

# ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE EL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO EN MÉXICO Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO

INFORME FINAL DEL CONTRATO NO.  
INECC/RPA1-003/2017



2017

## CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL



Preparado por:  
Sección de Contaminación Ambiental del  
Centro de Ciencias de la Atmósfera de la  
Universidad Nacional Autónoma de México  
(UNAM)

Preparado para:  
Coordinación General de Contaminación y  
Salud Ambiental (CGCSA) del Instituto  
Nacional de Ecología y Cambio Climático  
(INECC)

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/  
Cuicuilco, Del. Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04530.  
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404.  
[www.inecc.gob.mx](http://www.inecc.gob.mx)

Diciembre de 2017

## **Directorio**

**Dra. María Amparo Martínez Arroyo**

Directora General del INECC

**Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa**

Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

**Dr. Arturo Gavilán García**

Dirección de Investigación para el Manejo Sustentable de  
Sustancias Químicas, Productos y Residuos

### **Informe elaborado por:**

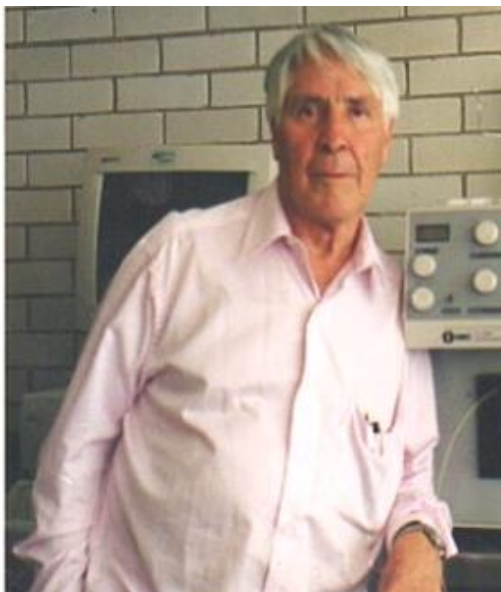
Sección de Contaminación Ambiental  
Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

### **Participantes:**

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría. Responsable  
Biól. Pablo Sánchez Álvarez  
M. en I. Ana Luisa Alarcón Jiménez  
Quím. María del Carmen Torres Barrera  
Dr. Elías Granados Hernández  
Dr. Gilberto Fuentes García  
M. en C. Ana Isabel González Rivera



A la memoria del Dr. Humberto Bravo Alvarez (1930-2017) y del Maestro en Ingeniería Armando Báez Pedrajo (1923-2015), pioneros del estudio del depósito atmosférico en México.



## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	VI
ABREVIATURAS	IX
RESUMEN EJECUTIVO	1
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>6</b>
2.1 GENERALIDADES SOBRE EL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO A NIVEL INTERNACIONAL	6
2.2 EL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AIRE Y EL CAMBIO CLIMÁTICO	8
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>13</b>
3.1 BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA Y SU EVALUACIÓN	13
3.1.1 <i>Tipo de investigación</i>	13
3.2 REPRESENTACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS SITIOS DE MUESTREO PARA EL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO EN MÉXICO	13
<b>4. ESTUDIOS REALIZADOS EN MÉXICO SOBRE DEPÓSITO ATMOSFÉRICO</b>	<b>15</b>
4.1 ESTUDIOS ELABORADOS POR LA SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA DE LA UNAM	15
4.1.1 <i>Artículos en revistas científicas de distribución internacional con arbitraje</i>	16
4.1.2 <i>Artículos en revistas nacionales con arbitraje</i>	23
4.1.3 <i>Artículos extensos en Memorias de Congreso (con arbitraje)</i>	25
4.1.4 <i>Artículos en Memorias de Congreso o Simposios (sin arbitraje)</i>	44
4.1.5 <i>Informes y reportes técnicos</i>	51
4.1.6 <i>Trabajos de investigación publicados (abstracts/resúmenes) en memorias de congresos o simposios</i>	53
4.1.7 <i>Contribución a la divulgación científica</i>	60
4.1.8 <i>Capítulos en libros</i>	72
4.2 ESTUDIOS ELABORADOS POR LA SECCIÓN DE QUÍMICA ATMOSFÉRICA DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA DE LA UNAM	77
4.2.1 <i>Artículos en revistas científicas de distribución internacional con arbitraje</i>	78
4.3 ESTUDIOS ELABORADOS POR LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARMEN, CAMPECHE	100
4.3.1 <i>Artículos en revistas científicas de distribución internacional con arbitraje</i>	100
4.3.2 <i>Artículos publicados en revistas nacionales</i>	131
4.3.3 <i>Libros</i>	138
4.3.4 <i>Capítulos en libros</i>	139
4.4 ESTUDIOS REALIZADOS POR OTRAS INSTITUCIONES	154
4.4.1 <i>Estudios realizados por la Secretaría de Medio Ambiente</i>	154



4.4.2	<i>Estudios realizados por otros autores y/o instituciones</i> .....	198
4.4.3	<i>Tesis realizadas en la Universidad Nacional Autónoma de México</i> .....	226
4.5	VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS ESTUDIOS SOBRE EL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO EN MÉXICO .....	254
4.5.1	<i>Cronología de muestreos realizados por la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM</i> .....	255
4.5.2	<i>Cronología de muestreos realizados por la Sección de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM</i> .....	256
4.5.3	<i>Cronología de muestreos realizados por la Universidad Autónoma del Carmen</i> .....	259
4.6	UBICACIÓN ESPACIAL DEL MUESTREO PARA EL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO EN MÉXICO .....	261
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>264</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>270</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	270
6.2	RECOMENDACIONES.....	271
<b>7.</b>	<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>272</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>273</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>298</b>
9.1	INFORMACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO DEL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO EN MÉXICO .....	298
9.2	DIRECCIONES URL PARA CADA SITIO DE MUESTREO USANDO LA PLATAFORMA WIX.COM .....	298
9.3	MATRIZ BIBLIOGRÁFICA DE LOS ESTUDIOS SOBRE EL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO EN MÉXICO.....	298

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. La calidad del aire y las conexiones climáticas (Fiore et al. 2015).....	9
Figura 2. Muestreos de depósito atmosférico en el Golfo de México.....	16
Figura 3. Estación Puerto Morelos, ICMYL, UNAM, Quintana Roo, México. ....	17
Figura 4. Zona arqueológica de El Tajín. ....	19
Figura 5. Zona arqueológica de Palenque. ....	20
Figura 6. Pirámide de los nichos El Tajín, Veracruz. ....	24
Figura 7. Ciudad de Tijuana, México. ....	25
Figura 8. Zona arqueológica Maya. ....	26
Figura 9. Zona arqueológica de Chichen Itza, Yucatán.....	27
Figura 10. Zona arqueológica de Tulim, Quintana Roo. ....	28
Figura 11. Efecto de la lluvia ácida en monumentos históricos de El Tajín. ....	29
Figura 12. Fortaleza de San Juan de Ulúa, Veracruz, México. ....	30
Figura 13. Equipo para el muestreo de lluvia en el crucero oceanográfico de 2003. ....	31
Figura 14. Contaminación atmosférica en monumentos históricos, Riunas del Rey, Cancún ....	33
Figura 15. Estación para el depósito atmosférico, El Tajín.....	34
Figura 16. Estaciones de muestreo de acuerdo a la SEDEMA, 2009.....	36
Figura 17. Estación de muestreo, La Mancha, Veracruz, México. ....	38
Figura 18. Sitio de muestreo en la costa del Golfo de México, La Mancha, Veracruz, México. ....	39
Figura 19. Sitios de muestreo de NADP y La Mancha en México. ....	41
Figura 20. Ciudad de Manzanillo, Colima, México. ....	44
Figura 21. Contaminación ambiental en la Ciudad de México ..... 45	45
Figura 22. Contaminación fotoquímica en la Ciudad de México. ....	46
Figura 23. Patrimonios culturales del estado de Veracruz, México.....	47
Figura 24. Trayectorias de retroceso para identificar de donde provienen las masas de aire. ....	50
Figura 25. Restauración de la zona arqueológica El Tajín.....	53
Figura 26. Equipo de muestreo utilizado por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CdMx.....	55
Figura 27. Sitios de muestreo de depósito atmosférico en el Golfo de México por la SCA-CCA-UNAM.....	57
Figura 28. Sitio de muestreo para el depósito atmosférico de la SCA-CCA-UNAM.....	58
Figura 29. Episodio de contaminación ambiental por ozono en la CdMx.....	60
Figura 30. Estación del ICMYL en Puerto Morelos, México.....	61
Figura 31. Deterioro en la zona arqueológica El Tajín.....	63
Figura 32. Deterioro de la zona arqueológica El Tajín a causa de la lluvia ácida. ....	64
Figura 33. Comportamiento del ion sulfato y nitrato de 1998 a 2007. SEDEMA, 2007.....	68
Figura 34. Equipo de muestreo utilizado por la SEDEMA para el depósito atmosférico. ....	69
Figura 35. Muestreo del depósito atmosférico a bordo del buque crucero oceanográfico de la Armada de México. ....	73
Figura 36. Concentración de iones ( $\mu\text{eq/L}$ ) determinados por Báez et al., 1987, en tres sitios de México. ....	80
Figura 37. Sitio de muestreo de depósito atmosférico, Tlamacas. ....	82
Figura 38. Parámetros estadísticos ( $\mu\text{eq/L}$ ) de las especies químicas determinadas por Báez et al., 2007. ....	85
Figura 39. Muestreo de depósito atmosférico en Veracruz de acuerdo a Báez, 1997.....	86
Figura 40. Muestreo de depósito atmosférico proveniente de eventos de huracanes en México.....	88
Figura 41. Comparación de iones presentes en lluvia ( $\mu\text{eq/L}$ ) entre Ciudad de México y Rancho Viejo de 1994-1999.....	91
Figura 42. Sitio de muestreo para el depósito atmosférico en Rancho Viejo. ....	92
Figura 43. Trayectorias de retroceso observadas en el periodo de lluvias 2001-2002. ....	95
Figura 44. Tendencias de pH desde 1992 a 2007, de acuerdo a Báez, et. al., 2009. ....	97
Figura 45. Promedio de concentración de iones inorgánicos ( $\text{mg/L}$ ) en agua de lluvia (fracción soluble) en Rancho Viejo y Ciudad de México García et. al., 2009.....	99

<i>Figura 46. Sitio de muestreo en Puerto Morelos, costa de Quintana Roo</i> .....	101
<i>Figura 47. Concentraciones ponderadas reportadas por Cerón et al., (2002)</i> .....	102
<i>Figura 48. Niveles de disminución típico de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en muestras de agua de lluvia colectadas en los techos residenciales Cerón et al., (2004)</i> .....	104
<i>Figura 49. Localización de sitios de muestreo Cerón et. al., 2005</i> .....	105
<i>Figura 50. Laguna de Términos, Campeche, México</i> .....	107
<i>Figura 51. Trayectorias usadas para identificar las principales fuentes de contaminación de acuerdo a Cerón et al., (2006)</i> .....	108
<i>Figura 52. Muestreo del depósito atmosférico en el sitio de San Antonio Cárdenas, Campeche, México</i> .....	109
<i>Figura 53. Valores de concentración ponderada, mínimo, máximo y Factores de enriquecimiento</i> .....	110
<i>Figura 54. Trayectoria de retroceso para San Antonio Cárdenas</i> .....	110
<i>Figura 55. Determinación de metales pesados en el depósito atmosférico, Cerón et al., 2010</i> .....	112
<i>Figura 56. Daño visible de la hoja y los efectos sobre el contenido de azufre, nutrientes y fotosíntesis de los pigmentos</i> .....	114
<i>Figura 57. Principales resultados reportados en Cerón et al., 2012b</i> .....	116
<i>Figura 58. Localización del sitio de muestreo: Salamanca-Guanajuato</i> .....	117
<i>Figura 59. Valores de pH y concentración iónica reportados para el sitio Salamanca, Guanajuato</i> .....	118
<i>Figura 60. Parques Nacionales ubicados en las cercanías de termoeléctricas en México</i> .....	119
<i>Figura 61. Valores de pH y composición iónica de la lluvia colectada en Ciudad del Carmen</i> .....	122
<i>Figura 62. Sitios de muestreo seleccionados por Cerón et al., 2014 para determinar el Flux de depósito atmosférico</i> ....	123
<i>Figura 63. Análisis de vientos reportados en el estudio de depósito seco y metales traza en Isla del Carmen</i> .....	126
<i>Figura 64. Ubicación de las estaciones de muestreo en el sitio 1) Xicalango- Atasta</i> .....	127
<i>Figura 65. Flujos de depósito a) nitrato, b) amonio c) azufre para la región de Atasa (en verde) y Córdoba (naranja)</i> ....	128
<i>Figura 66. Sitios de muestreo para el depósito atmosférico proveniente de una zona industrial en Campeche, México</i> .....	129
<i>Figura 67. Sitios de muestreo en Puerto Morelos, Quintana Roo, México</i> .....	132
<i>Figura 68. Análisis de vientos y su relación con la concentración de metales traza determinados en muestras de depósito atmosférico</i> .....	134
<i>Figura 69. Especies nativas de la zona de Campeche</i> .....	135
<i>Figura 70. Efectos de la exposición de contaminantes a siete especies endémicas de Campeche</i> .....	136
<i>Figura 71. Efectos sobre especies de vegetación representativas de la región sensibles a contaminantes atmosféricos, específicamente O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y acidez de la lluvia</i> .....	137
<i>Figura 72. Ilustración de las trayectorias de 24 horas de masa de aire utilizada para identificar las principales fuentes de contaminación para dos sitios de muestreo: a) Isla del Carmen y b) San Antonio Cárdenas</i> .....	140
<i>Figura 73. Cámara de exposición a lluvia ácida simulada</i> .....	142
<i>Figura 74. Sitio de muestreo de depósito atmosférico en Petenes y Tula de Allende</i> .....	143
<i>Figura 75. Flujos para deposición para NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> para Isla del Carmen en la temporada de muestreo</i> .....	152
<i>Figura 76. Sitios de muestreo de la SEDEMA, informe anual 1994</i> .....	154
<i>Figura 77. Nivel de pH en agua de lluvia, SEDEMA 1995</i> .....	157
<i>Figura 78. Distribución de pH en la ZMCM, SEDEMA 1996</i> .....	159
<i>Figura 79. Colector automático para el agua de lluvia usado por SEDEMA 1997</i> .....	160
<i>Figura 80. Porcentaje histórico de la lluvia ácida en la ZMCM, SEDEMA 1998</i> .....	163
<i>Figura 81. Concentración de a) NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y b) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en el depósito atmosférico de acuerdo a la SEDEMA 1999</i> .....	165
<i>Figura 82. Proceso de formación de lluvia ácida</i> .....	167
<i>Figura 83. Precipitación pluvial captada en periodo de lluvioso de la ZMCM</i> .....	169
<i>Figura 84. Concentración de iones (mg/L), pH y conductividad (µS/cm) para los sitios de muestreo de lluvia ácida en la ZMVM para el año 2002</i> .....	171
<i>Figura 85. Flujo de masa total (kg/ha) y su porción (%) en la ZMVM</i> .....	173
<i>Figura 86. Comportamiento del depósito húmedo en la ZMVM, según SEDEMA, 2004</i> .....	175

<i>Figura 87. Distribución espacial de depósito atmosférico (kg/ha) a) sulfatos y b) nitratos, en el año 2005</i> .....	177
<i>Figura 88. Distribución espacial de pH en 2006.</i> .....	179
<i>Figura 89. Distribución espacial de pH para 2006 y 2007 en la ZMVM.</i> .....	181
<i>Figura 90. Mecanismo de formación de la lluvia ácida.</i> .....	183
<i>Figura 91. Fotografía tomada el 12/04/2009 en la ZMCM. Fenómeno de lluvia ácida, SEDEMA 2009</i> .....	184
<i>Figura 92. Distribución espacial de la acidez en el agua de lluvia de 2005 a 2010, según SEDEMA 2010.</i> .....	187
<i>Figura 93. Equipos para el muestreo de depósito atmosférico, SEDEMA 2011.</i> .....	188
<i>Figura 94. Número de eventos de lluvia ácida por sitio de muestreo en 2013.</i> .....	191
<i>Figura 95. Distribución espacial del depósito total acumulado por iones presentes en la lluvia en 2014</i> .....	193
<i>Figura 96. Valores de pH de las muestras colectadas en 2015.</i> .....	195
<i>Figura 97. Concentración promedio de especies químicas en el depósito atmosférico húmedo, según SEDEMA, 2016.</i> ..	197
<i>Figura 98. Pluviómetro colector de lluvia.</i> .....	202
<i>Figura 99. Frecuencias de lluvia ácida en la ZMG.</i> .....	203
<i>Figura 100. Depósito total de contaminantes (ppm) de agosto a octubre de 2003, en el Desierto de los Leones (alto depósito) y Zoquiapan (bajo depósito)</i> .....	206
<i>Figura 101. Distribución de la Red Pluviométrica y red automática de Monitoreo Ambiental.</i> .....	211
<i>Figura 102. a) Distribución del pH en el temporal 1999 y b) Distribución del pH en el periodo 1994-2004</i> .....	212
<i>Figura 103. La posición vertical promedio del aire que viaja a El Tajín durante 1998- 2002. La escala vertical de la atmósfera corresponde a altitudes de 0-2000m (nivel medio del mar).</i> .....	215
<i>Figura 104. Trayectorias de cinco días correspondientes a dos eventos de precipitación en El Tajín: (a) 12 de Noviembre del 2002; (b) 3 de Noviembre del 2002</i> .....	215
<i>Figura 105. Distribución de frecuencia en porcentaje de pH mensual de depósito húmedo.</i> .....	221
<i>Figura 106. Sitios de muestreo para el depósito atmosférico por mercurio de acuerdo a Hansen y Gay.</i> .....	224
<i>Figura 107. Variabilidad temporal de los estudios sobre el depósito atmosférico en México.</i> .....	254
<i>Figura 108. Ubicación espacial de los sitios de muestreo para el depósito atmosférico en México.</i> .....	263

## ABREVIATURAS

AC	Aseguramiento de calidad
Al	Aluminio
APHA	American Public Health Association (Asociación Americana de Salud Pública)
As	Astato
BC	Carbono negro
Br	Bromo
Ca <sup>2+</sup>	Calcio
Cd	Cadmio
CC	Control de calidad
CH <sub>4</sub>	Metano
CIA	Cámara de Intemperismo acelerado
CICOLMA	Centro de Investigaciones Costeras La Mancha
CI	Cromatografía iónica
Cl <sup>-</sup>	Cloruro
Cl <sup>-</sup> /Ca <sup>2+</sup>	Relación cloruro calcio
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Bióxido de carbono
CONACyT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
COVNM	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metano
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CU	Ciudad Universitaria
DMS	Dimetil Sulfuro
E-UV	Espectrofotometría visible
EAA	Espectrofotometría de Absorción Atómica
EAM	Espectrometría de Absorción Molecular
EF	Factor de enriquecimiento
Efc	Factores de alto enriquecimiento
EUV-VIS	Espectroscopía UV-Visible
Fe	Hierro
Ga	Galio
GEI	Gases de Efecto Invernadero
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Ácido carbónico
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
HCIO <sub>4</sub>	Clorato
HDPE	High Density Polyethylene (Polietileno de alta densidad)
Hg	Mercurio
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
HPLC	High Performance Liquid Chromatography (Cromatografía de líquidos de alta eficiencia)
HYSPLIT	HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única)
ICMyL	Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
IER	Ionic Exchange Resin (resina de intercambio iónico)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
K <sup>+</sup>	Potasio
KCl	Cloruro de potasio
La	Lantano

m/s	Metros/Segundo
MeV	Mega electro volts
mg/cm <sup>2</sup> -año	Flux
Mg <sup>2+</sup>	Magnesio
Mn <sup>2+</sup>	Maganeso
ml	Mililitros
mm	Milímetros
MM5	Meso-escale model 5 (modelo de meso-escala versión 5)
Mn	Manganeso
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Nitrógeno derivado de amonio
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrógeno derivado de nitrato
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
Na <sup>+</sup>	Sodio
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
NADP	National Atmospheric Deposition Program
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
NH <sub>3</sub> NO <sub>3</sub>	Nitrato de amoníaco
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Amonio
Ni	Níquel
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOx	Óxidos de nitrógeno
NOx	Óxidos de nitrógeno
NSF	National Science Foundation
O <sub>3</sub>	Ozono
OC	Carbono orgánico
P	Paladio
PAPIIT	Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica
Pb	Plomo
pH	Potencial de Hidrógeno
PIXE	Particle-induced X-ray emissions (Emisión de Rayos X Inducida por Partículas)
PM <sub>2.5</sub>	Partículas Menores a 2.5 µm de diámetro
ppm	Concentración en partes por millón
RAMA	Red Automática de Monitoreo Ambiental
Rb	Rubidio
REDDA/SEDEMA	Red de Depósito Atmosférico/Secretaría del Medio Ambiente
RV	Rancho Viejo
S	Azufre
S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Azufre derivado de sulfato
SCA-CCA-UNAM	Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México
SEMAR	Secretaría de Marina
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
SJU	San Juan de Úlva
SO <sub>2</sub>	Bióxido de azufre
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfato
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Mg <sup>2+</sup>	Relación sulfato magnesio
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Relación sulfato nitrato
SOA	Secondary Organic Aerosol (Aerosoles Orgánicos Secundarios)
SOx	Óxidos de azufre

Sr	Estroncio
Tl	Talio
Ton/Km <sup>2</sup> -mes	Flux
UAC	Universidad Autónoma de Campeche
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UJAT	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
UNACAR	Universidad Autónoma del Carmen
US-EPA	US-Environmental Protection Agency
V	Vanadio
VWM	Volume Weighted Mean (promedio ponderado por volumen)
Wet/dry	Depósito húmedo y depósito seco
WMO	World Meteorological Organization
Y	Indio
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México
ZMG	Zona Metropolitana de Guadalajara
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
Zn	Zinc
Zr	Circonio
µeq/L	Microequivalentes por litro
µg/Kg	Microgramos por kilogramos
µm	Micrometros



## RESUMEN EJECUTIVO

La interacción entre la calidad del aire y el depósito atmosférico, así como su relación con el cambio climático, han cobrado gran importancia a nivel mundial. Para una evaluación completa e integral entre estos temas ambientales se requiere de la evaluación del depósito atmosférico, razón por la cual el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) ha encargado a la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SCA-CCA-UNAM), como primera etapa, la realización del estudio “Análisis del estado del arte y su relación con el cambio climático”.

El término “lluvia ácida” se refiere al depósito atmosférico de los componentes ácidos que impactan a la tierra como lluvia, nieve, partículas, gases y vapor. La lluvia ácida fue reconocida por primera vez por Ducros en 1845 y posteriormente por Smith en 1852, cuyos estudios pioneros relacionaron las fuentes de sus precursores con emisiones industriales.

Actualmente, la lluvia ácida es un problema ambiental, causado en gran medida por las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , lo cual fue observado en la década de los 60's y principios de los 70's en Suecia y en América del Norte. Estos compuestos también pueden influir en la visibilidad, ya que pueden transformarse en partículas de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , mientras que algunos  $\text{NO}_x$  también pueden reaccionar con otros contaminantes para formar  $\text{O}_3$ .

La reacción del agua con el  $\text{CO}_2$  en la atmósfera lleva a la formación de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  que es un ácido débil y el cual hace descender el pH de la lluvia hasta 5.6, siendo éste, su pH de forma natural. La acidez se incrementa por la presencia de ácidos fuertes como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  originados a partir de sus precursores  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , respectivamente.

Se ha señalado la importancia del depósito atmosférico de especies como  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , así como su relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  como indicador de la eficiencia en las estrategias de reducción de sus precursores. Estudios recientes en la región del Golfo de México, comparando las estaciones de muestreo localizadas en Estados Unidos y en México, destacan los altos niveles de este indicador y por lo tanto de  $\text{SO}_4^{2-}$  en nuestro país.

En el presente documento se integró el estado del arte de los trabajos realizados en México en el tema de depósito atmosférico.

De la revisión del depósito atmosférico, se encontró que la mayoría de los estudios han sido puntuales con alcances limitados. Los primeros estudios se realizaron en los años 60's y dos grupos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM

fueron los pioneros en el tema. Adicionalmente, en 2002, un grupo de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Carmen, inició sus proyectos de investigación en depósito atmosférico.

Cabe mencionar, como ejemplo de colaboración por parte del sector gobierno y el sector académico, el caso de la Ciudad de México, donde la SEDEMA y la SCA-CCA-UNAM participan conjuntamente en la evaluación del depósito atmosférico en la ZMCM.

Se encontró que la acidez del agua de lluvia se va incrementando de Norte a Sur en la Ciudad de México, tomando en cuenta la variabilidad espacial del pH. Por lo anterior, para resolver esta problemática se deben considerar otros aspectos como la dispersión, transporte, depósito y concentración de los precursores de lluvia ácida, así como los mecanismos de reacción.

Los resultados de las investigaciones realizadas sobre depósito atmosférico húmedo han permitido identificar la presencia del fenómeno de lluvia ácida en los distintos sitios estudiados, con excepción de Monterrey, Nuevo León y Calakmul, Campeche, en los cuales se registraron promedios ponderados de pH superiores a 5.6. Existe un problema potencial de deterioro en sitios de interés natural y cultural, debido al pH ácido en la zona Sureste del país.

Entre los principales componentes del depósito atmosférico húmedo ácido o lluvia ácida, destaca la identificación de los aniones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ) y cationes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ), además de pH y conductividad. Un indicador de la reducción de emisiones de precursores de lluvia ácida es la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ , razón por la cual fue aplicada durante la realización de este informe a las diferentes investigaciones consultadas.

Comparando la información sobre composición química del agua de lluvia en la región del Golfo de México, considerando las estaciones localizadas en los Estados Unidos, desde Texas a Florida, con las estaciones en el Estado de Veracruz, México, destacan los altos valores de la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  encontrados en Veracruz (se registró un valor de 4.9 para 2015), lo cual demuestra la alta contribución de compuestos de azufre en el depósito atmosférico y la necesidad de controlar las emisiones de las fuentes principales de  $\text{SO}_2$  en México.

De la revisión de los estudios sobre el depósito atmosférico de la ZMCM, cabe mencionar que en la actualidad se presenta una relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  de 1.5 prácticamente en todas las estaciones, sin embargo es interesante mencionar que a principios de los años 80's esta relación era de 4 coincidiendo con el valor que actualmente se registra en la región del Golfo de México.

En la actualidad, la SCA-CCA-UNAM es responsable de realizar actividades de investigación sobre depósito atmosférico. Uno de sus logros es la colaboración a nivel internacional con el “National Atmospheric Deposition Program” (NADP) de los Estados Unidos y con el “Global Atmospheric Watch Precipitation Program” de la “World Meteorological Organization” (WMO), con quienes de manera mensual y semestral se realizan pruebas interlaboratorio, respectivamente.

Este informe representa un aporte científico a nivel nacional respecto a la evaluación del depósito atmosférico en México, identificando que es necesario crear vínculos con diferentes instituciones para promover de manera conjunta y permanente una Red de Depósito Atmosférico en México.

## 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población y su concentración en las zonas urbanas trae como consecuencia la demanda de más y mejores servicios, así como el empleo de mejores tecnologías y la expansión de infraestructuras para lograr una mejor calidad de vida. Desafortunadamente, el desarrollo también puede traer como consecuencia aspectos negativos como la contaminación atmosférica.

El incremento de fuentes de CO<sub>2</sub> gas dominante de efecto invernadero de origen antropogénico, así como la emisión de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas y la formación de O<sub>3</sub>, afectan la salud y el bienestar de la población, razón por la cual se han buscado indicadores de la calidad del aire e instrumentos de gestión que permitan implementar estrategias de prevención, minimización y control de la contaminación atmosférica.

Un indicador útil de niveles de contaminación atmosférica es la lluvia o el depósito atmosférico húmedo (Parker, 1983; Smith, 1990; Erisman et al., 1994). Este mecanismo natural de limpieza de la atmósfera, tiene propiedades de acarreo únicas, remueve parcialmente gases atmosféricos, aerosoles, partículas y aquellos compuestos que han sido introducidos a la atmósfera por fuentes naturales y antropogénicas.

Bajo este contexto, la especiación química del depósito atmosférico aporta datos valiosos acerca de las entradas de nutrientes y compuestos tóxicos a los sistemas terrestres y acuáticos, tanto a nivel local como regional (Parungo, 1990); permite evaluar posibles impactos de contaminantes depositados sobre ecosistemas, materiales y construcciones de valor histórico y cultural, así como, evaluar la eficiencia de programas de control y mejora de la calidad del aire (Genescá et al., 1999; Bravo et al., 2006b; Suárez et al., 2006; Cerón et al., 2008).

Estos efectos pueden dañar los bosques causando la limitación de nutrientes disponibles en el suelo y favorecer la disponibilidad de sustancias tóxicas como pueden ser metales pesados en el suelo (NADP, 2014).

En Europa y América del Norte, se han desarrollado numerosos estudios sobre los impactos ecológicos que genera el depósito atmosférico de azufre y nitrógeno, especialmente para las áreas naturales protegidas; enfocándose en la determinación de los niveles máximos de exposición a contaminantes sin deterioro significativo (cargas críticas de los ecosistemas), estos estudios han ayudado a desarrollar leyes y reglamentos para preservar los recursos naturales en estas regiones (US-NPS, 2001).

En México, gran parte de los estudios sobre el depósito atmosférico han sido desarrollados de manera puntual, por lo que, un estudio a nivel nacional es una excelente oportunidad para unir esfuerzos de diferentes instituciones y fortalecer el entendimiento para dar solución a los problemas ambientales relacionados con el depósito atmosférico y su interrelación con diversos aspectos, tanto de calidad del aire como impactos ambientales.

El estudio de la contaminación atmosférica y su interrelación con el cambio climático representa un gran reto, tanto para la comunidad científica como para las autoridades. Por tal razón, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) solicitó a la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SCA-CCA-UNAM), la realización del: “*Análisis del estado del arte sobre depósito atmosférico en México y su relación con el cambio climático*”:

### **1.1 Objetivo general**

Determinar el estado del arte sobre el depósito atmosférico (húmedo y seco) en México y su relación con el cambio climático.

### **1.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar la información sobre el muestreo y análisis del depósito atmosférico en diferentes regiones de México.
2. Describir las investigaciones que actualmente se están llevando a cabo en México sobre el depósito atmosférico.
3. Evaluar la información sobre el depósito atmosférico considerando los periodos de duración de los estudios, los protocolos de muestreo y análisis; así como los programas de aseguramiento y control de calidad establecidos.
4. Representar espacial y temporalmente las investigaciones sobre depósito atmosférico en México.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Generalidades sobre el depósito atmosférico a nivel internacional

El término “lluvia ácida” se refiere al depósito atmosférico de componentes ácidos que impactan a la tierra como lluvia, nieve, partículas, gases y vapor. La lluvia ácida fue reconocida por primera vez por Ducros (1845) y posteriormente, por el químico inglés Robert Angus Smith (Smith, 1852) cuyos estudios pioneros relacionaron las fuentes de emisión con emisiones industriales incluyendo observaciones iniciales sobre el efecto nocivo para el ser humano (Smith, 1872). El trabajo de Smith fue en gran parte olvidado hasta mediados del Siglo XX, cuando las observaciones comenzaron a relacionar la contaminación del aire con el depósito de  $\text{SO}_4^{2-}$  atmosférico y otros constituyentes químicos, primero cerca de la fundidora de metal en Sudbury, Ontario, Canadá, y más tarde en algunas regiones de Europa, Norte América y Australia (Gorham, 1961). Actualmente, la lluvia ácida es un problema ambiental, causado en gran medida por las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , mismas que se observaron por primera vez en Suecia por Svante Oden (Oden, 1976) y en América del Norte por Gene Likens y colegas (Likens y Bormann, 1974) en la década de los 60’s y 70’s.

Las investigaciones antes mencionadas y otras realizadas posteriormente, mostraron el vínculo de las emisiones de centrales eléctricas a base de carbón y otras fuentes industriales, con los efectos ambientales de la lluvia ácida como la acidificación en cuerpos de agua superficiales, así como efectos tóxicos sobre la vegetación, peces y otros ecosistemas. Fue el trabajo de estos pioneros lo que llamó la atención de los gobiernos, los responsables de las políticas ambientales, los medios de comunicación y el público en general, de abordar este problema impulsando medidas más estrictas de reducción de emisiones en América del Norte y Europa, lo que llevó en primer lugar a la disminución de las emisiones de  $\text{SO}_2$  y más tarde las de  $\text{NO}_x$ . Posteriormente, el efecto de la lluvia ácida fue examinado y referido en Asia (Zhao y Sun, 1986; Tamaki y Koyama, 1991), lo que también trajo como consecuencia la reducción de estas emisiones. Sin embargo, en la India estas emisiones continúan aumentando (Krotkov et al., 2016). Investigaciones en otras regiones del mundo mostraron que los niveles elevados de depósito de azufre (S) y nitrógeno (N) ocurren localmente o regionalmente cerca de las instalaciones industriales o por la combustión de carbón mineral (Al-Momani et al., 1995; Flues et al., 2002), incluyendo sitios viento abajo de ambientes marinos (Galloway y otros, 1989). Las emisiones de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) fueron reconocidas como contribuyentes de la acidificación de los ecosistemas (Ap et al., 1987). El depósito atmosférico de N fue reconocido como

una importante fuente de nutrientes a los ecosistemas acuáticos y como contribuyente en la eutrofización de estuarios (Fisher y Oppenheimer, 1991).

Aunque el tema de lluvia ácida ya no es tan relevante en algunos medios de comunicación de América del Norte y Europa, los científicos continúan observando y estudiando los niveles del depósito atmosférico; así como, el estado de recuperación de los ecosistemas en muchas regiones. De hecho, muchos avances científicos se han realizado en los últimos años para entender la relación de los suelos en la mediación de la recuperación de ecosistemas, identificando una variedad de factores que afectan la respuesta de los ecosistemas con niveles bajos de depósito atmosférico y documentando la velocidad de recuperación de los ecosistemas por efectos de la lluvia ácida. Además, el conocimiento está aumentando con el análisis de contaminantes atmosféricos del aire como el Hg y O<sub>3</sub>, y de los principales precursores de la lluvia ácida, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

Otros efectos en la atmósfera debido a SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, es la disminución en la visibilidad, ya que estos contaminantes pueden transformarse en partículas de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mientras que algunos NO<sub>x</sub> también pueden reaccionar con otros contaminantes para formar O<sub>3</sub> (US-EPA, 2017).

Finalmente, para mantener la capacidad del entorno global y proteger la existencia continua de la humanidad de manera saludable, existe una necesidad urgente, de tomar medidas para combatir el calentamiento global y hacer un frente común para reducir o eliminar la presencia de lluvia ácida (Kagawa, 2002).

Otros estudios han indicado la importancia del depósito atmosférico de especies como SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, así como su relación (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Como indicador de la eficiencia de las estrategias de reducción de sus precursores: SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (Lehman et al., 2015).



## 2.2 El depósito atmosférico y su relación con la calidad del aire y el cambio climático

El depósito atmosférico y su interrelación con diversos aspectos, tanto de calidad del aire como climatológicos, son una excelente oportunidad para unir esfuerzos para el entendimiento y la solución de problemas ambientales (Fiore et al., 2015a y 2015b).

Las interacciones entre la calidad del aire y el clima ocurren en múltiples escalas de espacio y tiempo, a través de varios mecanismos (Figura 1). El O<sub>3</sub> troposférico se forma a partir de reacciones fotoquímicas que involucran NO<sub>x</sub>, COVNM, CH<sub>4</sub> o CO.

Partículas finas con un diámetro menor a 2.5 µm (PM<sub>2.5</sub>) pueden ser emitidas directamente de sus fuentes (partículas primarias), así como formarse en la atmósfera a través de reacciones químicas en fase gas y fase acuosa (partículas secundarias). Las emisiones directas son las principales fuentes de sal marina, polvo mineral, BC y OC de la combustión. Los componentes secundarios incluyen SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (a través de la oxidación de precursores como el SO<sub>2</sub> y DMS), el nitrato de amonio (a través de reacciones con NO<sub>x</sub> y NH<sub>3</sub>), y aerosoles orgánicos secundarios (SOA); a través de la oxidación de algunos COVNM.

La abundancia de los aerosoles secundarios también depende de la influencia antropogénica que afecta la formación de aerosoles a partir de sus precursores emitidos (Unger et al., 2006; Carlton et al., 2010; Shindell et al., 2009; Leibensperger et al., 2011).

Las especies antropogénicas y naturales emitidas incluyen CH<sub>4</sub>, CO, COVNM, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, BC y OC, DMS, de la biota oceánica, polvo mineral y sal marina (Isaksen et al., 2009; Jacob y Winner 2009 y Fiore et al., 2012).

En la Figura 1, el texto en naranja describe los procesos atmosféricos de: formación, eliminación y transporte de los contaminantes atmosféricos. El texto negro con flechas gruesas indica la sensibilidad de estos procesos al calentamiento climático; las flechas más finas denotan una menor confianza o variabilidad regional en el signo del cambio (el aumento es hacia arriba, mientras que la disminución es hacia abajo, la flecha de doble sentido implica que no hay claridad en el sentido de cambio) en respuesta a un calentamiento climático. Los símbolos negros dobles entre paréntesis indican cómo responden (O<sub>3</sub> y partículas) al cambio indicado en cada proceso (para las flechas de doble sentido, la respuesta (O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>) denota que hay un incremento en el proceso indicado un aumento en el proceso): (++) consistentemente positivo, (+) generalmente positivo, (=) débil o variable; (-) generalmente negativo, (--) consistentemente

negativo, (?) incertidumbre en el signo de la respuesta y (\*) la respuesta depende de los cambios de los niveles de los oxidantes. No se muestran las partículas de aerosoles biológicos primarios, por ejemplo, polen, hongos, bacterias, algas y virus, que pueden afectar el clima (Després et al., 2012).

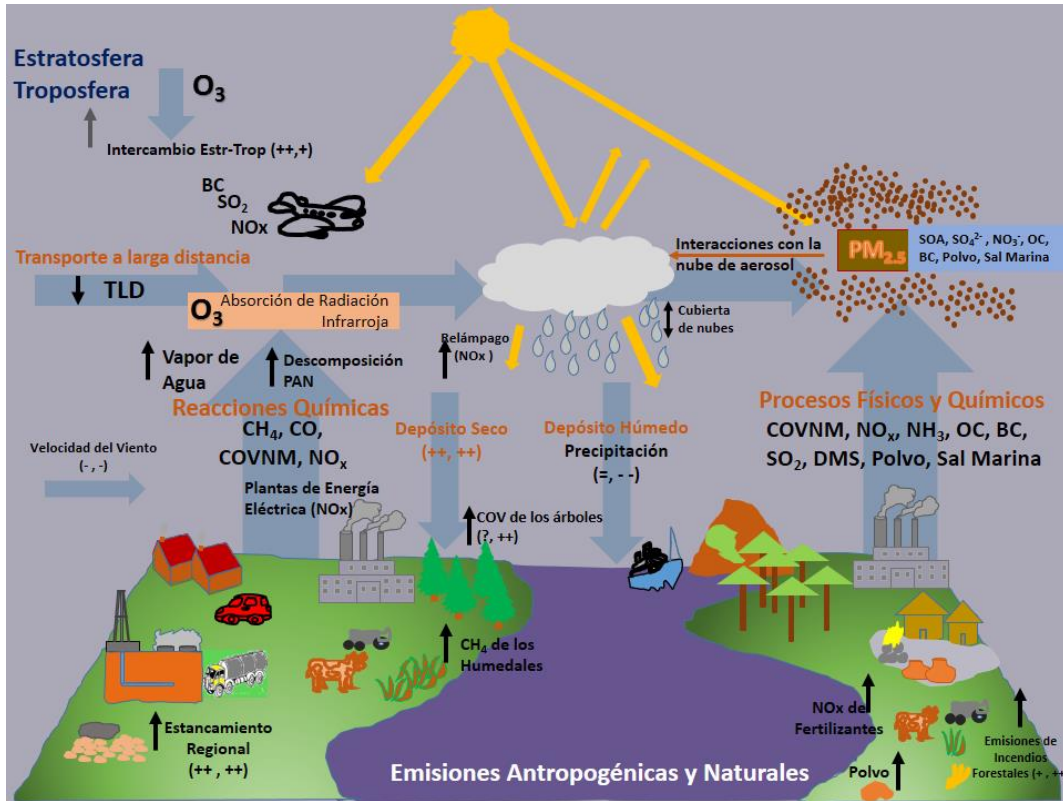


Figura 1. La calidad del aire y las conexiones climáticas (Fiore et al. 2015).

La producción, distribución y utilización de combustibles fósiles (por ejemplo, en centrales termoeléctricas, calefacción, refrigeración de tipo residencial, carreteras, vehículos, barcos y aeronaves) son las principales fuentes de precursores de partículas,  $O_3$  y  $CO_2$  a la atmósfera.

El  $CH_4$  antropogénico se emite a partir de actividades agrícolas, crianza de ganado, vertederos y plantas de tratamiento de aguas residuales. La emisión durante la producción de gas natural, particularmente a través de las operaciones de fracturación hidráulica, es un tema que actualmente está recibiendo atención (Brandt et al., 2014).

Muchos contaminantes atmosféricos y los Gases de Efecto Invernadero (GEI) tienen fuentes naturales: los incendios forestales producen todas las especies que se muestran en la Figura 1, la biósfera terrestre emite  $COVNM$  y  $NO_x$ ; la biósfera oceánica es una fuente de  $SO_2$ , vía la oxidación de  $DMS$  y posiblemente carbón

orgánico (Quinn y Bates, 2011). El aerosol de sal marina se considera natural, mientras que la fuente de polvo mineral puede ser influenciada por las actividades humanas (Ginoux et al., 2012).

Los relámpagos son una fuente de NO<sub>x</sub>, y los volcanes liberan SO<sub>2</sub>. La fuente individual más grande de CH<sub>4</sub> son los humedales. Muchas de estas especies se eliminan de la atmósfera por reacciones químicas, fotólisis o depósito atmosférico. Las partículas son removidas, tanto por el depósito húmedo como por el depósito seco, con mayores tasas de depósito atmosférico húmedo para las especies solubles y para las mezclas que dominan la fracción fina.

Las variables climáticas representan respuestas termodinámicas locales, así como cambios más amplios en la circulación atmosférica, los cuales pueden sufrir fluctuaciones climatológicas que en respuesta a los cambios en el balance de energía inducida por la perturbación de la abundancia de GEI y partículas. Estos cambios en el clima afectan las fuentes y los sumideros de contaminantes atmosféricos.

También se alteran los procesos químicos y de transporte modulando la formación y acumulación de contaminación desde la superficie cercana a la atmósfera donde son peligrosos para la salud humana, vegetación y las construcciones. Por ejemplo, numerosos estudios ponen en alerta el potencial de una sequía más frecuente al Suroeste de los Estados Unidos a medida que se incrementa el cambio climático; los impactos resultantes, sobre todo los incendios forestales y el polvo podría empeorar la contaminación por partículas (Seager et al., 2007; Cook et al., 2009; Spracklen et al., 2009; Flannigan et al., 2009). El potencial de calentamiento del clima para exacerbar la contaminación por O<sub>3</sub> en regiones pobladas (contaminadas) (Jacob y Winner, 2009; Weaver et al., 2009; Fiore et al., 2012; Kirtman et al., 2013) ha llevado a un uso generalizado del término *castigo climático* (Wu et al., 2008a) para transmitir el impacto adverso del cambio climático en la contaminación del aire. Estas fuertes conexiones entre la contaminación del aire y el clima subyacen en un enfoque más coordinado para abordar el clima objetivamente del cambio y calidad del aire (Ravishankara et al., 2012).

La gestión de la calidad del aire enfrenta múltiples desafíos. Basado en la claridad de la evidencia que apoya estándares más estrictos de la calidad del aire. En 2015 se estableció una reducción en el nivel de la National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) para O<sub>3</sub>, y para las PM<sub>2.5</sub>, la media anual de NAAQS se redujo en 2012. Niveles inferiores de NAAQS aumentan la importancia relativa de los niveles de fondo, que hacen que no corresponda directamente a las fuentes de emisión reguladas de los Estados Unidos, pero incluir componentes tales como el metano

global o contaminantes transportados del exterior, que podría abordarse mediante negociaciones internacionales (por ejemplo, Grupo de trabajo sobre el transporte hemisférico de contaminantes del aire [TFHTAP], 2010a, 2010b, 2010c). En los Estados Unidos el CH<sub>4</sub> no está actualmente regulado como un precursor de O<sub>3</sub> ya que por su tiempo de vida, alrededor de una década, no contribuye a nivel local o regional a episodios de contaminación por O<sub>3</sub> (Fiore et al., 2002). Los retos climáticos para la política sobre la contaminación del aire de los Estados Unidos implica la reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> para de manera simultánea alcanzar la calidad del aire y los objetivos climáticos (US-EPA, 2009). Este panorama de incluir las metas climáticas, implica además cuantificar el calentamiento climático inducido por la reducción de componentes, como el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en las partículas PM<sub>2.5</sub> que originan un enfriamiento (Raes y Seinfeld, 2009) para que estas acciones puedan ser tomadas en cuenta se hace necesario compensar esta situación favorable en el clima. Finalmente, los vehículos y las unidades de generación de electricidad inicialmente destinadas a reducciones de CO<sub>2</sub> ya han sido reguladas durante décadas bajo la Ley de Aire Limpio, para mejorar la salud, reducir la lluvia ácida y el deterioro de la visibilidad, aunque esos controles no disminuyeron el crecimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Bachmann, 2007; Watson, 2002).

Entre las acciones a seguir se contemplan:

- 1) Describir el comportamiento histórico y futuro de las emisiones atmosféricas frecuentemente usadas para abordar tanto los impactos de contaminantes del aire y sus precursores sobre el clima, y la influencia del cambio climático, así como la variabilidad en la contaminación del aire en los Estados Unidos;
- 2) Revisar las principales interacciones entre la calidad del aire y el clima, incluidos los impactos en eventos extremos de contaminación por O<sub>3</sub> y partículas, en el contexto de las emisiones cambiantes de contaminantes del aire;
- 3) Resaltar los desafíos emergentes para la gestión de la calidad del aire; y
- 4) Recomendar a las instituciones de investigación destinadas a apoyar un mayor enfoque holístico para la gestión de la contaminación del aire y avanzar en la comprensión de la calidad del aire y su interacción con el clima.

De acuerdo con el último Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI), entre 1990 y 2010 las emisiones nacionales de GEI crecieron al 1.45% anual. De los seis principales GEI, destacan CO<sub>2</sub>, cuya fuente principal es el sector energético que incluye el consumo de combustibles fósiles; y el N<sub>2</sub>O) producido por procesos biológicos, la combustión industrial y los gases de escape de vehículos de combustión interna. Ambos contaminantes, además de

contribuir a la perturbación del balance de energía planetaria y al ciclo hidrológico, favorecen a la formación del depósito atmosférico ácido (lluvia ácida).

La reacción del vapor de agua con el  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera ( $\approx 300$  ppm) conlleva a la formación de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  que es un ácido débil y el cual hace descender el pH de la lluvia hasta 5.6 unidades, siendo éste, su pH de forma natural. La acidez se incrementa por la presencia de ácidos fuertes como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  originados a partir de sus precursores  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , respectivamente. Dichos precursores son emitidos principalmente por la quema de combustibles fósiles.

La producción excesiva de alimentos y el uso masivo de fertilizantes nitrogenados, incrementa el  $\text{NH}_4^+$  y los  $\text{NO}_x$  en la atmósfera, donde una cantidad significativa es transformada a  $\text{N}_2\text{O}$ , aunque su emisión es baja con respecto al  $\text{CO}_2$ , contribuye con el 6% al efecto invernadero ya que tiene un potencial global de calentamiento 200-300 veces superior al  $\text{CO}_2$ , su conversión a  $\text{NO}$  además de alterar la capa de ozono al catalizar las reacciones de los compuestos clorados y bromados que destruyen el  $\text{O}_3$ , incrementa la formación de  $\text{HNO}_3$  causando la formación de lluvia ácida.

No se ha demostrado que la lluvia ácida ocasione efectos nocivos directos en la salud humana, los riesgos potenciales se relacionan con la exposición continua a sus precursores, ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ); sin embargo, la lluvia ácida puede provocar efectos indirectos, ya que su constante depósito puede disolver metales y sustancias tóxicas en suelos, rocas, conductos y tuberías, que son transportados hacia los sistemas de agua potable. En zonas afectadas por la lluvia ácida con alto contenido de metales pesados, existe la posibilidad de que dichos metales sean absorbidos por las plantas, líquenes y algas de ecosistemas terrestres o acuáticos y afecten a organismos superiores (peces, aves, mamíferos, etc.), incluyendo al hombre, después de consumir y acumular cantidades considerables.

### **3. METODOLOGÍA**

A continuación, se describen los procedimientos que se consideraron para la búsqueda bibliográfica, lo cual, permitió reunir y evaluar la información sobre el depósito atmosférico en México desde los años 60's a la fecha; así como las plataformas que se usaron para la creación de la representación espacial y temporal de los sitios de muestreo. Para cada estudio analizado se incluye la información en una matriz lo que permite visualizar y ubicar de una manera clara cada trabajo, por el autor correspondiente y/o la institución responsable de la realización de la investigación; creando un vínculo para tener acceso directo a la publicación en formato de documentos digitales (pdf).

#### **3.1 Búsqueda bibliográfica y su evaluación**

##### **3.1.1 Tipo de investigación**

La investigación se realizó a través de un diseño cualitativo e interpretativo, de tipo documental, el cual determinó el procedimiento de selección, acceso y registro de la muestra documental, apoyándose en medios digitales como BidiUNAM, TESIUNAM, Serie UNAM, Google Académico, Open Journals, Science Direct, etc., y utilizando palabras clave como: depósito atmosférico, lluvia ácida, precipitación pluvial, depósito ácido, contaminación atmosférica, redes de monitoreo, México, entre otros.

Se elaboró una matriz bibliográfica diseñada en Excel donde se catalogaron todos los textos y se aplicaron filtros de selección. Las categorías de análisis fueron: año de publicación, autor(es), título de la publicación, sitio de muestreo, tipo de muestreo, análisis, periodo de muestreo, valores de pH determinados en el estudio y resultados principales.

#### **3.2 Representación espacial y temporal de los sitios de muestreo para el depósito atmosférico en México**

Para la creación y ubicación espacial de los sitios de muestreo para el depósito atmosférico en México se usó un mapa de relieve en Google Earth, <https://www.google.com/intl/es/earth/>; así como las coordenadas geográficas de cada sitio de muestreo indicado en cada estudio realizado desde los años 80's a la fecha. Asimismo, se creó un blog utilizando la plataforma de trabajo conocida como <https://es.wix.com> con la finalidad de crear un vínculo entre el mapa de relieve de Google Earth y el sitio del blog para la descarga directa o consulta de los estudios realizados en cada sitio de muestreo en formato pdf, haciendo más



dinámica la información consultada en los diferentes medios de búsqueda respecto a los estudios realizados del depósito atmosférico en México.

La organización de los estudios sobre el depósito atmosférico para cada sitio fue con base al tema que se desarrolló en cada estudio, los cuales fueron incorporados al blog de cada sitio de muestreo.

Para cada sitio ubicado en el mapa de relieve se ingresó la información básica: clave del sitio, ubicación, coordenadas geográficas, año de muestreo, responsable del muestreo, entre otros; con la finalidad de que la información sea relevante y sirva de introducción para el usuario.

Para la representación temporal de los estudios antes mencionados se consideraron ocho grupos, los cuales han mantenido de forma constante los estudios de depósito atmosférico: Sección de Contaminación Ambiental, Química Atmosférica (ambos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM), Universidad Autónoma del Carmen en Campeche, Centro de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, REDDA-SEDEMA de la Ciudad de México, Gobierno del Estado de Guadalajara, Universidad Nacional Autónoma de Nuevo León y otros estudios relacionados con el tema en cuestión.



## **4. ESTUDIOS REALIZADOS EN MÉXICO SOBRE DEPÓSITO ATMOSFÉRICO**

### **4.1 Estudios elaborados por la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.**

Los estudios de depósito atmosférico en México realizados por la SCA-CCA-UNAM han sido desarrollados en colaboración con diferentes Instituciones que se enlistan a continuación:

1. Servicio Meteorológico Nacional
2. Gobierno de la Ciudad de México
3. Colegio de Posgraduados de Chapingo
4. National Oceanic and Atmospheric Administration
5. Secretaría de Marina
6. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
7. Instituto de Geografía, UNAM
8. Instituto de Ecología, UNAM
9. Instituto Nacional de Antropología e Historia
10. Universidad Veracruzana
11. Instituto de Ecología, A.C. Veracruz
12. Universidad Autónoma de Campeche
13. Universidad Autónoma de Nuevo León
14. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

A continuación, se describen los productos académicos generados en la SCA-CCA-UNAM, clasificados en:

Productos de investigación de proyectos específicos sobre el depósito atmosférico en México, por parte de la SCA-CCA-UNAM, en donde destacan los proyectos apoyados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), el Programa de Apoyos a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), y en colaboración con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. Asimismo, de colaboraciones y apoyos externos como el caso de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y la National Science Foundation (NSF).

#### 4.1.1 Artículos en revistas científicas de distribución internacional con arbitraje

A continuación, se presentan los estudios que se han realizado en México y que han sido publicados a nivel internacional respecto al depósito atmosférico, lo cual es un aporte científico y novedoso para nuestro país. Estos estudios indican cómo ha afectado el depósito húmedo en diversos sitios de México, a destacar el deterioro significativo en monumentos históricos.

**Parungo, F., C. Nagamoto, S. Hoyt, H. Bravo A. (1990). The Investigation of Air Quality and Acid Rain over the Gulf of Mexico. Atmospheric Environment. 24A (1): 109-123.**

##### ***Sitio y año de muestreo:***

Crucero oceanográfico en el Golfo de México (Figura 2) en Galveston, Texas, Tampico, Veeracruz, Coatzacoalcos, Campeche, Progreso, Mérida e Isla Perez, a bordo del buque de la Armada de México H-02 en el verano de 1986.

##### ***Método de muestreo:***

Colector automático de depósito atmosférico (periodo de 24 horas), así como embudos y botellas de HDPE, para muestreos secuenciales.



*Figura 2. Muestreos de depósito atmosférico en el Golfo de México.*

##### ***Análisis de muestras:***

Determinación de pH en el sitio de muestreo, etiquetado y conservación de muestras para su posterior análisis en el laboratorio por métodos de química húmeda.

### **Resultados**

Promedio de pH de 5.6 (4.6-6.1),  $\text{NO}_3^-$  de 1.8 ng/l y  $\text{SO}_4^{2-}$  de 2.4 ng/l. Tampico mostró mayor impacto por la contaminación urbana. En la zona de Campeche los factores de enriquecimiento mostraron la presencia de fuentes de  $\text{SO}_4^{2-}$  diferentes a la sal marina.

**Bravo, H.A., Saavedra, M.I. R., Torres, R.J., Sánchez, P.A., Granada, L.M.M. (2000b) Chemical Composition of Precipitation in a Mexican Maya Region. Atmospheric Environment. 34(8): 1197-1204.**

### **Sitio y año de muestreo:**

Puerto Morelos Quintana Roo, México (Figura 3). El muestreo se realizó de abril de 1994 a diciembre de 1995.



*Figura 3. Estación Puerto Morelos, ICMYL, UNAM, Quintana Roo, México.*

### **Método de muestreo:**

Se utilizó un equipo automático para la colección de muestras, con pluviómetro integrado Aerochem Metric Modelo 301. Se mide el volumen de lluvia y las muestras colectadas se colocan en botellas de material inerte NALGENE, se almacenan las muestras en refrigeración a 4°C.

### **Análisis de muestras:**

Se tomó el pH en campo y el volumen de precipitación del evento, posteriormente en el laboratorio se volvió a tomar el pH, aunado a la conductividad y se realizó el análisis químico de aniones y cationes por HPLC de acuerdo con los métodos establecidos por la US-EPA.

**Resultados:**

Los resultados de Puerto Morelos, Quintana Roo, durante el muestreo realizado de abril 1994 a diciembre de 1995 mostraron que en este sitio, el 53% de los eventos de precipitación tuvieron un  $\text{pH} < 5.6$  y el 11% de los eventos con un  $\text{pH}$  de 4.5 y 5.0. Se reportó que el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  fue el principal compuesto causante de la acidez. La concentración media de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue de  $9.7 \mu\text{eq/L}$ , siendo 1.5 veces más alto que el nivel reportado en el sitio de referencia de El Verde, Puerto Rico, aunque este valor fue más bajo comparado con otros sitios de la cuenca del Atlántico Norte.

Al considerar que la concentración  $\text{H}^+$  representa la acidez total de la lluvia, se calculó la contribución máxima teórica de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  a la acidez de la lluvia con la relación  $(\text{SO}_{4\text{exc}}^{2-} + \text{NO}_3^-) / \text{H}^+$ , obteniendo un valor de 4.7. Aunque hay una clara contribución teórica de éstos a la acidez de la lluvia en la región, las altas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ , debido a las masas de aire que se mueven hacia el Golfo de México, son suficientes para neutralizar dicha acidez.

Se determinó una concentración media de nitratos de  $11.4 \mu\text{eq/L}$ , la cual fue cuatro veces mayor que la concentración hemisférica de fondo ( $2.8 \mu\text{eq/L}$ ). La correlación entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NO}_3^-$  de 0.67, indicó la existencia de un enriquecimiento importante de aerosoles terrestres y antropogénicos por las masas de aire de las diferentes islas del Caribe. Adicionalmente, las altas concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  y su relación de 0.85 comprobaron el origen marino de la lluvia.

Se concluye que con las características de la lluvia en Puerto Morelos, no existe un potencial de deterioro en los monumentos Mayas.

**Bravo, A.H., Soto, A.R., Sosa, E.R., Sánchez, A.P., Alarcón, J.A.L., Kahl, J., Ruíz, B.J. (2006b). Effect of Acid Rain on Building Material of the El Tajín Archaeological Zone, in Veracruz, Mexico. Environmental Pollution. Vol. 144, 655-660. ISSN 0269-7491.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona Arqueológica de El Tajín, Veracruz (Figura 4). 2003-2006.



*Figura 4. Zona arqueológica de El Tajín.*

***Método de muestreo:***

Colector automático de depósito atmosférico Aerochem Metrics Modelo 301, embudos y botellas de HDPE cada 24 h. Colecta de muestras de material pétreo que se utilizó para exponerlo en la cámara de intemperismo acelerado.

***Análisis de muestras:***

Se determinó en campo el valor de pH, se hizo el análisis de las muestras y se obtuvo el balance químico para poder conocer su composición. Con base en ésta se preparó lluvia ácida artificial para simular el deterioro de las muestras de material pétreo en la cámara de intemperismo acelerado. Las muestras se analizaron por difracción de Rayos-X para determinar la composición elemental. Se hicieron pruebas de porosidad, absorción de agua y densidad antes y después del experimento.

***Resultados:***

Se obtuvo un valor de recesión superficial de 4.15  $\mu\text{m}/\text{año}$ , con lo cual registra el deterioro ocasionado por el depósito atmosférico.



**Heckel, P.F., Keener, T., Lu, M. and Bravo, A.H. (2007). A Summary of the International Workshop on the Influences of Air quality on the Mayan heritage Sites in Mesoamerica. Edited by Environmental Manager of the Air & Waste Management Association. February, pp 24-30. ISSN 1079-7343.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona Maya (Figura 5). El Taller se llevó a cabo en Cancún, Quintana Roo, del 16 al 21 de octubre de 2005.



*Figura 5. Zona arqueológica de Palenque.*

***Método de muestreo:***

Taller internacional, en donde se presentaron resultados de trabajos relacionados con el efecto del depósito atmosférico sobre Zonas Arqueológicas Mayas en Mesoamérica. Muestreo con un equipo Aerochem Metrics.

***Resultados:***

Se presentaron las experiencias de Guatemala, Honduras, Estados Unidos y México, sobre el impacto del depósito atmosférico en el deterioro de monumentos Mayas, se recomendó la necesidad de contar con inventarios de emisión de precursores del depósito atmosférico regionales, la creación de una Red Mesoamericana de Depósito Atmosférico para la conservación de Monumentos Mayas, se establecieron colaboraciones para estudios en Centroamérica y el Caribe. Entre las líneas de investigación propuestas desataca la evaluación de los efectos del transporte del depósito atmosférico a corta y larga distancia.

**Ramírez, L.E., Miranda, G.R., Gracia, V.Y., Bravo, A.H., Sosa, E.R., Sánchez, A.P., Alarcón, J.A.L., Torres, M.C., Kahl, J. (2010). Chemical composition of rainwater in Northeastern Mexico. *Atmósfera*. 23 (3), 213-224. ISSN 0187-6236.**

***Sitio y año de muestreo:***

Monterrey, Nuevo León, de enero a diciembre de 2007.

***Método de muestreo:***

Se utilizó un colector automático de depósito húmedo y seco marca Anchor International, modelo TE-78-2007. Se determinó el pH y la conductividad con un equipo Hanna H1 modelo 25 (pH/conductividad/temperatura).

***Análisis de muestras:***

Después de la colección y el pesaje, se utilizó una alícuota sin filtrar de cada muestra para determinar el pH y la conductividad. Se usó una segunda alícuota de cada muestra, recuperada de la botella de polietileno refrigerada, para la determinación de iones. Se utilizó CI para determinar los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{NH}_4^+$  y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Los procedimientos de aseguramiento de calidad incluyeron muestras blanco y de control, así como réplicas. Las condiciones de operación y análisis fueron reportadas por Bravo et al., (2006a).

***Resultados:***

Se colectaron un total de 32 muestras de agua de lluvia. El mayor número de eventos mensuales ocurrió en agosto (7) seguido de mayo (6), junio (5) y julio (5), sin eventos de lluvia en enero, noviembre y diciembre. La precipitación más intensa fue durante agosto (93.5 mm) seguido de junio (88.5 mm) y septiembre (62.8 mm). Los meses de enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre se consideran la estación seca.

Las conclusiones principales:

1. El agua de lluvia es típicamente alcalina, con fuertes correlaciones entre el  $\text{Ca}^{2+}$  y otras especies iónicas, por lo que se neutraliza la acidez.
2. El pH promedio del agua de lluvia fue de 6.58, debido a la neutralización. Solo el 25% de las muestras de lluvia tenían un pH inferior a 5.6. Esto muestra fuertes entradas de especies alcalinas a las muestras de agua de lluvia en esta región.

El pH promedio de las muestras superiores a 5.6 se debe a las altas concentraciones de calcio en forma de  $\text{CaCO}_3$  de las partículas de polvo alcalino provenientes de colinas y fábricas de canteras.



3. La química del agua de lluvia está dominada por  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Los principales cationes y aniones, en orden decreciente, son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ .
4. Los cationes  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se correlacionaron fuertemente con  $\text{Ca}^{2+}$ , lo que sugiere una fuente natural común de origen terrestre.
5. Las bajas concentraciones de  $\text{H}^+$  encontradas en las muestras de agua de lluvia de Monterrey sugieren que una porción importante de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  ha sido neutralizada por partículas alcalinas en la atmósfera.
6. Los aniones  $\text{SO}_4^{2-}$  o  $\text{NO}_3^-$  están débilmente correlacionados con  $\text{H}^+$  debido a la neutralización de los mismos.
7. La variación mensual en la deposición iónica está influenciada por la tasa de lluvia y la concentración de especies iónicas.
8. La correlación entre los iones mostró una influencia significativa de fuentes antropogénicas.

#### 4.1.2 Artículos en revistas nacionales con arbitraje

**Bravo A.H., Báez A.P., S. Lares (1960). Estudio del depósito de polvo por gravedad en la Ciudad de México. Revista Ingeniería Química. 26-28.**

***Sitio y año de muestreo:***

Ciudad de México. 28 estaciones localizadas en 9 zonas: I.- Zona industrial Oeste, II.- Zona industrial Este, III.- Zona industrial Norte, IV.- Zona residencial Oeste, V.- Zona residencial Sur, VI.- Zona urbana, VII.-Zona de negocios, VIII.- Zona rural NNW y IX.- Zona rural SSE. El muestreo fue realizado durante 12 meses de 1959.

***Método de muestreo:***

Se determinó la cantidad de polvo depositada por gravedad de manera mensual en 28 estaciones de muestreo. Se emplearon frascos de vidrio de 2.5 litros y una superficie de colección de 90 cm<sup>2</sup>. Los frascos de muestreo se colocaron en azoteas de edificios a una altura promedio de 12 metros. Después de 30 días de muestreo cada frasco fue sellado y enviado al laboratorio para su análisis.

***Análisis de muestras:***

Se realizó el análisis gravimétrico trasladando el contenido de cada frasco a un vaso de precipitados utilizando agua bidestilada, en el cual se evaporó la muestra hasta unos centímetros. Este material se pasó a una capsula para llevarla sequedad en una estufa operando a 85 °C.

***Resultados:***

Los resultados indican que existe una relación entre la cantidad de polvo depositado, los vientos dominantes, las diferentes estaciones del año y la zona de muestreo.

Las zonas más afectas fueron las industriales que se localizan al Norte y al Oeste de la Ciudad y que también están impactadas por las tolvánicas sobre todo en la época de secas (de noviembre a abril). También durante los meses de febrero y marzo en donde se tiene la presencia de vientos fuertes se favorecen las tolvánicas. Durante y al término de la estación de lluvias se observa una marcada reducción del polvo depositado por gravedad. Los valores de depósito tienden a subir al comenzar la estación de sequía a partir de noviembre. El valor más alto de depósito promedio mensual de polvo se obtuvo para la zona industrial Este con un valor de 38.9 Tons/Km<sup>2</sup>/mes, mientras que la zona residencial Sur presentó el menor valor de 13.5 Tons/Km<sup>2</sup>/mes.

**Bravo, A.H., Soto, A.R., Sosa, E.R., Sánchez, A.P., Alarcón, A., Ruíz, J. (2003b) Degradación del material pétreo de la zona arqueológica de El Tajín, Veracruz, México, por efecto de la lluvia ácida. Revista de la Sociedad Química de México, Vol. 47. No. 4. octubre-diciembre. 328-330.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona arqueológica de El Tajín, Veracruz (Figura 6). 2002-2003.



*Figura 6. Piramide de los nichos El Tajín, Veracruz.*

***Método de muestreo:***

Se utilizaron equipos automáticos para la colección de muestras, con pluviómetro integrado, se instaló una estación meteorológica automática y una computadora para el almacenamiento de datos, las muestras se colectan en botellas de HDPE y se mantuvieron en refrigeración previa a su análisis.

***Análisis de muestras:***

Se midió el pH y conductividad, y se prepararon las muestras para el análisis por HPLC. Se obtuvo el balance químico para la elaboración de lluvia ácida artificial, la cual se utilizó para exponer muestras de rocas en una cámara de intemperismo acelerado.

***Resultados:***

Resultados de la exposición de material pétreo de monumentos arqueológicos de El Tajín, Veracruz, en una cámara de intemperismo acelerado, que simuló la exposición para un periodo de cinco años. Se encontró que dadas las condiciones ambientales y de exposición al depósito atmosférico existe una recesión superficial de  $4.15 \mu\text{m/año}$ , lo que representa un daño evidente en el material constitutivo de las estructuras de El Tajín.

#### 4.1.3 Artículos extensos en Memorias de Congreso (con arbitraje)

**Bravo, A.H., Sosa, E.R., Torres, J.R. (1988). Preliminary study of the acid deposition in the Tijuana area (México). Paper 89-136.3 Published by APCA 81st. Annual Meeting of the Air Pollution Control Association. Dallas, Texas. June 19-24.**

##### **Sitio y año de muestreo:**

Tijuana, México (Figura 7).1986-1987.



*Figura 7. Ciudad de Tijuana, México.*

##### **Método de muestreo:**

Se utilizó un colector automático Aerochem Metrics Mod 301.

##### **Análisis de muestras:**

Se determinó el valor de pH con potenciómetro.

##### **Resultados:**

Los valores de pH obtenidos para la Ciudad de Tijuana durante el periodo de enero de 1986 a abril de 1987 indicaron la presencia de lluvia ácida, con valores menores a un pH de 5.6 hasta un pH de 5.2.

**Bravo, A.H., M.I. Saavedra, R., Sánchez, A.P., R. Sosa, E., R. Torres, J. (1991a). Impact of the Acidic Deposition in the Decay of Mexican Mayan Monuments (Preliminary Study). Paper 91-143.2, 84th Air & Waste Management Association. Vancouver, B.C. June 16-21.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona Maya (Figura 8). Tulum, Quintana Roo; Edzna, Campeche y Palenque Chiapas. 1990-1991.



*Figura 8. Zona arqueológica Maya.*

***Método de muestreo:***

Colector automático Aerochem Metrics Mod. 301, se colectaron las muestras en botellas Nalgene y se mantuvieron en refrigeración previo al análisis.

***Análisis de muestras:***

Se determinó el pH y la conductividad, así como el análisis de aniones y cationes.

***Resultados:***

En los sitios de Tulum y Palenque se tuvieron problemas con el muestreo por la falta de suministro eléctrico continuo, por lo que no se lograron conclusiones analíticas confiables. La Estación de Edzna, en Campeche tuvo registros que confirmó la presencia de lluvia ácida en esta zona.



**Bravo, A.H., Soto, A.R., Saavedra, R.M.I., Torres, J.R., Granada, M.L.M., Sánchez, A.P. (1998). Acid Rain in Mexico Case: Maya Monuments. Sixth International Conference. Air Pollution 98. Genova, Italy. September 28-30. WIT Press/Computational Mechanics Publications ISBN: 185312 605 5. 661-674 pp.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona Maya (Figura 9). Tulum, Quintana Roo y Palenque Chiapas. 1991-1994.



*Figura 9. Zona arqueológica de Chichen Itza, Yucatán*

***Método de muestreo:***

Colector automático Aerochem Metrics Mod. 301, se colectaron las muestras en botellas Nalgene para conservación previo al análisis.

***Análisis de muestras:***

Se determinó el pH y la conductividad, así como el análisis de aniones y cationes por Métodos recomendados por la WMO 1978.

***Resultados:***

Se reportó la presencia de lluvia ácida en las zonas de estudio, siendo crítica la de Tulum con valores de pH entre 4.4 y 5.6. En Palenque se encontraron valores inferiores a 5.6.

**Bravo, A.H., Soto, A.R., Torres, J.R., Sánchez, A.P. (2000c) Effects of Wet Acidic Deposition on Maya Monuments, Mexico. 93rd Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Salt Lake City, UTAH. June.**

**Sitio y año de muestreo:**

Zona Maya (Figura 10). Tulum, Quintana Roo. 1995.



*Figura 10. Zona arqueológica de Tulum, Quintana Roo.*

**Método de muestreo:**

Se utilizó un colector automático marca Aerochem Metrics Modelo 301. Se elaboró lluvia ácida artificial para exponer muestras de material pétreo de monumentos Mayas en una cámara de intemperismo acelerado. Se expusieron las muestras a un volumen de lluvia simulado de 1200 mm anual, a una temperatura de 25°C y una humedad relativa entre 75-85%.

**Análisis de muestras:**

Las muestras de lluvia se analizaron para determinación de aniones y cationes por HPLC, se realizaron pruebas de absorción de agua, densidad, porosidad y de difracción de Rayos X a las muestras de material pétreo y se simularon diez años de exposición en cinco meses de experimentación en la cámara de intemperismo acelerado.

**Resultados:**

El impacto del depósito atmosférico en material pétreo de la Zona Arqueológica de Tulum, Quintana Roo, registrado en una cámara de intemperismo acelerado demostró que a un pH de 4.6, y por un periodo simulado de diez años, se registró una recesión superficial promedio de 4.2  $\mu\text{m}/\text{año}$  con un intervalo de 3.59 y 4.71  $\mu\text{m}/\text{año}$ .



**Bravo, A.H., Soto, A.R., Sosa, E.R., Sánchez, A.P., Alarcón, J.A.L., Ruíz, B.J. (2004a). Effects of Wet Acidic Deposition on Stony Material at The Tajín Archaeological Site in Veracruz, Mexico. 97th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Indianapolis, Indiana. June.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona Arqueológica El Tajín, Veracruz (Figura 11). 2002.



*Figura 11. Efecto de la lluvia ácida en monumentos históricos de El Tajín.*

***Método de muestreo:***

Se utilizó un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se midió el valor de pH y volumen de lluvia, la muestra se conservó en refrigeración para su posterior análisis por HPLC. Para las muestras de material pétreo se determinó la densidad, porosidad, absorción de agua y difracción de Rayos X, antes y después de la exposición en la cámara de intemperismo acelerado de lluvia ácida.

***Análisis de muestras:***

Se determinó la concentración de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  por HPLC.

***Resultados:***

Se utilizó un pH 4.4 para la exposición del material pétreo en la cámara de intemperismo acelerado, el valor reportado de recesión superficial fue de 4.15  $\mu\text{m}/\text{año}$ , por lo que se recomendaron acciones para la conservación de la Zona Arqueológica de El Tajín.

**Bravo, A.H., Sosa, E.R., Sánchez, A.P., Alarcón, J.A.L., Soto, A.R., José Hernández T. (2005c). Importance of characterization of building material of heritage pre-hispanic and early Spanish monuments and the effects of acid deposition. 98th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Minneapolis, Minnesota. June.**

***Sitio y año de muestreo:***

Fortaleza de San Juan de Ulúa, Veracruz (Figura 12). Mayo a noviembre de 2003.



*Figura 12. Fortaleza de San Juan de Ulúa, Veracruz, México.*

***Método de muestreo:***

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC. A las muestras de material pétreo, se le hizo la determinación de parámetros físicos tales como densidad, porosidad, absorción de agua y difracción de Rayos X, antes y después de la exposición en la cámara de intemperismo acelerado de lluvia ácida.

***Análisis de muestras:***

En laboratorio se determinó la conductividad y pH, se realizó la determinación de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  por HPLC.

**Resultados:**

Se registró un pH mínimo de la lluvia de 5.3 para la zona de estudio, con la cual se expuso el material pétreo, pero debido a su composición principalmente de calcio dado que el material constitutivo es de origen biológico (arrecife de coral), presentó un mayor deterioro con respecto a otros sitios estudiados (Palenque y Tulúm), aunado al deterioro provocado por bacterias, hongos y líquenes.

**Bravo, A.H., Sosa, E.R., Kahl, J., Sánchez, A.P., Alarcón, J.A.L., Soto, A.R. (2006a). Acid Deposition Events during the Autumn of 2003 in a Research Cruise over the Gulf of Mexico. 99th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. New Orleans, Louisiana. June**

**Sitio y año de muestreo:**

Crucero Oceanográfico en el B.O. Justo Sierra de la UNAM. La Figura 13 presenta el colector de lluvia empleado en el buque. Campaña SOG en el Golfo de México, otoño del 2003.



*Figura 13. Equipo para el muestreo de lluvia en el crucero oceanográfico de 2003.*

**Método de muestreo:**

El muestreo de lluvia se realizó utilizando un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC.

***Análisis de muestras:***

Se midió el pH en campo, se registró el volumen y se conservó la muestra en refrigeración. Se utilizó HPLC para determinar las concentraciones de:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

***Resultados:***

Once de los 13 eventos registrados en el crucero oceanográfico tuvieron un valor de pH en el intervalo de 4.2 y 5.4. Los análisis de trayectoria señalan que las fuentes de emisión provienen del Sureste del Golfo de México, la península de Yucatán y las costas del Golfo de México.

**Ramírez, L.E., Miranda, G.R., Trujillo, S.D., Bravo, A.H., Sosa, E.R., Sánchez, A.P., Alarcón, J.A.L., Kahl, J. (2007). Preliminary Study of the Chemical Composition of Rainwater in Northeastern México. 100th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Pittsburgh, Pennsylvania. June.**

***Sitio y año de muestreo:***

Monterrey, Nuevo León, México. Junio a noviembre de 2006.

***Método de muestreo:***

Se utilizó un colector automático de depósito húmedo y seco, se registraron los parámetros meteorológicos, pH y conductividad.

***Análisis de muestras:***

Se analizaron por HPLC. Para la determinación de aniones y cationes.

***Resultados:***

Las características del agua de lluvia colectada fueron de naturaleza alcalina, dada la correlación entre los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , con  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Ninguna de las muestras analizadas presentó un pH ácido, el valor máximo registrado fue de 8.35 y el mínimo de 6.56 con un promedio de 7.37.



**Bravo, A.H., Sosa, E.R., Sánchez, A.P., Soto, A.R., et. al. (2007a). Mesoamerica's Workshop on the effects of air pollution on the Mayan heritage monuments. 100th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Pittsburgh, Pennsylvania. June.**

***Sitio y año de muestreo:***

Cancún, Quintana Roo, México (Figura 14), 16-21 de octubre de 2005



*Figura 14. Contaminación atmosférica en monumentos históricos, Ruinas del Rey, Cancún.*

***Método de muestreo:***

Se realizó un taller internacional, en donde se presentaron resultados de trabajos relacionados con el efecto del depósito atmosférico en Zonas Arqueológicas Mayas en Mesoamérica.

***Resultados:***

Se presentaron las experiencias sobre el impacto del depósito atmosférico en el deterioro de monumentos Mayas de Guatemala, Honduras, EU y México. Se recomendó tener inventarios de emisión de precursores del depósito atmosférico regionales, la creación de una Red Mesoamericana de Depósito Atmosférico para la conservación de Monumentos Mayas, se establecieron colaboraciones para extender los estudios en Centroamérica y el Caribe. Entre las líneas de

investigación propuestas destaca la evaluación de los efectos del transporte del depósito atmosférico. Se señaló la importancia de incluir la biodegradación como causante del deterioro significativo de los sitios Mayas, con el uso de muestreadores de tipo “denuders” para la determinación de  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$  y partículas ácidas.

**Sosa, E.R., Bravo, A.H., Sánchez, A.P., Alarcón, J.A.L., Herrera, T.Ch.A. (2008). Acid Wet Deposition Evaluation in the Coast of the Gulf of Mexico. 101st Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Portland, Oregon. June.**

***Sitio y año de muestreo:***

Se colocaron estaciones en la costa del Golfo de México, El Tajín (Figura 15); La Mancha, Fortaleza de San Juan de Ulúa y la Universidad Veracruzana en su Campus Mocambo. 2003-2005.



*Figura 15. Estación para el depósito atmosférico, El Tajín*

***Método de muestreo:***

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC. Se instaló una estación meteorológica automática en cada sitio de estudio y la información se utilizó para aplicar el modelo de trayectoria de retroceso.

**Análisis de muestras:**

Se midió el valor de pH en campo, se registró el volumen y se conservó la muestra en refrigeración. Se determinó por HPLC las concentraciones de:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

**Resultados:**

Se obtuvieron y analizaron un total de 77 muestras, el balance iónico indicó deficiencias con respecto al contenido de  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{PO}_3^-$ .

Se encontró que las concentraciones de cationes más altas se presentaron en la Fortaleza de San Juan de Ulúa, lo cual indicó condiciones alcalinas. En El Tajín se encontraron los valores más altos de  $\text{NH}_4^+$ , lo cual es producto de las actividades agrícolas en la zona de estudio. Los  $\text{NO}_3^-$  no presentaron variaciones significativas excepto entre las estaciones El Tajín-UV/Mocambo y La Mancha.

Cuando se comparan los iones de precursores de lluvia ácida, los  $\text{NO}_3^-$  mostraron valores más altos en San Juan de Ulúa y los  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron más altos en El Tajín.

Los cationes que mostraron una buena correlación con  $\text{Cl}^-$  fueron:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ; con  $\text{SO}_4^{2-}$ :  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$ ; con  $\text{NO}_3^-$ :  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$ . Esto indicó que pueden ser asociados con sus correspondientes sales y que pueden tener el mismo origen.

La zona arqueológica de El Tajín mostró diferencias significativa con respecto a los otros sitios, registrando la acidez más alta.



**Alarcón, J.A., Bravo, A.H., Sosa, E.R., Torres, B.M., Sánchez, A.P., Retama, H.A., Rivera, O. (2011). Acid wet deposition in the Mexico City Metropolitan Zone. 104th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Orlando, Florida, USA. June.**

**Sitio y año de muestreo:**

Dieciséis estaciones de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) (Figura 16), del Gobierno del Distrito Federal y la Estación del SCA-CCA-UNAM. Periodo de muestreo del 2003 al 2009.

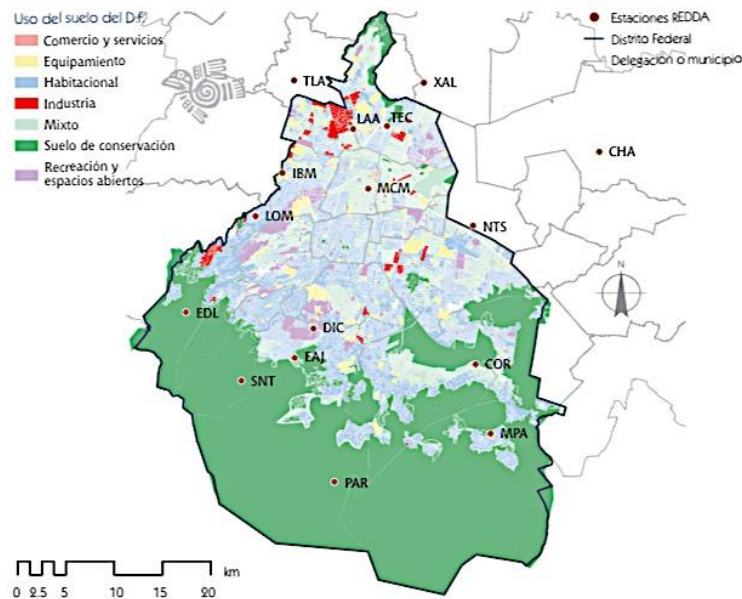


Figura 16. Estaciones de muestreo de acuerdo a la SEDEMA, 2009.

**Método de muestreo:**

El programa de monitoreo y análisis se realizó en la SCA-CCA-UNAM con un Programa de Aseguramiento de Calidad (AC) y un Control de Calidad (QC) para asegurar la confiabilidad de los datos, considerando recomendaciones de la US-EPA, el Programa Nacional de Deposición Ácida (NADP), del Programa de Química de la Precipitación Global (Watch Atmosphere Program) de la Organización Meteorológica Mundial y la experiencia de la SCA-CCA-UNAM. El muestreo de deposición húmeda se llevó a cabo semanalmente en las dieciséis estaciones REDDA y diariamente en la estación SCA-CCA-UNAM.

### **Análisis de muestras:**

Se determinó: pH, conductividad, y la concentración de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , basado en el método US-EPA 300.1, por HPLC, (Cromatógrafo Waters y un cromatógrafo Metrhom 883).

### **Resultados:**

Los resultados son de siete años consecutivos (2003-2009) de muestreo en las 17 estaciones distribuidas en la ZMCM. Los valores anuales ponderados de pH disminuyeron de Norte a Sur, con un valor mínimo de 4.16 en la estación Lomas (LOM), ubicada en la región Suroeste de la ZMCM.

Se determinó la concentración media ponderada de volumen para  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  por ser importantes para su asociación con para la formación de lluvia ácida.

Todas las estaciones presentaron una disminución en los valores ponderados de pH, que alcanzó su mínimo en 2007. Esta reducción se correlaciona con un aumento en el  $\text{SO}_4^{2-}$ , lo que sugiere que la acidez de las muestras es el resultado de la formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , una consecuencia de la reacción de  $\text{SO}_2$  con la humedad atmosférica.

La asociación de las especies determinadas con posibles fuentes mostró; 1) Ácido, una combinación de  $\text{H}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , con la quema de combustibles fósiles; 2)  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  con sal marina y sal de camino; y 3) Agricultura y suelo, una combinación de cationes base ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ ) y solutos nitrogenados ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ), que provienen de fertilizantes, campos de cultivo y partículas de polvo.

La zona Sureste tuvo el mayor porcentaje de muestras ácidas. La estación Parres presentó un 53% de muestras ácidas.

Se detectó una disminución del pH anual ponderado en la mayoría de los sitios estudiados en el periodo comprendido entre 2003. Por ejemplo, la estación Parres inició con un valor de 5.66 en 2003 y en 2009 llegó a 5.09.

El anión que se registró con mayor concentración en las muestras de deposición húmeda fue  $\text{SO}_4^{2-}$ , con un 50% de todos los aniones encontrados, seguido de  $\text{NO}_3^-$  con un 40% y  $\text{Cl}^-$  con un 10%.

La contribución del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  con respecto al ion  $\text{H}^+$  mostró un máximo del 30% para la zona Suroeste y un máximo del 10% para otras áreas.

Se recomienda la implementación de modelos de trayectoria para identificar las regiones de origen de los precursores de la lluvia ácida. Esto conducirá al establecimiento de medidas preventivas y contribuirá a la minimización y el control de los precursores de la lluvia ácida en fuentes específicas.

**Sosa, E.R., Bravo, A.H., Alarcón, J.A.L., Torres, B.M.C., Sánchez, A.P., Jaimes, P.M. (2013a). Nine years of wet deposition evaluation in the Coast of the Gulf of Mexico. 106th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Chicago, Illinois, USA. June.**

***Sitio y año de muestreo:***

Se colocaron estaciones en la costa del Golfo de México, El Tajín; La Mancha (Figura 17), Fortaleza de San Juan de Ulúa y la Universidad Veracruzana en su Campus Mocambo. Se colectó el depósito atmosférico durante los años de 2002 a 2011.



*Figura 17. Estación de muestreo, La Mancha, Veracruz, México.*

***Método de muestreo:***

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC. Se instaló una estación meteorológica automática en cada sitio y la información se utilizó para alimentar el modelo de trayectoria de retroceso. La colección de lluvia tuvo lugar diariamente para facilitar una resolución temporal más precisa para el depósito atmosférico húmedo en los sitios de estudio.

### **Análisis de muestras:**

Se realizó la determinación de: pH, conductividad, concentración de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) y concentraciones de aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) por HPLC con los protocolos de la US-EPA.

### **Resultados:**

Durante el periodo de estudio (2003 a 2011) se colectaron 569 muestras en la estación de La Mancha y se analizaron en el laboratorio SCA-CCA-UNAM. La distribución de los valores de pH fue similar en la mayoría de los años, excepto en 2007, 2010 y 2011, ya que los valores mínimos y máximos son mayores que en otros años. Sin embargo, el análisis estadístico no indicó diferencias significativas entre las distribuciones a los valores de pH de estos años. En los años 2007 y 2008, se determinaron eventos importantes de acidez, con pH de 3.81.

**Sosa, E. R., Bravo, A.H, Alarcón, J.A.L., B.M.C., Sánchez, A.P., Jaimes, P.M., Granados, H.E. (2015). Importance and evaluation of acid rain and settled particles on the coast of the Gulf of Mexico (2003-2013). 108th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Raleigh, North Carolina, USA. June.**

### **Sitio y año de muestreo:**

Estación de Investigaciones Costeras La Mancha, Veracruz (Figura 18). El periodo de muestreo del depósito atmosférico fue de 2003 al 2013.

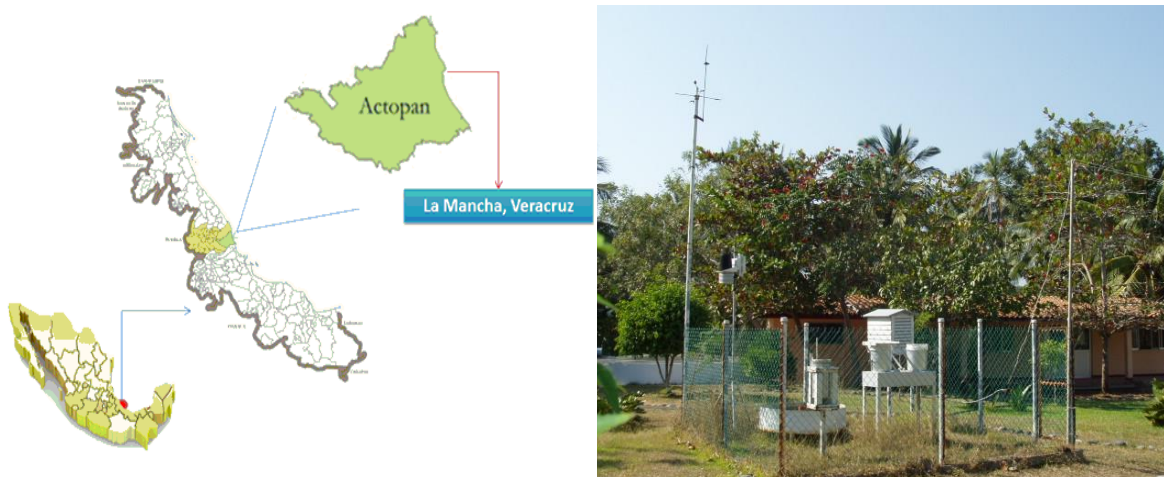


Figura 18. Sitio de muestreo en la costa del Golfo de México, La Mancha, Veracruz, México.

### **Método de muestreo:**

El muestreo automático de la lluvia se realizó utilizando un equipo Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservaron las muestras en refrigeración para su envío al laboratorio para su análisis. Se registraron parámetros meteorológicos con una estación automática cada 15 minutos. El laboratorio analítico de la SCA-CCA-UNAM cumple con el Programa de Garantía y Control de Calidad establecido de la US-EPA y NADP de los EU y desde 2008 ha participado en el Programa Global Atmospheric Watch de la WMO.

### **Análisis de muestras:**

Las muestras de depósito húmedo se filtraron; se midió el pH, conductividad y la especiación iónica. El depósito seco, se recuperó con 250 ml de agua ultrapura y se digirieron a  $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante una hora. Se llevó a cabo el análisis químico por HPLC, método US-EPA 300.1, para determinar la concentración de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ; y concentración de aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . La concentración de iones se analizó mediante Cl.

### **Resultados:**

Los valores promedio anuales ponderados de pH de 2003 a 2013, estuvieron por debajo de 5.6; con un intervalo de 4.81 (2007) a 5.13 en 2004.

Se colectaron 689 muestras de depósito húmedo y 108 muestras para partículas sedimentadas (depósito seco). El valor de pH fue generalmente ácido (~ 80%) en el cual,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  son los componentes principales en las muestras recolectadas en este sitio. El valor de pH fue de 3.81 a 7.61, con un promedio de 5.30. Durante la estación seca los iones estuvieron presentes en concentraciones mayores durante la estación seca ya que durante la temporada de lluvias, ocurre una importante dilución de los iones. Durante los periodos de alta acidez de las precipitaciones, se encontró que los principales constituyentes son el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , lo que sugiere que el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  es el principal compuesto responsable de la lluvia ácida. En los episodios con pH menos ácido, hubo mayor concentración de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Durante la década de duración de este estudio, se observó una tendencia decreciente significativa para  $\text{NO}_3^-$  y se observó una tendencia creciente para pH y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

El sitio "La Mancha" mostró una tendencia creciente en el pH, que es significativo a lo largo del periodo de muestreo de deposición húmeda con 0.30% por año. El sitio "La Mancha" muestra una tendencia decreciente significativa en la concentración de  $\text{NO}_3^-$  con un promedio de 4.16% por año. El periodo de 2004 a



2009 mostró un aumento en  $\text{NO}_3^-$  y una disminución desde 2010. Se observó una tendencia de aumento significativa en la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ , con un promedio de 3.08% por año. El periodo de 2004 a 2009 mostró un aumento en  $\text{SO}_4^{2-}$ , con un descenso en 2010, seguido de una tendencia aparente a permanecer constante.

**Sosa E. R., Bravo A. H., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C., Sánchez A. P., Jaimes P. M., Granados H. E., Gay D. (2017). Sulfate and nitrate in wet atmospheric deposition on the coast of the Gulf of Mexico from 2003 to 2015. 110th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Pittsburgh, Pennsylvania, USA. June.**

**Sitio y año de muestreo:**

Se consideraron los sitios de muestreo de NADP localizados en el Golfo de México, desde Texas a Florida (Figura 19). Centro de Investigaciones Costeras “La Mancha” (CICOLMA), Veracruz. El muestreo se realizó desde el 2003 al 2015.



*Figura 19. Sitios de muestreo de NADP y La Mancha en México.*

**Método de muestreo:**

El muestreo se realizó con un equipo Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservaron las muestras en refrigeración para su envío al laboratorio para su análisis. Se registraron parámetros meteorológicos con una estación meteorológica automática cada 15 minutos.

### **Análisis de muestras:**

La precipitación húmeda se colectó en botellas de HDPE. Las muestras fueron enviadas periódicamente a la Ciudad de México para su análisis químico. Los valores de conductividad y pH se determinaron con un Medidor de pH Corning 240 y un Medidor de Conductancia YSI Modelo 32, respectivamente. Se analizaron  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  por HPLC.

Se aplicó el modelo HYSPLIT de trayectorias de retroceso para identificar las regiones donde se encuentran las fuentes de emisión de precursores de lluvia ácida.

Para evaluar la composición ácida del depósito húmedo en toda la región del Golfo de México, se determinaron el pH, el  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  en el sitio de muestreo La Mancha (LM) en México, así como en los sitios NADP ubicados a lo largo de la costa del Golfo de México desde Texas hasta Florida (TX 03, TX 10, LA 30, FL 23, FL 05, FL14, FL 41 y FL 11).

### **Resultados:**

Los valores de pH del depósito húmedo en La Mancha durante 2003 a 2015 en los meses de la temporada de lluvias (junio a octubre) tuvieron una menor variabilidad. El 75% de los datos mostraron valores por debajo de 5.3 unidades de pH, octubre fue el mes con la acidez más alta, con una mediana de 4.88 unidades. Sin embargo, para los meses de la estación seca (noviembre a mayo), hubo una mayor variabilidad en los datos.

De acuerdo con las actividades locales y económicas de la región, la temporada de cosecha abarca los meses de noviembre a julio, en esta actividad se realizan quemas agrícolas para facilitar la cosecha de la caña de azúcar, lo que explicaría la alta variabilidad en los valores de pH para el meses correspondientes a la estación seca, por ejemplo meses de marzo, abril y diciembre que mostraron valores mínimos de pH de 4.56, 4.90 y 4.60, así como valores máximos de pH de 6.48, 6.90 y 6.08, respectivamente. De acuerdo con el objetivo, para buscar posibles correlaciones entre las estaciones LM y los de la NADP con respecto a  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , los valores de depósito en Kg/ha (mínimo, máximo y mediano) para  $\text{SO}_4^{2-}$  se observó que la estación LM presentó el mayor depósito de  $\text{SO}_4^{2-}$ , el 25% de los años alcanzó depósitos superiores a 13.45 Kg/ha, mientras que la mediana fue de 12.5 Kg/ha. La concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  determinada en la estación LM fue más alta que las estaciones de la NADP, se observó que el comportamiento mensual en la estación LM era similar a la estación TX 03, sin embargo, la variabilidad en la estación LM fue máxima. Las estaciones en Florida tenían concentraciones más bajas con la excepción de FL 05, cuya mediana era 15.25



$\mu\text{eq/L}$  y el 25% de los valores anuales estaba por encima de máximo de  $18 \mu\text{eq/L}$  hasta  $22.21 \mu\text{eq/L}$ .

En el sitio de muestreo "La Mancha", ubicado en la costa del Golfo de México, el fenómeno de la lluvia ácida ha estado presente por más de una década, siendo la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  más alta que el  $\text{NO}_3^-$ .

Desde 2003 a 2015, los valores anuales (promedio ponderado) de pH en "La Mancha" han ido en aumento, pero todos los valores registrados de pH estuvieron por debajo de 5,6. La concentración de valor ponderado de  $\text{SO}_4^{2-}$  estuvo en el intervalo de 15 a  $31 \mu\text{eq/L}$ , y para el último año fue de  $26 \mu\text{eq/L}$ , que es similar a los niveles más altos registrados en el sitio de los EU (TX03). La concentración de la media ponderada de  $\text{NO}_3^-$  estuvo en el intervalo de 3.5 a  $15 \mu\text{eq/L}$  y para 2015 fue de  $5.5 \mu\text{eq/L}$ , que es menor que en cualquiera de los sitios de EU. La relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  encontrada para "La Mancha" en 2015 fue de 4.8, siendo el valor más alto comparado con otros sitios en el Golfo de México cuyas proporciones estuvieron entre 1.03 y 1.87. Debido a los altos niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  y la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  encontrada en "La Mancha", es importante prestar atención a las fuentes de emisión de  $\text{SO}_2$  de azufre en México. De acuerdo con los resultados del Modelo de retroceso HYSPLIT, las trayectorias mostraron un transporte importante de depósito atmosférico ácido al sitio de muestreo desde el Este, durante la temporada de lluvias (junio-octubre). La región ubicada al Este de "La Mancha" es el Golfo de México que presenta operaciones en alta mar para la exploración y producción de petróleo.

#### 4.1.4 Artículos en Memorias de Congreso o Simposios (sin arbitraje)

**Aguilar, S.A., H. Bravo A., R. Magaña Z., M.I. Saavedra R., R. Torres J. (1981). Lluvia Ácida en la Cuenca del Valle de México. Memorias de Resúmenes de la Reunión 1981 de la Unión Geofísica Mexicana. Manzanillo, Colima. Mayo 6-9. (Figura 20).**

##### **Sitio y año de muestreo:**

Se instalaron 12 estaciones de muestreo en el Distrito Federal de tipo manual con embudos, botellas de HDPE, y un sitio con un colector automático de depósito automático Aerochem Metrics en 1980.



*Figura 20. Ciudad de Manzanillo, Colima, México.*

##### **Método de muestreo:**

Se utilizó material de colección inerte y se determinaron parámetros meteorológicos, en 11 estaciones distribuidas en el Distrito Federal. Se utilizó por vez primera un colector automático de depósito húmedo y seco marca Aerochem Metrics Modelo 301, que se encuentra ubicado en el CCA UNAM.

##### **Análisis de muestras:**

Se realizó la determinación de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  por métodos de química húmeda y de pH a las muestras de lluvia colectada utilizando un potenciómetro.

### **Resultados:**

En la mayoría de las estaciones se encontró un pH menor a 5.6, pero se detectó un cambio del pH desde el momento de la colección de campo hasta el análisis en el laboratorio, provocando la alcalinización de las muestras, esto se debe a la incorporación de partículas con sales alcalinas que son lavadas por la lluvia o depositadas en el interior del colector, antes y después del evento. Se logró detectar un evento histórico de transporte del depósito atmosférico ácido en dirección Norte-Sur en el Distrito Federal.

**Aguilar, S.A., H. Bravo A., M.I. Saavedra R., R. Torres J. (1984). Acid Precipitation in the Mexico City Basin. Proceedings of the Applications with Special Regard to Tropical Areas. World Meteorological Organization. Mexico City. November. pp. 3-4.**

### **Sitio y año de muestreo:**

Ciudad de México (Figura 21). CCA, UNAM. 1980 a 1984.



*Figura 21. Contaminación ambiental en la Ciudad de México.*

### **Método de muestreo:**

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia.

### **Análisis de muestras:**

Se realizó la determinación de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  por métodos de química húmeda y de pH a las muestras de lluvia colectada utilizando un potenciómetro.

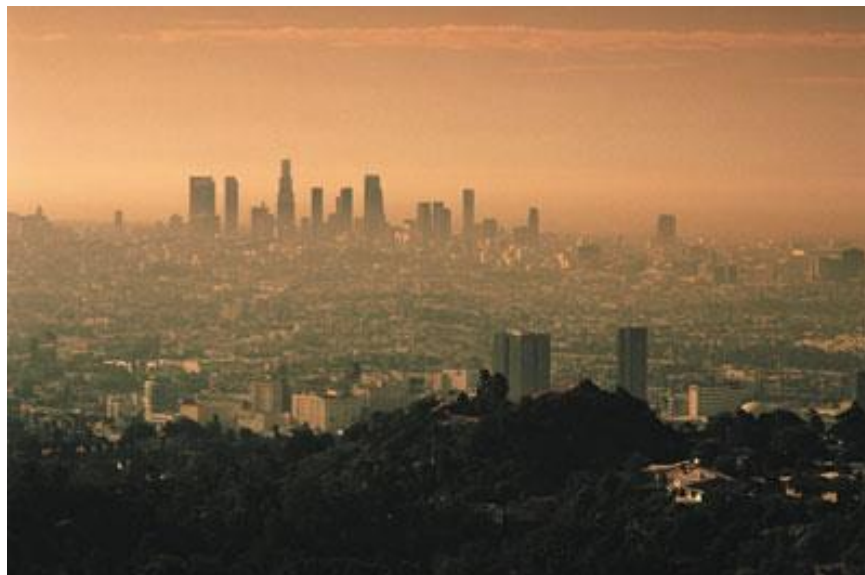
### **Resultados:**

La mayoría de las muestras de las estaciones presentaron un pH menor de 5.6, así como poca variabilidad en el contenido de  $\text{NO}_3^-$ , mientras que se presentó una marcada tendencia en el contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Se reporta un valor de pH en un intervalo de 4.81 a 6.66, considerando que los valores alcalinos se deben a la presencia de sales alcalinas en el ambiente y en el suelo y al error de colección en la separación del depósito seco y húmedo.

**Bravo A.H., Sosa E.R., Torres J.R. (1989). El problema fotoquímico y la lluvia ácida en la Ciudad de México. Memorias de la Reunión sobre Salud y Ambiente en la Ciudad de México. Secretaría de la Defensa Nacional. Departamento del Distrito Federal. México, D.F. Abril 17-21. pp. 61-69.**

### **Sitio y año de muestreo:**

Ciudad de México (Figura 22). CCA, Ciudad Universitaria, UNAM. 1980 a 1989.



*Figura 22. Contaminación fotoquímica en la Ciudad de México.*

### **Método de muestreo:**

El muestreo manual se realizó en 14 estaciones climatológicas en el Distrito Federal operadas por el SMN. Se utilizó embudo y botellas de colección inerte. El muestreo se realizó en el CCA UNAM con un equipo Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia.

### **Análisis de muestras:**

Se realizó la determinación de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  por métodos de química húmeda y de pH a las muestras de lluvia colectada utilizando un potenciómetro.

### **Resultados:**

Se reportó la presencia de lluvia ácida en el Distrito Federal a causa de las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , valores de pH en un intervalo de 4.81 a 6.66.

**Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Herrera T. Ch. (2007). Deposición ácida y sus efectos en el patrimonio cultural en el Estado de Veracruz. Segundo Foro del Medio Ambiente Atmosférico de Veracruz. USBI. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. Mayo.**



*Figura 23. Patrimonio cultural del estado de Veracruz, México.*

### **Sitio y año de muestreo:**

Zona arqueológica de El Tajín (TAJ), Estación de Ecología Costera La Mancha (LM), Universidad Veracruzana, Campus Mocambo y Fortaleza de San Juan de Ulúa (SJU). Muestreos realizados del 2003 al 2005. La figura 23 ilustra el patrimonio cultural en el Estado de Veracruz.

### **Método de muestreo:**

La colección de muestras de depósito ácido en los cuatro sitios estudiados se llevó a cabo con muestreadores automáticos Aerochem Metrics Modelo 301. Se



registraron los parámetros meteorológicos con una estación automática instalada en cada uno de los sitios.

### **Análisis de muestras:**

Se utilizaron varias muestras de material pétreo proveniente de la zona arqueológica de El Tajín y la Fortaleza de San Juan de Ulúa, las cuales se caracterizaron petrográficamente usando análisis de difracción de Rayos X. Se realizaron las actividades de muestreo de depósito atmosférico húmedo, transporte de muestras, cadena de custodia, análisis químicos por medio de HPLC. Se obtuvieron muestras de material pétreo, las cuales fueron expuestas en una cámara de intemperismo acelerado a un flujo volumétrico de agua simulando el impacto que sufre dicha muestra por la exposición a la lluvia ácida por un periodo de 10 años en cinco meses de exposición.

### **Resultados:**

En cada sitio se midió el volumen de la precipitación de cada evento de lluvia, valor que es determinante para la ponderación de cada una de las concentraciones de los parámetros mencionados, con esta información recopilada desde el año 2002 a la fecha, se logra comprobar la existencia de depósito ácido ( $\text{pH} = < 5.6$ ). Los valores de pH, conductividad y concentración de iones ponderados obtenidos para los diferentes sitios estudiados (TAJ, SJU, LM y UV) para el periodo 2003, 2004 y 2005 fueron intercomparados entre sí mediante la prueba estadística de Kruskal-Wallis, para este estudio se contemplaron seis combinaciones: 1) TAJ-LM, 2) TAJ-SJU, 3) TAJ-UV, 4) LM-SJU, 5) LM-UV y 6) SJU-UV. Para el caso del pH todas las comparaciones entre estos sitios mostraron una diferencia significativa con excepción de los pares LM-UV y LM-SJU. Los valores ponderados de pH para El Tajín fueron de 4.55, 4.52 y 4.66 durante los años 2003, 2004 y 2005 respectivamente, presentando este sitio (El Tajín) los niveles con mayor acidez. Es importante mencionar que la degradación de la roca caliza no proviene exclusivamente de factores químicos, sino también de aquellos de origen físico, bacteriológico, etc. Esta observación permite asegurar que la recesión superficial real de la roca es mayor que la calculada. En este trabajo, el intervalo de valores de recesión superficial se encuentra entre 3.0 y 4.0  $\mu\text{m}/\text{año}$ . La investigación realizada en este trabajo es sólo la parte de un proyecto global, el cual abarcaría como segunda etapa el estudio de materiales consolidantes que se pudieran aplicar a la roca para minimizar su deterioro, al incidir la lluvia ácida sobre ella. La utilización de materiales poliméricos es una opción que resulta muy prometedora, ya que algunos investigadores en esta área la han explotado y continúan haciéndolo. De acuerdo con este estudio, el 85% de los eventos de

precipitación muestreados en El Tajín de agosto 2000 a abril 2003 tuvieron características ácidas ( $\text{pH} < 5.6$ ), debido a que la zona arqueológica de El Tajín está cercana a fuentes emisoras de precursores de lluvia ácida ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ), por el tipo de combustible que utilizan en su operación (plantas de generación de energía eléctrica, procesos de combustión, refinerías y otros).

**Marín H. A., Bravo A.H., Alarcón J.A.L., Sosa E.R., Sánchez A.P. (2010). “Presencia de lluvia ácida en el Estado de Veracruz y el uso de modelos de trayectoria inversa para identificar regiones de emisión de precursores. Casos de estudio: El Tajín y La Mancha”. Memorias del XIX Congreso Mexicano de Meteorología y IV Congreso Internacional de Meteorología. Saltillo, Coahuila, México. Octubre.**

**Sitio y año de muestreo:**

Zona arqueológica de El Tajín y Estación de Ecología Costera de La Mancha, Veracruz. 2008-2010.

**Método de muestreo:**

El muestreo automático de la lluvia se realizó utilizando un equipo Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio, se registraron los parámetros meteorológicos en los dos sitios de muestreo con equipo automático cada 15 minutos durante el periodo de estudio.

**Análisis de muestras:**

Se analizaron las bases de datos meteorológicas de los días en los que se registraron eventos de depósito atmosférico ácido y se incorporaron al modelo HYSPLIT de trayectoria de retroceso (Figura 24).



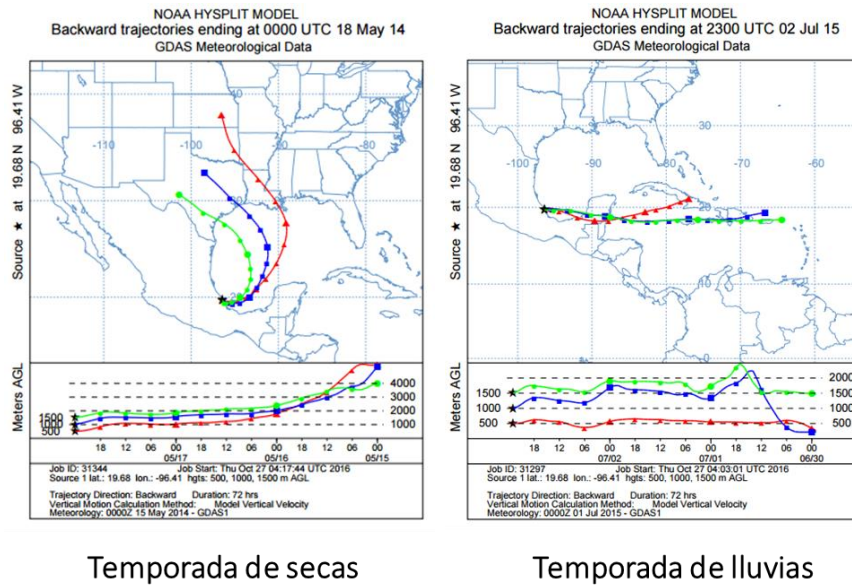


Figura 24. Trayectorias de retroceso para identificar de donde provienen las masas de aire.

## Resultados:

Se encontró que las fuentes de emisión de los eventos registrados de depósito atmosférico ácido se originaron en regiones distantes tales como la Sonda de Campeche, el Sur de la Península de Florida, de la Península de Yucatán y el mar Caribe.

#### 4.1.5 Informes y reportes técnicos

**Aguilar, S.A., H. Bravo A., R. Magaña Z., M.I. Saavedra R., R. Torres J. (1981). Estudio Preliminar de la Lluvia Ácida en la Cuenca del Valle de México. México, D.F., Departamento de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM/Servicio Meteorológico Nacional SARH. 22 p.**

##### ***Sitio y año de muestreo:***

14 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional ubicadas en el Distrito Federal se colectó la muestra total (depósito húmedo/seco), más la SCA-CCA-UNAM, que utilizó un colector Aerochem Metrics. Periodo de muestreo 1980-1983.

##### ***Método de muestreo:***

Se colectó el total en embudos y botellas en las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y en la SCA-CCA-UNAM con un colector automático de lluvia (depósito húmedo/seco).

##### ***Análisis de muestras:***

El pH en campo se registró con papel indicador en las estaciones del SMN y en la estación de la SCA-CCA-UNAM con un potenciómetro.

##### ***Resultados:***

Se presenta en el periodo de tiempo de muestreo una tendencia al incremento en el depósito ácido, lo anterior con los datos registrados en la Estación de Ciudad Universitaria. El promedio ponderado de pH para los años 1980, 1981, 1982 y 1983, de 6.22, 5.30, 5.58 y 5.14 respectivamente. Los valores de  $\text{SO}_4^{2-}$  para este mismo periodo (1980-1983), 11.04, 9.35, 6.33 y 4.43 mg/L respectivamente. Los  $\text{NO}_3^-$  para este periodo (1980-1983), 2.39, 2.51, 2.95 y 2.11 mg/L.

**Aguilar, S.A., H. Bravo A., M.I. Saavedra R., R. Torres J. (1984). Acid Precipitation in the Mexico City Basin. México, D.F. Departamento de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 7 p.**

***Sitio y año de muestreo:***

14 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional ubicadas en el Distrito Federal se colectó la muestra total (depósito húmedo/seco), más la SCA-CCA-UNAM, que utilizó un colector Aerochem Metrics. Periodo de muestreo 1980-1983.

***Método de muestreo:***

Se colectó el total en embudos y botellas en las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y en la SCA-CCA-UNAM con un colector automático de lluvia (depósito húmedo/seco).

***Análisis de muestras:***

El pH en campo se registró con papel indicador en las estaciones del SMN y en la estación de la SCA-CCA-UNAM con un potenciómetro, la determinación de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

***Resultados:***

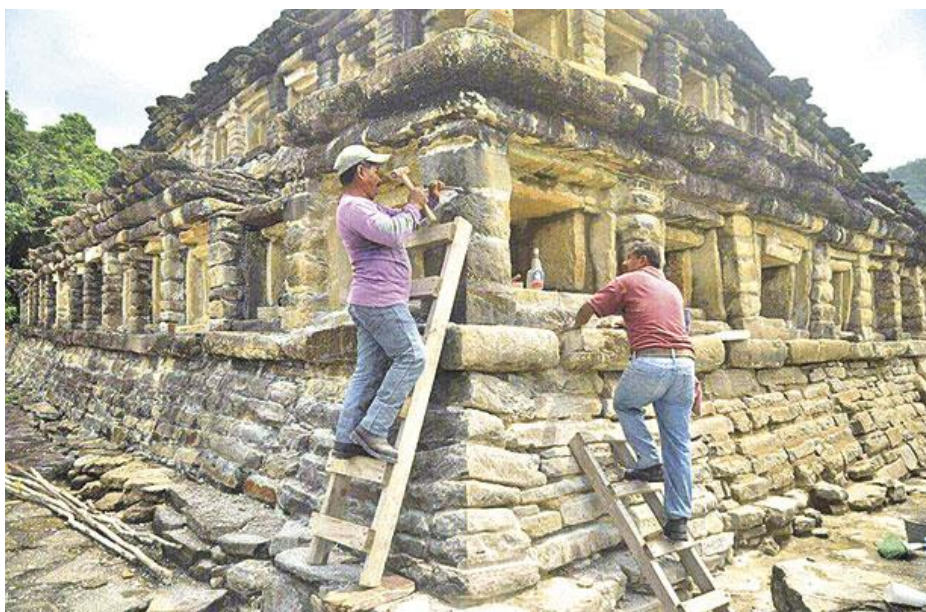
Se presenta en el periodo de tiempo de muestreo una tendencia e incremento en el depósito ácido, lo anterior con los datos registrados en la Estación de Ciudad Universitaria. El promedio ponderado de pH para los años 1980, 1981, 1982 y 1983, de 6.22, 5.30, 5.58 y 5.14 respectivamente. Los valores de  $\text{SO}_4^{2-}$  para este mismo periodo (1980-1983), 11.04, 9.35, 6.33 y 4.43 mg/L respectivamente. Los  $\text{NO}_3^-$  para este periodo fueron 2.39, 2.51, 2.95 y 2.11 mg/L.

#### 4.1.6 Trabajos de investigación publicados (abstracts/resúmenes) en memorias de congresos o simposios

**Bravo A.H., Soto A.R., Sosa E. R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Ruiz B.J., Kahl J. (2004). Acid Deposition Effects Archeological Monuments in Mexico. 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress and Exhibition. London, UK. August.**

##### **Sitio y año de muestreo:**

Zona Arqueológica de El Tajín, Veracruz (Figura 25). Muestreo y análisis de material pétreo de agosto de 2002 a abril de 2003.



*Figura 25. Restauración de la zona arqueológica El Tajín.*

##### **Método de muestreo:**

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC.

##### **Análisis de muestras:**

A las muestras de material pétreo, se les determinaron parámetros físicos tales como densidad, porosidad, absorción de agua y difracción de Rayos X, antes y después de la exposición en la cámara de intemperismo acelerado de lluvia ácida. Para cada muestra, se determinaron los siguientes parámetros: pH; conductividad eléctrica; concentración de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ; y concentración de

aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . La concentración de iones se analizó mediante HPLC, método EPA 300.1 El sistema de HPLC incluye un detector de conductividad. El pH de la lluvia ácida artificial que se utilizó para la exposición de material pétreo y se ajustó a 4.4, que presentó el valor ponderado promedio más bajo encontrado en las muestras de lluvia en El Tajín. Dentro de la cámara se colocaron tres muestras de roca (cada una de  $20 \text{ cm}^2$  aprox.). Se simuló un año de lluvia, durante 28 h., 750 mL de lluvia artificial cayeron sobre las muestras de piedra caliza a una tasa de caída de 0.45 mL/min (la precipitación anual en El Tajín es de 1180 mm/año, aproximadamente).

### **Resultados:**

Se obtuvieron 40 muestras, de las cuales 34 presentaron valores por debajo de un pH de 5.6, y un promedio ponderado de 4.4. De acuerdo con el mecanismo de disolución del carbonato de calcio, la lluvia ácida es neutralizada por carbonato de calcio y los valores de pH de la lluvia ácida aumentan de 4.4 a valores de pH cercanos a 8. A estos valores de pH, la contribución alcalina es debida a la concentración de bicarbonato y es muy importante cuando el equilibrio químico de su disolución es llevado a cabo.



**Bravo A.H., Sosa E.R., Torres B.M.C., Alarcón J.A.L., Sánchez A.P. (2013). Wet deposition in the Mexico City Metropolitan Zone. 2013 Annual Meeting and Scientific Symposium. National Atmospheric Deposition Program, Park City, Utah, USA. October 8-11.**

***Sitio y año de muestreo:***

17 estaciones de depósito atmosférico en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 2003-2009. La Figura 26 presenta uno de los sitios de muestreo.



*Figura 26. Equipo de muestreo utilizado por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CdMx.*

***Método de muestreo:***

Se colectaron las muestras de 16 Estaciones de la REDDA-SIMAT, del Sistema de Monitoreo de la Secretaría de Medioambiente, del Gobierno de la Ciudad de México más la estación ubicada en el CCA UNAM. Utilizando un colector automático de depósito húmedo y seco.

***Análisis de muestras:***

El programa de monitoreo y análisis establecido en la SCA-CCA-UNAM, consiste en un Programa de Aseguramiento de Calidad (AC) y de Control de Calidad (CC) lo que permitió generar datos confiables que cumplen con las recomendaciones de la US-EPA y la US-NADP así como también del Programa de Química de Precipitación Global (Global Atmosphere Watch) de la WMO.



El muestreo de depósito húmedo se llevó a cabo semanalmente en las dieciséis estaciones de la REDDA y diariamente en la estación SCA-CCA-UNAM. El análisis químico para cada muestra colectada consistió en determinar los siguientes parámetros: pH, conductividad, concentración de ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ). Esta identificación y cuantificación de iones, se basó en el método de la US-EPA No. 300.1, de HPLC, usando columnas cromatográficas para los cromatógrafos Waters y Metrhom 883.

### **Resultados:**

Los resultados obtenidos en el estudio de depósito húmedo de la ZMCM corresponden a un muestreo y análisis durante siete años consecutivos (2003-2009) en las 17 estaciones distribuidas dentro del área de estudio. Durante este periodo, se colectaron 2662 muestras. Los valores ponderados anuales de pH disminuyen de Norte a Sur en la ZMCM, habiendo registrado un valor anual mínimo ponderado de 4.16 en la estación LOM, ubicada en la región Suroeste de la ZMCM. La zona Sureste tuvo el mayor porcentaje de muestras ácidas. La estación PAR se distingue de otras, ya que el 53% de las muestras colectadas muestran valores ácidos. Se detectó una disminución del pH anual ponderado en la mayoría de los sitios estudiados en el periodo estudiado. Por ejemplo, la estación PAR comenzó con un valor de 5,66 en 2003 y en 2009 llegó a 5,09. El anión que se registró en la mayoría de las muestras de depósito húmedo fue  $\text{SO}_4^{2-}$ , que representa un 50% de todos los aniones encontrados, seguido de ion  $\text{NO}_3^-$  con un 40% e ion  $\text{Cl}^-$  con un 10%. La contribución del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  con respecto al ion  $\text{H}^+$  mostró un máximo del 30% para la zona Suroeste y un máximo del 10% para otras áreas. Se recomienda la utilización de modelos de trayectoria para identificar las regiones de procedencia de los precursores de la lluvia ácida. Esto conducirá al establecimiento de medidas preventivas y contribuirá a la minimización y el control de los precursores de la lluvia ácida en fuentes específicas.

**Sosa E. R., Bravo A.H., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C., Sánchez A. P. Jaimes P.M. (2013) Wet deposition in the Coast of the Gulf of Mexico. Annual Meeting and Scientific Symposium. National Atmospheric Deposition Program, Park City, Utah, USA. October 8-11.**

**Sitio y año de muestreo:**

Zona Arqueológica de El Tajín; Centro de Investigaciones Costeras de La Mancha, Fortaleza de San Juan de Ulúa e Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana Campus Mocambo. Veracruz, México (Figura 27). 2003 a 2009.



*Figura 27. Sitios de muestreo de depósito atmosférico en el Golfo de México por la SCA-CCA-UNAM.*

**Método de muestreo:**

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático en cada uno de los sitios estudiados. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC. El periodo de muestreo fue diario durante la temporada de lluvias en cada una de las estaciones instaladas.

**Análisis de muestras:**

La presente investigación identificó y evaluó la composición química de la deposición húmeda de 2665 muestras colectadas. Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos de pH y conductividad, tanto en campo como en laboratorio; se determinó la concentración de iones solubles en las muestras de lluvia:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , utilizando el método de la US-EPA No. 300.1, mediante HPLC.

### **Resultados:**

Los niveles de pH encontrados en el agua de lluvia muestran una fuerte presencia del fenómeno de la lluvia ácida en el área de estudio, con valores de pH en un intervalo de 3.8 a 5.6.

**Sosa E.R., Bravo A.H., Alarcón J., Torres B.M.C., Sánchez A.P., Jaimes P. M., Granados H.E. (2014). Chronology of acid rain in Mexico City and the Gulf of Mexico. Scientific Symposium. National Atmospheric Deposition Program, Indianapolis, Indiana, USA. October 21-24, 2014.**

### **Sitio y año de muestreo:**

16 Estaciones de la Red de Depósito Atmosférico del Gobierno de la Ciudad de México (REDDA-GobCDMX) y la estación instalada en la SCA-CCA-UNAM (Figura 28). Periodo comprendido de 2002 a 2013. En la región del Golfo de México se presentó la información de la estación La Mancha de 2003 a 2013.



*Figura 28. Sitio de muestreo para el depósito atmosférico de la SCA-CCA-UNAM.*

### **Método de muestreo:**

El muestreo de depósito atmosférico húmedo se realiza semanalmente para las estaciones de la REDDA-Gob CDMX, mientras que en la SCA-CCA-UNAM se muestrea semanal y diariamente. Después del muestreo, se lleva a cabo la determinación de los parámetros físico-químicos de pH y conductividad en campo. Posteriormente en el laboratorio, nuevamente se hace la medición del pH y la

conductividad, así como la determinación de las concentraciones de iones por HPLC.

### **Análisis de muestras:**

Los parámetros físico-químicos de pH y conductividad se determinan en campo y en laboratorio, mientras que la concentración de iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ) se determina utilizando el método de la US-EPA No. 300.1, por HPLC.

### **Resultados:**

Los valores de pH disminuyen de Norte a Sur en la ZMCM, presentando el área Suroeste los niveles más altos de acidez. El análisis de todo el periodo de estudio (2002-2014), muestra la presencia del fenómeno de la lluvia ácida ( $\text{pH} < 5,6$ ) en toda la ZMCM. En relación con las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , los valores más altos se presentan en el noroeste del área metropolitana, mostrando la influencia de fuentes externas de precursores ubicadas en el norte; teniendo en cuenta que la dirección del viento predominante es de Norte a Sur. Es importante señalar que aunque las fuentes ubicadas en la ZMCM han disminuido las emisiones de precursores de la lluvia ácida ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ), esto aún no se ha logrado fuera de la ZMCM, y sin embargo, estas emisiones también influyen en los niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y valores de pH ácido en ZMCM. En lo que respecta a la región del Golfo de México, está presente el fenómeno de la lluvia ácida, que se detectó desde 2003 en cuatro sitios de muestreo instalados y operados por la SCA-CCA-UNAM. Estos cuatro sitios se mantuvieron funcionando continuamente hasta 2006, permaneciendo actualmente en operación y considerada como un sitio de referencia la Estación "La Mancha", Veracruz. En relación con el depósito atmosférico húmedo durante el periodo de estudio (2003-2013) se encontraron los siguientes intervalos para el promedio anual ponderado por volumen: pH (4,81-5,44);  $\text{SO}_4^{2-}$  (15.78-40.10  $\mu\text{eq/L}$ ); y  $\text{NO}_3^-$  (3.60-20.85  $\mu\text{eq/L}$ ). Esto muestra el impacto potencial en diferentes receptores en el área de estudio, como: zonas agrícolas, cuerpos de agua, edificios que forman parte del patrimonio cultural, industrias, entre otros.

#### 4.1.7 Contribución a la divulgación científica.

**Bravo A.H. Sosa E.R., Torres J.R. (1991). Ozono y lluvia ácida en la Ciudad de México. Ciencias. Revista de Difusión. Facultad de Ciencias. UNAM. no. 22, pp. 33-40.**

##### **Sitio y año de muestreo:**

14 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional ubicadas en el Distrito Federal se colectó la muestra total (depósito húmedo/seco), más la SCA-CCA-UNAM, que utilizó un colector de depósito atmosférico Aerochem Metrics y un analizador de ozono marca Beckman. En la Figura 29 se aprecia la contaminación por ozono en la Ciudad de México. Periodo de muestreo 1980-1985.



*Figura 29. Episodio de contaminación ambiental por ozono en la CdMx.*

##### **Método de muestreo:**

Se colectó el depósito total en embudos y botellas en las estaciones del SMN y en la SCA-CCA-UNAM con un colector automático de lluvia (depósito húmedo/seco).

##### **Análisis de muestras:**

El pH en campo se registró con papel indicador en las estaciones del SMN y en la estación de la SCA-CCA-UNAM con un potenciómetro.



### **Resultados:**

Se presenta en el periodo de tiempo de muestreo una tendencia e incremento en el depósito ácido, lo anterior con los datos registrados en la Estación de Ciudad Universitaria. El promedio ponderado de pH para los años 1980, 1981, 1982, 1983, 1984 y 1985 fue de 6.22, 5.30, 5.58, 6.16, 4.65 y 4.05, respectivamente. Los valores de  $\text{SO}_4^{2-}$  para este mismo periodo (1980-1985) fueron 11.04, 9.35, 6.33, 4.43, 6.25 y 6.62 mg/L, respectivamente. Los  $\text{NO}_3^-$  para este periodo (1980-1985), 2.39, 2.51, 1.91, 2.11, 2.01 y 2.86 mg/L.

**Bravo, H.A., M.I. Saavedra R., R. Torres J., P. Sánchez A., L.M. Granada, R. Soto A., J. Harris (1999). Impacto Potencial de la Lluvia Ácida en Monumentos Mayas. Revista Ciencia y Desarrollo. México, D.F. (Febrero).**

### **Sitio y año de muestreo:**

Estación Puerto Morelos, Quintana Roo (Figura 30). Abril de 1994 a diciembre de 1995.



*Figura 30. Estación de ICMYL, Puerto Morelos, Quintana Roo, México.*

### **Método de muestreo:**

Se utilizó un colector automático Aerochem Metrics Mod. 301. Se midió el volumen de lluvia y se embotelló en material inerte, se refrigeró para su envío al laboratorio.

### **Análisis de muestras:**

Se colectaron 45 muestras, se enviaron al laboratorio de la SCA-CCA-UNAM, determino el pH y posterior análisis por HPLC.



### **Resultados:**

El promedio ponderado del pH (respecto al volumen de lluvia asociado a cada caso) fue de 5.35. En general, la lluvia que se precipita en esta región del Caribe es ligeramente ácida, aunque poco más de 10% de las muestras presentaron un pH entre 4.5 y 5.0. Con respecto a otros valores registrados para otros sitios, claramente se observa la relativa "limpieza" de la lluvia en Puerto Morelos. El aspecto más relevante es que, no obstante haberse detectado valores ácidos en la lluvia que se precipita en la costa caribeña de la península de Yucatán, el potencial de incremento al deterioro natural al que están expuestos los monumentos mayas, construidos con material pétreo calizo, no representa una condición alarmante bajo las circunstancias actuales. Sin embargo, el análisis de las correlaciones emisión-transformación química-transporte atmosférico-precipitación de la lluvia en esta zona, indica que, cuando el patrón de los vientos en la capa baja de la atmósfera proviene del continente americano, específicamente del Sureste de Norteamérica, la acidez de la lluvia se incrementa. Por lo anterior, es necesario continuar con la vigilancia de este fenómeno, así como con la investigación relacionada con el efecto acumulativo de disolución en las condiciones químicas y ambientales de la precipitación en la zona maya.

**Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P. Alarcón J.A.L., Soto A.R. (2006). La Lluvia Ácida en México. El Faro. Boletín Informativo de la Coordinación de la Investigación Científica. Mayo, año VI, No. 62.**

**Sitio y año de muestreo:**

En la zona arqueológica de El Tajín (Figura 31) se colectó la lluvia durante 2002 al 2004 y CCA de la UNAM. Desde 1980 hasta 2005.



*Figura 31. Deterioro en la zona arqueológica El Tajín.*

**Método de muestreo:**

Cubetas abiertas y colector automático de depósito húmedo y seco Aerochem Metrics. Se prepararon muestras de material pétreo de El Tajín para su exposición en una cámara de intemperismo acelerado, simulando T, HR y un pH de 4.45.

**Análisis de muestras:**

Se midió el pH en campo y en laboratorio adicionalmente se determinó su composición iónica, por medio de técnicas de HPLC, la cual se utilizó como referencia para la preparación de la lluvia ácida artificial.

**Resultados:**

El Tajín sufre un deterioro superficial de  $\text{CaCO}_3$  que contiene la roca caliza a razón de  $1.05 \pm 0.09 \text{ mg/cm}^2$  por año, lo que es equivalente a una pérdida superficial de  $4.15 \pm 0.47 \text{ } \mu\text{g/año}$ .

**Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P. Alarcón J.A.L., Soto A.R. (2013) Lluvia ácida sobre el Tajín. EL FARO. Boletín Informativo de la Coordinación de la Investigación Científica. Ciudad Universitaria, junio, año XIII, No.147.**

**Sitio y año de muestreo:**

Zona arqueológica de El Tajín, Veracruz (Figura 32). 2002-2004



*Figura 32. Deterioro de la zona arqueológica El Tajín a causa de la lluvia ácida.*

**Método de muestreo:**

Colector automático de depósito atmosférico húmedo y seco mediante un equipo de muestreo Aerochem Metrics y determinación de condiciones meteorológicas con una estación meteorológica automática Davis Instruments.

**Análisis de muestras:**

Se colectó la muestra diariamente, se midió el volumen, se registró y almacenó para su envío al laboratorio. Se registraron cada 15 minutos los parámetros meteorológicos. Con el registro de las fechas de los eventos de depósito atmosférico ácido se aplicó el Modelo Hybryd Single Particle Langrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT).

**Resultados:**

Se encontró que la zona de El Tajín puede estar influenciada por los contaminantes precursores de lluvia ácida emitidos a la atmósfera por las diversas industrias localizadas a cientos de kilómetros de la costa del Golfo de México.

**Bravo A.H., Soto A.R., Sosa E.R., Sánchez A.P. (2003a). Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos. Ingeniería, Investigación y Tecnología IV.4, pp.195-205.**

**Sitio y año de muestreo:**

Tulum y Puerto Morelos, Quintana Roo, los muestreos se realizaron en 1994 y 1995.

**Método de muestreo:**

Se colectaron las muestras con un colector automático Marca Aerochem Metrics Mod. 301, se envasaron en botellas Nalgene se midió el volumen de precipitación y se registraron, embasaron y conservaron a una temperatura de 5°C para su posterior envío al Laboratorio de la SCA CCA UNAM. Se tomaron muestras de material petreo de estructuras mayas para su exposición en la cámara de intemperismo acelerado, previo a su análisis por PIXE para su determinación de compuestos elementales.

**Análisis de muestras:**

Las muestras de lluvia de determino el pH, conductividad y la determinación de aniones y cationes por medio de HPLC para obtener el balance químico para la posterior elaboración de lluvia ácida artificial con la que se expuso las muestras de material petreo. Se realizaron análisis de densidad, porosidad y adsorción de agua, así como su análisis elemental por la técnica de PIXE antes y después de los experimentos.

**Resultados:**

El valor de pH más bajo para el periodo de muestreo fue de 4.6, que se utilizó como referencia para la elaboración de lluvia ácida artificial. Resultado de la exposición del material petreo en la cámara de Intemperismo Acelerado se encontraron valores de recesión superficial en el intervalo de 4.0 y 5.0  $\mu\text{m}/\text{año}$ . Presentándose una recesión superficial promedio durante el periodo de exposición de 4.4  $\mu\text{g}/\text{año}$ .

**Sosa E. R., Bravo A. H., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C, Sánchez A. P, Jaimes P. M., Granados H. E. (2015). Acid rain on the Coast of the Gulf of Mexico. 9th International Conference on Acid Deposition, Rochester New York, USA. October.**

**Sitio y año de muestreo:**

Zona Arqueológica de El Tajín, Estación La Mancha, Fortaleza de San Juan de Ulúa e Instituto de Ingeniería UV Mocambo en el Estado de Veracruz. Muestreos realizados de 2003 al 2013.

**Método de muestreo:**

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC. El periodo de muestreo fue diario durante la temporada de lluvias.

**Análisis de muestras:**

Para la evaluación de la lluvia ácida, la colección de muestras de lluvia se realiza diariamente. Las mediciones de pH y conductividad se realizan en el laboratorio, así como la determinación de la concentración de iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ) por HPLC.

**Resultados:**

Durante el periodo de estudio, se encontraron los siguientes intervalos para la media ponderada por volumen por año: pH (4.78-5.40),  $\text{SO}_4^{2-}$  (15.76-31.63  $\mu\text{eq/L}$ ),  $\text{NO}_3^-$  (3.76-15.32  $\mu\text{eq/L}$ ), entre otros. El sitio "La Mancha" muestra una tendencia creciente en el pH, que es significativo durante todo el periodo con un 0,30% por año. Se observó una tendencia decreciente significativa en  $\text{NO}_3^-$  durante el periodo de estudio de una década, promediando un aumento de 4.16% por año. El periodo de 2004 a 2009 muestra un aumento en  $\text{NO}_3^-$ , mientras que desde 2010 se ha identificado una pequeña disminución. También se observó un aumento significativo en la tendencia sobre  $\text{SO}_4^{2-}$  en el periodo de estudio de una década, con un aumento promedio de 3.08% por año. El periodo de 2004 a 2009 muestra un aumento en  $\text{SO}_4^{2-}$ , con un descenso en 2010, seguido de una tendencia aparente a permanecer constante. Esto muestra el impacto potencial en el área de estudio sobre diferentes receptores: áreas agrícolas, cuerpos de agua y edificios que forman parte del patrimonio cultural (El Tajín presenta una recesión superficial de 4,2  $\mu\text{m}$  por año).

**Bravo A. H., Sosa E, R., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C, Sánchez A. P, Jaimes P. M., Retama H. A., Granados H. E. (2015). Spatial and temporal variation of the acid rain in the Mexico City Metropolitan Zone. 9<sup>th</sup> International Conference on Acid Deposition, Rochester New York, USA. October.**

**Sitio y año de muestreo:**

16 estaciones de la red de Depósito Atmosférico de la SEDEMA, Gobierno de la CDMX y a estación Ciudad Universitaria, en la Ciudad de México. Periodo de muestreo 2002-2014.

**Método de muestreo:**

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se determinó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC.

**Análisis de muestras:**

Se determinó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC. El periodo de muestreo para las estaciones de la REDDA fue semanal, mientras que para la SCA-CCA-UNAM fue semanal y diaria durante la temporada de lluvias.

**Resultados:**

El pH de las muestras decrece de Norte a Sur de la Ciudad de México, siendo el valor promedio ponderado anual más bajo con un pH de 3.8 para 2007. Se observa que la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue mayor con respecto a otros iones entre un 35 y 60%, y su correlación con los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{H}^+$  se incrementa en la zona Sureste de la Ciudad de México.  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  presentan su mayor depósito en el área oeste de la Ciudad de México. La Figura 33 ilustra el comportamiento de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  de 2003 a 2007.



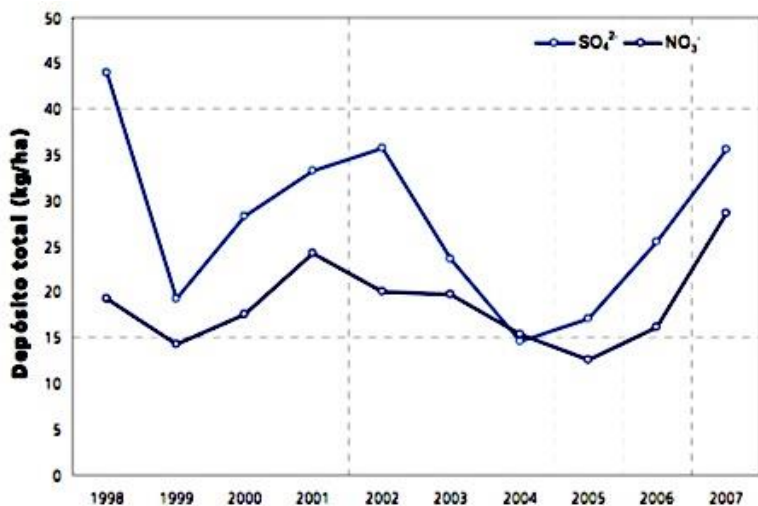


Figura 33. Comportamiento del ion sulfato y nitrato de 1998 a 2007. SEDEMA, 2007.

**Bravo A. H., Sosa E. R., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C, Sánchez A. P, Jaimes P. M., Retama H. A., Granados H. E. (2016). Sulfur and nitrogen compounds in wet atmospheric deposition and in ambient air as indicators of emissions reduction strategies at Mexico City. Scientific Symposium Deposition, National Atmospheric Deposition Program. Santa Fe, New Mexico, USA. October.**

#### **Sitio y año de muestreo:**

Estación de la SCA-CCA-UNAM en colaboración con la REDDA del Gobierno de la Ciudad de México en 16 sitios de muestreo (Figura 34). Periodo de muestreo 2003 al 2014.

#### **Método de muestreo:**

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático Aerochem Metrics Modelo 301. Se determinó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC. El periodo de muestreo para las estaciones de la REDDA fue semanal, mientras que para la SCA-CCA-UNAM fue semanal y diaria durante la temporada de lluvias.



*Figura 34. Equipo de muestreo utilizado por la SEDEMA para el depósito atmosférico.*

### **Análisis de muestras:**

Para la evaluación de la lluvia ácida, la colección de muestras de lluvia se realiza diariamente. Las mediciones de pH y conductividad se realizan en el laboratorio, así como la determinación de la concentración de iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ) por HPLC.

### **Resultados:**

Los niveles de  $\text{SO}_2$  han disminuido de 1990 a 2014 en aproximadamente un 90%, mientras que los de  $\text{NO}_x$  en un 20%. La relación  $\text{SO}_2/\text{NO}_x$  ha disminuido aproximadamente un 60%, lo que indica estrategias más efectivas para reducir el  $\text{SO}_2$  (cambio de combustible o reducción de azufre) que para las emisiones de  $\text{NO}_x$ . Esto, debido a que las fuentes de emisión de  $\text{NO}_x$  son diversas y también los  $\text{NO}_x$  son parte de complejos mecanismos de deposición atmosférica y fotoquímica.

**Sosa E. R., Bravo A. H., Alarcón J. A., Torres B. M.C., Sánchez A. P., Jaimes P. M., Granados H. E. (2016). Sulfate and nitrate in wet atmospheric deposition at the Gulf of Mexico and possible source regions of their precursors. Symposium Deposition, National Atmospheric Deposition Program. Santa Fe, New Mexico, USA. October.**

**Sitio y año de muestreo:**

Estación La Mancha, Veracruz, durante 2003-2015.

**Método de muestreo:**

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático Marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se determinó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC.

**Análisis de muestras:**

Para la evaluación de la lluvia ácida, la colección de muestras de lluvia se realiza diariamente. Las mediciones de pH y conductividad se realizan en el laboratorio, así como la determinación de la concentración de iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ) por HPLC.

**Resultados:**

En la costa del Golfo de México, el fenómeno de la lluvia ácida ha estado presente por más de una década, siendo la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  más alta que el  $\text{NO}_3^-$ . Desde 2003 hasta 2015, los valores anuales ponderados de pH en "La Mancha" han ido en aumento, pero todos los valores de pH están por debajo de 5.4; el valor más bajo de 4,81 se midió en 2007 y el valor más alto de 5,22 fue para el año 2015. La concentración del promedio ponderado anual para  $\text{SO}_4^{2-}$  está en el intervalo de 15 a 31  $\mu\text{eq/L}$ , y para el último año fue de 26  $\mu\text{eq/L}$ , que es similar al nivel más alto registrado en los EE. UU. (Estación TX03). La concentración del promedio ponderado anual para  $\text{NO}_3^-$  estuvo en el intervalo de 3.5 a 15  $\mu\text{eq/L}$  y para 2015 fue de 5.5  $\mu\text{eq/L}$ , que es menor que en los sitios de EE. UU. La relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  encontrada para "La Mancha" en 2015 fue de 4.8, siendo el valor más alto en comparación con otros sitios en el Golfo de México cuyas proporciones estuvieron entre 1.03 y 1.87.

**Bravo, A.H., Sosa, E.R., Alarcón, J.A.L., Torres, B.M.C., Sánchez, A.P., Jaimes, P.M., Granados, H.E., Gay, D., Lehmann, C. (2017). Evaluation of wet atmospheric deposition along the coast of the Gulf of Mexico - an international collaboration opportunity. Symposium Deposition, National Atmospheric Deposition Program. San Diego, California, USA. October.**

***Sitio y año de muestreo:***

La Estación “La Mancha” en Veracruz, México; estaciones de la NADP ubicadas en la costa del Golfo de México de Florida a Texas en los Estados Unidos. Muestreos del 2003-2005.

***Método de muestreo:***

El muestreo de la lluvia se realizó utilizando un equipo automático marca Aerochem Metrics, Modelo 301. Se tomó el valor de pH en campo y volumen de lluvia, se etiquetó y se conservó en refrigeración para su envío al laboratorio para su posterior análisis por HPLC.

***Análisis de muestras:***

Para la evaluación de la lluvia ácida, la colección de muestras se realizó diariamente. Las mediciones de pH y conductividad se realizan en el laboratorio, así como la determinación de la concentración de iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ) por HPLC.

***Resultados:***

Todos los iones están presentes en niveles mayores en “La Mancha” en comparación con cada uno de los sitios de muestreo en los EU, con excepción de los compuestos de nitrógeno ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ), que son comparados en sitios de EU. Los niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  en México fueron, en comparación a los sitios de la NADP, más altos que los de EU. La proporción entre  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  se ha utilizado como indicador de la efectividad de las reducciones de las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  en los EU. La relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  encontrada para “La Mancha” en 2015 fue de 4.8, el valor más alto en comparación con otros sitios en el Golfo de México, que tenían relaciones entre 1.03 y 1.87. Debido a los altos niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  y la proporción  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  encontrados en “La Mancha”, es importante monitorear las fuentes de emisión de  $\text{SO}_2$  en México.

#### 4.1.8 Capítulos en libros

**Parungo, P.F., Bravo, A.H., Keene, C.W. (1988). Rainwater chemical analyses. Ion concentrations and pH of rainwater. In: Farungo F and Miller J. Air Chemistry Studies over the Gulf of Mexico. National Oceanic and Atmospheric Administration. Environmental Sciences Group. Boulder Colorado. 354p.**

##### ***Sitio y año de muestreo:***

Sitios de muestreos a lo largo de la costa del Golfo de México, desde las costas de Galveston, Texas a Progreso, Yucatán. El crucero oceanográfico se desarrolló en julio y agosto de 1986.

##### ***Método de muestreo:***

Se colectaron simultáneamente dos tipos de muestras, a) por evento de lluvia y b) eventos secuenciales, con intervalos de 5 a 10 minutos dependiendo de la intensidad del evento de lluvia. Ambas muestras fueron colectadas en botellas de polietileno. Los eventos totales se obtuvieron utilizando un colector automático de depósito húmedo y seco Aerochem Metric, modelo 301.

##### ***Análisis de muestras:***

Se determinó el pH de las muestras inmediatamente después de su colecta. La concentración de aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  fueron determinadas por Cl.

##### ***Resultados***

Las muestras reportan un valor de pH en un intervalo de 4.0 a 6.1. El evento más ácido ( $\text{pH} \approx 4.2$ ) fue observado al Sur de Galveston, Texas y el menos ácido ( $\text{pH} \approx 6.0$ ) en el centro del Golfo de México. El catión con mayor concentración encontrado fue el  $\text{Na}^+$ ; las concentraciones de aniones presentan una distribución de la siguiente manera  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$  independientemente de la ubicación. Los datos sugieren que las partículas de sal marina son el componente dominante en la lluvia en esta zona, a pesar del hecho de que algunas nubes tienen un origen continental.

**Bravo, A.H., Torres, J.R., Harris, J., Saavedra, R.M.A., Sánchez, A P., Camacho, C.R., Sosa, E.R., Gamboa Rodríguez, M.T. (1996). Estudios de caso sobre química atmosférica y lluvia ácida, p. 434-457. En Vázquez-Botello, A., Rojas, G.J.L., Benítez, A.J., Zárate, L.D. (Eds.). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX Serie Científica 5. 666 p.**

***Sitio y año de muestreo:***

Crucero de investigación oceanográfica de la UNAM y la NOAA en 1986, así como la evaluación de la calidad del aire en Tabasco por la UJAT en 1990 y 1991; también los primeros resultados sobre el fenómeno de lluvia ácida en el Puerto de Veracruz desde 1992.

***Método de muestreo:***

Los muestreos se realizaron de manera secuencial durante los eventos de lluvia a bordo del buque (Figura 35) utilizando colectores de polipropileno y pluviómetros para volúmenes de precipitación en milímetros. Las muestras de lluvia fueron colectadas cada 24 horas en las horas posteriores a los eventos de lluvia, utilizando colectores de polipropileno y pluviómetros para volúmenes de precipitación en milímetros. En el laboratorio se realizó la determinación de especies iónicas ( $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ ) mediante métodos de vía húmeda recomendados por la WMO (1978).



*Figura 35. Muestreo del depósito atmosférico a bordo del buque crucero oceanográfico de la Armada de México.*



**Análisis de muestras:**

Se determinó el pH y conductividad por métodos convencionales y la determinación de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  por métodos de vía húmeda de acuerdo a lo establecido por la WMO (1978).

**Resultados:**

Se incluyen del crucero de investigación oceanográfica de la UNAM y la NOAA en 1986, así como la evaluación de la calidad del aire en Tabasco por la UJAT en 1990-1991 y los primeros resultados sobre el fenómeno de lluvia ácida en el Puerto de Veracruz desde 1992. Se infiere que la química atmosférica presente en esta cuenca es el principal mecanismo de transformación de la mezcla de contaminantes, registrados en aerosoles y lluvia ácida. Los niveles de concentración de los diversos compuestos tanto en partículas como en forma gaseosa, no alcanzan los niveles reportados para poblaciones continentales contaminadas; pero si se ubican por arriba de los correspondientes para ambientes no contaminados. Asimismo se reportó la presencia de valores netamente acídicos en varios eventos de precipitación ocurridos durante el crucero. Los valores reportados por la UJAT, indican que la actividad petrolera en Tabasco es la principal fuente de emisión de  $\text{SO}_2$ , aunque en ninguno de los sitios evaluados se rebasa la norma de calidad del aire de este contaminante. Por otra parte, se alcanzaron algunos valores ácidos (pH=5.6) en varios sitios de la región. La presencia de polvos favorece la neutralización de la precipitación ácida por su característica básica. Para el caso del Puerto de Veracruz se presenta la ocurrencia e identificación de lluvia ácida, dada la frecuencia de valores de pH en lluvia menor a un pH de 5.6 es significativa.

**Bravo, A.H., Sosa, E.R., Sánchez, A.P., Soto, A.R., Alarcón, J.M.L., (2005). Precipitación ácida en la costa del Golfo de México, p. 535-552. En: A.V. Botello, Rendón-von Osten, Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.) Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. UAC, UNAM e INE., 695 p.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona Arqueológica de El Tajín, Estación de Ecología Costera “La Mancha”, Fortaleza de San Juan de Ulúa e Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana Campus Mocambo, Veracruz. Año de muestreo 2003.

***Método de muestreo:***

Se utilizaron colectores automáticos de depósito atmosférico húmedo y seco, determinándose el valor de pH en campo, se registraron las muestras y se conservaron en refrigeración para su envío al laboratorio de la SCA-CCA-UNAM, de acuerdo al Programa de Aseguramiento de Calidad y Cadena de Custodia correspondiente.

***Análisis de muestras:***

En el laboratorio se determinaron nuevamente los valores de pH y conductividad, así como el análisis de iones por HPLC, de acuerdo a lo establecido por NADP de los Estados Unidos.

***Resultados:***

El valor ponderado de pH presenta una acidez que se incrementa en el siguiente orden: San Juan de Ulúa (pH=5.23), Universidad Veracruzana Mocambo (pH= 5.05), “La Mancha” (pH= 4.74), El Tajín (pH= 4.67). Se evidencia la presencia del fenómeno de depósito atmosférico ácido en todos los sitios de estudio.

**Sosa, R.E., Alarcón, J.A.L., Torres, B.M.C., Sánchez, A.P., Herrera, C. (2014). Evaluación de la deposición atmosférica ácida en la Costa del Golfo de México. P. 675-692 En: Botello, A.V., Rendón von Olsen J., Benítez, J.A., Gold-Bouchot, G. (eds.) Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. UAC, UNAM-ICMyL, CINVESTAV-Universidad Mérida. 1176p.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona arqueológica de El Tajín, Estación de Ecología Costera “La Mancha”, Fortaleza de San Juan de Ulúa e Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana Campus Mocambo, Veracruz. Año de muestreo 2003-2005.

***Método de muestreo:***

Se utilizaron colectores automáticos de depósito atmosférico húmedo y seco, se determinó el valor de pH en campo por métodos electrométricos, registrándose las muestras y se conservaron en refrigeración para su envío al laboratorio de la SCA-CCA-UNAM, de acuerdo al Programa de Aseguramiento de Calidad y Cadena de Custodia correspondiente. Se instaló una estación meteorológica automática para el registro de parámetros meteorológicos.

***Análisis de muestras:***

En el laboratorio se determinaron nuevamente los valores de pH y conductividad, así como el análisis de iones por HPLC, de acuerdo a lo establecido por NADP de los Estados Unidos.

***Resultados***

Los valores promedio anuales ponderados de pH para El Tajín fueron de 4.55, 4.52 y 4.66 durante los años 2003, 2004 y 2005 respectivamente, presentando este sitio los valores de mayor nivel de acidez en la cota del Golfo de México. De acuerdo con los resultados encontrados, el valor ponderado de pH presenta una acidez que se incrementa en el siguiente orden: San Juan de Ulúa (pH=5.23), Universidad Veracruzana Mocambo (pH= 5.05), “La Mancha” (pH= 4.74), El Tajín (pH= 4.67). Se evidencia la presencia del fenómeno de depósito atmosférico ácido en todos los sitios de estudio.

#### **4.2 Estudios elaborados por la Sección de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.**

Los estudios sobre depósito atmosférico desarrollados por este grupo se enfocan al estudio comparativo de la composición que presenta la precipitación en la Ciudad de México con sitios de diferentes condiciones topográficas y meteorológicas, así como el desarrollo de los mecanismos de formación de lluvia ácida.

La Sección de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, estuvo a cargo del M. en I. Armando Báez Pedrajo, fue fundado en el año de 1977; desarrollando las líneas de investigación en:

- 1) Estudio de la composición química de la precipitación pluvial y del agua de nube.
- 2) Contaminación en ambientes interiores y exteriores por carbonilos.
- 3) Determinación de peróxido de hidrógeno en agua de lluvia, fase gaseosa.
- 4) Determinación de metales pesados en aerosoles.

Su misión es entender el comportamiento de los gases y su función en la atmósfera, así como determinar los diversos mecanismos químicos en los procesos asociados en la dinámica atmosférica, determinando varias rutas y procesos de formación de elementos y compuestos que determinan la calidad del aire.

#### 4.2.1 Artículos en revistas científicas de distribución internacional con arbitraje

**Báez, A., Padilla H. & González O. (1986). Acid rain over Mexico City Valley and surrounding rural areas. Geofísica Internacional. 25 (2): 315-346.**

***Sitio y año de muestreo:***

Cd. de México (Lomas de Chapultepec, Cd. Universitaria) Rancho Viejo (Toluca), Laguna de Zempoala, Ajusco, Tlamacas, Nevado de Toluca. Eventos de lluvia de junio a septiembre de 1983

***Método de muestreo:***

Embudo y botellas de HDPE

***Análisis de muestras:***

Determinación de pH en los diferentes sitios de muestreos

***Resultados:***

Los resultados indican valores ácidos del pH en la mayoría de las muestras colectadas en el área urbana y aún en aquellas muestras que fueron obtenidas en lugares montañosos (pH<5.5). La variabilidad de los valores de pH puede deberse a mecanismos de transporte, las condiciones meteorológicas, la situación geográfica y el número de fracción colectada en el evento.

**Báez, A. and Belmont R. (1987). Comparative study of the chemical composition of rain of three different zones in Mexico. Contaminación Ambiental, 3: 25-36.**

***Sitio y año de muestreo:***

Tres zonas diferentes de México: Zona urbana (Cd. de México), zona costera (Minatitlán-Coatzacoalcos, en Veracruz) (temporada de lluvias 1984-1985) y zona agrícola (Guanajuato) en temporada de lluvias de 1985.

***Método de muestreo:***

Muestras de precipitación total colectadas en embudo y botellas de HPDE

***Análisis de muestras:***

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> método turbidimétrico

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> método colorimétrico brucine

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> método colorimétrico (reacción Nessler)

pH y conductividad

***Resultados:***

Los resultados de este estudio regional indicaron que están condicionados a las fuentes locales de contaminación (Figura 36). Las concentraciones de los iones determinados variaron de lugar a lugar. La influencia de la atmósfera fuertemente contaminada de la Cd. de México se reflejó en la química de la lluvia. Las concentraciones más altas de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> se encontraron en Cd. de México. Las emisiones industriales en el sitio de muestreo en Salamanca, contribuyeron a tener concentraciones más altas de los iones en el agua de lluvia, que aquellos valores encontrados en la zona predominantemente agrícola y de la zona que está bajo la influencia de condiciones meteorológicas marítimas.

VWM pH Guanajuato 6.48

VWM pH Cd. de México: 5.34

VWM pH Veracruz: 4.60

Las concentraciones más altas de iones se encontraron en Cd. de México y las más bajas en la zona agrícola.



	Amount of precipitation (mm)	pH	H <sup>+</sup>	μeq L <sup>-1</sup>				Σ <sup>+</sup> /Σ <sup>-</sup>	
				NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Mexico City, 1984-1985 (n = 29)</b>									
Minimum	2.5	4.59	0.04	92.9	75.3	8.2	30.7	142.0	
Maximum	124.1	7.40	25.7	393.0	468.0	68.9	110.0	476.0	
Arithmetic mean	41.6	5.48*	3.3	211.0	208.0	33.4	62.4	249.0	
Standard deviation	31.6	—	6.0	74.1	102.0	16.9	21.8	79.2	
Volume-weighted mean	—	5.34*	4.6	170.0	157.0	24.5	59.7	220.0	1.27
<b>Bajío Zone (Guanajuato State) 1985 (n = 54)</b>									
Minimum	10.2	5.45	0.008	10.7	10.0	1.6	7.1	39.6	
Maximum	178.9	8.10	3.50	334.0	609.0	104.0	66.4	500.0	
Arithmetic mean	64.0	6.45*	0.35	117.0	108.0	10.9	26.8	139.0	
Standard deviation	32.2	—	0.62	65.5	116.0	14.2	12.4	101.0	
Volume-weighted mean	—	6.48*	0.33	107.0	91.8	9.5	23.7	129.0	1.36
<b>Minatitlán-Coatzacoalcos (Veracruz State) 1984-1985 (n = 26)</b>									
Minimum	23.4	3.75	0.022	9.3	6.0	4.1	7.1	20.8	
Maximum	178.0	7.66	178.0	397.0	135.0	84.7	132.0	362.0	
Arithmetic mean	104.0	4.66	21.7	86.2	33.6	21.9	12.6	119.0	
Standard deviation	41.3	—	38.5	94.1	31.9	20.3	25.6	81.2	
Volume-weighted mean	—	4.60	25.0	80.3	28.9	18.6	10.9	109.0	1.27

Figura 36. Concentración de iones (μeq/L) determinados por Báez et al., 1987, en tres sitios de México.

**Báez, A.P., Belmont, D.R. and Padilla, H. (1993). Variation of chemical composition of wet precipitation, using a sequential sampling: urban-rural areas comparison. *Atmósfera*, 6: 163-174.**

***Sitio y año de muestreo:***

Ciudad Universitaria (Cd. de México) y Rancho Viejo (Edo. de México) de 1986 a 1987.

***Método de muestreo:***

Embudo y botellas de plástico HDPE

***Análisis de muestras:***

Determinación de pH y conductividad.  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  (absorción atómica),  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  (según standards methods (APHA, 1975) empleando los siguientes métodos  $\text{SO}_4^{2-}$  método turbidimétrico,  $\text{NO}_3^-$  colorimétrico brucine,  $\text{NH}_4^+$  por método colorimétrico (reacción Nessler).

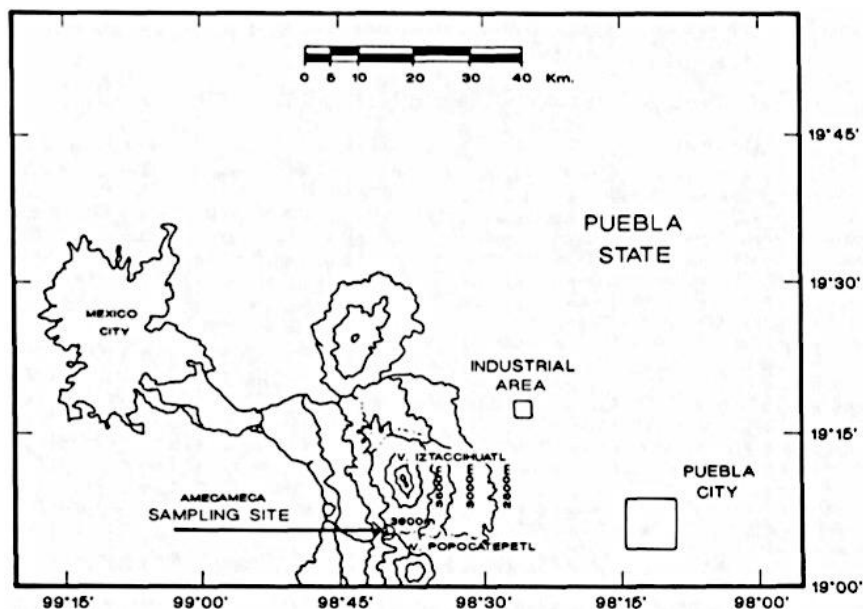
***Resultados:***

Los resultados indicaron que los constituyentes químicos, determinados en las muestras de lluvia colectadas secuencialmente, decrecieron en su concentración iónica en la porción primera de los eventos de lluvia. Fue aplicada la prueba no paramétrica de Mann-Whitney-Wilcoxon a los datos, mostrando claramente que hubo diferencias significativas entre estos dos lugares de muestreo. Este estudio también permitió inferir los mecanismos más importantes de lavado atmosférico que actúan en el evento de lluvia y el posible origen de los principales iones analizados. En Cd. de México el pH varió de 3.88 a 7.10 en 1986 y de 4.31 a 7.11 en 1987 para el sitio Rancho Viejo el pH varió de 4.05 a 5.4 en 1986 y de 4.46 a 5.4 en 1987.

**Báez, A.P., Belmont, R.D., Azpra, E., Torres, M.B & Padilla, H.G. (1997). Cloudwater and precipitation chemistry at Popocatepetl Volcano Mexico: a high elevation sampling site. *Journal of Environmental Quality*, 26 (1), 253-258.**

***Sitio y año de muestreo:***

Muestras de nubes y agua de lluvia colectadas en Tlamacas (Volcán Popocatepetl) (Figura 37) y Sureste de Cd. de México en septiembre de 1992, 1994 y 1995.



*Figura 37. Sitio de muestreo de depósito atmosférico, Tlamacas.*

***Método de muestreo:***

Colección de agua de nube con colector pasivo

Colección de agua de lluvia: embudo y botellas de HDPE

***Análisis de muestras:***

Determinación de pH y conductividad. Análisis de iones inorgánicos HPLC y EAA

**Resultados:**

El agua de nube tuvo concentración más alta que el agua de lluvia, se encontró dependencia del origen y las trayectorias de la masa de aire.

Los resultados mostraron que el agua de la nube tenía una concentración iónica más alta que el agua de lluvia. Las concentraciones iónicas en las nubes y el agua de lluvia parecen indicar una clara dependencia del origen y las trayectorias de la masa de aire. Las nubes en las que las trayectorias de retroceso muestran el paso por zonas con poca o ninguna contaminación producen agua de nubes con bajas concentraciones iónicas (29 y 30 de septiembre de 1992). El 10 de septiembre de 1992, los vientos tenían un fuerte componente del este, eliminando la contaminación significativa de las fumarolas del cráter. Esta situación meteorológica produjo agua de lluvia extremadamente limpia. El pH en Tlamacas: en septiembre de 1992: 4.68 a 6.05, en julio de 1994: 6.28 a 7.37 y en julio de 1995: 6.54 a 6.6.

**Báez, A.P., R.D. Belmont, H.G. Padilla, (1997). Chemical composition of precipitation at two sampling sites in Mexico: A 7-years study. Atmospheric Environment. 31(6), 915-925.**

***Sitio y año de muestreo:***

Composición química de la precipitación húmeda colectada durante 7 años en un área urbana (Cd. de México) desde 1987 a 1993 y un sitio rural (Rancho Viejo, Edo. de México).

***Método de muestreo:***

En Ciudad de México de 1987 a 1990, la precipitación total diaria se colectó usando embudo y botellas de plástico HDPE y de 1991 a 1993 en un wet/dry automático (Cd. de México) y de 1987 a 1993 en Rancho Viejo la colecta de lluvia fue por eventos en fines de semana con embudo y botellas HDPE.

***Análisis de muestras:***

Determinación de pH y conductividad. Análisis de iones inorgánicos por HPLC y EAA.

***Resultados:***

En ambos sitios, el sulfato fue el ion más abundante seguido de amonio. Los patrones estacionales de concentración ponderada de volumen mensual (Figura 38) muestran que los valores más altos de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$  se midieron en mayo, al inicio de la temporada de lluvias en el centro de México. Los valores más bajos se observaron de julio a septiembre, los meses en que ocurrieron la mayoría de las tormentas. Se utilizó un modelo para seleccionar las variables; en Rancho Viejo, el modelo mostró que el  $\text{SO}_4^{2-}$  contribuyó con un 41% en la predicción de la concentración de  $\text{H}^+$ . En la Ciudad de México, a pesar de la alta concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de lluvia, este ion solo contribuyó con 0.46%, mientras que el  $\text{Ca}^{2+}$  contribuyó en la precipitación húmeda con 41%. Finalmente, no se notaron tendencias a largo plazo. El VWM  $\text{H}^+$  en Cd. de México para 1987-1990 fue de 23.51  $\mu\text{eq/L}$ , para 1991-1993 fue de 22.29  $\mu\text{eq/L}$  y para Rancho Viejo de 1987 a 1993 fue de 20.5  $\mu\text{eq/L}$ .

	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
<i>University of Mexico, 1987–1990 (N = 104)</i>						
VWM	131.3	41.45	70.51	9.67	93.51	23.51
SVWM	9.28	3.79	4.57	0.70	7.20	4.28
G. mean	132.6	36.71	70.87	9.28	88.35	5.41
Minimum	34.17	5.29	3.50	0.82	15.71	0.04
Maximum	600	255	344	47.54	498	251
<i>University of Mexico, 1991–1993 (N = 79)</i>						
VWM	75.30	34.82	33.07	3.67	76.16	22.29
SVWM	6.41	3.29	2.82	0.30	5.01	4.00
G. mean	74.61	32.81	31.48	3.63	74.25	4.43
Minimum	17.70	5.50	4.45	0.57	15.00	0.10
Maximum	268	202	363	31.15	264	275
<i>Rancho Viejo, 1987–1993 (N = 267)</i>						
VWM	39.75	15.65	9.26	2.53	26.91	20.50
SVWM	3.17	1.27	0.91	0.32	2.06	1.81
G. mean	32.52	14.19	6.14	1.63	21.96	14.94
Minimum	1.46	1.21	0.50	0.16	0.71	0.11
Maximum	284	179	146	45.90	307	199

*N* = number of samples.

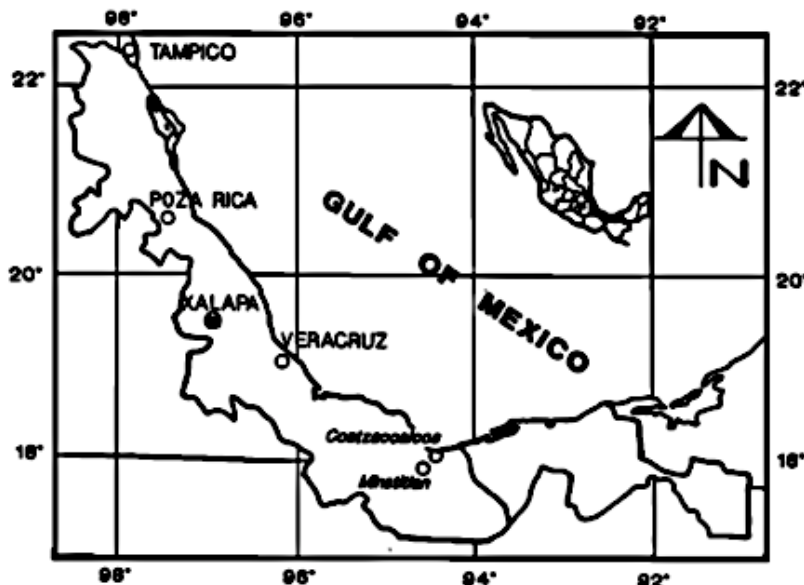
Figura 38. Parámetros estadísticos ( $\mu\text{eq/L}$ ) de las especies químicas determinadas por Báez et al., 2007.



**Báez, A.P., H. Padilla, R. Belmont, J. Cervantes, and D. Pereyra (1997) Rainwater chemistry at the eastern flanks of the Sierra Madre Oriental, Veracruz, México. Journal of Geophysical Research. 102(D19), 23,329-23,336.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona este de la Sierra Madre Oriental en Xalapa, Veracruz (Figura 39).  
Temporada de lluvia y seca de 1993-1995



*Figura 39. Muestreo de depósito atmosférico en Veracruz de acuerdo a Báez, 1997.*

***Método de muestreo:***

Lluvia colectada por eventos en botellas de HDPE y embudo tapado

***Análisis de muestras:***

Determinación de pH, conductividad. Análisis de iones inorgánicos HPLC y EAA.

***Resultados:***

Las muestras de lluvia se analizaron para los iones más importantes. Los resultados estadísticos indicaron que hubo diferencias significativas al nivel de confianza del 95%, entre la concentración iónica medida en las muestras colectadas en ambas temporadas.

Los valores menores de concentración encontrados durante la estación lluviosa podrían atribuirse a los procesos de dilución, ya que en esta temporada ocurre el 79% de la precipitación anual, en comparación con solo el 21% en la estación seca. Se encontraron correlaciones de pares iónicos altas y positivas entre los

iones más importantes en ambas temporadas. Aunque Xalapa se encuentra a menos de 100 km de la costa, la contribución marina de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  es significativo en comparación con la contribución no marina. En la temporada de lluvias, el enriquecimiento de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  se debe a las fuentes de emisión de distancia media y larga de Veracruz, como indican las trayectorias de retroceso de los vientos predominantes del Sureste. Por otro lado, en la estación seca, este enriquecimiento se debe a fuentes de emisión situadas en Tampico, Madero, Poza Rica y el Sureste del Sur de Texas, como lo indican los vientos predominantes del Noreste.

**Padilla, H.G., R. Belmont, M.B. Torres, and A.P. Báez (2000). Hurricanes Pauline and Nora rainwater chemical composition. Canadian Journal of Earth Sciences 37: 569-578.**

**Sitio y año de muestreo:**

Muestreo de agua de lluvia en la costa del Pacífico de México de los huracanes Nora (Manzanillo, Colima 18-23 septiembre de 1997) y Paulina (Huatulco, Oaxaca 8 y 9 de octubre de 1997 y Tapachula, Chiapas, 8-12 octubre de 1997) (Figura 40).

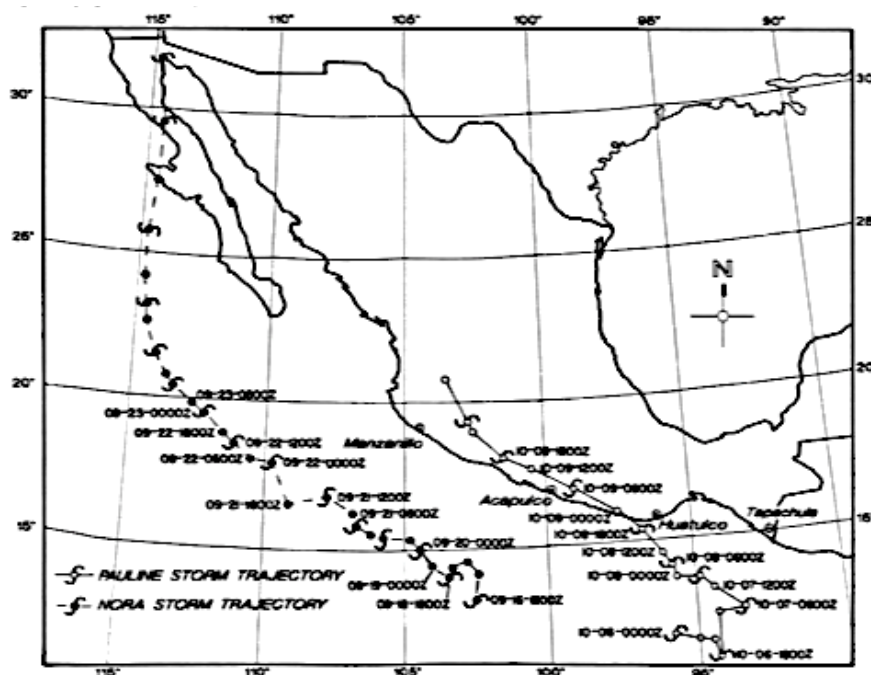


Figura 40. Muestreo de depósito atmosférico proveniente de eventos de huracanes en México.

**Método de muestreo:**

Embudos y botellas de HDPE

**Análisis de muestras:**

Análisis de iones inorgánicos por HPLC y EAA. Determinación de pH y conductividad.

**Resultados:**

Huracán Paulina: pH de 5.58 a 6.19. Huracán Nora: pH de 3.98 a 5.17. El muestreo de agua de lluvia bajo condiciones extremas presenta una oportunidad única para estudiar la composición de lluvia oceánica. Se reportó una concentración de sulfato de 0% se midió cerca del centro del huracán Paulina en Bahías de Huatulco. En otra muestra de agua de lluvia de bandas de lluvia Paulina se determinó una concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  por debajo del límite de detección.

Además, las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  fueron extremadamente bajas (0.02 y 0.025 mg/L, respectivamente). Algunas lluvias ligeras también se colectaron en Tapachula mientras Paulina estaba afectando severamente las Bahías de Huatulco. Muestras de lluvia del huracán Nora se tomaron junto con muestras de bandas en Manzanillo, donde fue interesante evaluar el profundo impacto de una planta de energía que tenía en la composición química de las lluvias del huracán Nora. El exceso de  $\text{SO}_4^{2-}$  no se correlacionó con  $\text{Mg}^{2+}$  en las bahías de Huatulco y Manzanillo. Sin embargo, se correlacionó con  $\text{Mg}^{2+}$  en Tapachula, a pesar de que esta ciudad se encuentra a 27 km de la costa. Una oxidación adicional de compuestos que contienen azufre orgánico combinado con un transporte simultáneo de aerosol marino se propone para explicar esta correlación.

**Báez, A.P., R.D. Belmont., R.M. García, M.C.B. Torres y H.G. Padilla. (2006). Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico. Atmospheric Research. 80: 67-85.**

***Sitio y año de muestreo:***

Ciudad de México (sitio urbano), periodos 1994-2000 y Rancho Viejo (sitio rural) en 1994 a 1999

***Método de muestreo:***

Ciudad de México: Muestras de lluvia diaria con colector automático wet/dry.

Rancho Viejo: Lluvia colectada por eventos en fines de semana en botellas de HDPE y embudo tapado.

***Análisis de muestras:***

Determinación de pH, conductividad. Análisis de iones inorgánicos por HPLC y EAA.

***Resultados:***

En la Cd. de México se obtuvieron resultados de VWMC anual máximo para  $\text{SO}_4^{2-}$  en marzo y el VWMC anual mínimo en julio y agosto. Se encontraron concentraciones más bajas de casi todos los iones y la concentración de  $\text{H}^+$  fue mayor en Rancho Viejo. Los  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NH}_4^+$  mostraron VWMC anual más altas en ambos sitios. El pH en la Ciudad de México, calculado a partir del VWM anual de pH fue de 4.95, que es un poco más alto que los valores de pH informados en otros países. A pesar de que las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  fueron menores en Rancho Viejo (Figura 41), el pH fue más bajo. Se calcularon las trayectorias de la masa de aire para las concentraciones individuales de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , observadas en cada sitio de muestreo para los datos de fin de semana. En Rancho Viejo, las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron más altas cuando las trayectorias de retroceso de masa de aire indicaron un flujo de viento desde la Ciudad de México y Toluca. El ion  $\text{H}^+$  tuvo el mismo comportamiento. Las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  también fueron más altas cuando la dirección del viento venía de las áreas urbanas.

En Cd. de México, la concentración de  $\text{H}^+$  fue menor, y  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  fueron más altos cuando la dirección del viento venía del sector Norte de la ciudad mientras que las relaciones  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NH}_4^+/\text{SO}_4^{2-}$  fueron 0.5 y 1.09 en 1994; 0.86 y 1.64 en 2000, respectivamente, lo que indica una disminución de las emisiones de  $\text{SO}_2$  derivadas del cambio de combustóleo a gas combustible.

	<b>Median</b>	
	<b>Mexico City (N= 83)</b>	<b>Rancho Viejo (N= 82)</b>
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>76.667</b>	<b>44.144</b>
<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>9.296</b>	<b>4.198</b>
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>42.857</b>	<b>20.633</b>
<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>4.522</b>	<b>1.022</b>
<b>K<sup>+</sup></b>	<b>2.046</b>	<b>3.033</b>
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>34.600</b>	<b>7.743</b>
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>3.689</b>	<b>1.885</b>
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>95.000</b>	<b>38.106</b>
<b>H<sup>+</sup></b>	<b>1.148</b>	<b>14.986</b>

Figura 41. Comparación de iones presentes en lluvia ( $\mu\text{eq/L}$ ) entre Ciudad de México y Rancho Viejo de 1994-1999



**García, R., Torres, M. C., Padilla, H., Belmont, R. Azpra, E., Arcega-Cabrera, F., Báez, A. (2006). Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the state of Mexico, Mexico. Atmospheric Environment. Vol. 40 (32): 6088-6100.**

***Sitio y año de muestreo:***

Muestreo de precipitación húmeda en temporada de lluvia (abril a septiembre) de 2001 y 2002. En la figura 42 se presenta el sitio de muestreo en Rancho Viejo Estado de México.



*Figura 42. Sitio de muestreo para el depósito atmosférico en Rancho Viejo.*

***Método de muestreo:***

Dos colectores de precipitación automáticos wet/dry. Uno para muestreo de iones inorgánicos y otro para muestreo de metales pesados

***Análisis de muestras:***

Análisis de Al, Cd, Cr, Mn, Ni, Pb y V (fracciones solubles e insolubles), por EAA y los principales iones inorgánicos  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en fracción soluble por HPLC. Determinación de pH y conductividad.

**Resultados:**

Los resultados de VWMC indicaron que la concentración más alta fue la del aluminio seguido en orden decreciente por Mn, V, Pb, Cr y Cd. Las solubilidades se calcularon en muestras de lluvia a pH<5 y pH>5, las solubilidades a pH<5 fueron mayores que las solubilidades a pH>5, como ha sido informado por otros autores. Las lluvias de Rancho Viejo tenían un pH de 4.5 indicando una naturaleza ácida. Comparando el VWMC de  $\text{Ca}^{2+}$  (7.79  $\mu\text{eq/L}$ ) con  $\text{NH}_4^+$  (46.36  $\mu\text{eq/L}$ ), indicó que el  $\text{NH}_4^+$  era el principal compuesto neutralizante. Las parcelas de dispersión mostraron que la acidez de la lluvia se debió principalmente a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  (55% y 22.7%, respectivamente). Las trayectorias de retroceso que utilizan el modelo NOAA-HYSPLIT se calcularon a 3000 metros sobre el nivel medio del mar e indicaron diferencias significativas en las concentraciones medias que dependían de la dirección del viento. Se encontraron buenas y positivas correlaciones entre todos los metales traza que indican un origen común. Se aplicó el análisis estadístico para todos los datos y obtener un mejor conocimiento del origen de los metales traza en el agua de lluvia.

**Báez, A., R. Belmont, R. García, H. Padilla, M.C. Torres. (2007). Chemical composition of rain water collected at a southwest site of Mexico, City, Mexico. Atmospheric Research. 86, 61-75.**

***Sitio y año de muestreo:***

Muestreo de agua de lluvia colectada en un sitio Suroeste de la Ciudad de México durante la temporada de lluvia de 2001 y 2002

***Método de muestreo:***

Dos colectores de precipitación automáticos wet/dry. Uno para muestreo de iones inorgánicos y otro para muestreo de metales pesados.

***Análisis de muestras:***

Análisis de los metales traza Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, V y Al en fracciones de lluvia soluble e insoluble por medio de EAA y los iones inorgánicos en fracciones solubles por HPLC. Determinación de pH y conductividad.

***Resultados:***

En la Ciudad de México se encontró un VWM pH de 5.08. Al presentó la mayor VVMC en fracciones solubles e insolubles. En las fracciones insolubles, el VWM de los otros metales traza disminuyó en el orden Mn, Pb, Ni, V, Cr y Cd, y en las fracciones solubles en el orden Mn, V, Ni, Pb, Cd y Cr. El  $\text{NH}_4$  presentó el VVMC más alto, seguido por  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ . Las trayectorias de masa de aire (Figura 43) se asociaron a las concentraciones de trazas de metales y de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{H}^+$  observado durante cada día de lluvia. Los factores de enriquecimiento relacionados con la abundancia relativa de elementos en la corteza se calcularon utilizando  $\text{Mg}^{2+}$  como referencia los cuales sugirieron que los principales iones tenían un efecto de origen antropogénico. Al,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  fueron los únicos elementos que tuvieron una fuente significativa de suelos. Se realizó un análisis factorial (Análisis de Componentes Principales) con rotación normalizada Varimax agrupando los elementos analizados en tres factores.

El factor 1 indicó una contribución por  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y fuentes antropogénicas para  $\text{SO}_4^{2-}$  y V. El factor 2 indicó una alta carga para Al, Ni y Mn, que indican la posible contribución de fuentes antropogénicas, pero con una contribución de suelo significativa para el Al. Las correlaciones de Pearson muestran que el Al se correlaciona con todos los metales; el Al presentó el mayor Flux en el depósito húmedo. Factor 3 indicó un origen antropogénico para  $\text{H}^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . La solubilidad de los metales traza no depende del pH del agua de lluvia.

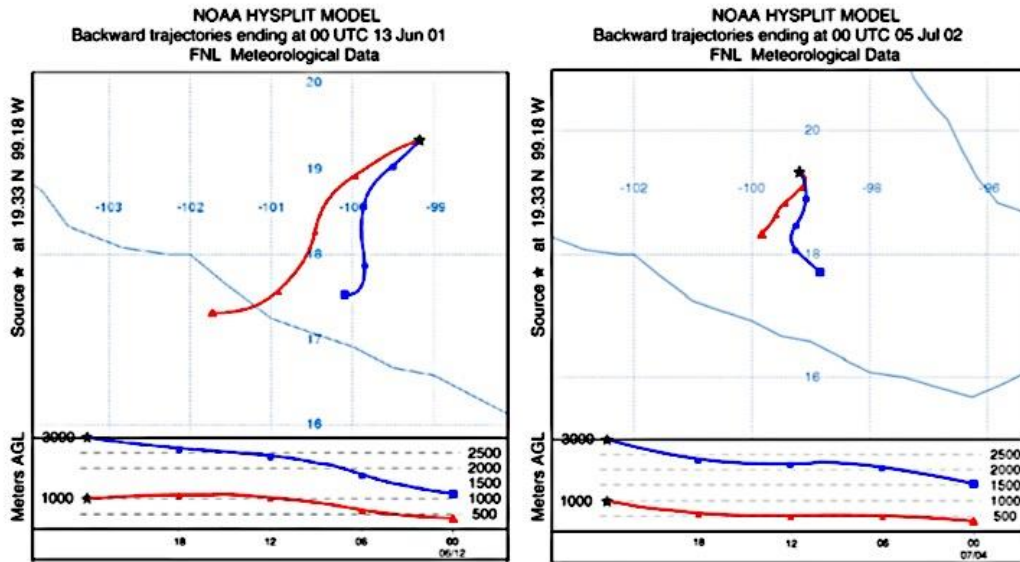


Figura 43. Trayectorias de retroceso observadas en el periodo de lluvias 2001-2002.

**Báez, A.P., R.D. Belmont, R.M. García, H.G. Padilla and MC. B. Torres (2009). Trends in chemical Composition of Wet Precipitation in Mexico City, Mexico: 1992-2007. The Open Atmospheric Science Journal. Vol. 3, 155-163.**

***Sitio y año de muestreo:***

Precipitación húmeda en la Ciudad de México de mayo a octubre de 1992 a 2007

***Método de muestreo:***

Colector de precipitación automática wet/dry

***Análisis de muestras:***

Determinación de pH, conductividad. Análisis de iones inorgánicos por HPLC y metales alcalinos por EAA.

***Resultados:***

Resultados de un estudio de variación en la composición química de la precipitación húmeda en un periodo de 16 años. Los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}^+$  fueron analizados. En la Cd. de México en los 16 años estudiados se tuvo un VWM pH de 4.60 a 5.85 (Figura 44). El análisis de correlación mostró una alta correlación positiva entre estos iones, lo que indica que las emisiones antropogénicas fueron las fuentes más importantes. Tendencias en las concentraciones anuales de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$  y alcalinidad se calcularon usando una regresión lineal de mínimos cuadrados.  $\text{SO}_4^{2-}$  en la precipitación húmeda mostró una tendencia decreciente significativa, correspondiente a la reducción en las emisiones de  $\text{SO}_2$  en el Valle de México debido al cambio de combustible a gas en centrales termoeléctricas e industrias pesadas y medianas. A pesar del hecho de que el número de vehículos de motor ha aumentado considerablemente en la Ciudad de México, el  $\text{NO}_3^-$  no mostró una tendencia creciente significativa. La relación  $\text{NH}_4^+/\text{Ca}^{2+}$  mostró una tendencia creciente significativa, debido principalmente a la disminución significativa en  $\text{Ca}^{2+}$ . Esta tendencia decreciente no fue tan marcada para la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

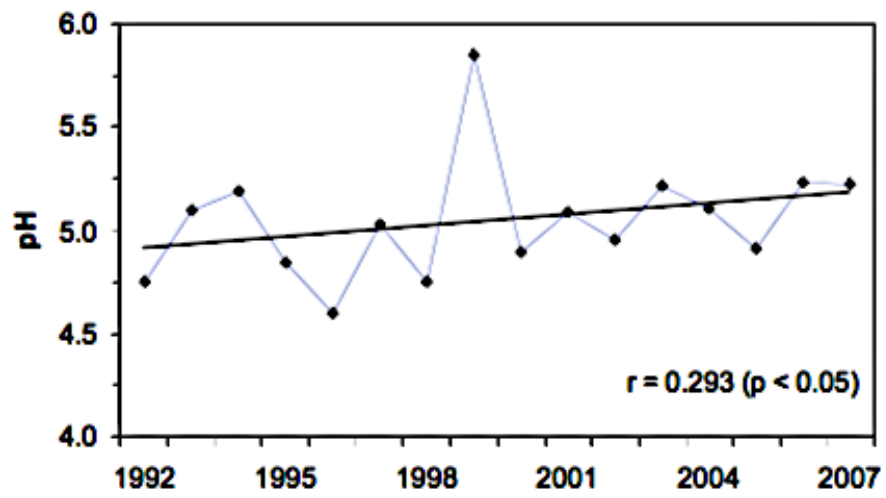


Figura 44. Tendencias de pH en la Ciudad de México desde 1992 a 2007, de acuerdo a Báez, et. al., 2009.



**García, R., R. Belmont, H. Padilla, M.C. Torres and A. Báez (2009). Trace metals and inorganic ion measurements in rain from Mexico City and a nearby rural area. Chemistry and Ecology. Vol. 25, No. 2, 71-86.**

***Sitio y año de muestreo:***

Rancho Viejo en el Estado de México y la Ciudad de México durante la temporada de lluvias de 2003 y 2004.

***Método de muestreo:***

El muestreo se realizó con dos colectores automáticos de precipitación wet/dry (Andersen, General Metal Works, Inc.), uno para muestras y el análisis de metales traza en la fracción soluble e insoluble, y otro para muestras en la fracción soluble para el análisis de iones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ ).

***Análisis de muestras:***

$\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron analizados por CI, mientras  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  fueron analizados por EAA. Los metales pesados (Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y V) fueron analizados por EAA mediante la técnica de horno de grafito.

***Resultados:***

Los VWM de Al presentaron el valor más alto de todos los elementos, tanto en las fracciones solubles como insolubles. El pH promedio en Rancho Viejo fue de 4.92 y para la Ciudad de México fue de 5.75. Los iones con las concentraciones más altas fueron  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  seguido de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  (Figura 45). La correlación en Rancho Viejo aplicando la técnica de Spearman mostró que la acidez fue causada por  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , y el ion neutralizador más importante fue  $\text{NH}_4^+$ . Valores altos del factor de enriquecimiento sugieren que la Ciudad de México se encuentra mayormente enriquecida por Cd, Cr, Mn, Pb y V que en el sitio de Rancho Viejo. Los valores del factor de enriquecimiento apoyan la idea de que los metales observados en el agua de lluvia tienen un origen antropogénico.

Las trayectorias de las masas de aire se asociaron con las concentraciones de metales traza y de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$  observado durante cada día de lluvia.

Ion	Average (mg/L)	
	Rancho Viejo	Ciudad de México
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.73	2.37
Cl <sup>-</sup>	0.27	0.38
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.34	2.64
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.64	1.46
Na <sup>+</sup>	0.09	0.31
K <sup>+</sup>	0.25	0.09
Ca <sup>2+</sup>	0.16	0.20
Mg <sup>2+</sup>	0.074	0.04
pH	4.92	5.75

*Figura 45. Promedio de concentración de iones inorgánicos (mg/L) en agua de lluvia (fracción soluble) en Rancho Viejo y Ciudad de México, García et. al., 2009*

### **4.3 Estudios elaborados por la Universidad Autónoma del Carmen, Campeche.**

En lo que se refiere al muestreo del depósito atmosférico en la costa y sitios marítimos, así como el estudio de cargas críticas destacan los trabajos desarrollados por la Universidad Autónoma del Carmen.

El Grupo de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Carmen, en Campeche desde el año de 2002 desarrolla las siguientes líneas de investigación:

- 1) Química atmosférica
- 2) Ciencias ambientales
- 3) Monitoreo de emisiones
- 4) Monitoreo de aire
- 5) Evaluación de Impacto Ambiental
- 6) Investigación en Contaminación Atmosférica

#### **4.3.1 Artículos en revistas científicas de distribución internacional con arbitraje**

**Cerón, R. M. B., Padilla, H. G., Belmont, R. D., Torres, M. C. B., García, R. M., & Báez, A. P. (2002). Rainwater chemical composition at the end of the mid-summer drought in the Caribbean shore of the Yucatan Peninsula. Atmospheric Environment, 36(14), 2367-2374.**

#### ***Sitio y año de muestreo:***

Del 27 agosto al 6 septiembre de 2000 y del 7 al 27 septiembre de 2000, se colectaron 37 muestras (11 en temporada de seca y 26 en temporada de lluvia) en el sitio de Puerto Morelos, Quinana Roo; en la península de Yucatán (Figura 46).



Figura 46. Sitio de muestreo en Puerto Morelos, Quintana Roo.

**Método de muestreo:**

Colector manual que consiste en un embudo de 27 cm de diámetro conectado a un envase de 2 litros.

**Análisis de muestras:**

37 muestras (11 en periodo de seca y 26 en periodo de lluvia).

El análisis de iones inorgánicos se realizó por EAA y HPLC.

**Resultados:**

Se comparó la composición de las muestras durante la temporada de seca y de lluvia, hubo contribución de sal marina del 91% para  $\text{Na}^+$  y 95% para  $\text{Mg}^{2+}$ . La concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  por contribución no marina (0.65 mg/L) fue similar a la reportada en bibliografía para sitios marinos 0.48 mg/L, la concentración de  $\text{NO}_3^-$  fue de 3.30 mg/L casi veinte veces mayor que el  $\text{NO}_3^-$  en el agua de lluvia oceánica (0.155 mg/L) (Figura 47). Las principales fuentes de contaminación sugeridas por el uso del modelo de mesoescala MM5 fueron los incendios forestales; el pH más bajo fue de 3.48, con altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  (4.51 mg/L), el 80% de las muestras de lluvia presentaron pH por debajo de 5.6.

Volume-weighted means (VWM) and standard deviations of the VWM (SDVWM) in  $\text{mg l}^{-1}$  for wet precipitation collected in Puerto Morelos

Sampling period	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{H}^+$	$\text{SC}^{\text{a}}$ ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	$\text{IB}^{\text{b}}$ (%)
<i>First</i>											
$N^{\text{c}}$	11	11	11	7	7	7	7	9	11	9	
VWM	1.21	5.32	6.88	3.51	0.14	0.35	0.38	0.12	0.092	54.8	2.70
SDVWM	0.36	1.98	1.77	1.31	0.05	0.14	0.15	0.02	0.027	9.3	
<i>Second</i>											
$N^{\text{c}}$	26	26	26	21	21	20	21	23	22	17	
VWM	1.01	3.45	1.91	2.03	0.10	0.23	0.22	0.10	0.028	21.9	0.97
SDVWM	0.22	0.53	0.54	0.38	0.03	0.11	0.04	0.02	0.007	3.0	
<i>All</i>											
VWM	1.06	3.97	3.31	2.4	0.11	0.26	0.26	0.10	0.046	31.4	1.21
SDVWM	0.19	0.67	0.71	0.44	0.02	0.09	0.05	0.01	0.010	3.9	

<sup>a</sup> Specific conductance.

<sup>b</sup> Ion balance (calculated from  $\mu\text{eq l}^{-1}$ ).

<sup>c</sup> Number of samples.

Figura 47. Concentraciones ponderadas reportadas por Cerón et al., (2002)

**Cerón RM.; H.P. Padilla; A. Báez; M. Muriel; J.G. Cerón (2004). "Improvement of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> stabilization in rainwater samples". Global Nest, the International Journal. Volumen 6. No.2. pp. 151-159.**

***Sitio y año de muestreo:***

El muestreo se llevó a cabo de 2000 a 2001 en cinco sitios: el sitio uno se posicionó en el techo del edificio principal del Centro de Ciencias Atmósfera de la UNAM en la Ciudad de México, el sitio dos en el techo de una casa residencial en la Ciudad de México, sitio tres ubicado en una zona residencial en la Ciudad de Orizaba, el sitio cuatro ubicado en la parte superior de una estación meteorológica ubicada en el centro de Puerto Morelos en Quintana Roo y el sitio cinco a bordo del Buque Oceanográfico "PUMA".

***Método de muestreo:***

El agua de lluvia fue colectada usando un vaso de precipitados de 2 litros y los colectores estaban lejos de cualquier posible fuente de emisión. Las muestras fueron transferidas a botellas de vidrio protegidas de la luz.

***Análisis de muestras:***

Se realizó un estudio con disoluciones y muestras estándar para observar la disminución de los niveles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> después de su preparación o recolección, utilizando diferentes métodos para preservarlos. Los métodos evaluados para preservar los niveles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en muestras de agua de lluvia fueron: a) Muestras de agua de lluvia helada, b) Filtrar muestras de agua de lluvia, c) Utilizando muestreadores de agua de lluvia acidificada, d) Agregar Na<sub>2</sub>SnO<sub>3</sub>.3H<sub>2</sub>O a las muestras de agua de lluvia y e) Almacenamiento de muestras y "dimmer" fluorescente a 0 y a 4°C.

***Resultados:***

En todos los casos, se observó que los peróxidos totales estaban constituidos por peróxido de hidrógeno y la fracción de peróxidos orgánicos no era significativa (Figura 48). Se propuso un protocolo de muestreo para los niveles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en agua de lluvia tomando muestras cada 15 minutos durante el muestreo secuencial para un evento de lluvia individual, formando un "dimmer" fluorescente en el sitio inmediatamente después de la recolección de muestras, y almacenando a 4°C y oscuridad.

Este procedimiento permite realizar campañas de muestreo incluso en sitios remotos. Los otros métodos evaluados no ejercen ninguna preservación.



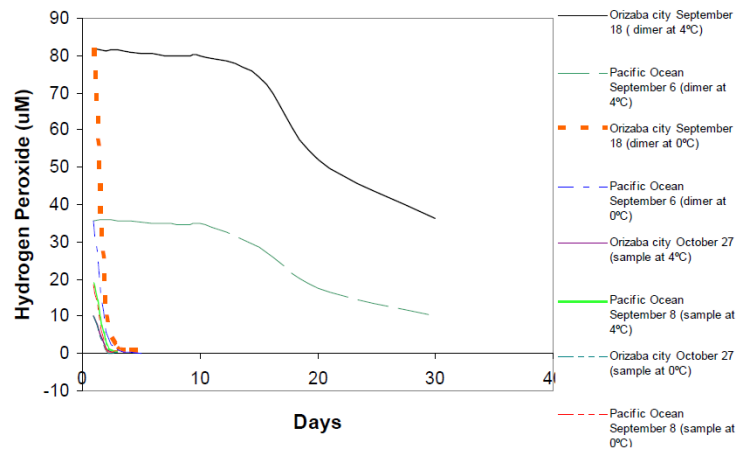


Figura 48. Niveles de disminución típico de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en muestras de agua de lluvia colectadas en los techos residenciales Cerón et al., (2004).

**Cerón, R. M., Cerón, J. G., Córdova, A. V., Zavala, J., & Muriel, M. (2005). Chemical composition of precipitation at Coastal and Marine sampling sites in Mexico. *Global NEST J*, 7(2), 212-221.**

**Sitio y año de muestreo:**

El estudio se llevó a cabo del 24 agosto de 1999 al 4 de octubre de 2001 en Acapulco (16 muestras en el año 1999), Cancún (10 muestras para el año 1999), Tapachula (15 muestras durante el año 1999), Puerto Morelos (28 muestras en el año 2000), Océano Pacífico (21 muestras colectadas en el año 2002) y Puerto Morelos (43 muestras para el año 2001). Los muestreos se realizaron en azoteas de hoteles (Acapulco, Cancún y Tapachula) y los muestreos mar adentro se realizaron a bordo del buque oceanográfico PUMA (Figura 49).

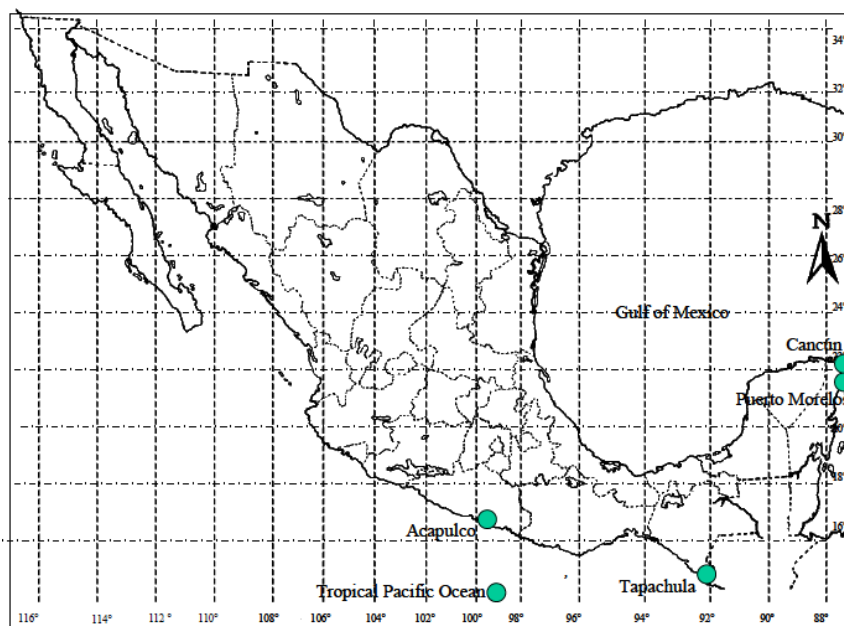


Figura 49. Localización de sitios de muestreo Cerón et. al., 2005.

**Método de muestreo:**

Colector manual que consiste en un embudo de 27 cm de diámetro conectado a un envase de HDPE de 2 litros; protocolo de muestreo de Galloway y Likens (1978).

**Análisis de muestras:**

Los análisis se realizaron en el laboratorio de Química atmosférica de la UNAM. Se midió pH, conductividad, así como iones inorgánicos.

El análisis de iones inorgánicos se realizó por EAA por flama ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y HPLC ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y con supresor ( $\text{NH}_4^+$ ).

**Resultados:**

Se realizó el análisis de resultados para: pH, conductividad y concentraciones ponderadas de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . Se estableció su abundancia iónica, correlación y el factor de enriquecimiento; posteriormente se compararon con otros valores representativos de mar y costa (Bravo et al.; 2000; Clark et al., 1998; Eklund et al., 1997; McDowell et al., 1990; Galloway et al., 1989; Hendry et al., 1984; Galloway et al., 1983; Galloway et al., 1982). Se aplicaron pruebas estadísticas: Kruskal-Wallis y Mann-Whitney, las cuales, determinaron que no tenían una distribución logarítmica normal y que presentaban diferencias significativas entre los sitios de muestreo. Los niveles de  $\text{Na}^+$  (8.5-118.6  $\mu\text{eq/L}$ ) y  $\text{Cl}^-$  (17.5-140.9  $\mu\text{eq/L}$ ) fueron los más altos,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  (2.3-26.8  $\mu\text{eq/L}$  y 0.9-3.1  $\mu\text{eq/L}$  respectivamente) fueron muy bajos en sitios expuestos principalmente al aire marítimo, como Cancún, Puerto Morelos y el Océano Pacífico por las altas tasas de precipitación, mientras que, el sitio de Cancún y Tapachula fueron más altos debido a la absorción de partículas del suelo. Con respecto a  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NH}_4^+$  las concentraciones determinadas (11.8-28.1  $\mu\text{eq/L}$  y 2.3-14.5  $\mu\text{eq/L}$ , respectivamente) fueron mayores a los valores de referencia reportados en la literatura, las cuales, están asociadas a las actividades agrícolas en este sitio. En Puerto Morelos destacó la alta concentración de  $\text{NO}_3^-$  (67.9  $\mu\text{eq/L}$ ), la cual, fue asociada con el arrastre del viento de la especie  $\text{NO}_x$  (usando el modelo de trayectorias HYSPLIT), producto de incendios forestales que dieron lugar a la acidificación del agua de lluvia, cuyo valor de pH fue menor a 5.6 en más del 80% de las muestras colectadas.

**Cerón, R.M., J.G. Cerón & M. Muriel (2006). Influence of geochemical and anthropogenic sources on rainwater chemical composition in two coastal sites impacted by the gas and oil industry in Campeche, México. Environmental problems in coastal regions Vol. 88. (ISSN 1743-3541). pp. 419-429. WIT Press. Reino Unido.**

***Sitio y año de muestreo:***

San Antonio-Cárdenas localizada a 18° 22' 12" N y 92° 07' 47" O y la Isla del Carmen localizada a 18° 41' 59" N y 91° 38' 24" O. Localizados en el Estado de Campeche dentro del Área Natural Protegida denominada "Laguna de Términos", (Figura 50). Los muestreos se realizaron desde el 1 de junio hasta el 31 de octubre de 2004.



*Figura 50. Laguna de Términos, Campeche, México.*

***Método de muestreo:***

Colectores automáticos: wet/dry (Tisch Environmental Inc., TE-78-100 model, USA).

***Análisis de muestras:***

Se utilizó un sistema de filtración Kontes Ultra-Ware, el análisis de algunos iones se realizó con EAA. Para ion de amonio se utilizó un cromatógrafo Alltech con detector UV-Visible, se midió pH y conductividad con un potenciómetro modelo EC10 y un equipo YSI 3200, respectivamente.

**Resultados:**

La constitución química del agua de lluvia fue similar a la reportada por diversos autores para sitios costeros, niveles de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , superaron los niveles de la concentración de fondo informado para sitios remotos costeros y marinos, lo que sugiere que las fuentes diferentes de sal marina del aerosol contribuyeron al proceso de mineralización del agua de lluvia en San Antonio Cárdenas. Del análisis de las trayectorias de retroceso de masa de aire (Figura 51) se concluye que la fuente principal de estos altos niveles de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fue la planta de gas comprimido ubicada a 10 km al NE de San Antonio Cárdenas.

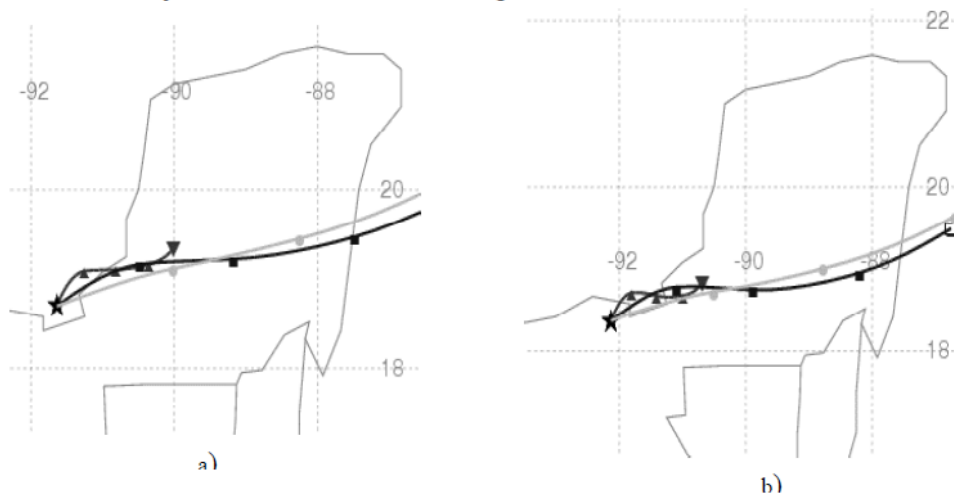


Illustration of 24-hour air mass back trajectories used to identify the main pollution sources for two sampling sites: a) Carmen Island and b) San Antonio Cardenas.

Figura 51. Trayectorias usadas para identificar las principales fuentes de contaminación de acuerdo a Cerón et al., (2006)

**Cerón, R. M., Cerón, J. G., Muriel, M., & Cárdenas, B. (2008). Identification of ion sources in rain water of a coastal site impacted by the gas and oil industry in the south east of Mexico. *Global Nest*, 10(1), 92-100.**

**Sitio y año de muestreo:**

San Antonio Cárdenas se encuentra en la Reserva Natural llamada "Laguna de Términos". Este sitio se encuentra en la Península de Atasta a 18° 37' de latitud Norte y 92° 13' de longitud Oeste a 40 km de la Isla Carmen y a 10 km de la planta de gas en Atasta. El periodo de muestreo fue del 1 de junio al 30 de octubre de 2004 como se puede observar en la Figura 52.



Figura 52. Muestreo del depósito atmosférico en el sitio de San Antonio Cárdenas, Campeche, México.

**Método de muestreo:**

Las muestras fueron colectadas con equipos automáticos: wet/dry (Tisch Environmental Inc., TE-78-100 model, USA) ubicados en la azotea de la Universidad Tecnológica de Campeche.

**Análisis de muestras:**

Se utilizó un sistema de filtración Kontes Ultra-Ware. El análisis de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó por EAA por flama, y el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se analizaron por CIA sin supresión, mientras que el  $\text{NH}_4^+$  se determinó por EUV-VIS. Se midió pH y conductividad con un potenciómetro modelo EC10 y un equipo YSI 3200, respectivamente.

**Resultados:**

Con respecto a la composición iónica y su abundancia relativa se encontró que para los cationes se tiene  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+$  y para especies anionicas:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ . Los niveles de  $\text{NO}_3^-$  (0.37-4.31 mg/L) y  $\text{SO}_4^{2-}$  (0.32-6.07 mg/L) superaron los niveles de la concentración de fondo informado para sitios remotos costeros y marinos, lo que sugiere que las fuentes diferentes de sal marina del aerosol contribuyeron al proceso de mineralización del agua de lluvia en San Antonio Cárdenas. Del análisis de las



trayectorias de retroceso de masa de aire corridas en HYSPLIT se concluyó que la fuente principal de estos altos niveles de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fue la planta de gas comprimido ubicada a 10 km al NE de San Antonio Cárdenas. En las Figuras 53 y 54 se presentan los resultados relevantes de este estudio.

*Table 2.* Volume-weighted mean and median concentrations, minimum and maximum values, ( $\text{mg l}^{-1}$ ); enrichment factors and detection limits for wet precipitation collected in San Antonio Cardenas

N= 26									
	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{H}^+$
<b>Mean</b>	2.47 ± 2.74	0.37 ± 0.24	1.06 ± 0.66	0.33 ± 0.16	3.85 ± 1.90	3.84 ± 4.39	2.47 ± 1.26	0.09 ± 0.08	0.09 ± 0.21
<b>Median</b>	1.70	0.36	0.99	0.33	4.44	2.55	2.62	0.07	0.03
<b>Minimum Value</b>	0.33	0.03	0.05	0.08	0.32	0.71	0.37	0.01	0.98
<b>Maximum Value</b>	13.44	0.84	2.41	0.81	6.07	21.50	4.31	0.28	2.41
<b>Enrichment Factor (EF)</b>	1.16	4.7	13.02	1.27	7.17	*	-	-	-
<b>Detection Limits</b>	0.002	0.006	0.01	0.002	0.22	0.04	0.17	0.042	-

*Figura 53.* Valores de concentración ponderada, mínimo, máximo y Factores de enriquecimiento.

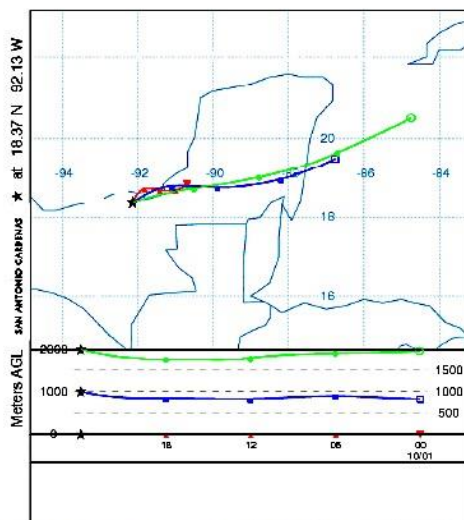


Illustration of a typical 24-hour air mass back trajectory for San Antonio Cardenas at three different heights: 0, 1000 and 2000 m above ground level (AGL)

*Figura 54.* Trayectoria de retroceso para San Antonio Cárdenas

**Cerón-Bretón, R. M., Cerón-Bretón, J. G., Guerra-Santos, J. J., Núñez-Lara, E., & Muriel-García, M. (2010). Contribution of anthropogenic and natural sources to the levels of trace elements in two costal sites in Campeche, Mexico. *International Journal of sustainable development and planning*, 5(3), 282-298.**

**Sitio y año de muestreo:**

San Antonio-Cárdenas localizada a 18° 22' 12" N y 92° 07' 47" O y la Isla del Carmen localizada a 18° 41' 59" N y 91° 38' 24" O. Ambos sitios localizados en el Estado de Campeche dentro del Área Natural Reservada y Protegida llamada "Laguna de Términos". Los muestreos se realizaron desde el 1 de junio hasta el 31 de octubre de 2004.

**Método de muestreo:**

Los muestreos simultáneos se realizaron con equipos automáticos (Tisch Inc. Y TE-78-100).

**Análisis de muestras:**

pH, conductividad y análisis de metales traza.

**Resultados:**

Se colectó un total de 52 muestras, se encontró un valor de pH promedio de 4.64 para San Antonio-Cárdenas y de 5.38 para Isla del Carmen indicando niveles de acidez en el agua de lluvia en San Antonio-Cárdenas, mientras que en el sitio de Isla del Carmen mostró una capacidad de amortiguamiento natural para neutralizar la acidez. Se analizaron las concentraciones de los elementos traza en estos dos sitios y su distribución, así como trayectorias de retroceso con el modelo HYSPLIT para localizar el origen de las masas de aire, se aplicó estadística paramétrica para el análisis de datos, así como el cálculo de correlaciones y factor de enriquecimiento.

En ambos sitios de muestreo, se encontraron fracciones significativas de Al, Fe y Mn en una forma insoluble; estos metales traza no mostraron enriquecimiento y se correlacionaron de manera significativa entre sí. Se encontró una relación entre los valores de pH superiores a 5 y los elementos cuyo origen principal fue la corteza (Al, Fe y Mn), sugiriendo la influencia de la corteza sobre el proceso de mineralización del agua de lluvia en ambos sitios.

El enriquecimiento de metales traza como Cu, Pb, Zn y Ni fue mayor en San Antonio-Cárdenas comparado con el sitio de Isla del Carmen debido a los vientos predominantes en San Antonio-Cárdenas (los vientos fueron provenientes del NE) mostrando la influencia de fuentes antropogénicas locales (probablemente, la planta de compresión de gas agrio en Atasta, ubicada al Noreste de San Antonio-Cárdenas y flota vehicular). Los resultados se presentan en la Figura 55.

Values	pH	Trace metals concentrations ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )						
		Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Ni
<b>San Antonio-Cardenas</b>								
Media	4.64	19.03	10.74	6.74	30.90	44.81	10.18	10.62
Maximum	6.27	32.00	22.00	14.00	58.00	75.85	18.30	16.40
Minimum	3.01	3.00	2.00	2.70	5.40	7.83	4.32	6.54
Standard deviation	0.76	8.64	6.40	3.70	14.28	20.05	3.24	2.35
<b>Isla Del Carmen</b>								
Media	5.37	28.77	19.66	10.29	25.05	39.85	4.88	6.55
Maximum	6.91	38.40	26.48	16.50	38.67	64.23	8.32	12.37
Minimum	2.98	11.41	7.61	2.82	13.16	15.54	1.97	1.78
Standard deviation	1.06	8.10	5.66	4.41	7.94	17.05	1.76	3.27

Figura 55. Determinación de metales pesados en el depósito atmosférico, Cerón et al., 2010.

**Cerón, J., Cerón R., Guerra, J., Aguilar C., Montalvo C., Guzmán J., Peña J., Carballo C., (2012). Changes on foliar nutrients, proteins and photosynthetic pigments due to controlled exposures to sulfur dioxide in *Rizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* and *Conocarpus erectus* individuals. International Journal of Energy and Environment.**

**Sitio y año de muestreo:**

Jardín botánico de la Universidad Autónoma de Isla del Carmen. Exposición en una cámara abierta durante 8 semanas (del 8 de agosto hasta el 15 de octubre de 2010).

**Método de muestreo:**

Se utilizó un invernadero para irrigar 7 especies nativas de la zona de Campeche: *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*, se expusieron individuos de tres meses de edad durante 8 semanas, una hora al día con SO<sub>2</sub> en tres diferentes concentraciones (50, 100 y 150 ppbv) usando aire filtrado de carbón dentro de una cámara abierta con generador de SO<sub>2</sub> marca Teledyne, modelo 700.

**Análisis de muestras:**

Se evaluó antes y después de la exposición el daño visible de la hoja y los efectos sobre el contenido de azufre, nutrientes y fotosíntesis de los pigmentos.

**Resultados:**

Un total de 245 plántulas fueron expuestas cuatro veces a la semana de junio a julio a agua de lluvia (10 mm). Seis tratamientos con cinco repeticiones, cada uno se estableció en condiciones de sequía e irrigación en diferentes valores de pH (2, 3, 4 y 5.6). Los resultados sugieren que la condición del estrés hídrico está relacionada con la gravedad de los efectos que muestran los individuos expuestos a la lluvia ácida a valores de pH de 2 y 3. Se observó un aumento significativo en el contenido de azufre en los tejidos de las hojas maduras, siendo mayor en los árboles de caoba, cedro rojo y sangre a pH 2 en condiciones de sequía. La relación clorofila a/b (Figura 56) mostró una disminución significativa en caoba, mangle blanco y sangre. Los árboles de madera y los niveles de nutrientes fueron sensibles a valores de pH más bajos.

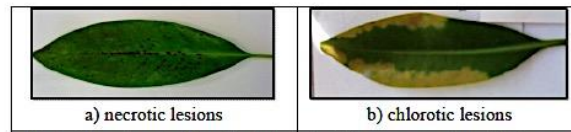


Fig 2. Necrotic and chlorotic lesions in Red mangrove individuals exposed to  $\text{SO}_2$ .

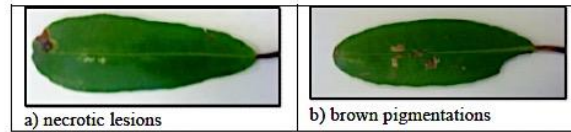


Fig 3. Necrotic and brown pigmentations in White mangrove individuals exposed to  $\text{SO}_2$ .

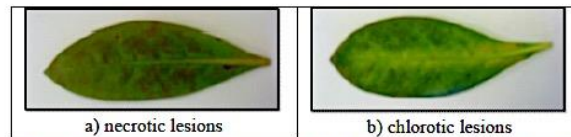


Fig 4. Necrotic and chlorotic visual damages in Buttonwood mangrove individuals exposed to  $\text{SO}_2$ .

*Figura 56. Daño visible de la hoja y los efectos sobre el contenido de azufre, nutrientes y fotosíntesis de los pigmentos.*

**Cerón, R.M., Cerón, J.G., Aguilar, C., Montalvo, C., Carballo, C., Cárdenas, B., & Carrillo J. (2012). Atmospheric dry deposition in the proximity of oil-fired power plants at Mexican Pacific coast. Journal of Environmental Protection, 3(09), 1228.**

***Sitio y año de muestreo:***

Se colectaron muestras semanales durante el año 2010, en Manzanillo, Colima.

***Método de muestreo:***

Se utilizaron colectores automáticos (wet/dry). Para la colección del depósito seco, dentro de la cubeta se usaron tres filtros como superficies sustitutivas.

***Análisis de muestras:***

Extracción con 980 mL de agua desionizada en un baño ultrasónico durante 15 min. Se determinó pH, conductividad, aniones y cationes, balance iónico y comparativo de conductividad, medida y conductividad calculada. Se usó CII, EUV-Vis y EAA para la determinación de iones.

***Resultados:***

De acuerdo con la Figura 57, el  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron los aniones más abundantes (53% del total), cuyos niveles sobrepasan las concentraciones de fondo de acuerdo con la literatura, se observaron altas contribuciones de las plantas que queman combustóleo localizadas viento arriba (efecto de brisa). A pesar de ello, los valores de pH determinados en las muestras fueron ligeramente ácidos (28%). Se determinaron altos Flux de  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ , los cuales muestran la influencia del complejo minero Peña Colorada, donde el amil-xantato de potasio se utiliza como colector en represas de relaves. El pH mínimo, máximo y promedio fue de 5.06 a 6.94 y 5.76, respectivamente.



**Table 3. Minimum, maximum and average concentration of major ions ( $\mu\text{Eq}\cdot\Gamma^{-1}$ ) and pH in dry deposition samples collected at Manzanillo.**

Parameter	Minimum	Maximum	Average
pH	5.06	6.94	5.76
$\text{Na}^+$	0.04	2.65	0.76
$\text{K}^+$	17.90	341.69	46.36
$\text{Ca}^{2+}$	0.02	69.83	10.49
$\text{Mg}^{2+}$	1.48	6.75	3.04
$\text{NH}_4^+$	0.03	74.83	21.98
$\text{NO}_3^-$	7.26	84.03	26.52
$\text{SO}_4^{2-}$	15.61	124.66	46.66
$\text{Cl}^-$	0.04	2.06	0.61

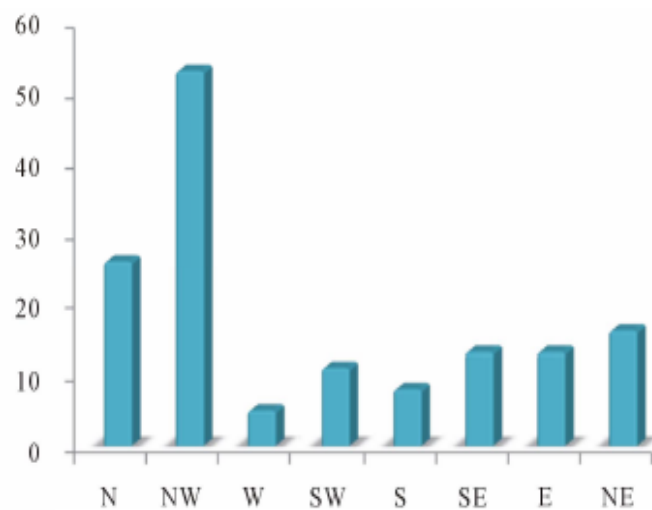


Figure 1. Wind direction frequency distribution for Manzanillo, during the study period

Figura 57. Principales resultados reportados en Cerón et al., 2012b.

Cerón, R., Cerón, J., Carballo, C., Aguilar, C., Montalvo, C., Vargas, C., & Rodríguez, M. (2012). Chemical characterization of dry deposition of pollutants in one industrial site in Guanajuato, México. *International Journal of energy and environment*, 6(5), 532-539.

**Sitio y año de muestreo:**

Salamanca, Estado de Guanajuato, durante 2010, Figura 58.



Figura 58. Localización del sitio de muestreo: Salamanca-Guanajuato.

**Método de muestreo:**

Las muestras de depósito seco se colectaron semanalmente durante 2010 en el estado de Guanajuato. Las muestras se colectaron con un muestreador wet/dry automático usando botellas de nylon.

**Análisis de muestras:**

pH, conductividad, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> mediante EAA, el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (determinado colorimétricamente), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl<sup>-</sup> por Cl.

**Resultados:**

Las muestras se extrajeron con agua desionizada y se analizó el pH, conductividad, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl<sup>-</sup>, Figura 59. Los valores de pH oscilaron entre 5.1 y 6.3, con un valor promedio de 5.66. Los iones más abundantes fueron K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. A partir de la cuantificación de efecto de neutralización de los principales componentes alcalinos, el papel de la prevalencia de K<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup> fue completamente evidente, lo que sugiere la influencia de las plantas industriales de cemento ubicadas contra el viento en el sitio de muestreo. Se estimaron los Flux de depósito seco para todos los iones medidos. Por otro lado, el depósito de azufre excedió ligeramente el valor de carga crítica reportado para algunos ecosistemas de Europa. Considerando que los resultados informados en este estudio no incluyen los flujos de depósito húmedo, incluso en este momento, el depósito de N y S no es un problema, por lo que es necesario tomar medidas de prevención para evitar que el depósito total de estos elementos exceda las cargas críticas.

Table II. Summary statistics for dry deposition in Salamanca site.

Ions	Concentration (μ Eq l <sup>-1</sup> )			Standard deviation
	Minimum	Maximum	Mean	
Na <sup>+</sup>	0.01	2.17	0.62	0.63
K <sup>+</sup>	25.83	174.17	69.66	35.5
Ca <sup>2+</sup>	0	20.45	5.45	5.43
Mg <sup>2+</sup>	1.65	6.58	2.69	1.18
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0	18.29	2.72	4.49
Cl <sup>-</sup>	0.03	1.89	0.59	0.51
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	16.44	105.93	49.71	22.76
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9.84	75.32	27.82	16.1
pH	5.1	6.3	5.7	0.28

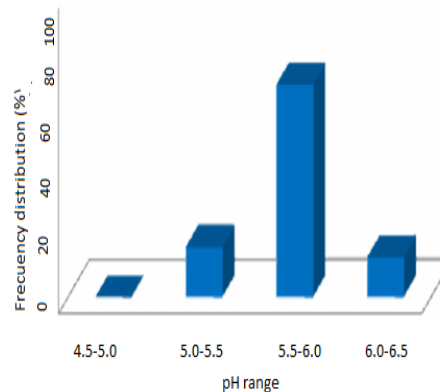


Figura 59. Valores de pH y concentración iónica reportados para el sitio Salamanca, Guanajuato.

**Cerón B., J. G., Cerón B. R. M., Cárdenas G.B., Ortíz A. J. A., Cruz Ch. E., Díaz M.B., Carballo P. C.G., Pérez L.T., Reyes T.J., Muriel G.M., and Guerra S. J.J. (2012) On the dry deposition of ionic species at two National Parks located in the vicinity of power plants in Mexico. PP. 31-38. International Journal of Energy and Environment. Vol. 6. No. 1. ISSN: 1109- 9577.**

***Sitio y año de muestreo:***

Durante 2009 y 2010, se trabajó de forma simultánea en dos sitios en México: la reserva de biosfera "Los Petenes" en Campeche y el Parque Nacional "El Chico" en Hidalgo (Figura 60). Se obtuvieron 18 muestras en los Petenes y 16 muestras para "El Chico".



a) Reserva de la Biosfera los petenes

b) Parque Nacional El Chico

*Figura 60. Parques Nacionales ubicados en las cercanías de termoeléctricas en México.*

***Método de muestreo:***

Se colectaron muestras de depósito seco usando filtros de nylon como superficies sustitutivas por periodos de exposición de una semana, de acuerdo con la metodología de Alonso, 2009.

***Análisis de muestras:***

Se determinó pH, conductividad, aniones y cationes, balance iónico y comparativo de conductividad medida y conductividad calculada.

**Resultados:**

Con respecto al pH, el sitio de “El Chico” presentó un intervalo de 4.39 a 7.47 con un promedio de 6.05, 50% de las muestras totales mostraron valores de pH por debajo de 5.0. Los resultados en “Los Petenes” muestran que la abundancia relativa fue  $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ . Mientras que en “El Chico” fue  $\text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{SO}_4^{2-}$ . Se concluyó que los altos niveles de  $\text{NO}_3^-$  encontrados en “El Chico” tuvieron su origen en incendios forestales que ocurren con frecuencia como parte de la dinámica natural de este parque. Sólo las fuentes locales de emisión contribuyeron al depósito de N en este sitio, además que la planta de energía ubicada en Tula, un sitio urbano e industrial cerca de “El Chico” no contribuyó al depósito de oligoelementos secos. Aunque los niveles de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron altos, los valores de pH obtenidos mostraron que estos sitios tenían suficiente capacidad de amortiguamiento para neutralizar la acidez. Sin embargo, es necesario hacer un diagnóstico preciso de ambos sitios, considerando que el valor del pH no es un indicador conservador de los efectos potencialmente ecológicos relacionados con el depósito ácido. Por lo tanto, proponemos que, en el trabajo futuro las cargas críticas para N y S se deben estimar en ambos sitios.

**Cerón, R. M., Cerón, J. G., Carballo, C. G., Aguilar, C. A., Montalvo, C., Benítez, J. A. & Gómez, M. M. (2013) Chemical composition, Fluxes and seasonal variation of acid deposition in Carmen Island, Campeche, Mexico. Journal of Environmental Protection, 4(08), 50.**

***Sitio y año de muestreo:***

El muestreo se llevó a cabo en el área natural protegida "Laguna de Términos" en la Ciudad del Carmen, Campeche. De abril a octubre de 2012.

***Método de muestreo:***

Para el muestreo del depósito húmedo se usó un colector automático (wet/dry) marca Tisch Environmental Inc., modelo TE-78-100.

***Análisis de muestras:***

A todas las muestras se les midió el pH y se realizó la determinación de iones utilizando EAA,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  por CII, el ion  $\text{NH}_4^+$  se determinó por EUV-visible.

***Resultados:***

El valor de pH fue en el intervalo de 2.02 a 7.18, con un promedio de 5.69 unidades, se observó que el 38.98 % del total de los eventos presentaron  $\text{pH} < 5$ , 3.39 % tenían  $\text{pH}$  entre 5 y 5.6, y 57.63%  $\text{pH} > 5.6$ . Los valores de pH disminuyeron de septiembre a octubre, cuando el viento cambia de SE a NE, se observó la influencia de frentes fríos y transporte de larga distancia de fuentes localizadas en el Golfo de México. Por el contrario, en el mes de agosto predominan los vientos alisos que favorecen la neutralización de la precipitación por el transporte de partículas de suelo (calcisoles). Se observó un efecto de dilución debido a las tasas de precipitación. La abundancia relativa de los iones fue  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^-$ . Los valores de pH y la composición iónica de la lluvia se presentan en la Figura 61.



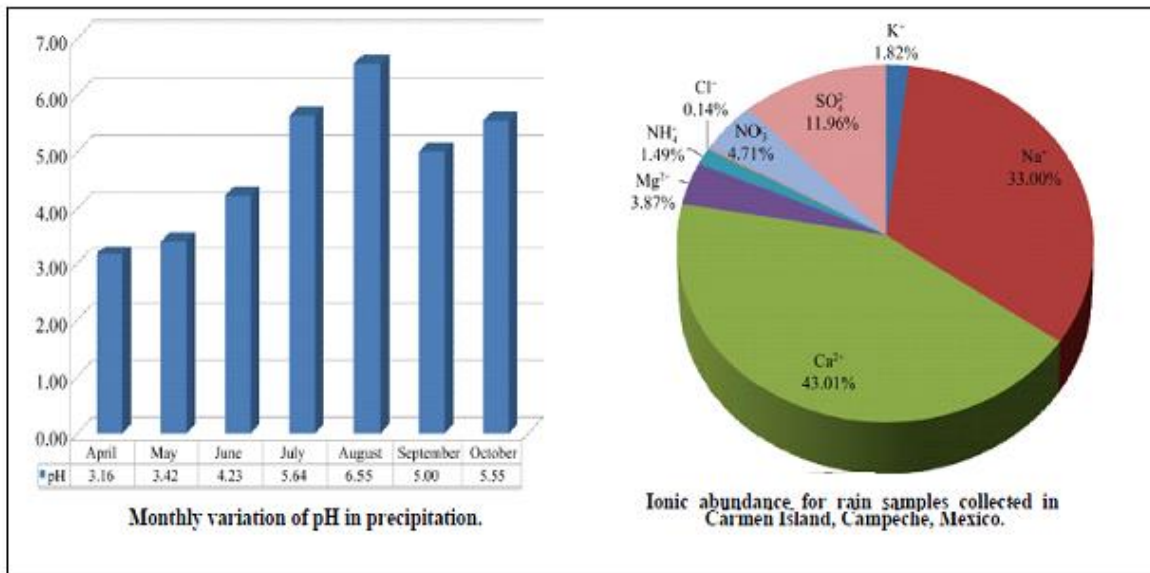


Figura 61. Valores de pH y composición iónica de la lluvia colectada en Ciudad del Carmen



**Método de muestreo:**

Colector automático de muestreo wet/dry (Tisch Environmental Inc., TE-78-100).

**Análisis de muestras:**

El pH de las muestras se determinó con un potenciómetro; mientras que la conductividad específica se determinó mediante el uso de un medidor de conductividad. La determinación de metales alcalinos y alcalinotérreos:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó mediante el uso EAA. La determinación de aniones inorgánicos se hizo por cromatografía de iones con detección por conductividad. Finalmente, la determinación de  $\text{NH}_4^+$  mediante colorimetría, empleando el método de Fenato.

**Resultados:**

El depósito húmedo fue colectado en Ciudad de México, Área Metropolitana de Monterrey y Parque Nacional "El Chico", durante 2009 y 2010. El parámetro de pH, conductividad Cl,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  fueron determinados. En la Ciudad de México los niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron mayores que los niveles de  $\text{NO}_3^-$ , el ion  $\text{NH}_4^+$  provino de fuentes mixtas (emisiones vehiculares y actividades agrícolas). La zona Metropolitana de Monterrey presentó un depósito atmosférico alcalino debido a que los niveles de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  fueron altos, especialmente durante el periodo del Huracán "Alex". Se encontraron valores bajos de pH en el parque nacional de "El Chico" y las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  fueron altas, lo que sugiere la influencia de una fuente local (incendios forestales). El Flux (Kg/ha-año) para N- $\text{NO}_3^-$ , N- $\text{NH}_4^+$  y S- $\text{SO}_4^{2-}$  fueron 1.36, 2.74 y 4.84 para la zona Metropolitana de Monterrey; 7.27, 0.57 y 4.32 para "El Chico", y 5.97, 4.96 y 6.78 para la Ciudad de México, respectivamente.

**Cerón B. R.M., and Cerón B. J.G. (2014). Wet and dry deposition of trace elements in two sites in Carmen Island, Campeche, México. Transactions on Environment and Development. Vol. 10. 2014. Pp. 393-404. ISSN: 1790-5079.**

***Sitio y año de muestreo:***

Se colectaron muestras de depósito húmedo y seco en dos sitios de muestreo (urbano y manglar) en la Isla del Carmen, Campeche, México, de febrero a noviembre de 2013 (56 muestras en el sitio urbano y 66 en la zona de manglar).

***Método de muestreo:***

Las muestras se colectaron con un muestreador automático de depósito atmosférico (wet/dry). Las muestras de depósito húmedo se colectaron diariamente, mientras que el depósito seco se colectó semanalmente.

***Análisis de muestras:***

Después de su colecta a cada una de las muestras se midió pH, conductividad y se determinó la composición de aniones y cationes.

***Resultados:***

En el sitio urbano: el 9% del depósito húmedo fue menor a pH 5.6 y el 19% < pH 5.0, con un valor de pH promedio de 6.43. En el caso del depósito seco, el valor promedio fue 6.09, en la zona de manglar el pH promedio fue de 6.28. El 1.5% < pH 5 y 19.6% < pH 5.6, en el caso del depósito seco, el valor promedio fue 5.90, 11.4 % < pH 5 y 22.6 % < pH 5.6.

El  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{NO}^-$  fueron los iones más abundantes, contribuyendo en gran proporción a la masa iónica total. En ambos sitios de muestreo, fue evidente la influencia de las fuentes locales, y en el caso del sitio urbano, una fuente local (actividades de construcción) contribuyó a valores extremadamente altos de  $\text{Ca}^{2+}$ . Los Flux de N en ambos sitios de muestreo excedieron las cargas críticas y las concentraciones de fondo hemisféricas propuestas para ecosistemas sensibles y sitios marinos remotos. El depósito de N total en la isla Carmen ya está por encima del extremo superior del valor umbral informado para ecosistemas sensibles.

Las fuentes locales impulsaron la química del depósito total en ambas muestras sitios, los niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  permanecieron por debajo de los valores hemisféricos de fondo, lo que sugiere que la contribución de las fuentes regionales de este ion no fue significativa. Sin embargo, es necesario tomar medidas regulatorias locales para evitar que el depósito total de N sea una amenaza para los ecosistemas en la isla Carmen y en la Figura 63 se presenta la trayectoria de los vientos en la Isla del Carmen.

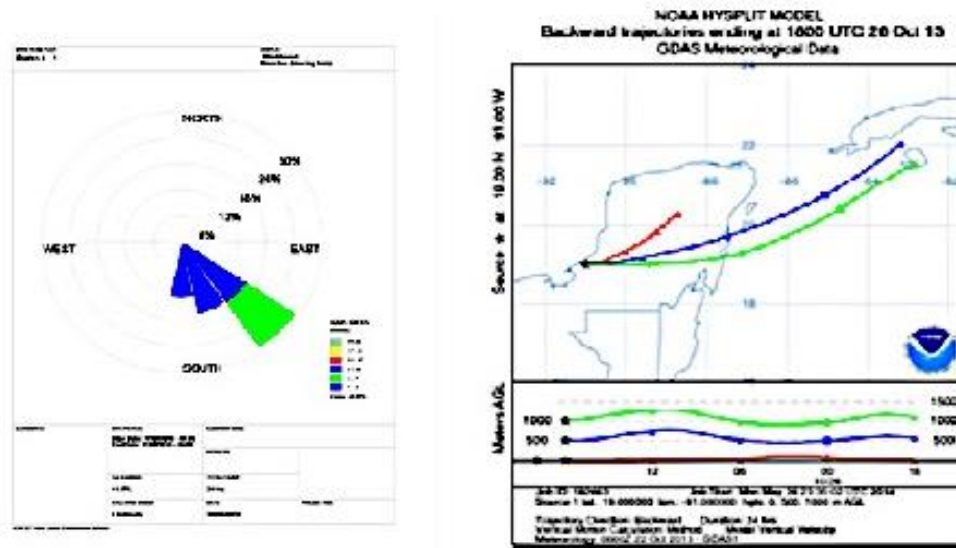


Figura 63. Análisis de vientos reportados en el estudio de depósito seco y metales traza en Isla del Carmen.

**Cerón, R. M; Cerón, J; Aguilar, C; Montalvo, C; Rustrian, E; Houbron, E; Ramírez, E; Muriel, M; Córdova, A; Carballo, C; García, A; Chi, H; and Hernández, M. (2015). Spatial and Temporal Trough fall Deposition Patterns on two regions at the Center and at the Southeast of Mexico. WSEAS Transactions on Environment and Development. Volumen 11, 2015, PP. 57- 72.**

**Sitio y año de muestreo:**

En la Figura 64 se muestran los sitios que se consideraron para este estudio: región 1 (Xicalango-Atasta), el muestreo se llevó a cabo del 6 de junio de 2014 hasta el 6 de enero de 2015, mientras que en la región 2 (Córdoba-Orizaba) del 29 de noviembre de 2014 al 7 de febrero de 2015.



Figura 64. Ubicación de las estaciones de muestreo en el sitio 1) Xicalango- Atasta.

**Método de muestreo:**

Se utilizaron colectores pasivos (resinas de intercambio iónico) para recolectar muestras en 23 puntos distribuidos a lo largo de estas dos regiones en un diseño de transectos múltiples.



**Análisis de muestras:**

Los iones retenidos se extrajeron con 100 mL de una disolución de KCl y se analizaron mediante colorimetría y turbidimetría.

**Resultados:**

En la región de Xicalango-Atasta el Flux de N y S fueron 0.8 y 9.22 Kg/ha-año, respectivamente. En la región de Córdoba-Veracruz el Flux de N y S fueron 0.38 y 46.97 Kg/ha-año respectivamente. El Flux de N en la región Xicalango-Atasta no excedió la carga crítica propuesta por otros autores; sin embargo, el Flux a través de la caída para S fue 3 veces mayor que los propuestos para áreas sensibles. El transporte a larga distancia de contaminantes regionales fue completamente evidente durante temporadas de otoño e invierno en la región de Córdoba-Orizaba. El Flux de N en la región 2 no excedió el valor de carga crítica propuesto para ecosistemas sensibles; sin embargo, el Flux de caída de S superó casi 15 veces el valor de carga crítica, lo que sugiere que esta región está altamente contaminada como se muestra en la Figura 65.

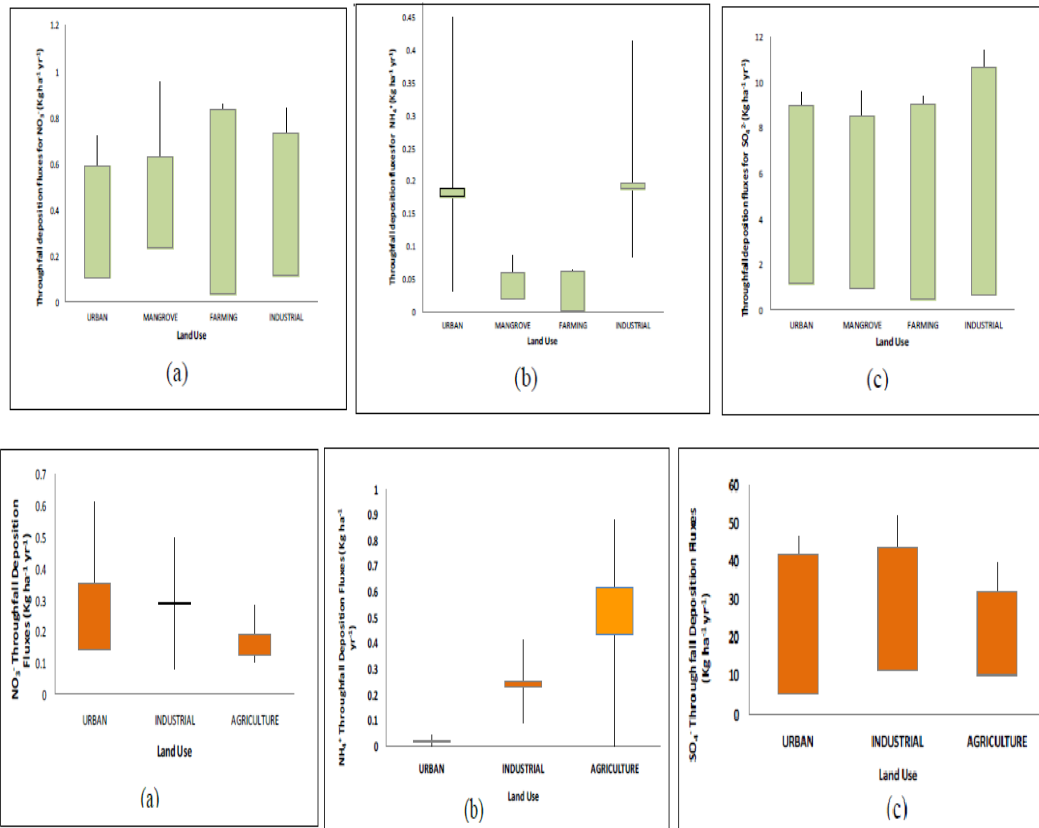


Figura 65. Flujos de depósito a) nitrato, b) amonio c) azufre para la región de Atasa (en verde) y Córdoba (naranja).

**Cerón-Bretón, R. M., Cerón-Bretón, J. G., García-Montero, A., Ramírez-Lara, E., Aguilar-Ucán, C. A., Montalvo-Romero, C., & Alderete-Chavez, A. (2015). Through fall deposition patterns for Nitrogen and Sulphur on ecosystems adjacent to one sour gas recompression plant in Campeche, México. Recent Advances on Mechanics, Materials, Mechanical Engineering and Chemical Engineering. INASE.**

**Sitio y año de muestreo:**

La investigación se llevó a cabo en la región de Xicalango-Atasta (Figura 66), en el estado de Campeche al Sureste de México. Del 6 de junio de 2014 al 6 de enero de 2015.

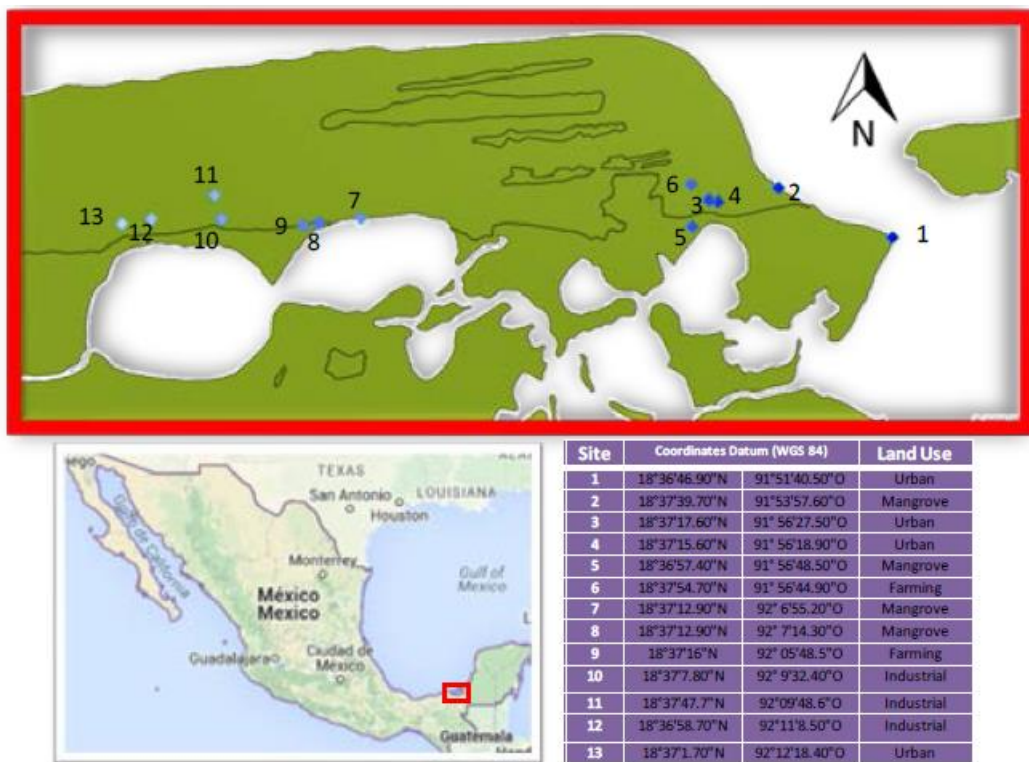


Figura 66. Sitios de muestreo para el depósito atmosférico proveniente de una zona industrial en Campeche, México.

**Método de muestreo**

Colectores pasivos basados en un ion de lecho mixto utilizando una columna de resina de intercambio (IER) para recoger muestras en trece puntos de muestreo distribuidos a lo largo de esta zona en un diseño de transectos múltiples.

**Análisis de muestras:**

Los iones retenidos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) por la columna de resina se extrajeron dentro de la misma columna de muestreo con una disolución de KCl, y se analizaron mediante colorimetría y turbimetría.

**Resultados:**

Los Flux de depósito de caída media para nitrógeno ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) y S ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) fueron 0.8 y 9.22 Kg/ha-año, respectivamente. El Flux de N no excedió la carga crítica propuesta para los ecosistemas sensibles; sin embargo, el Flux de caída para S fue 3 veces mayor que el propuesto para áreas sensibles, y 2 veces mayor que el valor reportado para bosques naturales, sugiriendo que el depósito de S podría ser una amenaza para los ecosistemas de manglares y pesquerías en la región. La contribución regional fue significativa durante las temporadas de otoño e invierno, cuando los contaminantes del aire transportados a larga distancia desde las plataformas mejoraron los niveles de fondo. Sin embargo, la planta local de compresión de gas ácido tuvo una gran influencia en estos niveles de fondo en la región de Xicalango-Atasta.

### 4.3.2 Artículos publicados en revistas nacionales

**Cerón R. M., Báez-Pedrajo, A., Padilla-Gordon, H., & Griselda, J. (2004) Contribución de incendios forestales a los niveles de nitrato y a la acidez del agua de lluvia en Puerto Morelos, Q. Roo, México. Un caso de estudio. Tec. Cienc & Ed. IMIQ 19(2), 55-64.**

***Sítio y año de muestreo:***

Puerto Morelos, Quintana Roo 20°50' N y 86° 54' O, en el techo de una estación meteorológica del ICMYL instalada en el muelle.

***Método de muestreo:***

Colector manual que consiste en un embudo de 27 cm de diámetro conectado a un envase de 2 litros.

***Análisis de muestras:***

37 muestras (11 en periodo de seca y 26 en periodo de lluvia).

El análisis de iones inorgánicos se realizó por EAA y HPLC.

***Resultados:***

En la Figura 67 se muestran trayectorias de los vientos hacia el sitio de Puerto Morelos para la campaña de muestreo. Se comparó la composición de la lluvia de la temporada de seca y de lluvia; para el Cl<sup>-</sup> la concentración ponderada fue de 3.98 mg/L; 5.32 µeq/L en el periodo de seca y 3.45 µeq/L en el periodo de lluvia, para SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> se determinó 0.65 mg/L; 1.21 µeq/L en el primer periodo, 1.01 µeq/L en el segundo periodo, para NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 4.51 mg/L, 6.88 µeq/L en el primer periodo, 1.91 µeq/L en el segundo periodo. Con respecto a los cationes: Na<sup>+</sup> 2.39 mg/L; 3.51 µeq/L en el primer periodo, 2.03 µeq/L en el segundo periodo, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> presentó 0.12 en el primer periodo, 0.10 segundo periodo, K<sup>+</sup> 0.14 en el primer periodo, 0.10 segundo periodo, Mg<sup>2+</sup> 0.255 mg/L; 0.38 µeq/L en el primer periodo, 0.22 µeq/L segundo periodo, Ca<sup>2+</sup> 0.26 µeq/L segundo periodo, para el H<sup>+</sup> 0.092 µeq/L en el primer periodo, 0.028 µeq/L segundo periodo; pH más bajo 3.48.

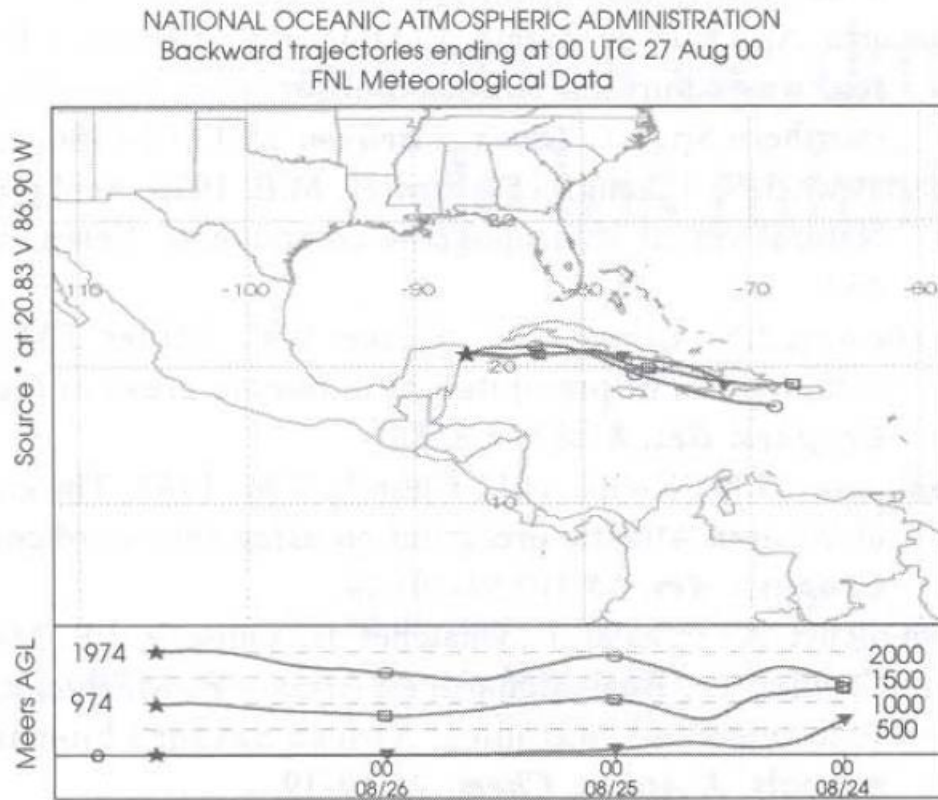


Figura 67. Sitios de muestreo en Puerto Morelos, Quintana Roo, México.

**Cerón B. J.G., Cerón B. R.M., Guerra S. J.J., Muriel. M. (2007) Deposición atmosférica de metales traza en dos sitios costeros en Campeche, México. Revista Tecnociencia-UNACAR. Julio-diciembre 2007. ISSN: 1870-9133.**

***Sítio y año de muestreo:***

Dos sitios en el Estado de Campeche, uno en el edificio de la Facultad de Química, en Isla del Carmen y el otro en el edificio de la Universidad Tecnológica de Campeche en San Antonio-Cárdenas, durante el periodo comprendido del 1 de junio al 31 de octubre de 2004.

***Método de muestreo:***

Colectores automáticos: wet/dry (Tisch Environmental Inc. TE-78-100).

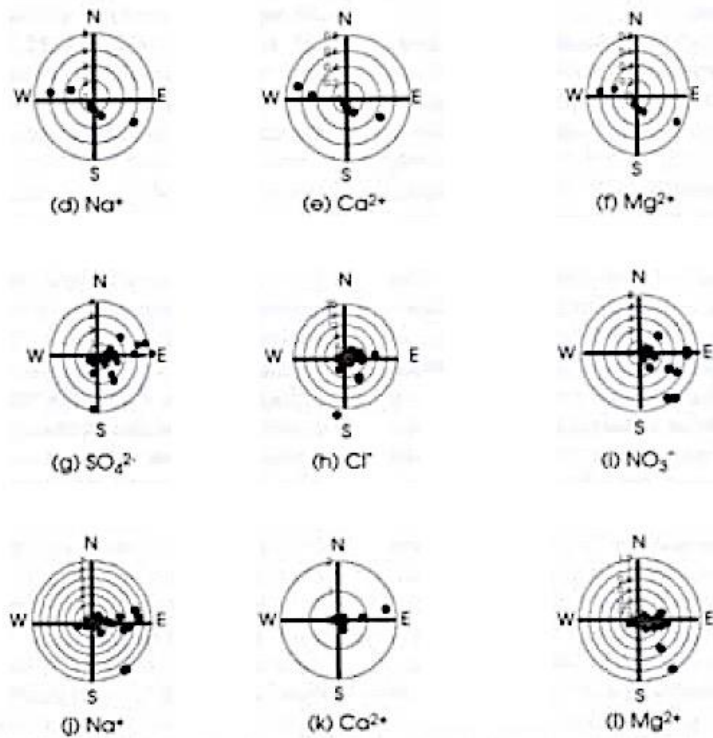
***Análisis de muestras:***

Antes de su preservación, se midió pH y conductividad. Las muestras fueron conservadas por acidificación (pH = 2) para garantizar su estabilización durante seis meses. Posteriormente, se sometieron a una digestión ácida, se filtraron y se analizaron los metales traza por la técnica de horno de grafito (Fe, Mn, Pb, Cu y Zn), sólo el aluminio se determinó por aspiración directa.

***Resultados:***

El valor de pH promedio fue de 4.64 en San Antonio Cárdenas y de 5.38 en Isla del Carmen. Con respecto a los análisis de metales, se separaron en dos grupos: la fracción insoluble (Al, Fe y Mn) cuyo origen se sugiere es la corteza terrestre y la fracción soluble (Ni, Cu, Pb y Zn) cuyo origen generalmente es antrópico. Para poder identificar las fuentes de origen se utilizaron las trayectorias de masa de aire en el modelo HYSPLIT cuyo resultado muestra la influencia de los vientos de NE (influencia de aire marítimo y vientos alisos) como se muestra en la Figura 68. Fue identificada la planta de recompresión de gas amargo ubicada en Atasta y las emisiones vehiculares como principales fuentes de contaminación.





**Dirección del viento vs. concentración en mg/L para (a) sulfato, (b) cloruro, (c) nitrato, (d) sodio, (e) calcio, y (f) magnesio; para el primer periodo de muestreo y (g) a (l) para el segundo periodo de muestreo para los mismos iones**

Figura 68. Análisis de vientos y su relación con la concentración de metales traza determinados en muestras de depósito atmosférico

**Cerón R. M., J; Cerón, R; Guerra, J; López, E; Endañú, E., (2012). Efectos de contaminantes atmosféricos sobre especies de vegetación representativa de la zona costera del Estado de Campeche. Pp. 39-43. Revista Fomix Campeche. Conacyt. Año 4. Número 14. Octubre-diciembre January 2012. Pp 39-43.**

***Sitio y año de muestreo:***

Jardín botánico de la Universidad Autónoma de Isla del Carmen. Exposición en cámara abierta durante 8 semanas (8 de agosto al 15 de octubre de 2010) a especies nativas de la zona de Campeche. Figura 69.



*Figura 69. Especies nativas de la zona de Campeche.*

***Método de muestreo:***

Invernadero especial para irrigar con lluvia ácida plántulas de: caoba, cedro, maculí, palo de tinte, mangle blanco, mangle rojo y mangle botoncillo, así como su exposición a O<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub> utilizando cámaras abiertas.

### **Análisis de muestras:**

Se midió la respuesta bioquímica de las plantas hacia los contaminantes, antes y después de las exposiciones: medición de clorofila mediante la evaluación de los niveles de pigmentos fotosintéticos (EUV-VIS), cambios en los niveles de azufre total (método turbidimétrico); cambios en los niveles de proteínas solubles, efectos en las concentraciones foliares de nutrientes:  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  (EAA y CI); así como la identificación de daños visibles.

### **Resultados:**

A partir de la exposición controlada a la acidez de la lluvia, se encontraron daños visibles severos por clorosis y necrosis a valores de pH bajos (Figura 70 y 71). Los niveles de nutrientes mostraron cambios después de las exposiciones en todas las especies estudiadas. Los individuos que mostraron mayor sensibilidad a la acidez del agua de lluvia fueron: mangle blanco, mangle rojo, mangle botoncillo, cedro y palo de tinte. En cuanto a la exposición controlada a diferentes concentraciones de  $O_3$ , todas las especies estudiadas mostraron daños visibles, siendo más severos en los ejemplares de mangle botoncillo, mangle blanco, maculí y palo de tinte, expuestos a concentraciones altas de  $O_3$  (250 ppb). Todas las especies presentaron disminución en el contenido de pigmentos fotosintéticos y en las proteínas solubles. Respecto a las exposiciones a diferentes concentraciones de  $SO_2$ , el mangle rojo y mangle botoncillo presentaron daños visibles más severos, también en éstos se encontró mayor pérdida de clorofila e incrementos en los niveles de proteínas solubles a concentraciones mayores de  $SO_2$ , ello se explica porque este contaminante puede ser metabolizado por las plantas y formar especies reactivas de oxígeno dentro de las hojas, lo cual probablemente activa mecanismos antioxidantes de defensa tales como la síntesis de proteínas.



*Figura 70. Efectos de la exposición de contaminantes a siete especies endémicas de Campeche.*

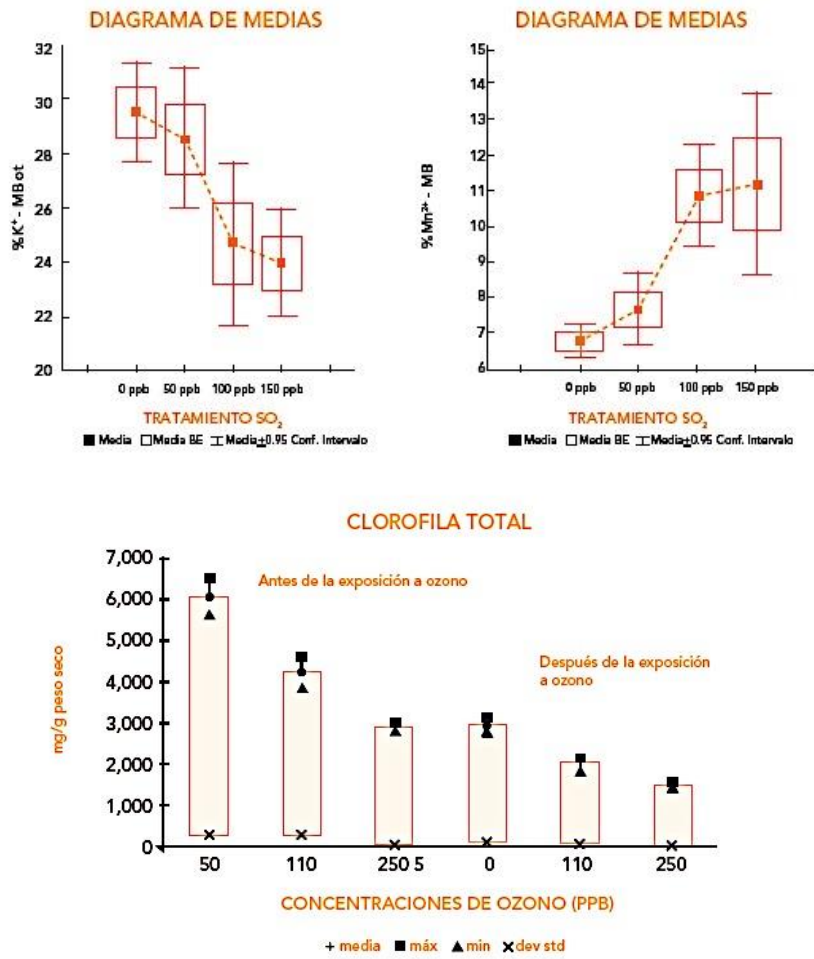


Figura 71. Efectos sobre especies de vegetación representativas de la región sensibles a contaminantes atmosféricos, específicamente  $O_3$ ,  $SO_2$  y acidez de la lluvia.

### 4.3.3 Libros

**Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. (2012). Análisis meteorológico de la “deposición ácida”. In: Avances y Perspectivas de la Deposition Ácida en México. UNACAR. Editores: Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. 115 páginas. ISBN 978-607-7826-21-7.**

El presente trabajo hace una integración de las investigaciones realizadas en México en materia de depósito atmosférico ácido, durante los últimos cinco años (2007-2012). Entre los tópicos tratados se incluyen: en el primer capítulo, un panorama general del proyecto piloto de la Red Mexicana de depósito atmosférico integrado por cuatro estaciones (sitios naturales y sitios urbanos), la cual fue operada durante dos años desde el 2009. En el capítulo dos se abordan algunos aspectos meteorológicos relevantes asociados a la identificación de posibles fuentes de precursores del depósito ácido. Los capítulos tres y cuatro presentan evaluaciones cuantitativas del depósito atmosférico en dos áreas industrializadas del país. Los capítulos cinco, seis y siete, presentan resultados de investigaciones acerca de los efectos del depósito atmosférico sobre materiales y especies de vegetación sensible. Dichos artículos se encuentran descritos en las secciones siguientes.

#### 4.3.4 Capítulos en libros

**Cerón R.M., Cerón J. G., & Muriel M. (2006). Influence of geochemical and anthropogenic sources on rainwater chemical composition in two coastal sites impacted by the gas and oil industry in Campeche, México. Publicado en: Transactions on Ecology and the Environment. Vol 88. (ISSN 1743-3541). Pp. 419-429. 2006. WIT Press. Wessex Institute of Technology. UK.**

##### ***Sitio y año de muestreo:***

El estudio se llevó a cabo en San Antonio Cárdenas (18° 22' 12" N y 92° 07' 47" W) e Isla del Carmen (18° 41' 59" N y 91° 38' 24" W) ambos sitios localizados en el Estado de Campeche dentro del área natural y protegida llamada "Laguna de Términos". Los muestreos se realizaron desde el 1 de junio hasta el 30 de octubre de 2004.

##### ***Método de muestreo:***

Colectores automáticos: wet/dry (Tisch Environmental Inc. Model TE-78-100).

##### ***Análisis de muestras:***

Las muestras colectadas fueron preservadas con cloroformo y refrigeradas, posteriormente se enviaron al laboratorio de Ciencias Ambientales de Ciudad del Carmen. Las muestras se filtraron antes de realizar el análisis de iones inorgánicos, el cual se realizó por EAA por flama para  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , por CI sin supresión para  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y por EUV-VIS para el  $\text{NH}_4^+$ .

##### ***Resultados:***

Se estudió la constitución química del agua de lluvia donde predominaron los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , por lo cual fue utilizado  $\text{Cl}^-$  como trazador de aerosol marino. La composición iónica fue similar a la reportada por diversos autores para sitios costeros; en San Antonio Cárdenas:  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{H}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$  mientras que en Isla del Carmen:  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{H}^+$  y  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ .

De acuerdo a los factores de enriquecimiento se determinó que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron de origen distinto al de los otros iones de origen marino. Los niveles de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  superaron los niveles de fondo informados para sitios remotos (2  $\mu\text{eq/L}$ ), costeros y marinos (10  $\mu\text{eq/L}$ ), lo que sugiere la contribución de otras fuentes como el suelo calcáreo de la región de Yucatán y las emisiones de la planta de gas comprimido ubicada a 10 km al NE de San Antonio Cárdenas, de acuerdo al análisis de las trayectorias de retroceso de masas de aire (Figura 72).



El valor de pH de las muestras colectadas fue de 3.01 a 6.27 con promedio de 4.64 en San Antonio Cárdenas y de 2.98 a 6.91 con promedio de 5.38 en Isla del Carmen.

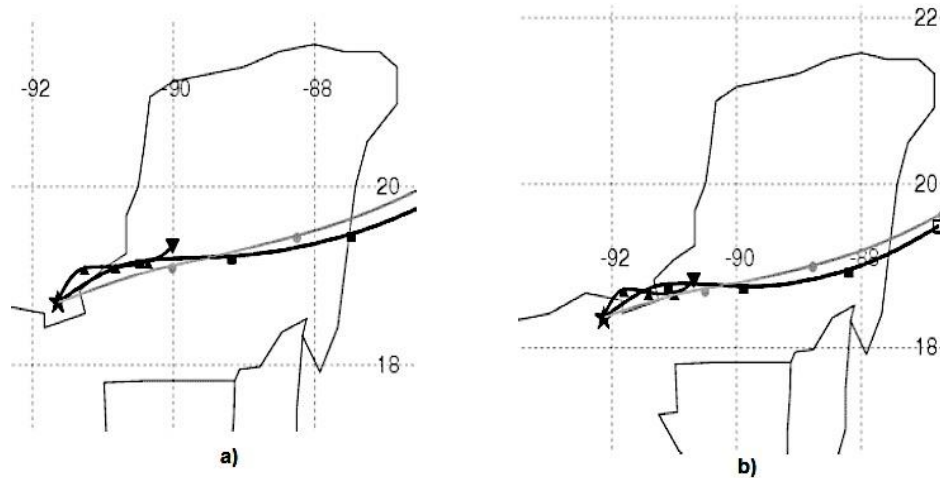


Figura 72. Ilustración de las trayectorias de 24 horas de la masa de aire utilizada para identificar las principales fuentes de contaminación para dos sitios de muestreo: a) Isla del Carmen y b) San Antonio Cárdenas.

**Cerón R. M., J. Cerón., J. Guerra., E. López., E. Endañú., M. Ramírez., M. García., R. Sánchez & S. Mendoza. (2009). Effects of simulated acid rain on tropical trees of the coastal zone of Campeche, Mexico. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 126. WIT Press, pp 259-270. doi:10.2495/CP090191. ISSN: 1743-3541.**

**Sitio y año de muestreo:**

Esta investigación se llevó a cabo en un invernadero en la Región de Campeche utilizando agua de lluvia artificial, durante el periodo de junio a julio de 2008.

**Método de muestreo:**

Siete tipos de árboles nativos de la región de Campeche: Palo de tinte sangre (*Haematoxylum campechianum* (L)), mangle blanco (*Laguncularia racemosa* (L)), mangle rojo (*Rhizophora mangle* (L)), mangle botón (*Conocarpus erectus* (L)), palo de rosa (*Tabebuia rosea* (Bertol)), Caoba (*Swietenia macrophylla* King) y Cedro rojo (*Cedrela odorata* (L)), se expusieron a lluvia ácida simulada durante seis semanas para evaluar el daño visible de la hoja y los efectos sobre el contenido de azufre, nutrientes y fotosíntesis de los pigmentos. Un total de 245 plántulas fueron expuestas cuatro veces a la semana de junio a julio a agua de lluvia ácida (10 mm). Seis tratamientos con cinco repeticiones, cada uno se estableció en condiciones de sequía e irrigación en diferentes valores de pH (2,3, 4 y 5.6) como se muestra en la Figura 73.

**Análisis de muestras:**

Bajo vigilancia, antes y después de la irrigación, se cortaron algunas hojas y se fotografiaron, dividieron y analizaron los siguientes parámetros: daños visuales en la coloración, contenido de clorofila, carotenoides y nutrientes.

Para desarrollar una escala de gravedad en las hojas se aplicó el método H-B (Horsfall and Barratt, 1945).

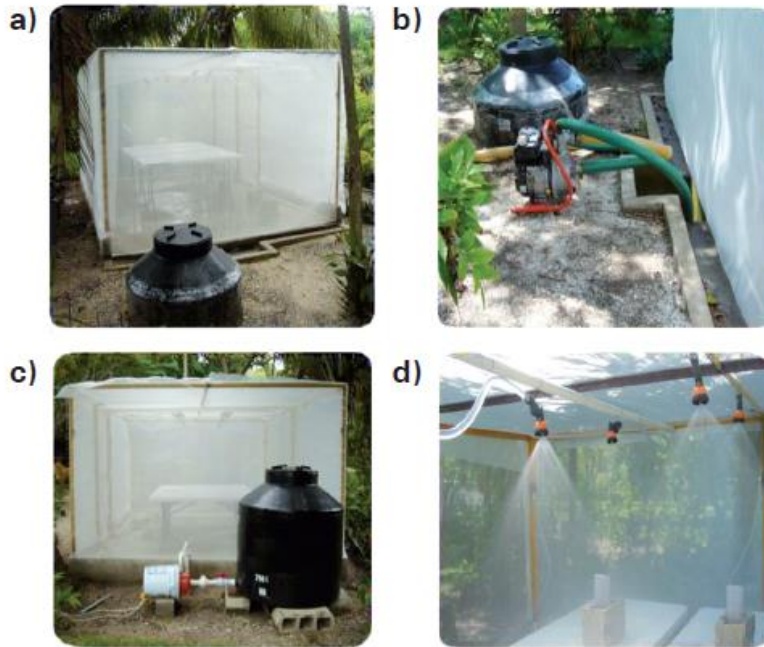


Figura 5.2. Cámara de exposición a lluvia ácida simulada con sistema de dosificación. a) Vista lateral de la cámara donde se ubica la canaleta y el tanque de residuos ácidos; b) Motobomba empleada para la transferencia del agua ácida del cárcamo al tanque de desecho; c) Tanque empleado para almacenamiento de agua de pozo para riego y la preparación de las soluciones ácidas; d) Sistema de dosificación de lluvia ácida simulada.

Figura 73. Cámara de exposición a lluvia ácida simulada

### **Resultados:**

Los resultados sugieren que la condición del estrés hídrico está relacionada con la gravedad de los efectos que muestran los individuos expuestos a la lluvia ácida a valores de pH de 2.0 y 3.0. Se observó un aumento significativo en el contenido de azufre en los tejidos de las hojas maduras, siendo mayor en los árboles de caoba, cedro rojo y palo de tinte sangre, a pH 2 en condiciones de sequía. La relación clorofila (a/b) mostró una disminución significativa en caoba, mangle blanco y tinte sangre. Los árboles y los niveles de nutrientes fueron sensibles a valores de pH más bajos. De acuerdo con los resultados, se pudo observar que el mangle rojo, botón, cedro rojo y tinte sangre fueron más sensibles a la lluvia ácida que las otras especies.

**Cerón-Bretón, R.M., Cerón-Bretón, J.G., Cárdenas-González, B., Ortíz Álvarez, A., Díaz-Morales, B., Carballo-Pat, C., and Muriel-García, M. (2012). Chapter 8. Evaluation of dry atmospheric deposition in two sites in the vicinity of fuel oil-fired power plant in Mexico. Pp. 167-184. En el libro “Air Quality: Monitoring and Modelling” Edited by Sunil Kumar and Rakesh Kumar ISBN 978-953-51-0161-1 de la editorial INTECH D.O.O. Croatia.**

***Sitio y año de muestreo:***

En dos sitios: la Reserva de la Biosfera Los Petenes-Campeche y en Tula de Allende-Hidalgo. Se obtuvieron muestras de depósito seco durante 2009 y 2010 (Figura 74).



*Figura 74. Sitio de muestreo de depósito atmosférico en Petenes y Tula de Allende.*

***Método de muestreo:***

El depósito seco se evaluó semanalmente utilizando una superficie subrogada de acuerdo con la metodología utilizada por Alonso et al., (2005); tres filtros de fibra sintética de 47 mm de diámetro con tamaño de poro de 1  $\mu\text{m}$ , que fueron suspendidos en un soporte de aluminio colocado en el interior de una cubeta.

### **Análisis de muestras:**

Se realizaron digestiones acuosas con agua desionizada para su posterior análisis de pH, CE, aniones y cationes. Los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  fueron analizados utilizando EAA, mientras que  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  se analizaron por Cl y el  $\text{NH}_4^+$  por EUV-VIS.

### **Resultados:**

El análisis de datos se realizó comparando la composición química de las dos estaciones de muestreo, se aplicó estadística paramétrica y factores de correlación de Pearson, se calculó el Flux anual de cada analito determinado, así como el valor de carga crítica comparando los resultados con valores internacionales de referencia.

Los valores de pH encontrados en las muestras de depósito seco variaron de 5.3 a 6.7, con un valor promedio de 5.9 en los Petenes y 5.77 en Tula.

La abundancia iónica relativa encontrada en Los Petenes fue  $\text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$  atribuida a las actividades agrícolas, quema de masa y emisiones de una planta de energía cercana a la zona de estudio. Las partículas alcalinas del suelo calcáreo en los Petenes, tuvieron un papel importante en el proceso de neutralización de la acidez derivada de las altas emisiones de  $\text{NO}_3^-$  de la planta de energía y debida a la quema de biomasa. La entrada de N en Los Petenes excedió ligeramente el valor reportado para otros sitios del mundo (Jones, 2005; Power et al., 2006).

En Tula de Allende la abundancia iónica relativa encontrada fue  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$  atribuida a la influencia de la industria (termoeléctrica, refinería y cementera) cercana a la zona a pesar de los altos niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  encontrados: 83.30  $\mu\text{eq/L}$  y 56.4  $\mu\text{eq/L}$  respectivamente (atribuidos a una central eléctrica cercana), el proceso de neutralización de la acidez se mejoró por la presencia de las plantas cementeras cercanas al sitio de muestreo. Sin embargo, la entrada de S excedió los valores críticos reportados para varios sitios alrededor del mundo (8.04 Kg/ha-año) de acuerdo con Nilsson y Grennfelt, (1988).

**Cerón Bretón, R. M., Bretón C. J. G., Pat C. C., Díaz B., Morales J. J. G. S., Ucán C. A., & Romero C. M. (2012). Evaluación del depósito húmedo en los alrededores de una planta termoeléctrica en el centro de México. *Avances y perspectivas de la lluvia ácida en México*, Cap. 4, pág. 53**

***Sitio y año de muestreo:***

La ciudad de Tula de Allende en el Estado de Hidalgo de octubre a diciembre del 2010.

***Método de muestreo:***

El muestreo del depósito húmedo se realizó utilizando un muestreador automático (wet/dry). El depósito seco se colectó utilizando superficies subrogadas (tres filtros de fibra sintética de 47 mm de diámetro con tamaño de poro de 1  $\mu\text{m}$ ), que fueron suspendidos en un soporte de aluminio colocado en el interior de la cubeta.

***Análisis de muestras:***

Se determinó pH, CE, metales alcalinos y alcalinotérreos:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  mediante EAA con aspiración directa, llevando a cabo previamente la digestión húmeda de las muestras y utilizando como fuente de calentamiento un equipo autoclave. La determinación de aniones inorgánicos se hizo por CII con detección por conductividad. Finalmente, la determinación de  $\text{NH}_4^+$  mediante colorimetría.

***Resultados:***

Sólo se trabajó con el depósito seco, debido a que no se presentó ningún evento de lluvia. Las muestras colectadas presentaron una gran variabilidad en sus datos. La abundancia iónica relativa encontrada fue  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . Se menciona que el balance iónico y el comparativo de conductividad medida con respecto a la conductividad predicha fue pobre por falta de cuantificación del ion bicarbonato.

El depósito seco colectado en Tula de Allende, presentó valores de pH entre 5.3 y 6.7, con un valor promedio de 5.77. Con respecto a los iones determinados: los niveles de exceso de  $\text{SO}_4^{2-}$  encontrados (68.78  $\mu\text{eq/L}$ ) excedieron casi seis veces los niveles hemisféricos de fondo para sitios remotos (10  $\mu\text{eq/L}$ ) (Galloway et al., 1982) y son comparables con el valor de sitios contaminados; lo que indica que se



tuvo una contribución significativa de fuentes locales y regionales que aportaron cantidades importantes de este ion. Por otro lado, los niveles de  $\text{NO}_3^-$  encontrados ( $56.37 \mu\text{eq/L}$ ) excedieron casi 20 veces los niveles hemisféricos de fondo reportados para sitios remotos ( $2.8 \mu\text{eq/L}$ ) y son comparables a los reportados para sitios contaminados, tomando en cuenta el tiempo de residencia del  $\text{NO}_2$  en la atmósfera (1 día), se puede inferir que se tuvo una contribución importante de fuentes locales en el sitio.

A partir de la información meteorológica y las trayectorias de las masas de aire se determinó que la dirección dominante del viento durante el periodo de muestreo fue N-NE, existió transporte local y regional de emisiones generadas en fuentes antropogénicas ubicadas en esta dirección, que influyeron de manera significativa en el depósito seco.

Se observaron variaciones temporales de los factores de neutralización en relación al pH para los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , el efecto de neutralización de los cationes siguió la jerarquía  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . Los flujos del depósito seco durante el periodo de muestreo, presentaron la siguiente jerarquía:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$ .

**Cerón-Bretón, J; Cerón-Bretón, R; Guerra-Santos, J; Aguilar-Ucán, C; Montalvo-Romero, C. (2012). Efectos de depositación atmosférica sobre vegetación. Capítulo 5. Pp. 65-80. En: Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México. Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. Editores. UNACAR. 115 páginas. Tiraje: 525 ejemplares. ISBN 978-607-7826-21-7.**

**Sitio y año de muestreo:**

Los ensayos de intemperismo se llevaron a cabo en el jardín botánico de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), ubicada en Ciudad del Carmen, Campeche, a 18.63°N, 91.83°W durante los meses de junio y julio de 2009.

**Método de muestreo:**

Se realizó la propagación de ocho especies seleccionadas de la vegetación típica de la zona costera del Estado de Campeche y especies seleccionadas del jardín botánico de la UNACAR; *Laguncularia racemosa* (C. F. Gaertn.), *Rhizophora mangle* L., *Conocarpus erectus* L., *Haematoxylum campechianum* L., *Cedrela odorata* L., *Tabebuia rosea* (Bertol.) A. D.C, *Swietenia macrophylla* King y *Cucurbita pepo* L., 40 plantas en total fueron sometidas a condiciones de estrés hídrico.

**Análisis de muestras:**

A cada individuo se le realizó un seguimiento y caracterización física (altura, ancho, diámetro de tallo, tamaño de las hojas, número total de hojas, peso y descripción general del estado de las hojas: color y presencia de daños por insectos y/o mecánicos) antes y después de su exposición a soluciones ácidas (pH de 5.6, 4.0, 3.0, 2.0, y a condiciones de estrés hídrico). Los individuos expuestos a pH 5.6 fueron usados como grupo de control. Las exposiciones se llevaron a cabo para cada grupo de individuos durante un mes (exponiéndolas un total de 15 veces) con un sistema de riego con capacidad de generar 12 mm durante un minuto, siendo la duración de cada exposición precisamente de un minuto.

### **Resultados:**

De acuerdo a los análisis en las concentraciones de los cuatro elementos foliares realizados a las especies en estudio y los daños foliares visualizados, se puede concluir que las tres especies de mangle (*Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* y *Rhizophora mangle*) no mostraron cambios importantes debido a la acidez de lluvia simulada, presentándose sólo un desbalance nutricional a pH más bajos tanto a condiciones de riego como de estrés hídrico. Los individuos de *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia roseae*, *Haematoxylum campechanum*, y *Cucúrbita pepo*, mostraron una mayor afectación a la lluvia ácida simulada al presentar una disminución en el contenido de los cationes foliares ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ ) e incremento en el  $\text{Mn}^{2+}$ , el cual está ligado a presencia de acidez en el sustrato.

De los cuatro cationes foliares estudiados, el  $\text{K}^+$  fue el único que se vio disminuido en el follaje de todas las especies estudiadas para todos los tratamientos, mientras que el contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  en el follaje fue el menos afectado, quizás a causa de que tanto el sustrato como el agua de riego empleado presentaban un alto contenido de  $\text{CaCO}_3$ . Con base a los cambios en los niveles de nutrientes derivados de la exposición de lluvia ácida simulada, las especies que mostraron una mayor sensibilidad fueron: *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia roseae*, *Haematoxylum campechanum* y *Cucúrbita pepo*; sin embargo, se concluye que es necesario llevar a cabo estudios a largo plazo que permitan evaluar con mayor precisión y amplitud la respuesta de cada una de estas especies frente a la acidez del agua de lluvia, antes de poder concluir acerca del potencial que tienen para ser usadas como bioindicadores de este tipo de contaminación.

**Cerón Bretón Rosa Ma.; Julia G. Cerón Bretón; Jorge A. Benítez Torres; Carmen G. Carballo Pat; Jesús J. Guerra Santos; José A. Ortíz Álvarez; A. Víctor Córdova Quiroz. (2014). Evaluación de los flujos de depósito atmosférico seco de elementos traza en Ciudad del Carmen, Campeche: Implicaciones Ecológicas. En: A.V. Botello; J. Rendón Von Ostén; J. Benítez; y G. Gold-Bouchot (Eds.). Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental: diagnóstico y tendencias. UAC, UNAM-ICMyL, CINVESTAV Unidad Mérida. ISBN: 978-607-7887-71-3.**

***Sitio y año de muestreo:***

El muestreo fue llevado a cabo en Ciudad del Carmen, Campeche, entre abril y noviembre de 2012.

***Método de muestreo:***

Las muestras de depósito seco fueron colectadas mediante un muestreador automático acoplado a un dispositivo de muestreo de depositación seca llamado DAS por sus siglas en inglés (Dry Deposition on Aqueous Surfaces), que utiliza agua como superficie de colección, de acuerdo a la metodología reportada previamente por Tartari y colaboradores (1995). Las muestras de depósito seco fueron colectadas en una base semanal, y almacenadas a 4 °C y en la obscuridad hasta su análisis.

***Análisis de muestras:***

A todas las muestras se les determinó pH y CE. Para la determinación de metales alcalinotérreos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y metales pesados (Ni, Fe, Cu, Zn, Mn y Pb) se utilizó EAA. Las muestras fueron tratadas previamente a su análisis en un proceso de digestión,  $\text{NH}_4^+$  fue analizado por EAM utilizando el método de azul de indo-fenol (Fresenius, 1989). La determinación de  $\text{SO}_4^{2-}$  se realizó por el método turbidimétrico. Los niveles de  $\text{Cl}^-$  se midieron a partir de su valoración con  $\text{AgNO}_3$ . La determinación de  $\text{NO}_3^-$  se realizó por colorimetría con el método de la brucina.

### **Resultados:**

Los valores de pH estuvieron en un intervalo de 2.05 a 6.59 con un valor promedio de 4.5, el 60% de las muestras presentó valores de pH por debajo de 5, el 10 % de las muestras presentó valores de pH entre 5 y 5.6, mientras que el 30% de las muestras presentó valores de pH por arriba de 5.6.

La abundancia iónica relativa en el sitio fue:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^-$ . La abundancia relativa de metales traza fue:  $\text{Zn} > \text{Fe} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cu}$ . El  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron las principales especies acidificantes, mientras que  $\text{Na}^+$  (aerosol marino) y  $\text{Ca}^{2+}$  (corteza terrestre) fueron los iones básicos que contribuyeron en mayor proporción al proceso de neutralización.

Los Flux de depósito atmosférico seco para N y S, excedieron significativamente los valores hemisféricos de fondo reportados para sitios remotos, y en el caso de S, sobrepasaron los valores umbral límite de cargas críticas reportadas para ecosistemas europeos. Los niveles promedio de Pb fueron ligeramente más altos que los valores de carga crítica reportados para suelo total y solución de suelo total en Europa, y significativamente más altos que los reportados para aguas superficiales para Holanda y el Reino Unido.

La remoción de contaminantes y aerosoles de origen geoquímico, así como las condiciones meteorológicas prevalecientes, constituyen los principales factores que afectan la química del depósito atmosférico en el sitio. Además de las aportaciones de tipo local, los procesos de transporte juegan un papel determinante en las aportaciones regionales de tipo industrial de elementos traza en el depósito seco.

El análisis de trayectorias reveló que la dirección dominante del viento durante el periodo de muestreo fue del Suroeste, donde se encuentra ubicada la estación de recompresión de gas amargo de Atasta, por lo que además de las fuentes locales, en su mayoría de tipo vehicular, pudo aportar cantidades significativas de contaminantes precursores de depósito ácido y partículas metálicas.

**Cerón R. M; Cerón, J.G; Muriel, M; Anguebes, F; Ramírez, M; Zavala, J; Carballo, C; Escoffie, R.C. (2015). Spatial and temporal distribution of throughfall deposition of Nitrogen and Sulphur the mangrove forests associated to Terminus Lagoon. Chapter 7. Pp. 147-164. ISBN: 978-953-51-4199-0.**

***Sitio y año de muestreo:***

El estudio se llevó a cabo en Isla Carmen-Campeche, colocando 13 estaciones de muestreo a lo largo de la isla. El periodo de muestreo fue de julio de 2013 a junio de 2014.

***Método de muestreo:***

Se utilizaron dispositivos pasivos de muestreo, los cuales colectaron de manera conjunta el depósito húmedo y seco. El muestreo se dividió en seis periodos de dos meses.

***Análisis de muestras:***

A todas las muestras se les determinó pH y CE, el  $\text{NH}_4^+$  fue analizado por EAM utilizando el método de azul de indo-fenol. La determinación de  $\text{SO}_4^{2-}$  se realizó por el método turbidimétrico. La determinación de  $\text{NO}_3^-$  se realizó por colorimetría con el método de la brucina. El peso del extractante se convirtió en volumen utilizando la densidad específica de una disolución de KCl 2 N (1,05 g/mL), la cantidad de cada ion en una columna dada se determinó con el factor del volumen extractante multiplicado por la concentración iónica en el extractante. El área de superficie de la abertura del embudo y el periodo de muestreo se usaron para estimar los flujos de depósito de N y S por hectárea en un año (Kg /ha-año).

***Resultados:***

Los flujos de depósito para N y S en la isla Carmen fueron 2.15 y 4.7 Kg /ha-año. El Flux medio de N no excedió las cargas críticas propuestas para ecosistemas sensibles, sin embargo, el Flux de S se encontró en el valor umbral límite propuesto para los bosques naturales y es mayor que los reportados para áreas muy sensibles (Figura 75).

Para inferir la influencia local o regional, se estimó la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  en el depósito total y se obtuvo una proporción de 4.7. Mientras que el  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  mostraron un patrón similar en sus flujos durante la estación seca.



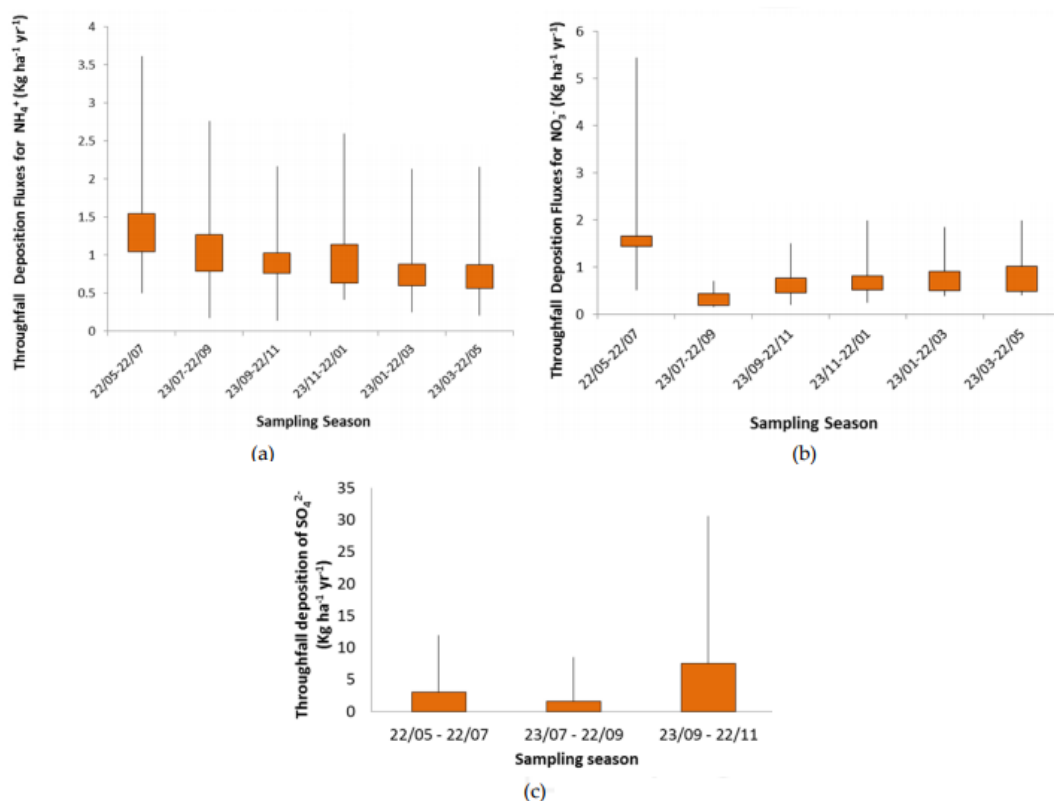


Figura 75. Flujos de deposición atmosférica para NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> para la isla Carmen para la temporada de muestreo.

Los Flux promedio para NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> fueron los más altos en el muestreo de los sitios etiquetados como 3, 7 y 2, respectivamente.

Los resultados encontrados sugieren que NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el sitio de estudio tiene un origen local, y se distribuye principalmente a lo largo de la zona urbana, siendo su depósito superior durante la estación seca. Por otro lado, los mayores flujos de depósito de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se distribuyeron en el borde Este de la isla solo durante la estación seca, sugiriendo un origen local, probablemente de emisiones de vehículos ligeros y actividades agrícolas desarrolladas en áreas rurales cercanas. Con respecto a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, su depósito tiene su origen en fuentes locales y regionales, siendo esta contribución más alta cuando la isla fue sometida a la influencia de "Norte". Era bastante evidente que además de las emisiones de fuentes industriales locales en la isla Carmen, los niveles de precursores fueron mayores por el transporte a larga distancia de emisiones de plataformas ubicadas mar adentro en el Golfo de Campeche durante la temporada "Norte" cuando los vientos predominantes provenían del NE.

**Cerón J., R.M. Cerón, C. Aguilar, C. Montalvo, A. García, M. Muriel, E. Ramírez, A. Córdova & C. Carballo. (2016). Mapping temporal and spatial variation of Sulphur and Nitrogen deposition to a complex ecosystem in Campeche, Mexico. Transactions on the Ecology and the Environment Vol. 203. Pp.113-123. En: Environmental Impact II. WIT Press UK.**

***Sitio y año de muestreo:***

Región de Xicalango-Atasta en el Estado de Campeche, las muestras se colectaron del 5 de julio de 2014 al 6 de mayo de 2015, en 5 muestreos con duración de dos meses cada uno.

***Método de muestreo:***

Se usaron colectores pasivos de IER en 13 puntos seleccionados en un diseño de transectos múltiples.

***Análisis de muestras:***

Los iones retenidos se extrajeron con 100 mL de KCl 2N y se analizaron  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  mediante colorimetría y turbidimetría.

***Resultados:***

Los flujos de depósito para N y S fueron de 0.97 y 9.47 Kg /ha-año. El Flux de N no excedió la carga crítica propuesta y fue considerablemente más bajo que los valores reportados por otros autores; sin embargo, el Flux de S fue 2 veces mayor que los propuestos para áreas sensibles en Europa, lo que sugiere que el depósito de S podría ser una amenaza para los ecosistemas de manglares y la pesca en la región. El transporte a larga distancia de contaminantes regionales fue evidente durante todas las estaciones. Los mapas de depósito de partículas sedimentables se obtuvieron mediante técnicas geoestadísticas y fue posible identificar dos fuentes principales en la región: instalaciones de producción de petróleo y gas, así como las emisiones vehiculares de la carretera federal.

#### 4.4 Estudios realizados por otras instituciones

##### 4.4.1 Estudios realizados por la Secretaría del Medio Ambiente

**SEDEMA (1994). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1994. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). 71 pág. [www.sedema.cdmx.gob.mx](http://www.sedema.cdmx.gob.mx)**

##### **Sitio y año de muestreo:**

Se utilizaron 12 sitios de muestreo, repartidos en cinco zonas, en la zona Noroeste: Tlalnepantla (TLA) y Secretaría de Hacienda (SHA), en la zona Noreste: Xalostoc (XAL), Cerro del Tepeyac (TEC), Chapingo (CHA) y Netzahualcóyotl Sur (NTS), en la zona centro la estación Museo Cd. de México (MCM), en la zona Suroeste: Lomas (LOM), Pedregal (PED), Felipe Ángeles (FAN), Instituto Nacional de Ecología (INE) y en la zona Sureste la estación Xochimilco (XCH). La Figura 76 muestra su localización.

El muestreo se llevó a cabo de mayo a septiembre de 1994.

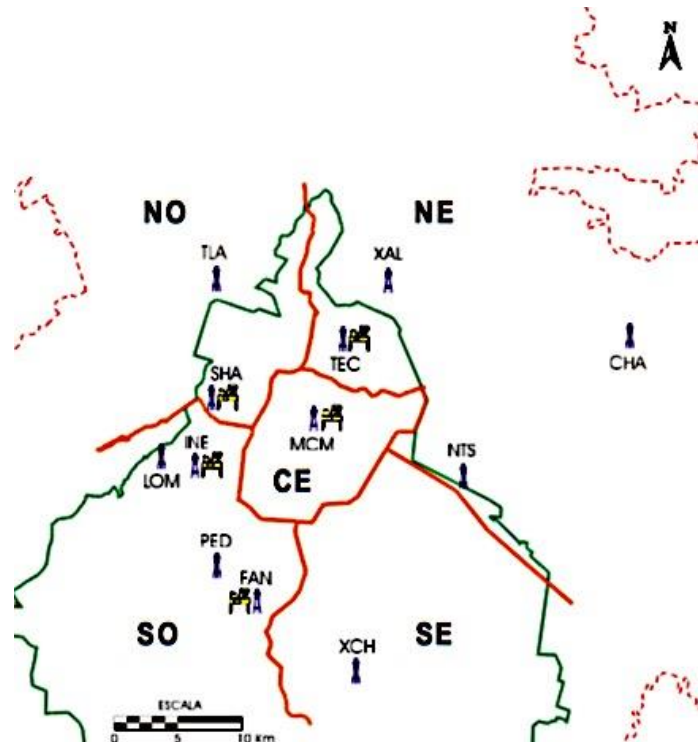


Figura 76. Sitios de muestreo de la SEDEMA, informe anual 1994.

***Método de muestreo:***

Se utilizaron simultáneamente en cinco estaciones de monitoreo los colectores tradicionales para el depósito total y los colectores automáticos ASP-78100 para el depósito húmedo y seco.

***Análisis de muestras:***

Volumen, pH, CE, la identificación y cuantificación de iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó por EAA,  $\text{SO}_4^{2-}$  por el método de  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  por el método colorimétrico azul de indo-fenol y  $\text{Cl}^-$  por el método argentométrico.

***Resultados:***

Los datos se presentaron conforme la técnica de muestreo:

Para el depósito total, el intervalo del volumen de agua recolectado fue de 32 a 2000 mL. El valor de pH se midió en un intervalo de 7.9 a 3.5 unidades, cuyos valores de conductividad fueron de 880 a 11.7  $\mu\text{mhos/cm}$ .

El  $\text{SO}_4^{2-}$  presentó una concentración máxima de 23.3 mg/L y mínima de 2.4 mg/L, mientras que para el  $\text{NO}_3^-$  fue de 6.48 a 0.16 mg/L.

**Depósito húmedo**

El volumen de agua recolectado presentó un valor máximo de 9820 mL y un valor mínimo de 86 mL. El intervalo de pH fue de 6.9 a 3.5 unidades, ambos en la zona Suroeste y con valores de conductividad de 816.20 a 9.43  $\mu\text{mhos/cm}$ . Los  $\text{SO}_4^{2-}$  presentaron una concentración máxima y mínima de 24.0 mg/L a 2.4 mg/L respectivamente. El  $\text{NO}_3^-$  fue determinado en el intervalo de 6.67 a 0.16 mg/L.

**Depósito seco**

El valor de pH máximo y mínimo fue de 6.9 y de 5.6 unidades y cuyos valores de conductividad fueron 235.20 a 99.45  $\mu\text{mhos/cm}$ . La concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  registrada fue de 48.00 a 3.20 mg/L. Para  $\text{NO}_3^-$  el valor de concentración fue en el intervalo de 8.81 a 3.69 mg/L.

**SEDEMA (1995). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1995. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), 54 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

La evaluación de la composición química del agua de lluvia en la ZMCM, se realizó en 12 sitios de monitoreo. Durante los meses de mayo a octubre de 1995, meses representativos de la temporada de lluvias.

Los sitios de muestreo fueron: Tlalnepantla (TLA), Secretaría de Hacienda (SHA), Laboratorio de Bacteriología y Fisicoquímica (LBFQ), Xalostoc (XAL), Cerro del Tepeyac (TEC), Chapingo (CHA), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Museo Cd. de México (MCM), Lomas (LOM), Pedregal (PED), Felipe Ángeles (FAN), Xochimilco (XCH).

***Método de muestreo:***

Depósito total mediante colectores tradicionales (botella con embudo).

***Análisis de muestras:***

Se determinó el volumen captado en cada muestra y la concentración de los parámetros fisicoquímicos: pH, CE, la cuantificación de iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó por EAA,  $\text{SO}_4^{2-}$  por el método de  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  por el método colorimétrico azul de indo-fenol y  $\text{Cl}^-$  por el método argentométrico.

***Resultados:***

El volumen del agua de lluvia captado presentó valores promedio máximo y mínimo de 1101 y 538 mL. El pH in situ promedió un máximo y mínimo de 4.74 a 7.13 unidades de pH, mientras que su medición en laboratorio presentó un intervalo de 4.76 a 7.29. La conductividad presentó valores promedio máximo y mínimo de 316.24 y 31.01  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente. Por su parte, la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  máximo y mínimo fue de 10.09 mg/L y 4.97 mg/L respectivamente, mientras que los  $\text{NO}_3^-$ , fueron 4.35 a 2.15 mg/L.

La información de  $\text{Cl}^-$  fue invalidada, debido a que el 61% y 17.84% de las muestras presentaron concentraciones inferiores al límite de detección y volumen insuficiente de agua para efectuar la determinación.

El  $\text{Na}^+$  presentó concentración promedio máxima y mínima de 3.76 y 0.55 mg/L. El  $\text{K}^+$  presentó concentraciones de 0.76 a 12.34 mg/L. En tanto que el  $\text{Mg}^{2+}$  presentó

valores en el intervalo de 0.25 a 1.68 mg/L. El  $\text{Ca}^{2+}$  presentó valores promedio máximo y mínimo de 17.54 y 2.01 mg/L.

Durante 1995 se realizó la caracterización de material biológico en el agua de lluvia a través de las muestras colectadas. Mediante la observación microscópica de sedimentos en cada una de las muestras colectadas, mediante filtración (0.45 micras de diámetro de poro). Los datos demostraron que las diatomeas registraron el porcentaje más alto de 92.12%, seguido del polen con 55.2% y los hongos con el 51.0%.

Respecto al comportamiento histórico del pH del agua de lluvia, 1995 fue el año con menor frecuencia de valores ácidos. En el período 1987-1995 los niveles de pH bajos se ubicaron alrededor de 3.0 y 4.0 unidades, con una tendencia constante. En contraste, los valores más altos de pH presentaron una tendencia fluctuante con niveles de 5.9 hasta 9.2 unidades de pH (Figura 77).

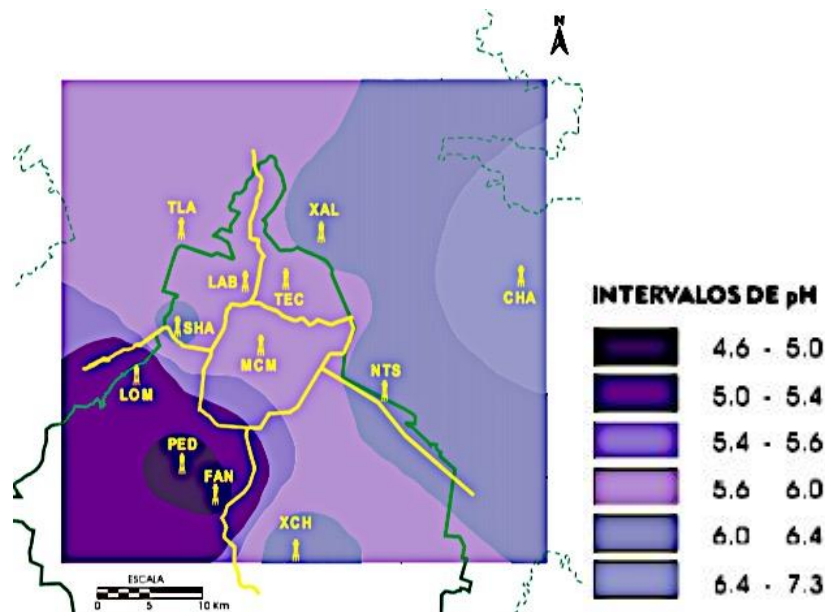


Figura 77. Nivel de pH en agua de lluvia, SEDEMA 1995.

**SEDEMA (1996). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1996. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), 64 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Los muestreos se efectuaron en 12 sitios: Tlalnepantla (TLA), Secretaría de Hacienda (SHA), Laboratorio de Bacteriología y Físicoquímica (LBFQ), Xalostoc (XAL), Cerro del Tepeyac (TEC), Chapingo (CHA), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Museo Cd. de México (MCM), Lomas (LOM), Pedregal (PED), Felipe Ángeles (FAN), Xochimilco (XCH).

Muestreo de mayo a octubre de 1996.

***Método de muestreo:***

Depósito total utilizando un colector tradicional (botella con embudo).

***Análisis de muestras:***

Volumen, pH, CE, la identificación y cuantificación de iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó por EAA,  $\text{SO}_4^{2-}$  por el método de  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  por el método colorimétrico azul de indo-fenol y  $\text{Cl}^-$  por el método argentométrico.

***Resultados:***

Durante 1996 se captó el volumen más grande de agua de lluvia (2020 mL) en los sitios PED y LOM (zona Suroeste). Obteniéndose un valor promedio de 767 mL de agua de lluvia. El pH de las muestras colectadas fue desde 3.62 a 8.59. En este año el 23.53% de las muestras registraron valores de pH que caracterizan la presencia de lluvias ácidas, el 14.93% presentó pH considerado como el normal en el agua de lluvia y en el 61.54% se detectó pH de ligeramente ácido a alcalino.

En el análisis espacial se observaron los niveles de mayor acidez en la zona Suroeste. Históricamente el pH más ácido se ha registrado en la zona Suroeste, en un 80% y su tendencia es estable, mientras que en la zona Noreste predominan valores de pH alcalinos (Figura 78).

La conductividad registró disminución en su valor con respecto a otros años debido al dispositivo de protección del embudo en todos los sitios, logrando minimizar los problemas de contaminación por excremento de aves, que se había observado en años anteriores. Los niveles altos de conductividad  $>60 - 100 \mu\text{S}/\text{cm}$  correspondieron a los sitios en la zona Noreste y Sureste.



Respecto a los constituyentes iónicos, los porcentajes más altos obtenidos en las concentraciones correspondiente fueron:  $\text{SO}_4^{2-}$ , 75.4% >5.0 - 10.0 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ , 46.8% >4.0 - 9.0 mg/L;  $\text{Na}^+$  69.7% >0.08 - 1.0 mg/L;  $\text{K}^+$  85.9% >0.08 - 1.0 mg/L;  $\text{Ca}^{2+}$  30.8% >1.0 - 2.0 mg/L;  $\text{Mg}^{2+}$ , 78.0 % >0.08 - 1.0mg/L.

Los cloruros no fueron analizados estadísticamente, por su invalidación al no reunir los criterios necesarios para su tratamiento.

En el análisis de correlación aplicado a todas las variables estudiadas, la conductividad y el  $\text{Ca}^{2+}$  mostraron mayor relación entre los iones. Indicando que el  $\text{Ca}^{2+}$  puede influir notablemente en el balance iónico del agua de lluvia. Las condiciones meteorológicas que prevalecieron en el período en el que se registraron los pH más ácidos permitieron determinar a la dirección y velocidad del viento como el factor que influye de manera importante en las concentraciones de iones.

En este año, los indicadores biológicos presentaron porcentajes inferiores a 1995. Predominando la presencia de diatomeas en las muestras recolectadas en todos los sitios.

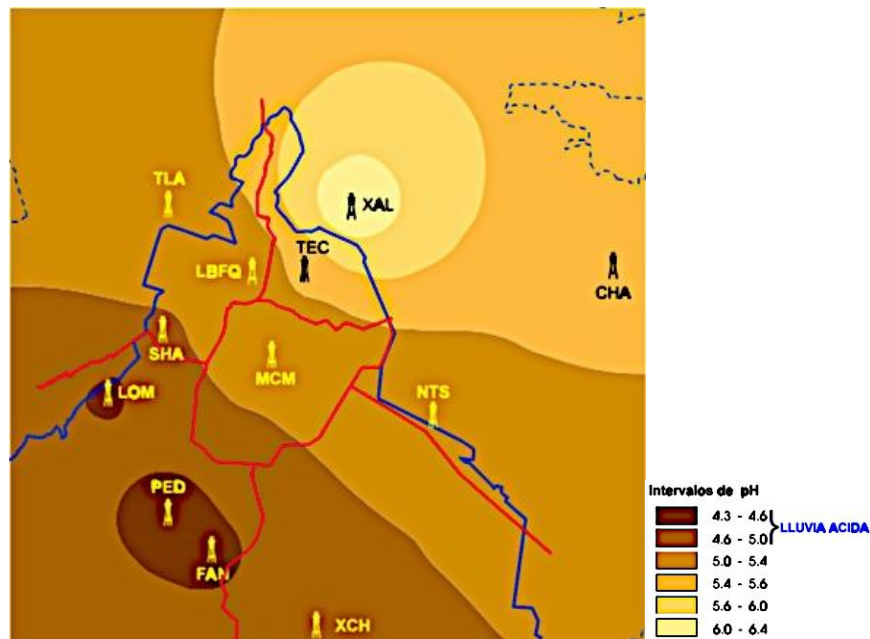


Figura 78. Distribución de pH en la ZMCM, SEDEMA 1996.

**SEDEMA (1997). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1997. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), 67 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Tlalnepantla (TLA), Secretaría de Hacienda (SHA), Laboratorio de Bacteriología y Físicoquímica (LBFQ), Xalostoc (XAL), Cerro del Tepeyac (TEC), Chapingo (CHA), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Museo Cd. de México (MCM), Lomas (LOM), Pedregal (PED), Felipe Ángeles (FAN), Xochimilco (XCH).

Muestreo de mayo a octubre de 1997.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo y depósito seco, utilizando un muestreador automático modelo ASP 78100 (Figura 79).



*Figura 79. Colector automático para el agua de lluvia usado por SEDEMA 1997.*

***Análisis de muestras:***

Volumen, pH, CE, la identificación y cuantificación de iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó por EAA,  $\text{SO}_4^{2-}$  por el método de  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  por el método colorimétrico azul de indo-fenol y  $\text{Cl}^-$  por el método argentométrico.

**Resultados:**

De las 276 muestras de depósito total y húmedo, el 27% presentó valores inferiores a pH=5.0, es decir caracterizaron la presencia de lluvia ácida; el 19% presentó valores en el intervalo de 5.0 a 5.6) y el 54% de las muestras los valores de pH fueron superiores a 5.6, continuándose la tendencia de mayor número de muestras con pH alcalino. Los valores promedio máximo y mínimo se obtuvieron en los sitios CHA (zona Noreste; depósito total) y LOM (zona Suroeste; depósito húmedo) con 5.71 y 4.40 respectivamente. Cabe mencionar que en el sitio LOM se registró el mayor número de eventos ácidos (11) de todos los sitios monitoreados.

Los volúmenes de agua de lluvia captados por los dispositivos de recolección fueron más altos en la zona Sur de la ciudad, por lo que el valor promedio máximo correspondió al sitio PED (zona Suroeste; depósito húmedo) con 1918 mL, mientras que el valor promedio mínimo se obtuvo en el sitio CHA (zona Noreste, depósito total) con 376.3 mL.

Desde 1994 la conductividad se ha mantenido en el intervalo de 9.6 a 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el valor mínimo y máximo para 1997 fue de 96 a 185.7  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ambos valores correspondieron a sitios equipados con colectores automáticos.

Respecto a  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  presentaron valores máximos de 60.6 y 31.35 mg/L mientras que los valores mínimos fueron de 3 y 0.17 mg/L. Los valores máximos de los aniones se relacionan con las condiciones meteorológicas, mismas que determinan la presencia de compuestos acidificantes en áreas específicas de la ciudad, además el tipo de colector utilizado.

**SEDEMA (1998). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1998. Gobierno del Distrito Federal, 75 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

En este año fueron reubicados seis sitios y se ubicaron sitios nuevos con respecto a la antigua red de muestreo, por lo que fueron adaptados 16 sitios para el muestreo. Periodo de muestreo año 1998.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo y depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Volumen, pH, CE, la identificación y cuantificación de iones en el depósito húmedo y total ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) se realizó por EAA,  $\text{SO}_4^{2-}$  por el método de  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  por el método colorimétrico azul de indo-fenol y  $\text{Cl}^-$  por el método argentométrico. Para el depósito seco se determinaron Si, Al, Fe, Ti, Sr, Ba, Rb, Zn, Mn, Cu y Pb mediante fluorescencia de rayos X. En las muestras de depósito húmedo y total se determinó la presencia de elementos biológicos utilizando el método de filtración con membrana.

***Resultados:***

Los volúmenes de agua de lluvia recolectados fluctuaron entre 17 y 11120 ml, correspondiendo los volúmenes más grandes a muestras de depósito húmedo (Figura 80). En éste año el atraso de las lluvias, los 1932 incendios forestales y las tolvaneras fueron los principales factores que influyeron en los valores de pH ligeramente ácidos y alcalinos (>5.6-7.93). De 156 muestras de depósito húmedo y 93 de depósito total equivalentes al 70 y 63%, respectivamente del total de muestras analizadas; seguido del pH ácido (4.07-5.0) correspondientes al 20 y 23% respectivo y sólo 10% de depósito húmedo y 14% del depósito total presentaron valores normales (>5.0-5.6).

Con respecto a la conductividad la mayoría de las mediciones efectuadas se ubicaron en el intervalo de 13-50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

El valor de  $\text{SO}_4^{2-}$  se encontró en el intervalo de 1.54 a 31.4 mg/L, mientras que los valores de  $\text{NO}_3^-$  se determinaron en el intervalo de 0.14 a 18.5 mg/L

Se detectaron Fe, Zn, Pb y Cu en todas las muestras de depósito seco y el Mn en una proporción significativa (86.5%). Los elementos biológicos (algas, hongos y polen) encontrados en el depósito atmosférico (húmedo y total) constituyen riesgos para la salud humana, principalmente por *Alternaria sp*, hongo de distribución cosmopolita o el polen considerado como neumo-alergeno.

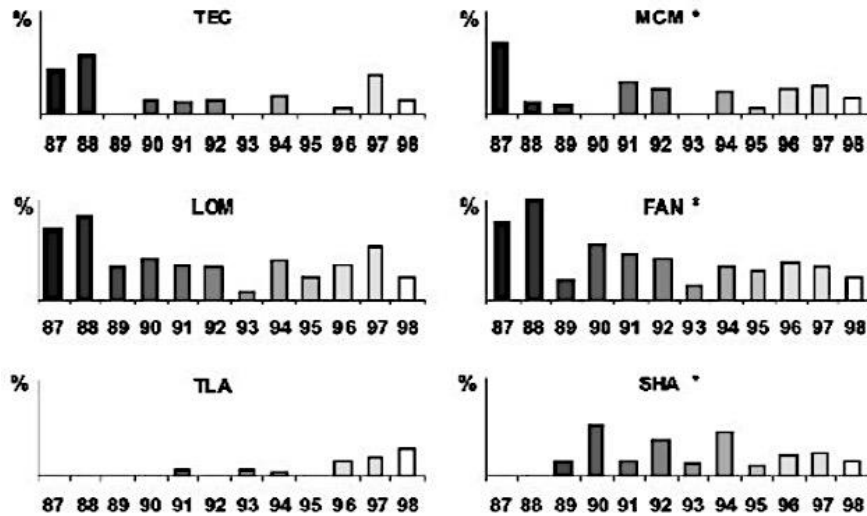


Figura 80. Porcentaje histórico de la lluvia ácida en la ZMCM, SEDEMA 1998.

**SEDEMA (1999). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1999. Gobierno del Distrito Federal, 93 pág. [www.sedema.cdmx.gob.mx](http://www.sedema.cdmx.gob.mx)**

***Sitio y año de muestreo:***

Lomas (LOM), Legaria (IBM), Tlalnepantla (TLA), Laboratorio de Bacteriología y Físicoquímica (LBFQ), Xalostoc (XAL), Chapingo (CHA), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Plaza de Santa Catarina (PSC), Diconsa (DIC), Ecoguardas Ajusco (EAJ), Ajusco Picacho (AP), Ex convento Desierto de los Leones (EDL), Parres (PAR), Centro de Educación Ambiental Acuexcomatl (CEA), Milpa Alta (MPA), San Nicolás Totolapan (SNT).

Periodo de muestreo de mayo a diciembre 1999.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo y depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Volumen, (volumétrica), pH (electrométrico), (conductímetro digital), acidez (titulación), alcalinidad (titulación), aniones (turbidimétrico), cationes (EAA) y  $\text{NH}_4^+$  (electrodo selectivo de amoniaco).

***Resultados:***

En 1999 los valores promedio ponderados de la mayoría de los sitios de monitoreo se ubicaron dentro del intervalo de pH normal del agua de lluvia (5.00-5.60 unidades), la excepción fue para DIC, EDL y PAR (zona Suroeste) cuyos valores por debajo del valor criterio caracterizaron la presencia de lluvia ácida, y XAL (zona Noreste) en donde se obtuvo el único valor ligeramente ácido con tendencia a la alcalinidad.

La acidez del agua de lluvia esta principalmente influenciada por el  $\text{NO}_3^-$  cuya concentración aumentó considerablemente en la mayoría de los sitios de monitoreo, mientras que los niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  disminuyeron en casi todos los sitios (Figura 81).

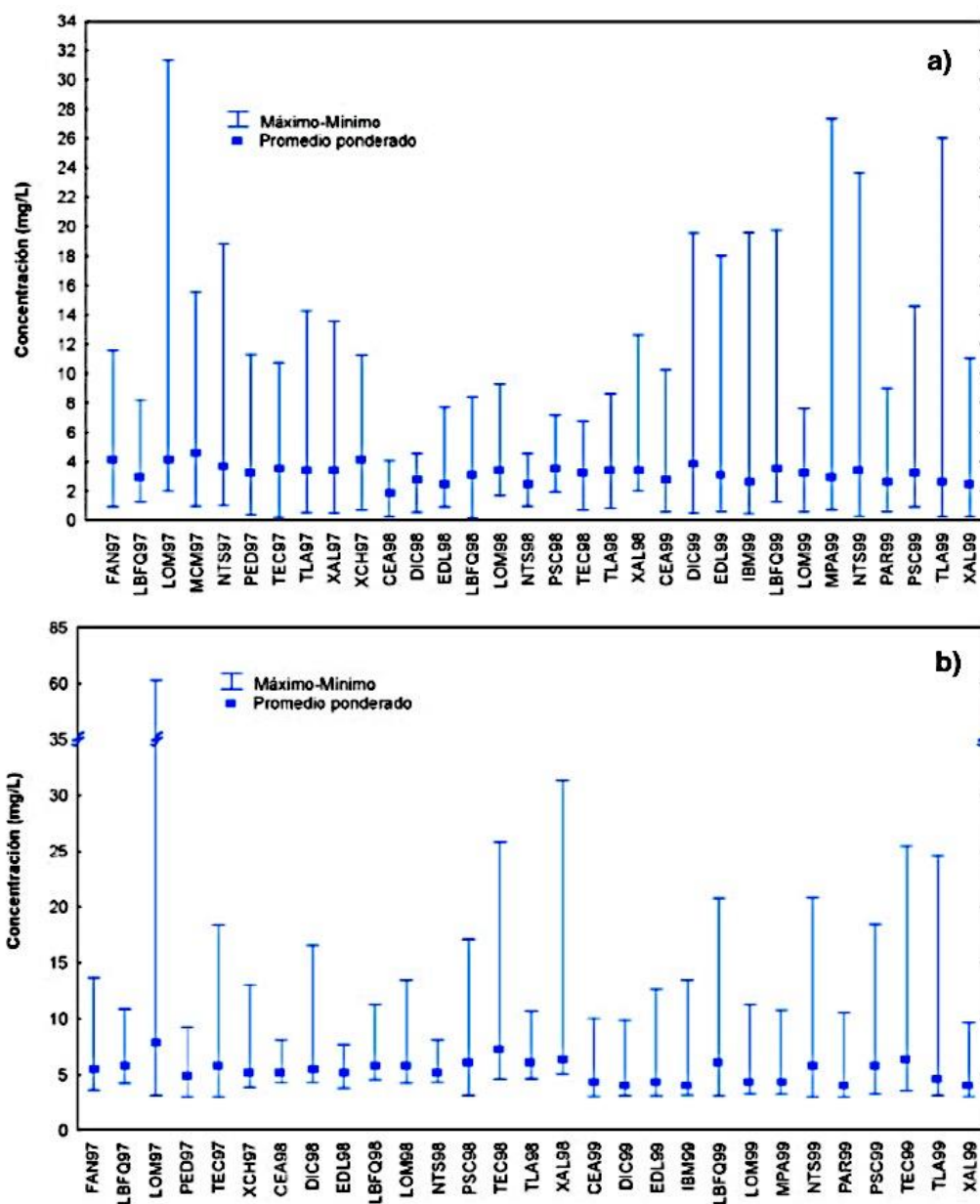


Figura 81. Concentración de a) NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y b) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en el depósito atmosférico de acuerdo a la SEDEMA 1999.



**SEDEMA (2000). Secretaría del Medio Ambiente. Informe anual de la calidad del aire y precipitación ácida en el Valle de México. Gobierno del Distrito Federal. 72 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Plaza de Santa Catalina (PSC), Centro de Educación Ambiental Acuexcomatl (CEA), Lomas (LOM), Plaza de Santa Catarina (PSC), Xochimilco (XCH).

Periodo de muestreo: mayo-noviembre del 2000.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo y depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Se determinó pH, CE,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  (no se especifica la técnica analítica).

***Resultados:***

En los últimos años el promedio ponderado anual del pH del agua de lluvia, se ha mantenido en el intervalo considerado como normal, lo que puede asociarse con una mayor presencia de cationes en la atmósfera que neutralizan los efectos ácidos originados por  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ .

Esto se sustenta en el análisis de aniones, los cuales presentan entre 8 a 24 veces por arriba de concentraciones de fondo. El Suroeste es la zona que presenta niveles de pH ácido, el cual se asocia con el arrastre de partículas de la zona Norte que es principalmente industrial, ya que los vientos predominantes en la ZMVM son del Noreste con dirección al Suroeste. El análisis de correlación mostró una asociación positiva entre los cationes y pH, ya que al aumentar los cationes el pH tiende a ser alcalino y cuando disminuyen el pH tiende a la acidez. Los aniones tienen un comportamiento aparentemente estable, ya que no presentan una variación temporal importante (Figura 82).

## Formación de la lluvia ácida

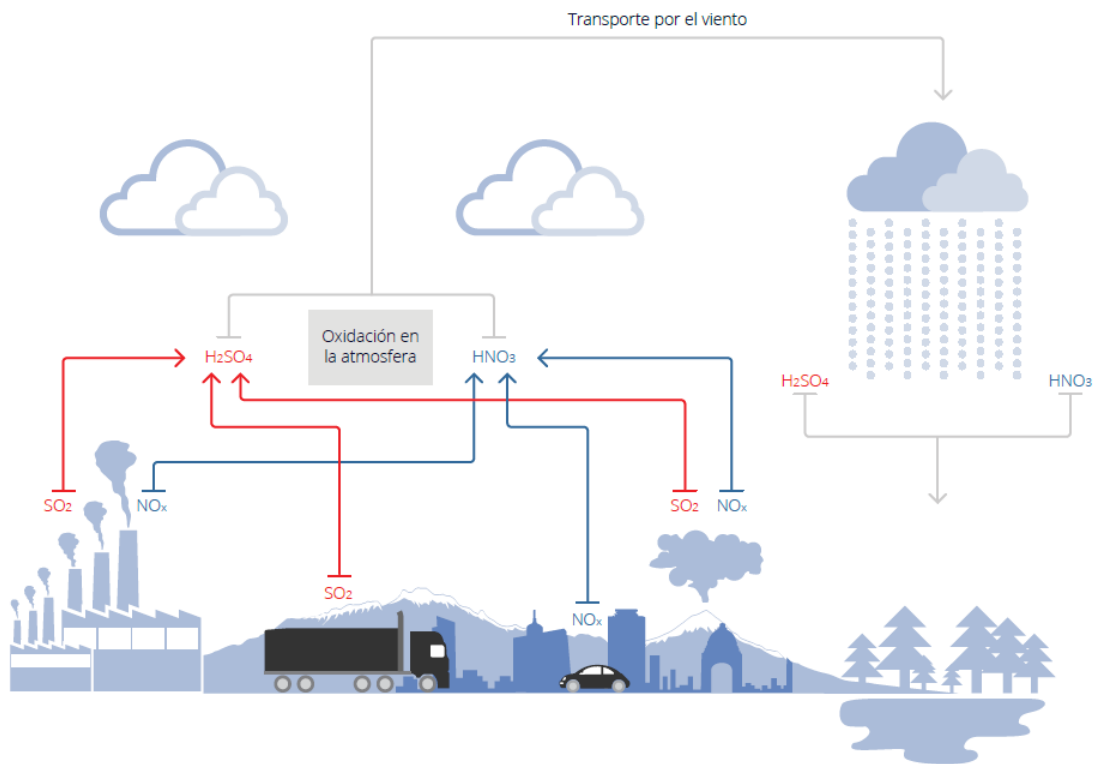


Figura 82. Proceso de formación de lluvia ácida.

**SEDEMA (2001). Secretaría del Medio Ambiente. Informe de estado de la calidad del aire y tendencias 2001 para la Zona Metropolitana del Valle de México. Sistema de Monitoreo Atmosférico. Gobierno del Distrito Federal. 114 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Plaza de Santa Catalina (PSC), Centro de Educación Ambiental Acuexcomatl (CEA), Lomas (LOM), Plaza de Santa Catarina (PSC), Xochimilco (XCH). Periodo de muestreo: mayo-noviembre del 2001.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo y depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Se determinó pH, CE,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  (no se especifica la técnica analítica).

***Resultados:***

Durante la época de lluvia, en el caso del promedio ponderado, los valores obtenidos para  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en la región Sur, son tan altos o mayores que los obtenidos en el Norte de la ciudad, mientras que los valores más bajos de pH (4.6 a 5.0) prevalecieron en el Suroeste. Por su parte, los compuestos de origen natural reflejan una posible influencia de fuentes de emisión localizadas hacia el Norte y Este de la ciudad, donde predominan suelos sin cubierta vegetal. El análisis del depósito mostró que la región comprendida por las delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan, Coyoacán, y el municipio de Huixquilucan del Estado de México, recibió la mayor cantidad de iones depositados por recibir la mayor cantidad de precipitación pluvial, la cual tiene un promedio de 2800 mm al año (Figura 83). Asimismo la región que comprenden las delegaciones Gustavo A. Madero, Tláhuac, Milpa Alta, y el municipio de Tlalnepantla, se caracterizaron por registrar un menor depósito.

Es importante comentar que la variación que presentó el pH durante 2001 en la ZMVM, fue similar a la que reporta la US-EPA y el NADP (por sus siglas en inglés).

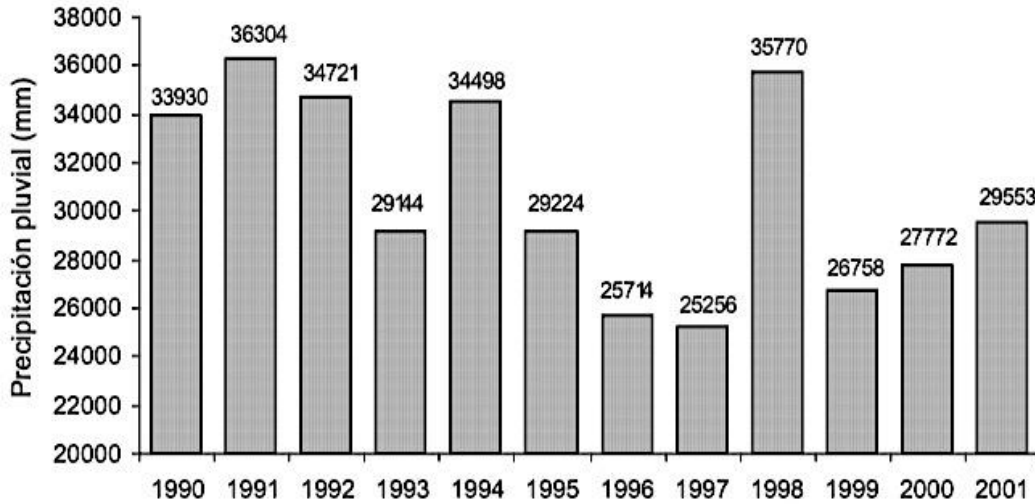


Figura 83. Precipitación pluvial captada en periodo de lluvioso de la ZMCM.

**SEDEMA (2002). Secretaría del Medio Ambiente. Informe de estado de la calidad del aire y tendencias 2002. Zona Metropolitana del Valle de México. Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Gobierno del Distrito Federal. 36 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Corena (COR), Chapingo (CHA), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT): Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2002.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . No se especifica la técnica analítica.

***Resultados:***

La concentración ponderada de iones (expresada en mg/L de agua) y la conductividad eléctrica, son parámetros que determinan la calidad del agua de lluvia.

La REDDA del SIMAT realiza mediciones de iones de origen antropogénico ( $\text{SO}_4^{2-}$ ;  $\text{NO}_3^-$ ;  $\text{NH}_4^+$ ) y natural ( $\text{Na}^+$ ;  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{K}^+$ ).

En el año 2002, la concentración ponderada de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , fue 4.8, 2.8 y 1.6 mg/L, respectivamente. Los valores máximos correspondieron a estaciones de monitoreo localizadas en la región Norte de la ZMVM, donde hay una mayor concentración de industrias. El  $\text{Ca}^{2+}$  es el ion de origen natural con mayor concentración, principalmente en la estación XAL.

La magnitud del pH se asocia con una mayor proporción de los iones de origen antropogénico registrados en cada estación. La conductividad eléctrica también

alcanzó sus valores máximos en el Noreste de la ZMVM, la representación espacial de este parámetro indica que las muestras de agua de lluvia recopiladas en áreas con uso de suelo urbano-industrial, tuvieron la mayor cantidad de iones disueltos. Los valores de pH en la región Suroeste oscilaron entre 4.6 y 5.0. (Figura 84).

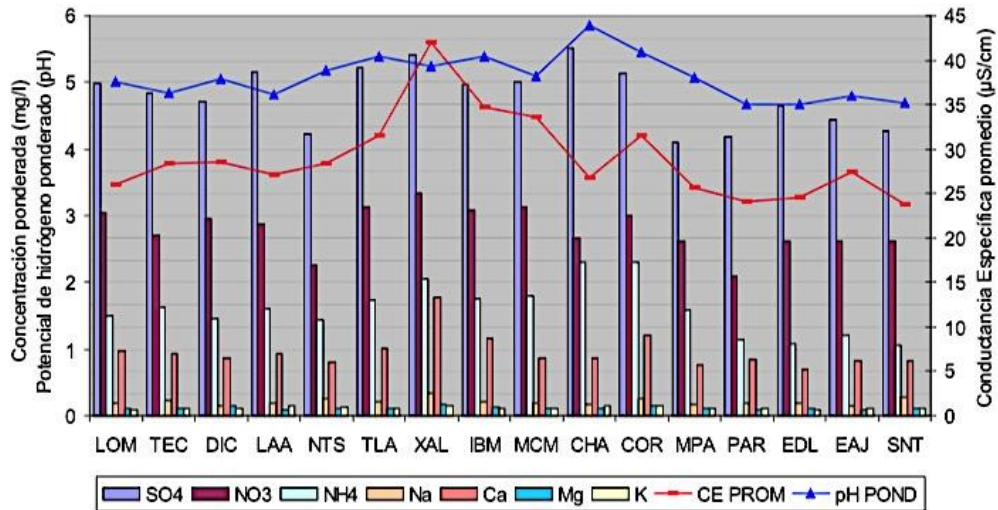


Figura 84. Concentración de iones (mg/L), pH y conductividad (µS/cm) para los sitios de muestreo de lluvia ácida en la ZMVM para el año 2002.

**SEDEMA (2003). Secretaría del Medio Ambiente. Informe del estado de la calidad del aire y tendencias 2003 para la Zona Metropolitana del Valle de México. Gobierno del Distrito Federal. 44 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Corena (COR), Chapingo (CHA), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT): Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2003.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl.

***Resultados:***

En el año 2003, la precipitación pluvial acumulada fue de 719 mm y se puede calificar como “alta” si se compara con el volumen registrado en años anteriores. El mes que registró mayor precipitación fue junio, con 198 mm. La distribución espacial del volumen de precipitación pluvial registrado en la época de lluvias, mostró los niveles máximos en la región que incluye las delegaciones Tlalpan, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Miguel Hidalgo y los municipios Huixquilucan y Naucalpan. Los niveles menores, se localizaron en la región que comprende las delegaciones Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza y el municipio Nezahualcóyotl. El patrón espacial del depósito húmedo muestra valores altos en el Suroeste y bajos en el este de la ZMVM. El Suroeste presenta entorno forestal con alta precipitación y el este entorno mixto urbano-industrial con baja precipitación.

El depósito húmedo promedio de:  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  durante la época de lluvias de 2003, fue de 30, 21 y 19 kg/ha, respectivamente (Figura 85). El análisis químico



del depósito húmedo indicó que las estaciones con entorno forestal presentaron el mayor flujo de masa total, mostrando una mayor concentración de  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ .

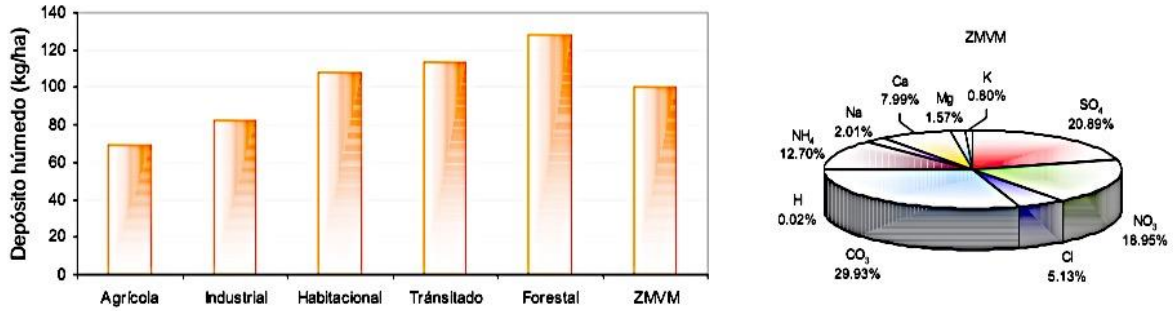


Figura 85. Flujo de masa total (kg/ha) y su porción (%) en la ZMVM.

**SEDEMA (2004). Secretaría del Medio Ambiente. Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2004. Zona Metropolitana del Valle de México. Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Gobierno del Distrito Federal. 54 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Corena (COR), Chapingo (CHA), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT). Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2004.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl.

***Resultados:***

Durante la época de lluvias del año 2004, el depósito húmedo promedio de  $\text{SO}_4^{2-}$ , fue de 14.3 kg/ha. El depósito húmedo promedio de  $\text{NO}_3^-$  en las 16 estaciones de monitoreo de la ZMVM con mejor desempeño histórico, presentó un comportamiento fluctuante en los registros de 1998 a 2004, con el depósito máximo en el año 2001. El depósito húmedo promedio de  $\text{NO}_3^-$ , durante la época de lluvias de 2004, fue de 14.5 kg/ha. El análisis del pH ponderado entre 1998 y 2004, en las 16 estaciones de monitoreo con mejor desempeño histórico, indicó que la acidez del agua de lluvia presentó un comportamiento fluctuante con el pH mínimo en 1998 y el máximo en 2004. El incremento de la acidez en 2001 y 2002, se puede asociar al aumento de los depósitos de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  (Figura 86). La transferencia de los contaminantes precursores de la acidez al Suroeste de la ZMVM coincide con el patrón de distribución del pH, ya que esta zona presentó los

valores de mayor acidez durante la época de lluvias en el año 2004. La distribución espacial del pH mostró valores que oscilan entre 5.06 y 6.31.

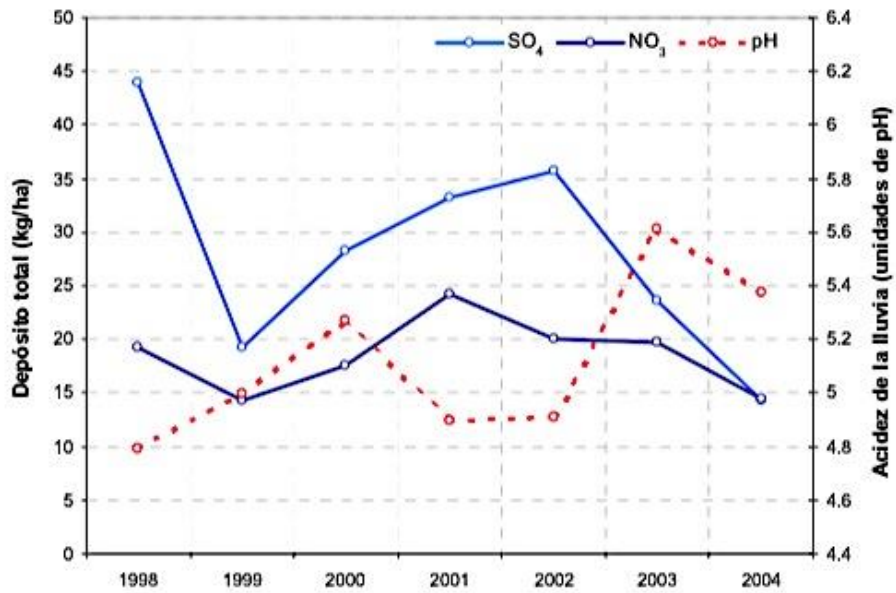


Figura 86. Comportamiento del depósito húmedo en la ZMVM, según SEDEMA, 2004

**SEDEMA (2005). Secretaría del Medio Ambiente. La Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. 20 años de monitoreo (1986-2005). Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Gobierno del Distrito Federal. 91 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Corena (COR), Chapingo (CHA), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT).

Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2005.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por CII.

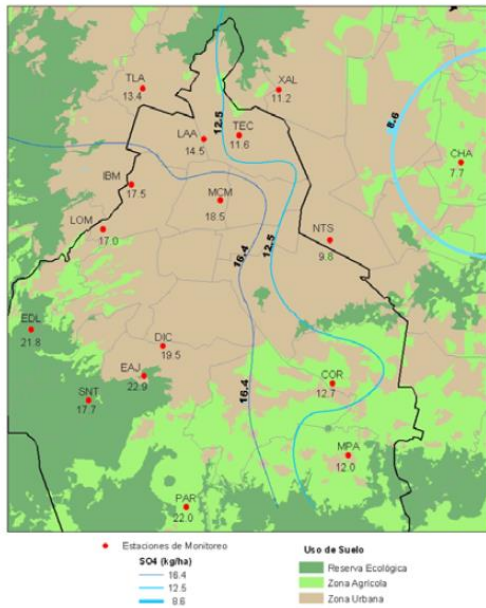
***Resultados:***

El comportamiento temporal del  $\text{SO}_4^{2-}$ , tuvo un repunte en el año 2005, al estimarse que durante la temporada de lluvia se depositaron 17.1 kg/ha. En el caso del  $\text{NO}_3^-$ , asociado a  $\text{NO}_x$ , se estimó un depósito de 12.5 kg/ha, el más bajo desde 1998. Con relación a la distribución del depósito (Figura 87), ambos precursores muestran el gradiente de transferencia típico para la ZMVM, esto es, valores altos en el Suroeste y bajos en el Noreste. El gradiente de  $\text{SO}_4^{2-}$  fluctuó entre 7.7 y 22.9 kg/ha, y en el caso del  $\text{NO}_3^-$  entre 6.6 y 20.6 kg/ha. La evolución temporal y espacial de los registros del pH del agua de lluvia, permite inferir acerca de la relevancia del proceso de transferencia de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  hacia las áreas forestales y agrícolas del Sur de la ZMVM. La información disponible desde 1990, indica que la incidencia de eventos de lluvia ácida ( $\text{pH} \leq 5.6$ ) en estas áreas ha sido una situación que sucede año con año. Es importante resaltar la

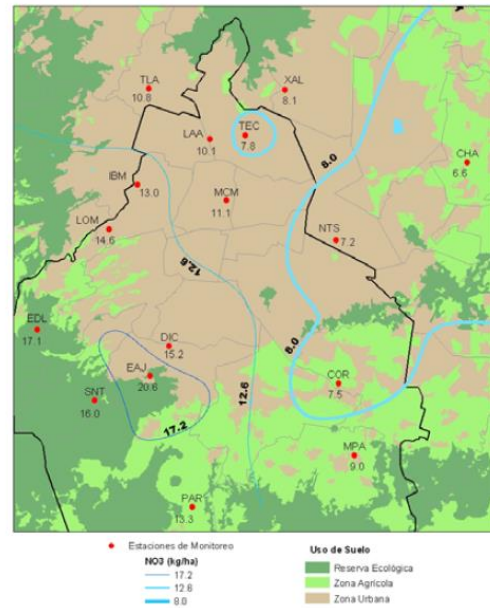
relevancia que tienen como proveedoras de servicios ambientales para la ZMVM, al ser áreas de recarga para el acuífero y sumideros de carbono.

En términos comparativos, se puede señalar que en 1990 la superficie impactada por eventos de lluvia ácida, equivalió al 90% de la superficie, mientras que en 2005 la superficie equivalió al 33%, con valores de pH que oscilaron entre 5.18 en el Suroeste y 6.45 en el Noreste.

**Mapa 12. Distribución espacial del depósito húmedo de  $\text{SO}_4^{2-}$  (kg/ha) en la ZMVM, 2005.**



**Mapa 13. Distribución espacial del depósito húmedo de  $\text{NO}_3^-$  (kg/ha) en la ZMVM, 2005.**



*Figura 87. Distribución espacial de depósito atmosférico (kg/ha) a) sulfatos y b) nitratos, en el año 2005*

**SEDEMA (2006). Secretaría del Medio Ambiente. La Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 1986-2006. Informe del estado y tendencias de la contaminación atmosférica. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. 2007. 91 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Corena (COR), Chapingo (CHA), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolas Totolapan (SNT).

Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2006.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl.

***Resultados:***

El SIMAT lleva a cabo la medición de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  disueltos en el agua de lluvia, los cuales son un indicativo del comportamiento y evolución que tiene la lluvia ácida. La serie de tiempo 1998–2006, muestra un comportamiento irregular de ambos indicadores. En 2005 hubo un repunte de los niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$ . La distribución espacial que tienen ambos precursores señala que sus valores altos ocurren en el Suroeste de la ZMVM y los valores bajos en el Noreste, lo que se traduce en una mayor transferencia de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  hacia las áreas forestales y agrícolas del Sur de la ZMVM. El análisis de la distribución de los registros del pH del agua de lluvia (Figura 88), señala que la mayor incidencia de eventos de lluvia ácida ( $\text{pH} \leq 5.6$ ) ocurrió en el año 1998, lo cual coincide con el mayor registro de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

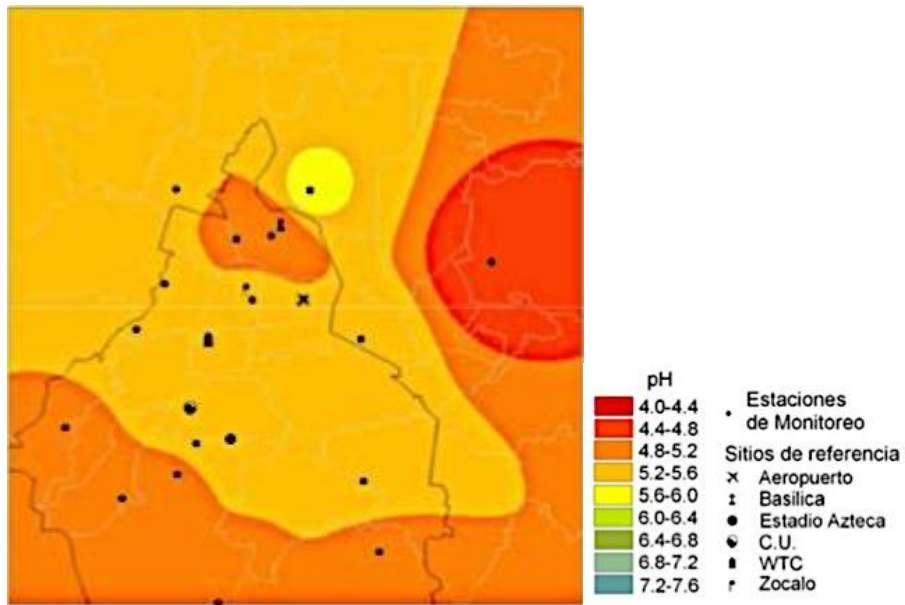


Figura 88. Distribución espacial de pH en 2006.



**SEDEMA (2007). Secretaría del Medio Ambiente. Informe de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México Estado y Tendencias 1990-2007. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. 2008. 58 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Corena (COR), Chapingo (CHA), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT).

Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2007.

***Método de muestreo:***

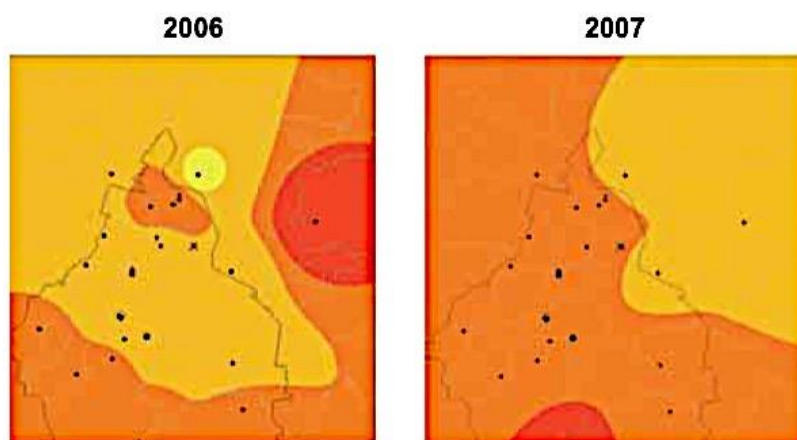
Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl.

***Resultados:***

Durante el año 2007 se registraron 17 eventos semanales de lluvia en cada sitio de muestreo. La estación PAR registró el valor de pH más bajo con 4.6 unidades. La zona más afectada es la zona de conservación y agrícola. Se registraron eventos de lluvia ácida en toda la ZMVM (Figura 89). La cantidad de precipitación pluvial depositada en la ZMVM, permite sugerir que su comportamiento histórico es estable y su relación con la tendencia de los contaminantes del aire es mínima. Un aspecto notable en la región Sur, es que es donde se deposita una mayor cantidad de lluvia. Esta situación puede tener una relación estrecha con el comportamiento de contaminantes, en primera instancia puede sugerir una mayor depuración de los contaminantes suspendidos en la atmósfera.



*Figura 89. Distribución espacial de pH para 2006 y 2007 en la ZMVM.*

**SEDEMA (2008). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2008. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2009. 148 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Xalostoc (XAL), Parres (PAR), Corena (COR), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT).

Periodo de muestreo: mayo-noviembre de 2008.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

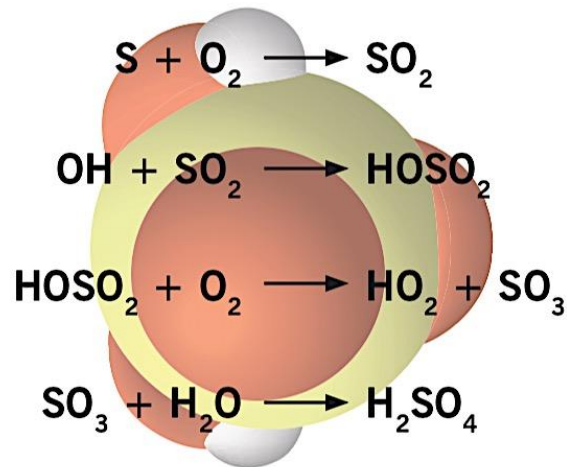
***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl.

***Resultados:***

Desde el año 2003, la región impactada por la lluvia ácida se ha incrementado gradualmente, ya que sólo 4 de 16 estaciones reportaron un promedio ponderado de pH menor a 5.6. En los años 2004 y 2005 se duplicó el número de estaciones y para los años 2006 y 2007 todas las estaciones reportaron la presencia de lluvia ácida. En 2008 solo la estación de XAL registró un valor promedio de pH mayor a 5.6; la estación de SNT localizada en la delegación Magdalena Contreras, registró el valor más bajo de pH con un valor de 3.8 durante la semana del 9 al 15 de junio. Sin embargo, fue la estación de PAR localizada en la delegación Tlalpan, la que reportó el promedio ponderado de pH más bajo con un valor de 4.8, debido a que en esta estación el 61% de las muestras colectadas reportaron valores ácidos. A pesar de que los resultados de 2008 indicaron que en todo el Distrito Federal se presentan problemas por lluvia ácida, la región con la mayor afectación se encuentra al Sur del Distrito Federal, principalmente donde se ubica el suelo de

conservación, que incluye las zonas boscosas de la Sierra del Ajusco, el bosque del Desierto de los Leones y las zonas agrícolas del Ajusco, Milpa Alta y Xochimilco. En la Figura 90 se muestra el mecanismo de formación de la lluvia ácida.



*Figura 90. Mecanismo de formación de la lluvia ácida.*

**SEDEMA (2009). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2009. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2010. 188 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Xalostoc (XAL), Parres (PAR), Corena (COR), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT). Periodo de muestreo: junio-octubre de 2009 (Figura 91).



*Figura 91. Fotografía tomada el 12/04/2009 en la ZMCM. Fenómeno de lluvia ácida, SEDEMA 2009*

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

**Análisis de muestras:**

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl. El análisis químico se realiza siguiendo las recomendaciones del NADP-WMO (Allan, 2004).

**Resultados:**

En la temporada de lluvia del año 2009 (junio a octubre), la estación de monitoreo EDL acumuló el máximo de precipitación con 1227 mm de lluvia, seguida por la estación SNT con 1144 mm, de acuerdo con los registros de la REDDA del SIMAT. Las precipitaciones en la Ciudad de México y su área metropolitana, suelen ser más ácidas en el Sur y Poniente que en el Norte y Centro, aunado a esto, la región expuesta a eventos de lluvia ácida se ha incrementado gradualmente desde 2004. Los resultados de 2009 indicaron que la acidez de la lluvia presentó poca variabilidad espacial con valores promedio de pH entre 4.9 y 5.6. El valor promedio más ácido se obtuvo en la estación EAJ, localizada en la delegación Tlalpan y la muestra más ácida con un pH de 4.3 se registró la cuarta semana de octubre en la estación EDL ubicada en la delegación Cuajimalpa. A pesar de que los datos de pH indicaron cierta homogeneidad en la distribución de la acidez, es probable que en el Sur del Distrito Federal sean mayores los efectos de la lluvia ácida, ya que suele ser mayor el porcentaje de muestreos ácidos en esta región, tal es el caso de las estaciones PAR, MPA, SNT, EAJ, COR y EDL, que presentaron valores ácidos en al menos una quinta parte de los muestreos (52, 40, 36, 32, 31 y 28% respectivamente). Dichas estaciones son representativas de la mayor área de conservación en la Ciudad de México, que incluye los bosques de la Sierra del Ajusco, el bosque del Desierto de los Leones y las zonas agrícolas del Ajusco, Milpa Alta y Xochimilco.

**SEDEMA (2010). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México Informe 2010. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2010. 166 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Xalostoc (XAL), Parres (PAR), Corena (COR), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT).

Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2010.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl. El análisis químico se realiza siguiendo las recomendaciones del NADP-WMO (Allan, 2004).

***Resultados:***

En 2010 se observó una disminución importante en la superficie afectada por la presencia de lluvia ácida, sin embargo, es sobre el suelo de conservación donde se registraron los mayores valores de acidez (pH más bajo). La estación de monitoreo EAJ localizada en las laderas del Ajusco, registró el menor valor de pH con 4.09 para la muestra obtenida durante el periodo del 31 de mayo al 6 de junio. La estación PAR localizada en el Ajusco reportó el promedio más bajo de la temporada con un valor de pH de 5.1. El análisis de las muestras de depósito húmedo indicó que los iones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , son los más abundantes. Mientras que el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se encontraron en menor concentración. Las estaciones de monitoreo ubicadas en el suelo de conservación generalmente reciben la mayor cantidad de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ . Durante la temporada de lluvia de 2010, sobre el suelo de conservación se registró un depósito acumulado de 14.4 a



20.0 kg/ha de  $\text{NO}_3^-$ , mientras que en el caso de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue entre 15.3 y 19.9 kg/ha. Para  $\text{NH}_4^+$ , los valores en el suelo de conservación se encuentran entre 8.7 y 11.0 kg/ha. La estación PAR, localizada en el Ajusco, registró los valores más altos de depósito de estos contaminantes. La Figura 92 muestra la distribución espacial de la acidez en el agua de lluvia de 2005 a 2010.

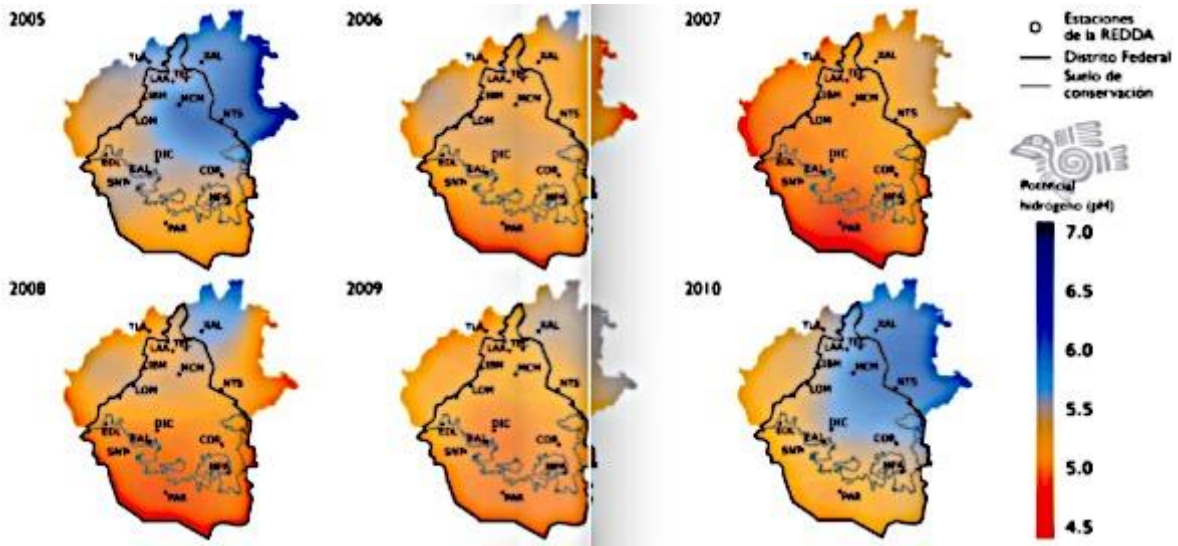


Figura 92. Distribución espacial de la acidez en el agua de lluvia de 2005 a 2010, según SEDEMA 2010.

**SEDEMA (2011). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México Informe 2011. 25 años de monitoreo atmosférico (1986-2011). Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2012. 122 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Xalostoc (XAL), Parres (PAR), Corena (COR), Milpa Alta (MPA), Diconsa (DIC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT). Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2011.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco. La Figura 93 muestra el colector automático para el muestreo de depósito atmosférico.



*Figura 93. Equipos para el muestreo de depósito atmosférico, SEDEMA 2011.*

**Análisis de muestras:**

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl. El análisis químico se realiza siguiendo las recomendaciones del NADP-WMO (Allan, 2004).

**Resultados:**

Las estaciones ubicadas en el suelo de conservación al Sur del Distrito Federal registraron la mayor acidez, ya que el valor del promedio ponderado del pH de todas las muestras fue menor al pH del agua de lluvia de 5.6. La estación SNT localizada en el parque ejidal San Nicolás Totolapan, en la delegación Tlalpan, registró los mayores valores de acidez con un promedio ponderado de pH de 4.8. Por otra parte, las estaciones localizadas dentro de la zona urbana reportaron un valor promedio de pH mayor o igual a 5.6. Los resultados de este año mostraron que la zona en donde se presentó el mayor número de episodios de lluvia ácida fue en el suelo de conservación, región en donde puede provocar una mayor afectación. Desafortunadamente este patrón se ha observado de manera recurrente en los últimos años, aún cuando no se cuenta con información detallada sobre los daños que la lluvia ácida tiene al Sur de la ciudad. De acuerdo con lo que se describe en la literatura científica los bosques que aún sobreviven en el Distrito Federal y en las colindancias con Morelos y el Estado de México, se encuentran en riesgo. Los daños asociados a la lluvia ácida pueden provocar en el largo plazo la declinación de los bosques y una merma en el rendimiento de los cultivos.

**SEDEMA (2013). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2013. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2014. 147 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Xalostoc (XAL), Ajusco (AJU), Corena (COR), Milpa Alta (MPA), Montecillo (MON), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NEZ), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT).

Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2013.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl. El análisis químico se realiza siguiendo las recomendaciones del NADP-WMO (Allan, 2004).

***Resultados:***

Durante el periodo de muestreo de 2013 se colectaron un total de 26 muestras en cada sitio de muestreo de depósito húmedo, en el periodo comprendido entre el 5 de mayo al 27 de octubre. Los sitios localizados en el suelo de conservación, al Sur del Distrito Federal, son los que reportaron el mayor número de episodios con lluvia ácida, los sitios ubicados al Norte reportaron el menor número de episodios de lluvia ácida, en el sitio de MON solo 4 muestras reportaron lluvia ácida (15% del total de muestras colectadas). En el sitio AJU ubicado en el poblado de Parres, en la delegación Tlalpan, en el 77% de las muestras se identificó lluvia ácida. SNT y AJU reportaron los valores mínimos de pH con 3.6 y 3.8, respectivamente. El mayor número de eventos de lluvia ácida se registró en las estaciones ubicadas en el suelo de conservación al Sur del Distrito Federal (AJU, SNT, MPA, EAJ y EDL), mientras que las estaciones localizadas al Norte de la ciudad (MON, XAL y



NEZ), registraron los mayores valores de pH (Figura 94). Los resultados confirman que durante la temporada de lluvia el suelo de conservación se encuentra frecuentemente expuesto a la lluvia ácida, sin embargo, poco se ha estudiado acerca de sus efectos y la magnitud del daño que provoca.

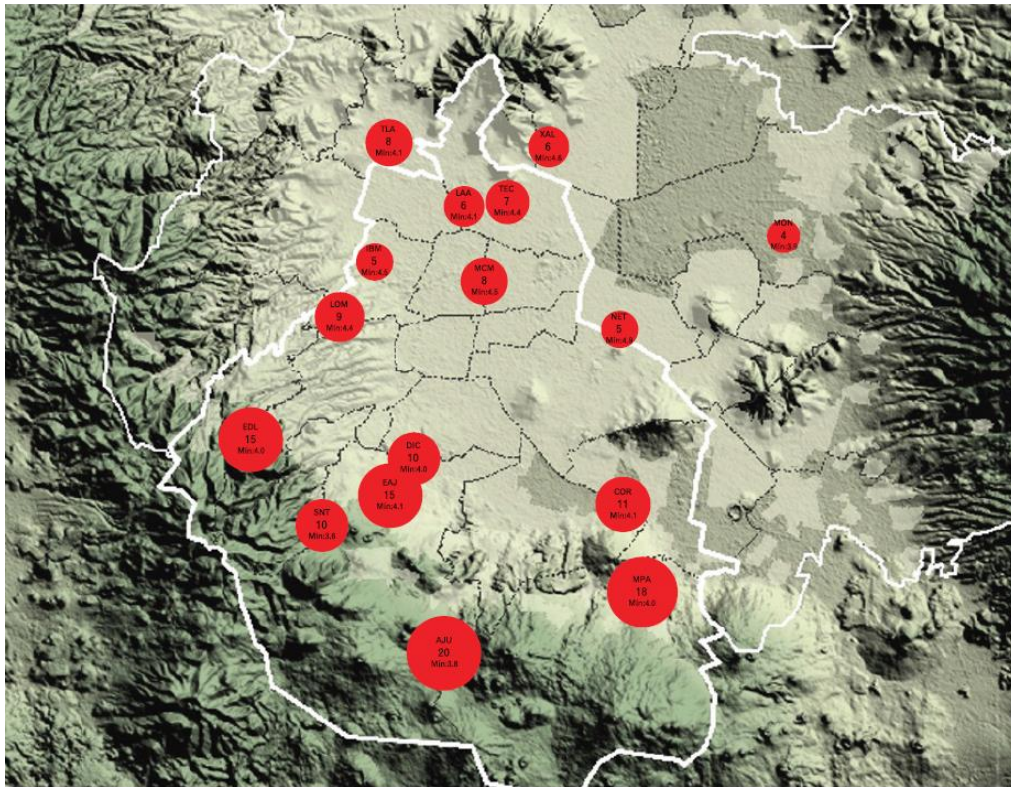


Figura 94. Número de eventos de lluvia ácida por sitio de muestreo en 2013.

**SEDEMA (2014). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2014. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. junio 2015. 122 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Xalostoc (XAL), Ajusco (AJU), Corena (COR), Milpa Alta (MPA), Montecillo (MON), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NEZ), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT). Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2014.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl. El análisis químico se realiza siguiendo las recomendaciones del NADP-WMO (Allan, 2004).

***Resultados:***

En 2014 se colectaron un total de 26 muestreos semanales por sitio. En todos los sitios se obtuvo más del 75% de muestras válidas. Durante la temporada de lluvia se registró al menos un evento con lluvia ácida en todos los sitios. El mayor número de episodios de lluvia ácida se observó en el Sur y Oeste del Distrito Federal, en la región de suelo de conservación. Las muestras obtenidas en los sitios AJU y EAJ (ambos en el suelo de conservación de la delegación Tlalpan), reportaron valores de pH que correspondieron a lluvia ácida en más del 50% de las muestras colectadas. El sitio AJU reportó la máxima acidez, con un pH de 3.8. En los sitios ubicados en el Centro y Norte de la ciudad, alrededor del 20% de las muestras reportaron valores de pH menores a 5.6. Destacan los casos de los sitios NEZ en el municipio de Nezahualcoyotl, que reportó sólo un evento de lluvia ácida y XAL en el municipio de Ecatepec, que registró dos eventos ácidos. Estos resultados confirman que el mayor número de eventos de lluvia ácida se

presentan viento abajo de los sitios de emisión de los precursores de la acidez, y el depósito ocurre en las regiones más sensibles al impacto de este fenómeno. Por otra parte, en el sitio MCM ubicado en el Centro Histórico, se reportaron valores con pH ácido en cinco de los muestreos. A pesar del bajo número de episodios, es importante mencionar que en esta zona se encuentran un número importante de obras, monumentos y edificaciones de gran valor artístico, cultural o histórico, elaborados o construidos con materiales susceptibles a ser degradados por la lluvia ácida (p.e. mármol, travertino, calcita), por lo que cualquier daño sería incalculable. La Figura 95 muestra la distribución espacial de depósito total acumulado por iones presentes en la lluvia.

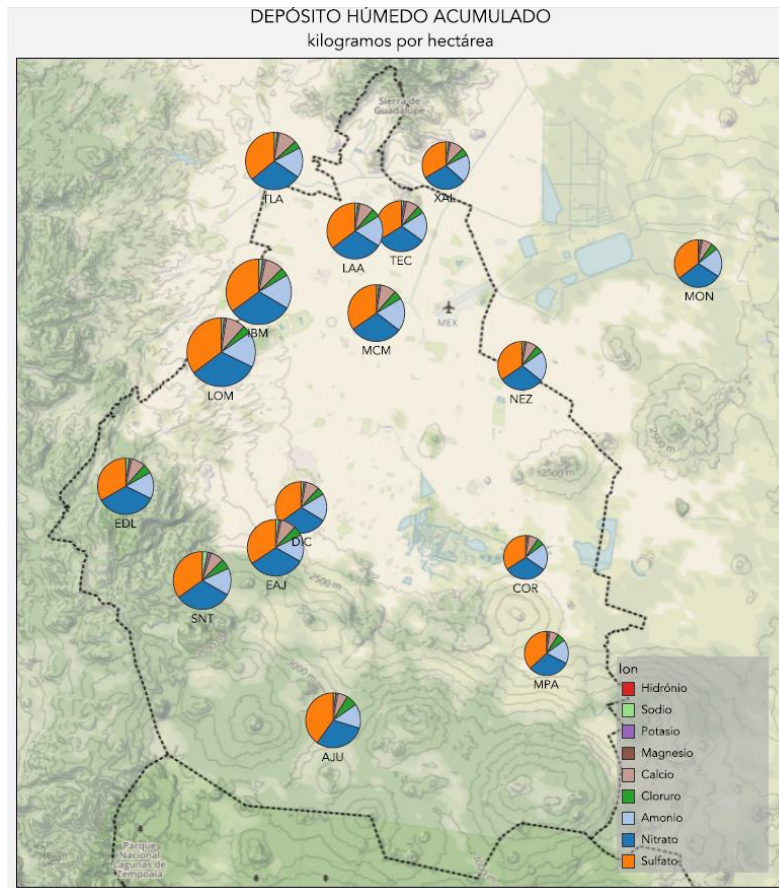


Figura 95. Distribución espacial del depósito total acumulado por iones presentes en la lluvia en 2014



**SEDEMA (2015). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe anual 2015. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. julio 2016. 179 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Xalostoc (XAL), Ajusco (AJU), Corena (COR), Milpa Alta (MPA), Montecillo (MON), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NEZ), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT). Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2015.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl. El análisis químico se realiza siguiendo las recomendaciones del NADP-WMO (Allan, 2004).

***Resultados:***

Durante el año 2015, alrededor del 62 % de todas muestras reportaron un valor de pH menor a 5.6. En todos los sitios de muestreo se observaron muestras con valores de pH que corresponden a lluvia ácida (Figura 96). El valor mínimo de pH fue de 3.8 en el sitio de MPA al Sureste de la Ciudad de México, el cual se ubica en una zona rural en donde predomina la actividad agrícola. En el sitio COR, ubicado en Xochimilco, MCM y MON se reportaron mínimos de pH con valores de 3.9. El máximo de pH se observó en el sitio COR con un valor de 8.0. Debido a la dirección predominante de los vientos, los sitios ubicados viento abajo de las zonas de máxima emisión de los precursores de la lluvia ácida son los más afectados. Se reportaron valores que corresponden a lluvia ácida ( $\text{pH} < 5.6$ ), el mayor número de episodios ocurrieron al Sur y al Poniente de la Ciudad de México. La región de suelo de conservación, que es la más susceptible a los

daños provocados por la lluvia ácida, es la que experimentó el mayor número de episodios durante esta temporada. En el sitio EDL ubicado dentro del Parque Nacional Desierto de los Leones, el 65% de las muestras analizadas reportaron un pH menor a 5.6. El sitio AJU localizado dentro del Parque Nacional Cumbres del Ajusco, reportó valores de pH correspondientes a lluvia ácida en el 58% de las muestras.

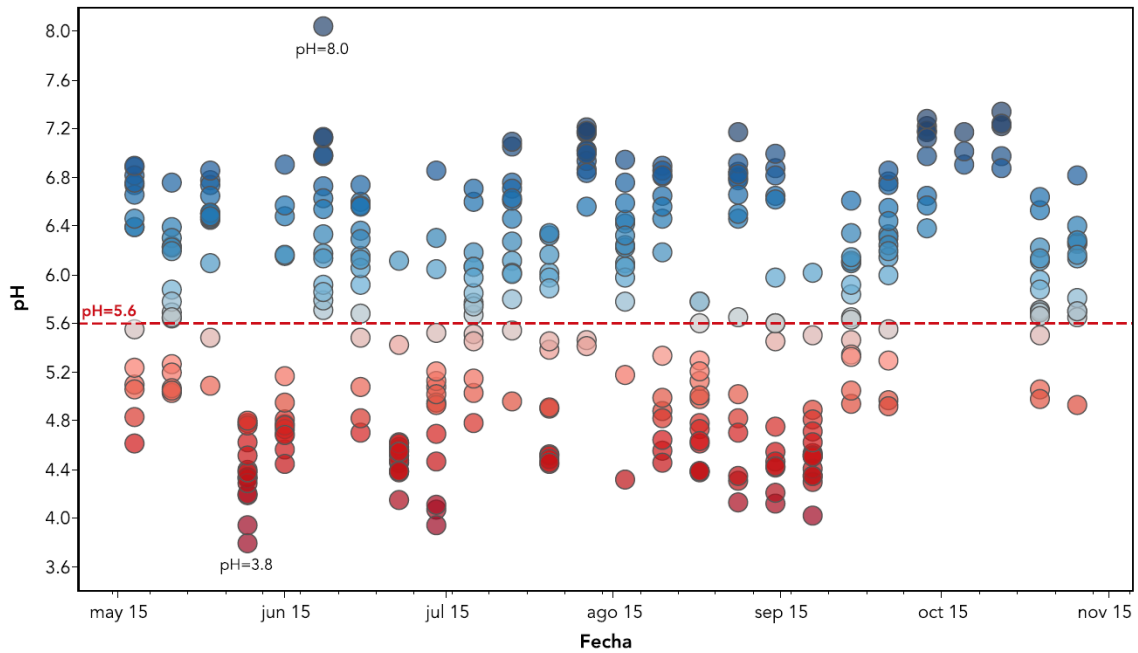


Figura 96. Valores de pH de las muestras colectadas en 2015.

**SEDEMA (2016). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe anual 2016. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico. Cd. de México, noviembre 2017. 204 pág.**

***Sitio y año de muestreo:***

Xalostoc (XAL), Ajusco (AJU), Corena (COR), Milpa Alta (MPA), Montecillo (MON), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Lomas (LOM), Netzahualcóyotl Sur (NEZ), Cerro del Tepeyac (TEC), Tlalnepantla (TLA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Legaria (IBM), Ecoguardas Ajusco Picacho (EAJ), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT).

Periodo de muestreo: mayo-noviembre 2016.

***Método de muestreo:***

Depósito total, depósito húmedo, depósito seco.

***Análisis de muestras:***

Medición de volumen, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por Cl. El análisis químico se realiza siguiendo las recomendaciones del NADP-WMO (Allan, 2004).

***Resultados:***

La distribución espacial del volumen acumulado durante el periodo de muestreo del año 2016, mostraron que los sitios ubicados al Suroeste de la Ciudad de México tuvieron los mayores volúmenes de precipitación, mientras que los sitios ubicados al Este registraron los menores valores. El sitio SNT registró un volumen acumulado máximo con 1146 mm (~1146 litros por metro cuadrado). La Figura 97 muestra la abundancia relativa de los iones inorgánicos presentes en el depósito atmosférico la que estuvo definida por el siguiente orden:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+$ . Los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  contribuyeron con alrededor del 70% de la masa total de la fracción iónica inorgánica, ambos tienen su origen en los procesos de oxidación de los óxidos de nitrógeno y de azufre emitidos a la atmósfera.

Los valores máximos de acidez, estimada como el promedio ponderado del pH, se observaron en la porción Sur de la Ciudad de México con un pH ponderado mínimo en el sitio MPA ubicado en la Delegación Milpa Alta, en una región con uso de suelo predominantemente agrícola.

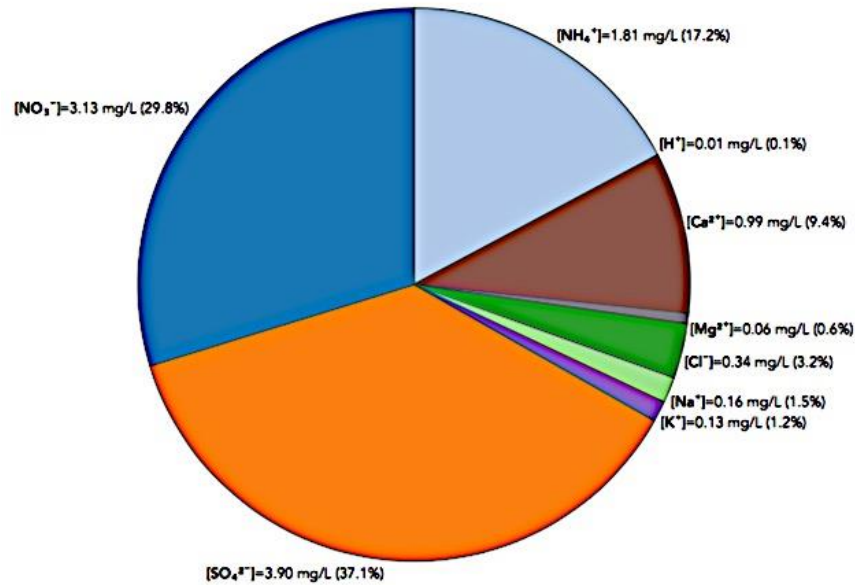


Figura 97. Concentración promedio de especies químicas en el depósito atmosférico húmedo, según SEDEMA, 2016.

#### 4.4.2 Estudios realizados por otros autores y/o instituciones

**Flores, J., Vaca, M., López, R., González, A., & Barceló, M. (2002). Plomo, cadmio y zinc en polvos sedimentados a diferentes alturas en la Ciudad de México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol.14.**

##### ***Sitio y año de muestreo:***

Los sitios de muestreo fueron localizados en la Delegación Azcapotzalco; en la Delegación Venustiano Carranza y en la Delegación Cuauhtémoc. Se llevaron a cabo tres muestreos durante el primer semestre del año 2001 en la Ciudad de México.

##### ***Método de muestreo:***

Las muestras de partículas se colectaron con un aspirador, se guardaron en bolsas de polietileno para su traslado al laboratorio. Los muestreos se realizaron a diferentes alturas.

##### ***Análisis de muestras:***

Se secaron durante toda una noche a 100° C, se tamizaron con una malla de un milímetro para eliminar las partículas grandes. Las muestras se sometieron a digestión ácida por duplicado y blancos. El análisis de los metales (Pb, Cd y Zn), se llevó a cabo por EAA.

##### ***Resultados:***

La concentración de Pb se encontró en un intervalo de 100 a 310 mg/kg, la concentración de Cd en un intervalo de 0.5 a 2.7 mg/Kg y la concentración de Zn en un intervalo de 200 a 1,100 mg/kg. En general se observó para los tres metales analizados, un perfil muy similar, es decir una disminución de la concentración de 3 a 5 metros y luego un aumento hasta 11 metros seguido de una disminución importante hacia los 16 metros. El perfil de las curvas para los tres metales fue similar.

**Velasco Saldaña, H. E., Segovia Estrada, E., Hidalgo Navarro, M., Ramírez Vallejo, S., García Romero, H., Romero Terán, I., y Montaña, J. (2002). Lluvia ácida en los bosques del poniente del Valle de México. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 28 (pp. 1-8). FEMISCA.**

***Sitio y año de muestreo:***

Chapa de Mota (ChM), San Luis Ayucan (SLA), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa (UAMI).

Periodo de muestreo: mayo a diciembre de 2001.

***Método de muestreo:***

Colector automático de depósito atmosférico. Muestreo por evento.

***Análisis de las muestras:***

Determinación pH, conductividad eléctrica, análisis de iones inorgánicos, metales y plaguicidas organoclorados.

***Resultados:***

En cuanto al pH se registraron valores ácidos de hasta 3.88, siendo más bajos aún que los reportados dentro de la zona urbana. Las concentraciones promedio más altas de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  correspondieron al sitio UAMI, ubicado cerca de zonas sin pavimentar y extensiones de tierra erosionada que dan origen a partículas que contribuyen con la presencia de estos cationes en el agua de lluvia. Los sitios ChM y SLA se encuentran localizados en bosques de encinos, donde la vegetación secundaria no es abundante y la tierra queda expuesta a procesos de erosión, condición que se reflejó en las dos mayores concentraciones promedio de  $\text{K}^+$  en estos dos sitios. El sitio EDL se encuentra en un bosque mixto de pinos y oyameles, donde la vegetación es más abundante y los procesos de erosión son menores, y con ello el aporte de partículas a la atmósfera se reduce. Las mayores concentraciones de metales traza (Al, Fe, Mn, Zn y Cu) se presentaron en los dos sitios influenciados por zonas industriales. En general, las concentraciones más altas se presentaron en el sitio SLA, el cual está localizado al Noroeste del área industrial de Tlalnepantla, seguido por el sitio UAMI que se encuentra en un área industrial de menor tamaño en Iztapalapa. Las determinaciones de plaguicidas organoclorados presentaron concentraciones por debajo del límite de detección.

**Torres González Fidel Ángel (2009). Efecto de la lluvia en materiales pétreos del patrimonio histórico del Estado de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigación en Corrosión. Tesis Maestría. Maestría en Ciencias Marinas. Opción: Preservación de infraestructura marina. 123pp.**

***Sitio y año de muestreo:***

San Francisco Campeche (Universidad Autónoma de Campeche). Del 9 de enero al 31 de agosto de 2007.

***Método de muestreo:***

Colector automático de depósito atmosférico. Muestreo por evento.

***Análisis de las muestras:***

Determinación pH, conductividad eléctrica, análisis de iones inorgánicos por CII, análisis estructural y pruebas de porosidad, dureza e Irrigación con lluvia artificial a muestras de material pétreo provenientes de los sitios de Calakmul y Dzibilnocac.

***Resultados:***

En la ciudad de San Francisco de Campeche, la presencia de partículas de carácter alcalino en el depósito seco disminuye la acidez de la lluvia. Las diferencias en las tasas de recesión de hasta más de 100% observadas entre el método gravimétrico y el análisis de  $\text{Ca}^{2+}$  en el efluente, los ensayos de deterioro natural parecen indicar que la recesión física debida a procesos erosivos como la velocidad del viento y la velocidad de impacto de la lluvia contribuyen en gran medida al deterioro de la roca. Se obtuvieron tasas de recesión superficial de 5.08-28.63  $\mu\text{m}/\text{año}$ .



**Hidalgo Navarro Marcos (2004). Análisis sobre el comportamiento de la lluvia en zonas boscosas aledañas al Valle de México. Tesis Licenciatura. División: Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.**

***Sitio y año de muestreo:***

Se seleccionó una red de monitoreo, la cual se conformó por siete sitios, tres de la REDDA, tres del Centro Nacional de Investigaciones y Capacitación Ambiental y un sitio compartido por ambas instituciones. Muestreo en el año 2001.

***Método de muestreo:***

Cada estación estuvo equipada con un colector automático y un pluviógrafo.

***Análisis de muestras:***

Se les determinó pH, conductividad eléctrica y análisis de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ .

***Resultados:***

El análisis indica que en el ámbito regional no se observa una tendencia definida que indique el carácter ácido o básico del agua de lluvia, del total de eventos el 50%, presentan un pH entre 3.89 y 5.1, más frecuentemente entre los meses de junio y agosto. Mientras que el 40% presentan un pH básico (superior a 5.6) distribuidos a lo largo de la temporada. Debido a este estrecho margen entre el número de eventos que presentan un pH u otro no es posible definir a nivel regional que la calidad del agua de lluvia sea ácida.

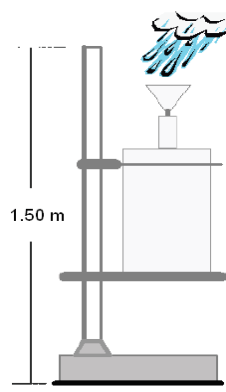
**García, M. E., Ramírez, H. U., Meulenert, Á. R., García, F. O., y Alcalá, J. (2006). Influencia de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en la formación de lluvia ácida en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. e-Gnosis, Vol. 4, Art. 7, 16 págs.**

***Sitio y año de muestreo:***

El monitoreo de la lluvia durante el período 1994-2002 se realizó mediante la implementación de una Red Pluviométrica distribuida estratégicamente en la ZMG. Esta red incorporó 17 estaciones de muestreo localizadas geográficamente. Para el estudio de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> se utilizó la información del banco de datos de las 8 estaciones de la RAMA proporcionados por la Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable de Jalisco, México (SEMADES). La serie de datos comprende registros horarios de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>.

***Método de muestreo:***

La colección se realizó en horas posteriores al evento de lluvia en botellas de HDPE. Los pluviómetros utilizados para los muestreos corresponden a especificaciones estándar internacionales para este tipo de monitoreo (Figura 98), constituidos por una botella de polietileno de alta densidad conectada con un tubo a un embudo de 25 cm. Una vez desocupados los pluviómetros fueron lavados y enjuagados cuidadosamente con agua desionizada para ser reutilizados. Las muestras fueron analizadas en un tiempo no mayor de 24 horas después del evento lluvioso. Los parámetros a analizar fueron: pH, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup>.



*Figura 98. Pluviómetro colector de lluvia.*

**Análisis de muestras:**

Las técnicas analíticas fueron tomadas del Manual for the Gaw Precipitation Chemistry Programme Guidelines de la WMO (Allan, 2004). Durante el periodo de monitoreo se realizaron 10,259 determinaciones. El análisis de las muestras se realizó en el laboratorio de química del IAM-UdeG. Los parámetros pH,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  fueron analizados durante los meses de junio a septiembre en el período 1994-2002 y  $\text{NO}_3^-$  fue analizado en 1999, 2000 y 2002.

**Resultados:**

Considerando el período de estudio 1994-2002, es evidente que la contaminación atmosférica ha modificado la naturaleza química de la lluvia. La temporada de 1999 mostró el comportamiento más ácido en prácticamente toda la ZMG (4.88-5.93 unidades de pH) a excepción de la zona Noroeste (Figura 99).

Las concentraciones máximas de  $\text{SO}_4^{2-}$  (9.30 mg/L) correspondieron al temporal 1999 en las regiones Noreste, Este y Sureste, mientras que las mínimas (3.80 mg/L) se localizaron al Oeste de la ZMG. La distribución de las concentraciones promedio de  $\text{SO}_4^{2-}$  (4.3-6.2 mg/L) en el período 1994-2002 no presenta un predominio definido debido a las constantes variaciones de un temporal a otro.

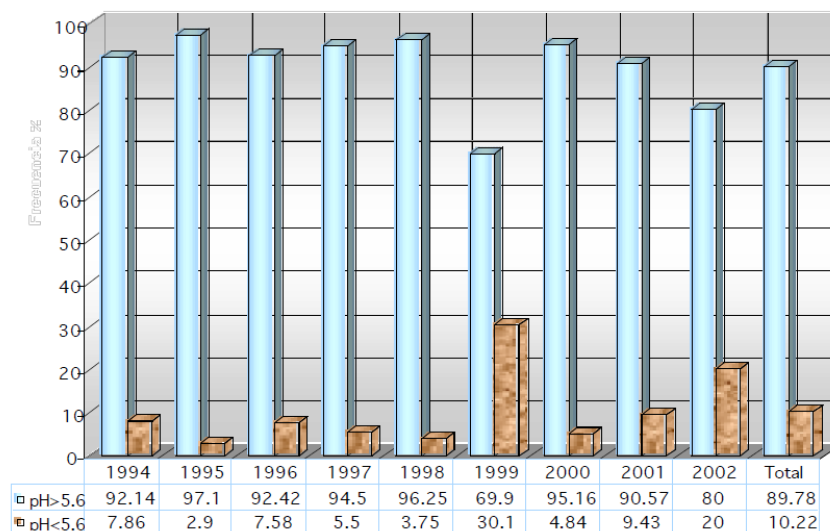


Figura 99. Frecuencias de lluvia ácida en la ZMG

Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en 1999 mostraron un comportamiento elevado hacia el Oeste (5.98 mg/L) y niveles más bajos hacia el Norte (4.14 mg/L). El año 2000 presentó concentraciones altas hacia el Sur-Suroeste y la variación osciló

entre 4.47 y 5.42 mg/L, mientras que el 2002 mostró a la región Centro como la más afectada con concentraciones máximas de 5.27 mg/L y el resto de la ZMG demostró niveles menores (4.45 mg/L).

**Pérez Suárez, M., Cetina Alcalá, V. M., Aldrete, A., Fenn, M. E., & Landois Palencia, L. L. (2006). Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la ciudad de México. Agrociencia, 40(2).**

***Sitio y año de muestreo:***

Desierto de los Leones (DL) Ciudad de México y Zoquiapan (ZQ) Estado de México, respectivamente. Durante la temporada de lluvia (agosto-octubre, 2003).

***Método de muestreo:***

En este estudio se analizó la alteración química del agua de lluvia en dos bosques templados: con alto y bajo depósito de contaminantes atmosféricos. Se colocaron seis colectores de lluvia en las dos zonas (DL y ZQ). Cada colector tuvo un soporte de madera y se colocó a 1.10 m para evitar la contaminación con partículas de suelo. Al soporte se sujetó un embudo de plástico (14 cm de diámetro) conectado con una manguera a un recipiente colector de 4L. En cada repetición se colectó el depósito atmosférico total, se muestreó en doce ocasiones y se tuvo un total de 144 muestras, cuyo volumen de lluvia se midió en campo cada semana.

***Análisis de muestras:***

Se midió pH y conductividad eléctrica en cada una de las seis muestras colectadas semanalmente por zona. Luego se tomaron tres muestras compuestas por zona, que se filtraron con una membrana de nitrocelulosa (0.45  $\mu\text{m}$ ) y se almacenaron en un refrigerador a 4 °C. La concentración de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se determinó por CI (Dionex series 4000i) y  $\text{NH}_4^+$  se analizó en un Autoanalizador TRAACS 800 en el laboratorio de incendios forestales del USDA Service-Forest, en Riverside, California, E.U.

***Resultados:***

La precipitación colectada en DL fue de 758 mm, se colectó 61% de la precipitación total en 2003 (1,251 mm). En ZQ se colectaron 329 mm, lo cual fue 39% del total de precipitación anual registrado por la Comisión Nacional del Agua (834 mm) en la estación de Ixtapaluca, Estado de México. En orden decreciente la precipitación fue agosto >septiembre>octubre. Sin embargo, junio y julio son los meses de mayor precipitación, principalmente en ZQ, donde la precipitación entre agosto y octubre fue menos de 50% de la anual.

La Figura 100 muestra el depósito total de contaminantes (ppm) en los dos sitios estudiados. La concentración promedio de  $H^+$  por zona fue  $6 \mu\text{eq/L}$  ( $\text{pH}=5.2$ ) en el DL y  $5 \mu\text{eq/L}$  ( $\text{pH}=5.3$ ) en ZQ. La concentración de  $H^+$  en la semana 6 en ZQ fue la mayor ( $30 \mu\text{eq/L}$  de  $H^+$ ) y por tanto la de más alta acidez ( $\text{pH}=4.5$ ) en ambas zonas. Esto podría deberse a las emisiones del volcán Popocatepetl, que después de 70 años de inactividad retomó su actividad de emisión de gases en 1993. La concentración promedio de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de lluvia fue de  $43 \mu\text{eq/L}$  en el DL y  $29 \mu\text{eq/L}$  en ZQ. La concentración promedio de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  también fue mayor en el DL ( $33$  y  $49 \mu\text{eq/L}$ ) que en ZQ ( $16$  y  $35 \mu\text{eq/L}$ )

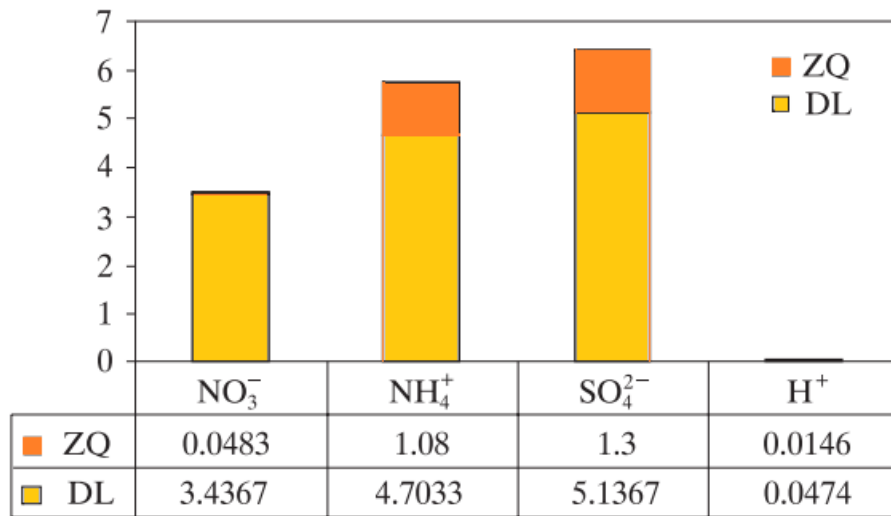


Figura 100. Depósito total de contaminantes (ppm) de agosto a octubre de 2003, en el Desierto de los Leones (alto depósito) y Zoquiapan (bajo depósito)

**Kahl, J. D., Bravo-Álvarez, H., Sosa-Echeverría, R., Sánchez-Álvarez, P., Alarcón-Jiménez, A.L., & Soto-Ayala, R. (2007). Characterization of atmospheric transport to the El Tajín archaeological zone in Veracruz, México. *Atmósfera*, 20(4), 359-371.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona Arqueológica del Tajín, periodo de muestreo 1998-2002.

***Método y análisis de datos:***

Se investigaron las condiciones meteorológicas locales en Tuxpan, 30 km al Norte de El Tajín, utilizando mediciones de vientos para el periodo 1989-1999 proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional, la agencia meteorológica nacional de México. El transporte atmosférico tridimensional y de varios días se modeló durante 1998-2002 utilizando campos de viento, temperatura y altura geopotencial proporcionados por el Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo de 2.5 x 2.5° latitud/longitud, suficientes para capturar las características meteorológicas a escala sinóptica que controlan el transporte atmosférico de varios días y largo alcance. Finalmente, los campos globales de presión media del nivel del mar durante 1968-1996 se utilizaron para determinar las características climáticas a gran escala.

***Resultados:***

El estudio analizó las trayectorias aéreas de cinco días que llegan diariamente a El Tajín durante 1998-2002. Se muestran dos regímenes meteorológicos distintos que controlan el transporte a El Tajín. El flujo principal es del Este asociado con la parte Sur del subtropical alto. El flujo oriental domina el transporte durante los meses de verano (junio-agosto), cuando casi todas las trayectorias pasan sobre el mar Caribe, cruzando la península de Yucatán y el Sur del Golfo de México antes de llegar a El Tajín. El flujo del Norte al Noroeste asociado con el anticiclón de América del Norte es una influencia importante durante los meses que no son de verano, con trayectorias de cinco días que se extienden hasta el Centro de Canadá. Durante estos meses, los patrones de viento favorecen el transporte desde el Centro-Sur de los EU, con trayectorias que pasan por Texas, el Norte del Golfo de México y el Norte de México antes de llegar a El Tajín.



**Ramírez Lara Evangelina, (2009). Tesis: Aplicación de un modelo para la evaluación de fuentes potenciales de emisión de precursores de depositación ácida. Doctorado en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables. Facultad De Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Nuevo León.**

***Sitio y año de muestreo:***

Área Metropolitana de Monterrey. El periodo de muestreo comprendió del mes de junio de 2006 a diciembre de 2008.

***Método de muestreo:***

El equipo utilizado fue un colector automático el cual se ubicó en la azotea del edificio redondo de la Facultad de Ciencias Químicas de la UANL.

***Análisis de muestras:***

Se recolectaron y analizaron 22 muestras de depósito total, 58 de depósito húmedo y 20 de depósito seco, determinando la concentración de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  por HPLC, además de pH y conductividad.

***Resultados:***

Los resultados mostraron que los valores de pH fueron mayores a 5.6 por la neutralización que ejercen partículas alcalinas sobre las especies ácidas presentes en el aire. La química del agua de lluvia mostró una alta concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ .

La baja concentración de  $\text{H}^+$  encontrada en las muestras de agua de lluvia sugiere que una parte importante de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y de  $\text{HNO}_3$  fue neutralizada por partículas alcalinas presentes en la atmósfera. Se encontró alta correlación entre los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  lo que probablemente indica que proceden de la misma fuente.

Los parámetros meteorológicos incidieron directamente en la disminución de la concentración iónica, así como la velocidad del viento influyó en los fenómenos de dispersión de los contaminantes de acuerdo a las rosas de vientos obtenidas.

Con relación a las fuentes de emisión se concluye que son de origen natural y antropogénico, como por ejemplo la industria de extracción de minerales no metálicos ubicadas al poniente de la localidad y la composición propia de las montañas pueden estar contribuyendo a las altas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , debido a lo cual la calidad del aire presenta serios problemas debido principalmente a la presencia de partículas suspendidas.

**Granados Sánchez D., López Ríos G. F., Hernández García M. A. (2010). La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 16(2): 187-206.**

***Sitio y año de muestreo:***

Se colectó depósito atmosférico en dos Parques Nacionales: Desierto de los Leones (Ciudad de México) y Zoquiapan (Estado de México), en abril y noviembre de 1999, así como en enero y abril de 2000 respectivamente.

***Método de muestreo:***

El muestreo se realizó mediante el depósito por la lluvia a través del follaje de pinos.

***Análisis de muestras:***

Se realizó una recopilación de información sobre el pH y las cargas de N y S sobre dos parques nacionales en México.

***Resultados:***

El depósito anual por la lluvia a través del follaje de N ( $\text{NH}_4^+$ ) y de S ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) inorgánico en el Desierto de los Leones fue de 18.5 y 20.4 kg/ha. Los valores análogos en Zoquiapan fueron de 5.5 y 8.8 kg/ha\*año. El depósito de N y S en el Desierto de los Leones fue relativamente alta comparada con muchos bosques del mundo, lo cual era esperado considerando las elevadas emisiones de  $\text{NO}_x$  y S en la Ciudad de México. Los valores anuales de precipitación fueron de 1,455 mm en el Desierto de los Leones y de 778 mm en Zoquiapan.

**Patiño Hernández Xochitl. (2011). Caracterización de la deposición húmeda y seca en el Parque Nacional El Chico, mineral del Chico-Hidalgo, México. Implicaciones de la contaminación atmosférica. Licenciatura en Ingeniería Geología Ambiental. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.**

***Sitio y año de muestreo:***

Parque Nacional El Chico Hidalgo (la Chamusquina). Se caracterizó el depósito húmedo entre los meses de agosto a diciembre de 2009.

***Método de muestreo:***

La colección de muestras se llevó a cabo con un colector automático Aerochem Metrics 301.

***Análisis de muestras:***

Se colectaron 27 muestras de depósito húmedo y 16 para depósito seco. Fueron determinadas sus propiedades: pH, temperatura, conductividad eléctrica y volumen de precipitación. Asimismo se determinaron concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  los aniones fueron determinados por HPLC, cationes por EAA y  $\text{NH}_4^+$  por colorimetría con detección UV.

***Resultados:***

El volumen total colectado fue de 30256 mL, los valores de pH para el depósito húmedo oscilaron de 2.8-6.2, con valor promedio de 4.7. Para la conductividad eléctrica los valores oscilaron entre 7 a 218  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con respecto a la temperatura, se registraron valores de 22 a 28°C, los valores obtenidos para aniones fue de 133.1  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para  $\text{SO}_4^{2-}$ , 98.4  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{Cl}^-$  presentó un valor de 74.0  $\mu\text{eq}/\text{L}$ ; para los cationes se obtuvo: 111.4, 34.4, 27.4, 4.9, 58.8  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ , respectivamente.

Para el depósito seco el pH fue en el intervalo de 4.4-7.4 unidades, con promedio de 6.0. La abundancia de aniones fue de 245.0  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para el  $\text{NO}_3^-$ , 44.8  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para el  $\text{Cl}^-$  y 15.8  $\mu\text{eq}/\text{L}$  de  $\text{SO}_4^{2-}$ , para los cationes fue de 119.2 para el  $\text{Ca}^{2+}$ , 54.8  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para el  $\text{Na}^+$ , 49.5  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para el  $\text{Mg}^{2+}$ , 4.8  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para el  $\text{K}^+$  y 39.6  $\mu\text{eq}/\text{L}$  para el  $\text{NH}_4^+$ .

Las altas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron atribuidas a la dispersión de partículas provenientes de los depósitos de jales del municipio de Omitlán por acción del viento el cual se orienta hacia el Parque Nacional El Chico.



Las muestras fueron analizadas en un tiempo menor a 24 horas. Los parámetros medidos fueron: determinación de pH y conductividad, así como el análisis de aniones y cationes por CI. Las técnicas analíticas se obtuvieron del “Manual for The Gaw Precipitation Chemistry Programme” de la Organización Meteorológica Mundial (Allan, 2004).

**Resultados:**

La temporada de 1999 mostró el comportamiento más ácido en prácticamente toda la ZMG (4.88-5.93 unidades de pH) excepto la zona Noroeste, correspondiendo a niveles casi 10 veces más. La distribución promedio ponderada en todo el periodo reflejó una tendencia ácida dominante hacia el Oeste de la ZMG; la cual está registrando concentraciones de acidez importantes al igual que en países y ciudades altamente urbanizadas e industrializadas (Los Ángeles, Londres, México DF, entre otras). El crecimiento urbano e industrial en la ZMG es indicativo de que este comportamiento es resultado de emisiones contaminantes de origen antrópico (Figura 102).

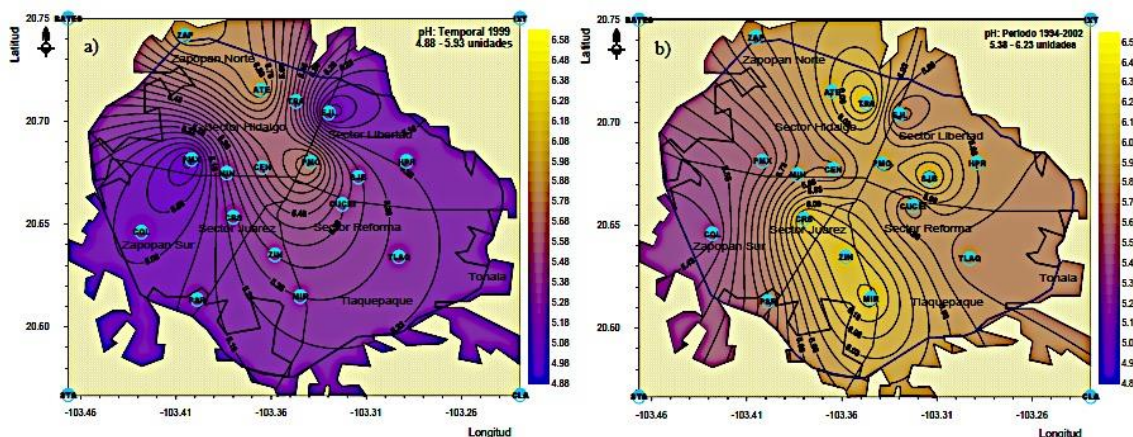


Figura 102. a) Distribución del pH en el temporal 1999 y b) Distribución del pH en el periodo 1994-2004

Las concentraciones máximas de  $SO_4^{2-}$  (9.30 mg /L) correspondieron al temporal 1999 en las regiones Noreste, Este y Sureste, mientras que las mínimas (3.80 mg/L) se localizaron al Oeste de la ZMG. La distribución de las concentraciones promedio de  $SO_4^{2-}$  (4.3-6.2 mg/L) en el periodo 1994-2004 no presenta un predominio definido debido a las constantes variaciones de un temporal a otro. Con respecto al  $NO_3^-$ , las concentraciones en 1999 mostraron un comportamiento elevado hacia el Oeste (5.98 mg/L) y niveles más bajos hacia el Norte (4.14 mg/L).

Esta temporada se caracterizó por reflejar una correspondencia con niveles altos de acidez principalmente en la región Oeste. El año 2000 presentó concentraciones altas hacia el Sur-Suroeste y la variación osciló entre 4.47 y 5.42

mg/L, mientras que el 2002 mostró a la región Centro como la más afectada con concentraciones máximas de 5.27 mg/L y el resto de la ZMG demostró niveles menores (4.45 mg/L). Es necesario seguir analizando  $\text{NO}_3^-$  de manera sistemática y determinar su influencia en la ZMG en un periodo más extenso.



**Kahl, J. D., y Saunders, R. O. (2012). Análisis Meteorológico de la Depositación Ácida. Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México, 21. UNACAR. Editores: Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. 115 páginas. ISBN 978-607-7826-21-7.**

***Sitio y año de muestreo:***

Los análisis meteorológicos fueron enfocados a estudios de muestreo del depósito atmosférico en: El Tajín durante el periodo de agosto 2002-enero 2003; la Zona Metropolitana de Monterrey en los años 2007-2008; en Campeche y en la zona de la reserva de la biosfera en Calakmul, llevados a cabo de 2009 a 2010.

***Método de muestreo:***

Los métodos descritos en el contexto forman parte de estudios recientes del depósito ácido en México, en todos los casos, el depósito atmosférico fue colectado con equipos automáticos (wet/dry), los datos meteorológicos y sus técnicas de análisis proporcionaron información sobre las posibles fuentes que contribuyeron a la formación de depósito ácido.

***Análisis de muestras:***

Se analizaron diversos métodos para evaluar los procesos meteorológicos que contribuyen a la formación de depósito atmosférico: datos estadísticos de viento, análisis de rosas de viento, modelado de trayectorias y el post-procesado de trayectorias (CMAQ, WRF-CHEM, HYSPLIT).

***Resultados:***

Con respecto a El Tajín, se aplicaron trayectorias de retroceso que ilustran dos distintos regímenes meteorológicos que controlan el transporte meteorológico: 1) El control principal son vientos de dirección Este asociado con un gran anticiclón subtropical en la cuenca del Atlántico Oeste el cual domina el transporte durante los meses del verano. Casi todas las trayectorias dirigidas hacia el Este pasan sobre el Mar Caribe, cruzando la Península de Yucatán y el Sur del Golfo de México. 2) El flujo proveniente del Norte y del Noroeste es importante durante los meses que no son de invierno, El transporte durante estos meses frecuentemente hace que las trayectorias pasen sobre Texas, el Norte del Golfo de México y el Norte de México.

La posición vertical de las trayectorias proporciona información adicional con respecto del potencial de fuentes a contracorriente. Durante el verano, cuando el transporte ocurre desde el Este, el aire tiende a permanecer en alturas entre 200-600 m (presiones entre 980 y 940 hPa). El transporte atmosférico a estas bajas



altitudes incrementa la posibilidad de fuentes a contracorriente, tales como las plataformas de Cantarell y las plantas de procesamiento de Atasta y Dos Bocas (Figuras 103 y 104).

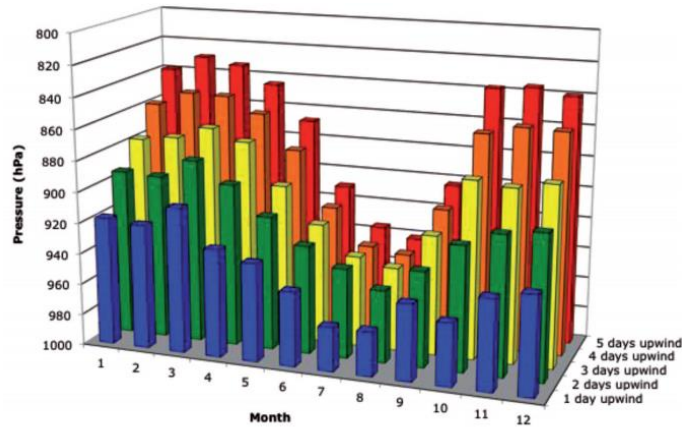


Figura 103. La posición vertical promedio del aire que viaja a El Tajín durante 1998-2002. La escala vertical de la atmósfera corresponde a altitudes de 0-2000m (nivel medio del mar).

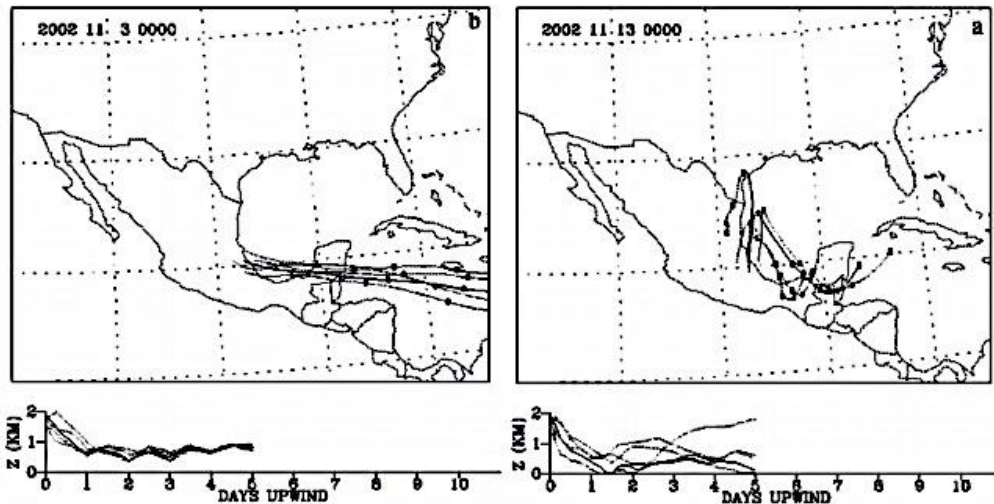


Figura 104. Trayectorias de cinco días correspondientes a dos eventos de precipitación en El Tajín: (a) 12 de Noviembre del 2002; (b) 3 de Noviembre del 2002.

En Monterrey, un análisis de rosas de los vientos de 2008 muestra vientos del este predominantemente con mayores velocidades de viento durante el verano.

Este estudio también encontró la influencia del control de las inversiones de temperatura, una capa atmosférica térmicamente estable en la cual la temperatura incrementa con la altura. Un análisis de datos meteorológicos de la atmósfera

superior para el periodo 1965-2009, proporcionó estadísticas climatológicas con respecto de la inversión. La presencia de las inversiones de temperatura, especialmente durante el invierno, reduce la dispersión turbulenta y causa elevadas concentraciones de contaminantes. Las bajas velocidades de viento que están correlacionadas con las altas concentraciones de aerosoles, también están asociadas con las fuertes inversiones de temperatura.

En Campeche se analizaron aspectos químicos y meteorológicos de las muestras de lluvia colectadas en estos sitios en 2006 y 2007. Se observó que la precipitación es más ácida en los meses en los cuales llueve menos y más alcalina en los meses con más lluvia. Un análisis de las rosas de los vientos de Campeche reveló que los vientos durante la temporada de lluvia llegaron principalmente del Sureste, mientras que durante el invierno la dirección del viento típicamente provenía del Norte y del Noreste.

**Díaz-Ibarra, M. A., Muy-Rangel, M. D., Rubio-Carrasco, W., y Ramos-Felix, E. (2014). Monitoreo del pH del agua de lluvia para la ciudad de Culiacán, Sinaloa. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 10 (1): 23-31.**

***Sitio y año de muestreo:***

La calidad del agua de lluvia fue monitoreada en la ciudad de Culiacán, Sinaloa. Los muestreos se realizaron en 4 puntos de la ciudad durante la temporada de lluvia del 2010.

***Método de muestreo:***

Se colocaron recipientes en el exterior de cada sitio de muestreo (pudo ser el techo, patio o el jardín de una casa), la altura mínima del recipiente desde la superficie (piso o techo) fue de un metro, con el fin de evitar que el agua de lluvia que golpeará la superficie del suelo, salpicara dentro del recipiente y lo contaminara con partículas de polvo, etc. Además, se tomó en cuenta que en el viaje del agua de lluvia no tuviera contacto con postes, ramas de árbol, cables o algún otro objeto, para así evitar su posible contaminación, tal como se describe en la metodología para muestreo manual para depósito húmedo de la Red Automática de Monitoreo Ambiental.

***Análisis de muestras:***

Luego de la ocurrencia de un fenómeno de lluvia, se pasó el agua a un vaso pequeño de 100 ml. Se midió *in situ* el pH por medio de potenciómetros manuales. Se seleccionaron 9 muestras de cada uno de los 4 puntos, en función de su fecha de muestreo. Se contabilizaron 36 muestras analizadas en total. También se llevaron a cabo dos pruebas de perfil físicoquímico del agua de lluvia, donde se analizó la presencia de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ , así como de Cu, Ca, Cl, Na, Fe, Mg y Mn.

***Resultados:***

Los valores del pH que se registraron en las zonas Sur y Centro-Sur (Colonia Lázaro Cárdenas y Fraccionamiento Montebello, respectivamente) fueron los más bajos. En ambos puntos se alcanzaron valores de  $\text{pH} < 6$ , alcanzando la medición más baja el valor de 5.33. En el caso de las zonas nororiental y norponiente (Fraccionamiento Los Ángeles e ISSSTE respectivamente) alcanzaron los valores más altos ( $\text{pH} > 7$ ) En las zonas Norte y Norte-Oriente, se obtuvo la media más alta y entre estos no existieron diferencias significativas.

Los valores de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  resultaron relativamente bajos donde el intervalo de  $\text{SO}_4^{2-}$  va desde no detectable hasta 5.88 mg/L y el de  $\text{NO}_3^-$  varía desde no

detectable hasta 8.16 mg/L. Cabe destacar que la muestra de  $\text{NO}_3^-$  tomada en el fraccionamiento Montebello fue mayor casi 8 veces la del fraccionamiento Los Ángeles, mientras que para el caso del  $\text{SO}_4^{2-}$ , la muestra tomada en el fraccionamiento Los Ángeles fue poco más del doble que la muestra tomada en Montebello. El  $\text{Na}^+$  presentó una variación del 80% en la concentración en las dos muestras. Ambas presentaron concentraciones relativamente elevadas, debido posiblemente a la cercanía de Culiacán con las zonas costeras, ya que el agua de lluvia adquiere su contenido de sodio de los grandes cuerpos de agua salada. Los valores de los demás parámetros son relativamente bajos. Se debe mencionar que el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Mn}$  provocan una reacción buffer reduciendo el efecto de la acidez del agua de lluvia.

**Ramírez-Lara, E., Cerón-Bretón, R. M., Cerón-Bretón, J. G., López-Chuken, U., y Kahl, J. (2016). Study of Trace Ions in Wet Deposition of an Industrial Site in Monterrey's Metropolitan Area, Mexico. *Open Journal of Ecology*, 6(01), 1.**

***Sitio y año de muestreo:***

Las muestras de lluvia fueron colectadas en el Campus de la Universidad Autónoma de Nuevo León localizada en un área urbana. El periodo de muestreo fue de marzo a noviembre de 2009.

***Método de muestreo:***

Sólo se trabajó con el depósito húmedo (wet), el cual fue colectado con equipo automático marca Tisch Environmental.

***Análisis de muestras:***

Cada muestra fue dividida en dos alícuotas de 250 mL, la primera fue utilizada para analizar cationes y la segunda para medir aniones, pH y conductividad. Los aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) fueron analizados por Cl, los cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) por EAA con técnica de flama.

Se obtuvo información meteorológica de superficie con estaciones meteorológicas marca Davis Instruments y se corrieron trayectorias de retroceso con el modelo HYSPLIT.

***Resultados:***

En el periodo de muestreo se colectaron 25 muestras de lluvia, con precipitación de 6.3 a 79.0 mm. El pH de las muestras varió de 5.99 a 8.11 con promedio de 6.96. Los niveles más bajos de pH fueron observados en junio y los más altos fueron registrados en octubre. Por otro lado, la conductividad de las muestras disminuyó conforme avanzaba la estación de lluvias. Con respecto a la concentración de iones el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{SO}_4^{2-}$  presentaron las mayores concentraciones seguidos del  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ , lo cual influyó en la composición de la lluvia. Se observó que en el mes de octubre las inversiones térmicas causaron elevadas concentraciones en las muestras de lluvia, por la pobre dispersión. Durante la primavera, se encontraron altos valores de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  debido a las entradas de aire marítimo proveniente del Golfo de México. El valor promedio de pH fue alcalino, debido a la presencia de la industria cementera, cuyas emisiones neutralizan el  $\text{SO}_4^{2-}$  y el  $\text{NO}_3^-$ , lo cual justifica las altas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ .

**Ramírez Lara E., Facundo Torres D.M. (2012) Estudio de la deposición atmosférica en una zona industrial del noreste de México. Avances y Perspectivas de la Deposición Ácida en México, 21. UNACAR. Editores: Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. 115 páginas. ISBN 978-607-7826-21-7.**

***Sitio y año de muestreo:***

El trabajo se desarrolló en una zona industrial del noreste de México. El periodo de muestreo comprendió de marzo a julio de 2010.

***Método de muestreo:***

El equipo utilizado fue un colector automático el cual se ubicó en la azotea de un edificio de la Facultad de Ciencias Químicas, de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

***Análisis de muestras:***

Se recolectaron muestras de depósito húmedo y se analizaron compuestos bajo los siguientes parámetros:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  mediante HPLC,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por EAA, además de pH y conductividad.

***Resultados:***

Los resultados mostraron que los valores de pH fueron mayores a 5.6 probablemente debido a la neutralización que ejercen partículas alcalinas sobre las especies ácidas presentes en el aire. Se observó una alta concentración de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ , y  $\text{NH}_4^+$  así como  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ .

La baja concentración de iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) encontrada en las muestras de agua de lluvia sugiere la neutralización de los precursores de la lluvia ácida; además se encontró alta correlación entre los iones  $\text{Ca}^{2+}$ , y  $\text{Mg}^{2+}$  lo que probablemente indica que proceden de la misma fuente, con relación al tipo de fuentes de emisión son de origen natural y antrópico (Figura 105).

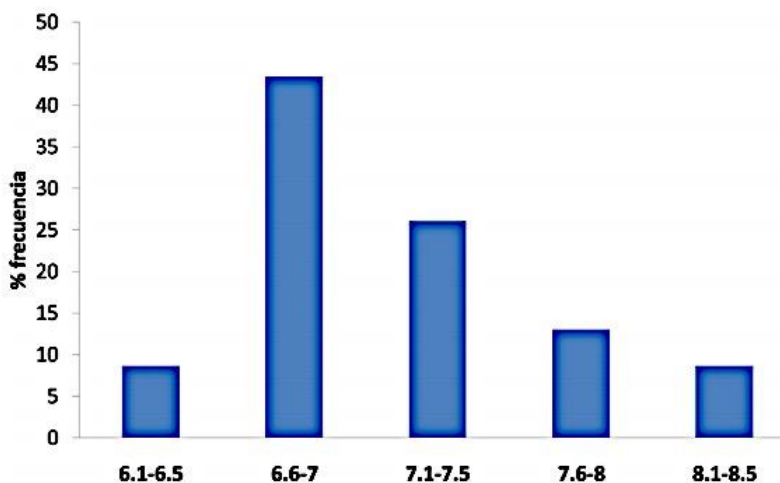


Figura 105. Distribución de frecuencia en porcentaje de pH mensual de depósito húmedo.

Los meses de abril y junio, 337 mm y 101 mm cada uno, son los que registraron una mayor cantidad de precipitación, el huracán Alex propició fuertes eventos intermitentes de lluvia que se prolongó los primeros días del mes de Julio siendo la cantidad de lluvia recolectada durante estos días casi lo equivalente a la cantidad de precipitación promedio durante un año.

La composición de la depositación húmeda, mostró una tendencia de  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{K}^+$ , los cationes contribuyen en un 59 % y los aniones con un 41 %, siendo predominantes los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$ , los aniones predominantes el  $\text{SO}_4^{2-}$  (96.7  $\mu\text{eq/L}$ ) seguido del ion  $\text{NO}_3^-$ , ambos percursores del depósito atmosférico ácido.



**Arróniz Crespo M., Ochoa Hueso R., Manrique Reol E. (2012) Biomonitorización del depósito de nitrógeno atmosférico en México: detección y prevención de daños en ecosistemas naturales. Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México, 21. UNACAR. Editores: Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. 115 páginas. ISBN 978-607-7826-21-7.**

**Sitio y año de muestreo:**

Tres sitios de muestreo: Parque Nacional El Chico (Hidalgo), Parque Ecológico de la Ciudad de México (Ajusco Medio) y Parque Nacional de los Dinamos (Ciudad de México). El trabajo se desarrolló en 2009.

**Método de muestreo:**

Campañas de biomonitorización de N a partir del análisis del contenido % de N en el tejido de musgos.

**Análisis de muestras:**

A través del biomonitoreo del musgo *Braunia secunda* se determinó el depósito de N con respecto a la actividad de la enzima fosfomonoesterasa y el porcentaje de N en tejido del musgo.

**Resultados:**

Siguiendo la experiencia del programa europeo ICP Vegetation, se analizó la respuesta fisiológica de diferentes especies de musgos en tres localidades situadas a lo largo de un gradiente de contaminación por depósito de N: Parque Nacional El Chico (7,24 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> /ha), Parque Ecológico de la Ciudad de México (19 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> /ha) y Parque Nacional de los Dinamos (28,2 kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> /ha). De las especies estudiadas, el musgo *Braunia secunda* (Hook) Brunch and Schimp, fue la que mostró las características más adecuadas para ser utilizada como bioindicador del depósito de N. Con respecto a las variables biológicas analizadas, la actividad de la enzima fosfomonoesterasa y el porcentaje de N en tejido del musgo presentaron una buena relación lineal con el depósito real de N, tanto en la estación seca como en la húmeda, mostrando una respuesta adecuada para ser utilizadas como variables biológicas en futuras redes de biomonitorización del depósito de N en México. Estos resultados coinciden con las conclusiones de trabajos realizados con especies de musgos en Europa en los que ambas variables biológicas han sido propuestas como buenos indicadores del depósito de N.

**Vásquez, G. C., de la Isla, M. D. L., Gordon, H. P., Hernández, J. J. V., y Martínez, A. V. (2012). La corteza arbórea como biomonitor del depósito ácido en la Cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 31(100).**

**Sitio y año de muestreo:**

El muestreo se realizó dentro de los bosques de pino-oyamel ubicados en Villa del Carbón, Izta-Popo y Zoquiapan pertenecientes al Estado de México. Desierto de los Leones, D.F. y en Mineral El Chico, Hidalgo, durante 1995 y 1996.

**Método de muestreo:**

Se realizó un biomonitoreo a fin de cuantificar el depósito ácido presente en la corteza de *Pinus montezumae*, *Cupressus lindleyi* y *Abies religiosa*.

**Análisis de muestras:**

Se seleccionaron diez árboles por especie dentro de los cuadrantes pre seleccionados, se tomó una muestra de 75 g de corteza de la cara incidente a los vientos. En el laboratorio el material se limpió, se pulverizó y se secó. Se tomó una muestra de 2 g, se hidrató durante 72 horas a 0°C, se descongeló y se midió conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno y capacidad amortiguadora.

**Resultados:**

Los resultados indican que la acidez en el pino varió de 3.15 a 3.6, en oyamel de 4.0 a 4.35 y en cedro de 4.3 a 6.3. Concluyendo que dichos valores de acidez existentes en los bosques de pino-oyamel fueron similares a los registros reportados por la RAMA. Los valores obtenidos en los bosques de Izta-Popo (4.1-3.2), Zoquiapan (4.3-3.35), Desierto de los Leones (4.3-3.6) y Villa del Carbón (4.5-3.4) se determinó que la acidificación de los sistemas forestales es alta.

Se encontró que a capacidad media amortiguadora del cedro permite asegurar que la especie atenúa la acidez, lo que lo convierte en una opción recomendable para reforestar. Para fines prácticos el biomonitoreo como herramienta para el registro de la acidez en bosques es una buena herramienta, utilizando las especies de pino cuando la acidez sea cercana a 3.0, el oyamel para valores próximos a 4.0 y cedro cuando se acerquen a 5.0.

**Hansen Anne y Gay David (2013). Observations of mercury deposition in Mexico. Environ Sci Pollut Res. 20:8316-8325.**

***Sitio y año de muestreo***

Se consideraron dos sitios de muestreo para el depósito atmosférico húmedo por mercurio en México. El sitio uno correspondió en el Instituto de Agricultura ubicado entre los límites de la ciudad de Huejutla, Hidalgo. El segundo sitio fue ubicado en el pueblo de Puerto Ángel, Oaxaca, aproximadamente a 2 km del Océano Pacífico (Figura 106). El muestreo se desarrolló a partir del mes de septiembre de 2003 a noviembre de 2005.

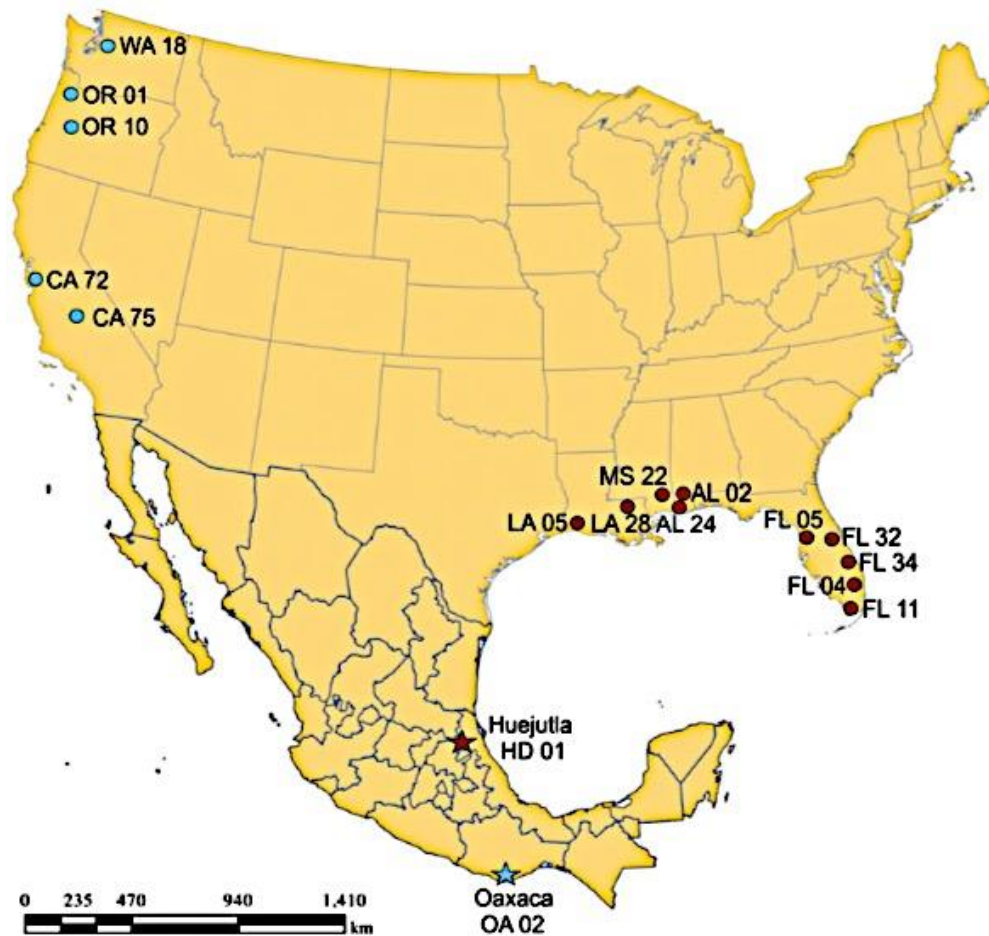


Figura 106. Sitios de muestreo para el depósito atmosférico por mercurio de acuerdo a Hansen y Gay.

### ***Método de muestreo***

El método de muestreo consistió en un equipo-colector automático (Aerochem Metrics 301, Loda Electronics.) y pluviómetros (Belfort 5-780, Baltimore, MD, USA). En cada sitio de muestro se instalaron los equipos antes mencionados. La técnica utilizada para el muestreo y conservación de las muestras fue con base a la metodología del US-NADP en la Mercury Deposition Network.

### ***Análisis de muestras:***

Las muestras se analizaron mediante el protocolo de la US-EPA 1631 en el laboratorio analítico para mercurio de este mismo país.

### ***Resultados:***

Para los dos años de muestreo se colectaron 116 muestras en el sitio uno y 86 en el sitio dos para el periodo de estudio. La concentración de mercurio en el depósito atmosférico tuvo una variabilidad de 1.3 a 84.1 ng/L. En el sitio uno se encontró una concentración de mercurio de 8.2 ng/L, y en el sitio dos 7.9 ng/L. Los resultados representan que las concentraciones de mercurio en el depósito atmosférico son bajas respecto a los sitios del NADP tanto del Golfo como del Pacífico.

#### 4.4.3 Tesis realizadas en la Universidad Nacional Autónoma de México

##### **Belmont Dávila Gabriel Pablo (1988). Influencia de la precipitación pluvial en la fertilidad de los suelos de la zona Centro-Sur del Bajío.**

###### ***Sitio y año de muestreo:***

Región Sur de la zona agrícola del Bajío (Guanajuato Sur) en las localidades; Celaya, Irapuato, Pénjamo, Salamanca, Salvatierra, Valle de Santiago, Yuriria. El muestreo se realizó en el periodo de mayo a octubre de 1985.

###### ***Método de muestreo:***

Precipitación: colector manual de exposición continua que consta de una caja de poliuretano en la cual se colocó una botella de polietileno de 4 litros de capacidad y un embudo de 25.7 cm de diámetro con muestreos quincenales. Suelos: el muestreo se llevó a cabo antes de la temporada de lluvias con tubo de PVC de 4 in, empotrado en el suelo a 60 cm de profundidad.

###### ***Análisis de muestras:***

Precipitación: pH y  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , P-Total,  $\text{P-PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ . Suelos; pH, N-Total,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , P-Total, materia orgánica y textura.

###### ***Resultados:***

Los valores encontrados de la precipitación muestran tendencia hacia la alcalinidad, donde se tienen los valores de 5.64 y 8.11 para las localidades de Irapuato y Salamanca respectivamente. La alcalinidad encontrada en las muestras pudo deberse a partículas alcalinas, las cuales neutralizan la acidez de la precipitación pluvial, además de que la colecta se realizó cada 15 días, ya que las partículas se han disuelto y han entrado en equilibrio con el  $\text{CO}_2$  atmosférico, provocando así un pH no ácido. Los  $\text{SO}_4^{2-}$  tuvieron mayor aporte en todas las estaciones, en segundo lugar, el N amoniacal, los demás iones presentaron una aportación mínima en comparación con la fertilización de suelos, por lo que no se detectó cambio significativo en los suelos.

En referencia con los suelos, de forma general no existe una diferencia marcada en el contenido de nutrimentos, entre suelos de uso agrícola y no agrícola, esto se pudo deber a la cercanía de sitios de muestreo de suelos no agrícolas con las áreas de cultivo, en las cuales se aplican fertilizantes, que pueden llegar a zonas no agrícolas y de esta forma ser fertilizadas.

**Padilla Gordon Hugo Pascual (1989). Estudio analítico de la composición química de la precipitación pluvial en el Valle de México.**

***Sitio y año de muestreo:***

El muestreo se realizó en las estaciones: Ciudad Universitaria, Desierto de los Leones (ex convento), Popocatepetl, Amecameca y Rancho Viejo (Nevado de Toluca). La colecta de lluvia se realizó de mayo a octubre de 1987.

***Método de muestreo:***

La colección de muestras se realizó en dos fracciones, donde se colectaron los primeros 5 mm de lluvia en un recipiente y el resto en otro recipiente, la colección se hizo de forma diaria y recogiendo las muestras en la mañana del día siguiente. Semanalmente se colectaban las muestras del Desierto de los Leones, Popocatepetl y Amecameca, en Rancho Viejo solo los fines de semana.

***Análisis de muestras:***

Se determinó el pH y conductividad. Se analizaron los cationes:  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y los aniones:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , el ion  $\text{HCO}_3^-$  se calculó teóricamente.

***Resultados:***

Las primeras fracciones de lluvia presentaron un nivel considerablemente mayor de contaminación con respecto a las segundas fracciones, ya que en la formación de nubes se alimentan de corrientes de aire con alto grado de contaminación, resultando en una concentración más elevada en la lluvia próxima a iniciarse. Los resultados confirman que el cálculo de la acidez de la lluvia en las nubes, debido a que a mayor contaminación mayor acidez, no como la medición del pH a nivel de suelo, donde el pH puede ser alcalino y contener una elevada concentración de contaminantes.

**Padilla Gordon Hugo Pascual (1998). Comparación de la composición química de las nubes y de la precipitación pluvial entre diferentes zonas montañosas de México.**

***Sitio y año de muestreo:***

Cordillera Neovolcánica (Sierra del Ajusco, Desierto de los Leones, volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl) y en la Sierra Madre Oriental (Teziutlán) y muestreo se realizó en dos periodos, del 9 a 11 y del 29 al 30 de septiembre del año 1992, otro periodo de muestreo fue de 19 al 21 julio del 1992 en Tlamacas.

***Método de muestreo:***

Los muestreos de agua de nube se realizaron con diferentes tipos de colectores (pasivos y activos). La precipitación pluvial fue colectada empleando embudos de polietileno de 27 cm de diámetro conectadas a botellas de polietileno.

***Análisis de muestras:***

Las especies iónicas analizadas en las muestras de agua de nube y de lluvia fueron:  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ , además de la determinación del pH a cada una de las muestras. El análisis químico empezó por la filtración de las muestras, se determinó la alcalinidad de las muestras mediante la técnica de Gran; el análisis se realizó primero para los iones  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$  al ser los iones más estables. El análisis de cationes se realizó mediante EAA y el análisis de iones mediante HPLC.

***Resultados:***

En el sitio de muestreo localizado en el Popocatepetl las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de nube fueron 1.44 y 6.7 mg/L con colector pasivo y activo, respectivamente, mientras que en Teziutlán fueron de 8.08 y 8.61 mg/L. Aunque solo en dos ocasiones el agua de lluvia presentó mayor contaminación que la de nube en el Popocatepetl, las concentraciones iónicas fueron elevadas en el agua de nube en Teziutlán. Finalmente, no se observaron variaciones en la composición química del agua de nube tan grandes como en las de agua de lluvia de la región de Teziutlán. Las muestras de agua de nube tuvieron concentraciones mayores de todos los iones menos  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .



**Soto Ayala Rogelio (1999). Efecto de la lluvia ácida sobre el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos.**

***Sitio y año de muestreo:***

Puerto Morelos, Quintana Roo México a 95 Km al noreste de Tulum y a 50 Km al Norte de la isla de Cozumel en un periodo de dos años (1994-1995).

***Método de muestreo:***

Se colectaron muestras de roca caliza que se remonta al periodo terciario tardío. Para colectar las muestras de lluvia se utilizaron recipientes de polietileno (Nalgene), inmediatamente después se midió el volumen de precipitación, así como el pH de cada una de las muestras, se tapaban y se llevaban a refrigeración a 4°C de acuerdo a recomendaciones de la US-EPA referentes a la colección y manejo de muestras.

***Análisis de muestras:***

Se determinó el pH de las muestras utilizando un potenciómetro, así como la conductividad con un conductímetro y se determinaron las concentraciones de los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , y  $\text{SO}_4^{2-}$  mediante HPLC.

***Resultados:***

El agua de lluvia que cayó sobre el Puerto de Morelos, en el año de 1994 presentó características más ácidas que en el año de 1995. El sodio presenta una mayor concentración en el efluente. Las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  aumentaron por la contribución de roca caliza la concentración de ion amonio disminuye en el efluente. En las concentraciones de aniones ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ ) se incrementan en el efluente. La lluvia ácida causó la disolución química de la roca caliza al disolver el carbonato de calcio que contiene los elementos que constituyen la arcilla. La presencia de sulfatos en la lluvia ácida causó formación de sulfato de calcio en la roca, así lo indicaron los análisis de difracción de rayos X.

**Cerón Bretón Rosa María (2002). Composición química de la precipitación pluvial en zonas costeras.**

***Sitio y año de muestreo:***

Muestreo se llevó a cabo en Acapulco, Gro; Cancún, Q Roo; Océano Pacífico, Puerto Morelos, Querétaro; y Tapachula, Chiapas. El muestreo se llevó a cabo en el periodo de agosto de 1999 a octubre de 2001

***Método de muestreo:***

El dispositivo de muestreo fue un colector de precipitación que consiste en un embudo cuyo contenido se colecta en botellas de polietileno HDPE, y para preservarlas se utilizó el Método de Peden y Skowron, (1978).

***Análisis de muestras:***

La conductividad fue determinada con un conductímetro; la medición de pH de las muestras se realizó mediante un potenciómetro. Se determinaron aniones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , mediante HPLC. Para la determinación de cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica.

***Resultados:***

Se observó que las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en Acapulco y Tapachula varían significativamente a las encontradas en Cancún, Puerto Morelos y el Océano Pacífico, probablemente debido a que la contribución del aerosol marino está limitada por la distancia a la costa, la altitud y la influencia de las condiciones meteorológicas que favorecen la entrada de aire marítimo en cada sitio específico de muestreo. La concentración de estos iones es más alta en sitios mayormente expuestos a la entrada de aire marítimo como Cancún, Puerto Morelos y el Océano Pacífico. Las concentraciones de iones  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en las costas no fue significativa, a excepción de Cancún y Puerto Morelos, donde abundan suelos calizos. En lo que se refiere a  $\text{SO}_4^{2-}$ , sus concentraciones son muy bajas comparadas con sitios que tienen influencia antropogénica y están de acuerdo con las reportadas para sitios costeros y marinos con influencia antropogénica mínima. La ausencia de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  en la fracción marina de la precipitación confirma su origen antropogénico, conforme el sitio se vuelve menos remoto, dependiendo de la influencia de fuentes antropogénicas locales, del uso del suelo, o de incendios de biomasa en la periferia del sitio de muestreo, los niveles de estos iones se pueden incrementar.

**Chávez Aguilar Griselda (2002). Relación del daño en copa y el depósito atmosférico, como una causa del decline forestal en el bosque de *Abies religiosa* de dos parques nacionales.**

***Sitio y año de muestreo:***

Parque Nacional del desierto de los Leones, Parque Nacional del Chico, (Estado de Hidalgo). El año de muestreo fue 2002.

***Método de muestreo:***

El muestreo de hojas se realizó de acuerdo con Potter et al. (1991), el total de individuos muestreados fue de 39 Abetos, muestra representativa para cada una de las zonas. Las hojas fueron saludables (sin presencia de plagas, ni daño físico), al ser colectadas se colocaban inmediatamente en frascos de polipropileno (250 ml) con cuidado de no agitarlas y evitar la pérdida de depósito, finalmente se transportaron al laboratorio para ser hidratadas con agua desionizada. Se conservaron en refrigeración para su posterior análisis químico.

***Análisis de muestras:***

La conductividad fue determinada con un conductímetro; la medición de pH de las muestras se realizó mediante un potenciómetro. Se determinaron aniones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  por HPLC.

***Resultados:***

Respecto al pH y la conductividad no presentaron diferencias significativas entre las zonas de estudio. Por su parte el depósito iónico, para  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  no presento diferencias significativas entre las zonas de estudio, mientras que para  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  se sugiere una determinación de co-variables debido a que no se determinó si existieron diferencias significativas. Para el ion  $\text{NH}_4^+$ , si se determinaron diferencias significativas entre las zonas de estudio, con 400 ppm y 40 ppm para DDLL y El Chico, respectivamente. Los iones que presentaron mayor correlación en DDLL fueron  $\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Mg}^{2+}$  con una  $r=0.50$  y  $0.49$ , respectivamente. La correlación catiónica demostró que el elemento de mayor grado de asociación en los aniones fue el  $\text{SO}_4^{2-}$  y para los cationes el  $\text{NH}_4^+$  (0.90097) y el  $\text{Ca}^{2+}$  (0.89953), para DDLL y El Chico, respectivamente.

**Mojica Avilés Maricela (2003). Dendroanálisis con PIXE de núcleos de pino y oyamel para el registro de los eventos del depósito atmosférico en los Parques Nacionales Izta-popocatepetl y Zoquiapan.**

**Sitio y año de muestreo:**

Cuenca de México, Parque Nacional Zoquiapan, Chalco Estado de México y Parque Nacional Izta-popocatepetl. Periodo de muestreo: 1970 a 2000.

**Método de muestreo:**

Se identificaron las especies *Pinus montezumae* y *Abies religiosa* que se encontraban en buen estado y que median más de 14m de diámetro, se tomaron dos núcleos de cada árbol a una misma altura con un taladro de manera perpendicular a la pendiente del suelo, obteniendo muestras de ocho árboles para cada zona de estudio. Se extrajeron sus núcleos, se colocaron en popotes y después en contenedores, se secaron en estufa a 40°C para evitar que se contaminen, posteriormente se acomodaron y se pegaron los núcleos secos a los bastidores de madera.

**Análisis de muestras:**

Se calculó el promedio de los elementos detectados de 1970 al 2000 en cada una de las especies tanto del Izta-popocatepetl como de Zoquiapan, así como los datos climáticos y emisiones atmosféricas.

Se analizaron 22 elementos (S, Cl, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Pb, Y, Zr, P, La y Hg) en las dos zonas estudiadas y fueron sometidos al análisis de PIXE.

**Resultados:**

En Izta-Popocatepetl la mayor cantidad de  $Ca^{2+}$  fue durante el periodo de 1981 o 1985 con 56,881  $\mu\text{g/g}$ , en tanto que en el último quinquenio (1996-2000) se encontraron las menores concentraciones con 1,025  $\mu\text{g/g}$ . En Zoquiapan el  $Ca^{2+}$  presentó en promedio, su mayor concentración durante el periodo de 1971 a 1975 con 5,148  $\mu\text{g/g}$ . después fue disminuyendo hasta el penúltimo quinquenio (1991-1995) en donde se encontró su menor concentración con 1,011  $\mu\text{g/g}$ . El máximo contenido de  $K^+$  en Pino del Izta-Popocatepetl fue durante el quinquenio de 1991 a 1995 con 97,086  $\mu\text{g/g}$ , mientras que en el último periodo (1996-2000) se detectó la menor concentración con 1,793  $\mu\text{g/g}$ . El  $K^+$  detectado en Zoquiapan las mayores concentraciones se encontraron en el periodo de 1971 a 1975 con 11,098  $\mu\text{g/g}$ , mientras que las menores concentraciones fueron encontradas en el penúltimo

quinquenio con 2,423  $\mu\text{g/g}$ . El máximo contenido de S detectado en los anillos de crecimiento en un promedio de cinco años de *Pinus montezumae* del Izta-Popocatépetl fue de 71,719  $\mu\text{g/g}$  en periodo de 1981 a 1985, después se redujo a 1,156  $\mu\text{g/g}$  en el último quinquenio (1996-2000). En el *Pinus montezumae* de Zoquiapan demostró que las mayores concentraciones de nutrimentos se observaron muy asociados en los periodos de 1975 a 1990 y para el último quinquenio se observó una asociación muy lejana y una menor concentración. También se observó que en promedio la anchura de los anillos fue mayor en Zoquiapan que en el Izta-popocatépetl, tanto en *Pinus montezumae* como en *Abies religiosa*.

**Robles Mora Gabriela (2003) Dendroquímica con PIXE en pino y oyamel, para el registro retrospectivo de 30 años de depósito atmosférico, en el Desierto de los Leones y "El Chico" Hidalgo.**

**Sitio y año de muestreo:**

Las zonas de estudio que se eligieron fueron el Parque Nacional Desierto de los Leones y el Parque Nacional "El Chico" Hidalgo, de 1970 a 2000.

**Método de muestreo:**

Se realizó una selección aleatoria de los árboles. Los criterios para la selección de los arboles fueron que presentaran vigor, con capa frondosa, sin parásitos, ni plantas parásitas, sin daño con machete o hacha, así como de árboles cuarteados de su tronco. Se tomaron medidas de su tronco que rebasaron los 1.20 m de circunferencia. Se extrajeron cinco núcleos de *Pinus lelophyta* y cinco de *Abies religiosa*, de ambas zonas, con un taladro Pressler de 0.5 mm, después se etiquetaron y se resguardaron en popotes cuidadosamente colocados en una caja, para su posterior trabajo en el laboratorio.

**Análisis de muestras:**

En el laboratorio se secaron los núcleos a 50°C por 24 hrs. Se fijaron en bastidores de madera de 35 cm de largo con un canal de 5mm. Posteriormente, se rasuraron para contar con una superficie plana, con el fin de que los anillos pudieran ser leídos, fueron sometidos al análisis de PIXE.

**Resultados:**

Con el método de la extracción de componentes principales los micronutrientes extraídos para las especies de pino de la zona de El Chico fueron: V, Mn, Fe, Ni y para oyamel fueron: Mn, Fe, Co, Cu, Y, y Zn. En el oyamel se registraron Ga, Ni, Cr, el primero se presenta a lo largo de todo el tiempo y se encuentra dentro del intervalo registrado (3-30 ppm), aunque se presentan picos importantes en el segundo y tercer quinquenio, Ni presenta picos de 2-3 mg/kg en el segundo quinquenio y disminuye en el último. Para Cr en el primer y tercer quinquenio se presentaron de 1-2 mg/kg y después ya no se detectó. Los elementos no esenciales se encuentran en mayor frecuencia en oyamel, pero con una concentración menor para el caso de Pb lo registra a lo largo del tiempo, pero para *Pinus* es muy puntual, pero con concentraciones altas.

El Ta aumentó ligeramente en los últimos 2 quinquenios de 5 a 10 mg/Kg y en el caso del oyamel el Ta presentó concentraciones altas en cuarto quinquenio de

hasta 50 mg/kg. En general, se observa que los macronutrientes van disminuyendo drásticamente del quinto quinquenio al sexto quinquenio, así como el crecimiento del anillo, con excepción de Ca, y la correlación más alta que se encontró fue con  $K^+$  con una correlación de 0.76 de todos los demás macronutrientes. Al analizar el comportamiento a lo largo del tiempo las concentraciones se encuentran muy semejantes entre los elementos encontrados en el oyamel, haciéndose notar una disminución drástica en el quinto quinquenio, asimismo para el anillo de crecimiento en la mitad del quinto quinquenio, y la correlación más alta con la anchura fue para K con 0.38. Sin embargo, los elementos esenciales se ubican en el intervalo mínimo o por debajo del mínimo en ambas especies.



**Ruiz Barrios Jaime (2004). Efecto de la lluvia ácida en el material pétreo constituyente de los monumentos de la zona arqueológica del Tajín, Veracruz, México.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona arqueológica del Tajín, en el municipio de Papantla de Olarte, Veracruz. El periodo de muestreo abarcó de agosto a octubre de 2002

***Método de muestreo:***

Sistema de colección de lluvia (colector automático “wet/dry”) recomendado por el NADP. La colección se llevó a cabo cada 24 hrs., en botella de polietileno (Nalgene). Los recipientes se tapaban perfectamente y se colocaban en refrigeración a 4°C. El material pétreo que se analizó es material representativo de los monumentos de la zona arqueológica de El Tajín. La muestra se eligió de las rocas depositadas en el suelo, en la base de una muralla semi-destruida por el tiempo.

***Análisis de muestras:***

Se determinaron los parámetros siguientes: pH, conductividad, y las concentraciones iónicas de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . A la muestra de material pétreo se le determinó la absorción de agua y densidad, de acuerdo con los procedimientos recomendados en la Norma Oficial Mexicana (NMX-C-164-1986), la porosidad utilizando el método reportado por Davis, H. D. El análisis de Difracción por Rayos X, practicado a la muestra de roca de El Tajín, se identificaron los siguientes componentes:  $\text{CaCO}_3$  (81.2%), cuarzo o sílice (17.9%) y feldespatos (0.9%).

***Resultados:***

Los resultados obtenidos en el análisis de difracción por rayos X, realizados a la roca caliza, se encontró que el  $\text{CaCO}_3$  es su componente principal (81.2%), seguido de la sílice y trazas de feldespatos de composición química variable. La composición química del agua de lluvia procedente de la zona de estudio es importante señalar que de los 17 eventos sólo cuatro de ellos tuvieron un pH arriba de 5.6, mientras que todos los demás presentaron un valor inferior a éste. La acidez máxima correspondió a un valor de pH de 4.03. El deterioro promedio sufrido por su componente principal, el  $\text{CaCO}_3$ , fue de  $1.05 \text{ mg/cm}^2\text{-año}$ , mientras que la pérdida de masa total de las muestras, dió un valor ligeramente más alto ( $1.12 \text{ mg/cm}^2\text{-año}$ ).

**Ramírez Blancarte Valeria (2005). Evaluación del efecto de la lluvia ácida en el material de construcción de la Fortaleza de San Juan de Ulúa Veracruz, México.**

***Sitio y año de muestreo:***

Fortaleza de San Juan de Ulúa Veracruz, México. El periodo de muestreo comprendió del 7 de enero al 6 de diciembre del 2003.

***Método de muestreo:***

Sistema de colección de lluvia (colector automático “wet/dry”) recomendado por el NADP. Después de la colección de agua de lluvia, se midió el volumen de precipitación, así como el pH de cada una de las muestras, utilizando un potenciómetro. Las muestras originales de la roca calcárea procedentes de SJU, se cortaron seis muestras: las cuatro primeras para la irrigación en la Cámara de Intemperismo Acelerado y el resto para determinar los parámetros físicos siguientes: densidad, porosidad, absorción de agua y difracción por rayos-X.

***Análisis de muestras:***

En el laboratorio se les determinó nuevamente el pH, la conductividad y las concentraciones de los iones siguientes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  mediante HPLC. El procedimiento que se utilizó para medir la absorción de agua es el establecido en la NMX-C-164-986. Se determinó la densidad de cada una de las muestras de material rocoso. Para determinar el porcentaje de porosidad (%P) se utilizó el método reportado por Davis H. D. (1954).

***Resultados:***

Del total de las muestras de agua analizadas (89), sólo el 31% presentó un pH por arriba de 5.6, el pH más bajo que se registró fue de 4.3. Los resultados obtenidos en el análisis de difracción por Rayos X, se encontró que las muestras están constituidas fundamentalmente de  $\text{CaCO}_3$  en sus dos formas cristalinas: calcita y aragonita. La masa de  $\text{CaCO}_3$  perdida por cada una de las muestras fue de: 0.358g y 0.374g, respectivamente. La mayor porosidad de la roca no es un factor que haya contribuido a una mayor degradación, la pérdida de  $\text{CaCO}_3$  de las muestras más porosas, en promedio, fueron menores que las experimentadas por las muestras más compactas.

**Correa Galicia Pedro (2006). Correlación nutrimental del suelo y anillos de crecimiento del bosque de pino-oyamel del Parque Nacional Zoquiapan a través del depósito atmosférico mediante la técnica de PIXE.**

**Sitio y año de muestreo**

Parque Nacional Zoquiapan, Estado de México, con un periodo de muestreo de 1993 a 1999.

**Método de muestreo:**

Para la toma de muestra, se realizaron dos perfiles a una profundidad de 0 a 120 cm. Se tomó una cantidad aproximada de 1 kg, se envasaron en bolsas de polietileno. Se identificaron las especies de *Pinus montezumae* y *Abies religiosa*, que se encontraban en buen estado, como: vigor, capa frondosa, sin parásitos, sin plantas parasitarias, ausente de daño alguno como machete, hacha, donde los diámetros oscilaron de 1.50 a 2.45 m, para realizar el estudio se obtuvieron muestras de cuatro árboles, a cada uno de ellos se les extrajo un par de núcleos de madera (anillos de crecimiento) con un taladro Pressler de 0.5 mm.

**Análisis de muestras:**

Una vez en el laboratorio, se procedió a secar las muestras a temperatura ambiente, donde posteriormente se realizó un tamizado a cada una de ellas con malla de 2 mm, después se tomaron 100 g de muestra representativa y se llevaron al Instituto de Física para realizar pastillas de 0.5 cm de diámetro por 3 mm de espesor. Cada una de las muestras se sometieron a una irradiación de protones en un acelerador de Van Graaff de 5.5 MeV. Los núcleos extraídos de los árboles se colocaron en bastidores de madera, a fin de orientarlos tangencialmente, para realizar el rasurado exponiendo el ancho del anillo.

**Resultados:**

El pH registró un ascenso de 4.7 a 4.8 unidades a las profundidades de 15 a 60 cm. Los cambios registrados en el periodo de seis años oscilan entre los 4.8 a 5.2 en el pH y en el real, fue de 5.6 a 6.0. La materia orgánica tiende a disminuir en las partes más profundas del perfil del suelo y al comparar los registros de 1993 contra 1999, se determinó una disminución en los intervalos de 6-11% a 4-9%, respectivamente. La Capacidad de Intercambio mostró una disminución de 20-40 Cmol/Kg en 1993 y 30-15 Cmol/Kg para el año de 1999. Los registros del incremento P>S>K>Ca>Mg redujo el crecimiento de anillos en *Abies religiosa* con 0.1-0.7 mm.

**Cruz Jiménez Elizabeth (2007). Estudio comparativo entre la deposición húmeda y seca de Ciudad Universitaria (Zona Metropolitana de la Ciudad de México) y El Tajín (Veracruz).**

**Sitio y año de muestreo:**

Ciudad Universitaria y Zona arqueológica El Tajín. Periodo de muestreo 2003 y 2004

**Método de muestreo:**

El sistema para la colección y los procedimientos establecidos para coleccionar, conservar y analizar las muestras de depósito húmedo y seco, están avalados por la US-EPA y el NADP.

**Análisis de muestras:**

Se cuantificaron las concentraciones de los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , además del pH y la conductividad de las muestras tanto de depósito húmedo como seco, así como la cantidad de partículas sedimentables coleccionadas mensualmente en este último tipo de depósito. Con el propósito de evaluar la cuantificación de los iones obtenidos mediante la técnica de HPLC.

**Resultados:**

Los valores encontrados de pH ponderados en las muestras de depósito húmedo para CU en el año 2003 fueron de 5.02, mientras que en el año 2004 fue de 5.20. En El Tajín durante el año 2003 fue de 4.56, mientras que en 2004 fue de 4.51. Los valores encontrados indican la presencia de lluvia ácida en ambos sitios, pero está más ácida en el sitio de muestreo de la Zona Arqueológica de El Tajín. Los resultados encontrados de las concentraciones ponderadas de los aniones en las muestras de depósito húmedo en CU tienen el siguiente orden:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ , los valores encontrados para los años 2003 y 2004 fueron: 62.48/62.99  $\mu\text{eq/L}$  de  $\text{SO}_4^{2-}$ , 46.55/45.38  $\mu\text{eq/L}$  de  $\text{NO}_3^-$  y 11.88/14.85  $\mu\text{eq/L}$  de  $\text{Cl}^-$ . En la Zona Arqueológica de El Tajín se presentó el siguiente orden:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ , para las muestras del año 2003 y 2004 se encontró: 42.51/40.60  $\mu\text{eq/L}$  de  $\text{SO}_4^{2-}$ , 25.24/37.32  $\mu\text{eq/L}$  de  $\text{Cl}^-$  y 19.77/25.26  $\mu\text{eq/L}$  de  $\text{NO}_3^-$ . Los resultados para las muestras de depósito húmedo en CU están en el siguiente orden:  $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ .

En el depósito húmedo de la Zona Arqueológica de El Tajín se encontró para el año 2003 el siguiente orden decreciente en la composición de los iones:  $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ , mientras que en el año 2004 fue:  $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} >$

$Mg^{2+} > K^+$  En cuanto a los valores del depósito seco se encontró que se incrementa en el orden siguiente: El Tajín 2004 (1.24 Ton/Km<sup>2</sup>-mes), 2003 (2.17 Ton/Km<sup>2</sup>-mes), CU 2003 (2.38 Ton/Km<sup>2</sup>-mes) y 2004 (2.60 Ton/Km<sup>2</sup>-mes). Como se puede observar CU presentó valores mayores de depósito seco.

**García Martínez Rocío (2007). Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y una zona rural (Rancho Viejo, Edo. de México).**

**Sitio y año de muestreo:**

Ciudad Universitaria en la Ciudad de México y Rancho Viejo, Estado de México. Durante el periodo 2003-2004.

**Método de muestreo:**

Colector de lluvia automático (wet/dry) Andersen modelo 78-100. La colección de lluvia fue por 24 horas. Se utilizaron dos colectores manuales, uno para la determinación de especies iónicas y otro para metales pesados y consiste de un embudo de 20 cm de diámetro de polietileno, acoplado a una botella de polietileno de alta densidad (HDPE). En Rancho Viejo se realizaron muestreos por cada evento de lluvia.

**Análisis de muestras:**

El análisis químico de Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y V fue por EAA. Las cubetas utilizadas para el depósito seco, se llevaron al laboratorio para realizar el análisis químico de los metales pesados asociados a las partículas. El pH del agua de lluvia, se determinó utilizando un potenciómetro. La determinación de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , se efectuó utilizando un EAA (flama). Las especies iónicas analizadas fueron:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , usando un HPLC.

**Resultados:**

Las concentraciones iónicas ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), así como también de metales pesados (Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y V) en CU (zona urbana), están de acuerdo con lo reportado para otros sitios urbanos. En lo que se refiere a Rancho Viejo (zona rural), la abundancia iónica obtenida, está de acuerdo a lo reportado para zonas rurales, con influencia antropogénica mínima. Las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  en Ciudad Universitaria, fueron mayores significativamente con las obtenidas en Rancho Viejo. En Ciudad Universitaria como en Rancho Viejo, la contribución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  favorecen la acidez del agua de lluvia, siendo el de mayor proporción el ión  $\text{SO}_4^{2-}$ . Las pruebas del depósito seco encontraron valores de mayor concentración de metales pesados a 15 m/s.

## **Herrera Tolama Chedy Adriana (2007). Evaluación de la deposición húmeda en la Costa del Golfo de México para el periodo 2003-2005.**

### ***Sitio y año de muestreo:***

Zona Arqueológica de El Tajín, Veracruz, Instituto de Ecología, A.C. El Morro “La Mancha”, Veracruz, Fortaleza de San Juan de Ulúa en el Puerto de Veracruz. Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana en campus Mocambo, Veracruz. Periodo 2003, 2004 y 2005.

### ***Método de muestreo:***

Los sistemas de colección de lluvia recomendados por el NADP, consisten en un dispositivo de dos cubetas en las que se colecta la precipitación seca y húmeda, separadamente. En el caso de las muestras de precipitación seca, la cubeta se remueve cada mes, se tapa herméticamente, se etiqueta y se almacena para su posterior envío y análisis en el laboratorio.

### ***Análisis de muestras:***

El análisis químico consiste en determinar para cada muestra de lluvia de los 4 diferentes sitios los siguientes parámetros: pH, conductividad, concentración de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y concentración de aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Para la determinación del pH se utilizó un potenciómetro. Para la determinación de la conductividad se utilizaron dos conductímetros. La cuantificación de los iones en las muestras de agua de lluvia se utilizó un sistema de HPLC.

### ***Resultados:***

En el análisis por sitio hay diferencia significativa en los valores de pH entre todos los sitios en los 3 años estudiados. TAJ muestra el pH promedio ponderado mensual más bajo y SJU el más alto, sin embargo, se encuentran por debajo del valor de referencia de la lluvia limpia (pH=5.6). Los iones  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  presentaron un comportamiento de tendencia igual que el ion  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en sus concentraciones ponderadas mensuales, esto nos indica que pueden provenir de las mismas fuentes. El catión que tuvo la menor concentración fue  $\text{K}^+$ . Del 2004 al 2005 se muestra que hubo un decremento estadísticamente significativo para los cuatro



cationes básicas en el sitio de El Tajín, el ion  $K^+$  mostró un incremento significativo del 2003 al 2004 en La Mancha.

La mayoría de los valores de concentración de los cationes básicos ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ ) fueron altos en SJU por lo que se observa al mismo tiempo que fue el sitio más alcalino, a su vez la conductividad presentó también valores altos en SJU, como resultado de las altas concentraciones de los iones básicos, ya que la conductividad depende de la concentración. El ion  $SO_4^{2-}$  y el ion  $NO_3^-$  no presentaron diferencias significativas entre sitios y en años consecutivos. Las sales que mostraron buenas correlaciones con  $Cl^-$  son:  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ; con  $SO_4^{2-}$ :  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $NH_4^+$ ; el  $NO_3^-$  con el  $Ca^{2+}$  y el  $NH_4^+$ , lo que indica que dichas sales provienen de un origen común. La mayoría de origen marino y corteza terrestre. Se observó una tendencia en los tres años que al aumentar la acidez o disminuir el pH.

**Miranda Quintero José Martín (2008). Cuantificación de metales pesados tóxicos en la precipitación pluvial en la Zona Sur de la Ciudad de México.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona Sur de la Ciudad de México. Durante junio a octubre de 2007.

***Método de Muestreo:***

El muestreo se realizó en un colector automático de lluvia “wet/dry” marca Andersen modelo 78-100 utilizando botellas HDPE, así como cubetas cubiertas de teflón con capacidad de 12 L, las cuales se lavaron con agua des ionizada tratándose previamente con HNO<sub>3</sub> (3.2 M) para remover los metales pesados incrustados en las paredes y así prevenir la contaminación de las muestras.

***Análisis de muestras:***

Las muestras de agua de lluvia se filtraron a través de una membrana de policarbonato de 0.4 µm de poro, realizando el análisis por EAA para determinar la presencia de metales en las muestras de lluvia.

***Resultados:***

La precipitación pluvial total durante el periodo de muestreo fue de 464 mm con la siguiente composición química de metales pesados analizados: 46 % de Fe, 24 % de Al, 21 % de Mn, 5 % de V, 4 % de Ni, y alrededor del 0.2 % de Cd. La concentración de Al en Ciudad Universitaria no ha presentado diferencias significativas y el Cd ha disminuido un 17 %, en cambio el Mn aumentó 492 % y el Ni 378 % aproximadamente. El aumento de Mn y Ni probablemente se deba a incrementos de emisiones de fuentes antropogénicas por el crecimiento del padrón vehicular al Sur de la Ciudad de México y las condiciones de tráfico, la venta y uso de motores diésel en algunos modelos nuevos de automóviles, incineración de basura, quema de aceites, etc.

**Marín Hernández Adrián (2009). Evaluación, prevención y control de precursores de lluvia ácida en el estado de Veracruz.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona arqueológica de El Tajín y Estación de Ecología Costera “El Morro de La Mancha”. Se muestreo durante el periodo comprendido entre los años 2006 y 2007.

***Método de Muestreo:***

Los colectores utilizados para el muestreo de lluvia fueron Aerochem Metrics Modelo 301, que consisten en un dispositivo de dos cubetas en las cuales se colectó el depósito seco y húmedo en forma separada. Los recipientes utilizados para la colección de agua de lluvia son botellas de polietileno de alta densidad de 500 mL (Nalgene). En cada uno de los sitios se colectó la muestra de lluvia tomando la lectura del volumen de precipitación del pluviómetro acoplado al colector, midiendo el pH y en algunas ocasiones la conductividad de la muestra en campo.

***Análisis de muestras:***

Los parámetros a determinar fueron el pH y conductividad, así como los aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^-$  y cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , además de analizar bicarbonatos. La medición del pH de las muestras se realizó con un potenciómetro y la conductividad se midió mediante un conductímetro. La determinación de aniones y cationes de las muestras de agua de lluvia se realizó mediante la técnica de HPLC.

***Resultados:***

Para el caso de El Tajín más del 80% de los eventos de precipitación tienen un pH por debajo de 5.65 mientras que para La Mancha es de 77%. Para los dos sitios estudiados (El Tajín y La Mancha) se obtuvo el promedio ponderado anual de pH de agua de lluvia menor a 5.65, por lo cual se tiene la presencia de lluvia ácida. En el periodo 2003-2005 el valor más bajo de pH había correspondido siempre a El Tajín lo cual se repitió en 2006, sin embargo, para el año 2007 el pH para ambos sitios es muy similar 4.78 para “La Mancha” y 4.79 para El Tajín. De los cationes cuantificados el  $\text{Na}^+$  es el que tiene un valor de concentración mayor seguido del  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ . Por otra parte, los aniones cuantificados observaron el siguiente comportamiento en orden decreciente:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{NO}_3^-$ . La presencia de  $\text{NH}_3\text{NO}_3$  está ligado a la descomposición de la materia orgánica y también a los

fertilizantes utilizados en actividades agrícolas debido a que ambas estaciones están rodeadas por gran cantidad de vegetación y de actividades agrícolas. En un análisis comparativo de las emisiones se observó que existen fuentes puntuales con una aportación muy alta de SO<sub>x</sub>, sobre todo en los municipios de Tuxpan, Veracruz y Cd. del Carmen, Campeche.

En la Mancha se observó para el año 2006 una diferencia significativa entre los valores de pH de las muestras de los eventos que provienen del Norte y los del Este, resultando tener un pH más bajo los eventos cuyas fuentes potenciales se ubican en la parte oriental del Golfo de México.

## **Alarcón Jiménez Ana Luisa (2012). Lluvia ácida en la Zona Metropolitana de la CdMx: Evaluación y trascendencia.**

### ***Sitio y año de muestreo:***

Zona Metropolitana de la Ciudad de México, durante el periodo comprendido durante los años 2003 y 2009.

### ***Método de Muestreo:***

Para la obtención de muestras se siguió un protocolo de muestreo y análisis recomendado por la NADP, 2000 y la US-EPA, 1994, utilizando un colector automático "wet/dry". El muestreo se realizó en 16 estaciones que abarcan la ZMCM.

### ***Análisis de muestras:***

Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos de pH y conductividad, así como la concentración de los iones inorgánicos solubles:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , mediante la técnica analítica de HPLC.

### ***Resultados:***

Las muestras de depósito húmedo para la región Noreste de donde se obtuvieron un total de 564 muestras analizadas, de las cuales 11% presentaron valores de pH menores a 5.6 y más del 75% de las muestras mostraron valores de pH superiores a 6.5. En la región Noroeste se analizaron un total de 437 muestras de las cuales 80 presentaron valores de  $\text{pH} \leq 5.6$  (18.3%). En la región Centro se analizaron 151 muestras de las cuales 16 presentaron carácter ácido (10.60%). Los valores de pH determinados en esta región fueron en un intervalo de 4.5 a 7, y las mayores frecuencias se observaron en los valores de 6.5 a 6.8. La región Suroeste se analizaron 1251 muestras de las cuales el 37.09 % presentó valores de pH menores a 5.6. Los valores de pH registrados en la región Suroeste se encuentran en un intervalo de 3.66 a 7.80 y la mayor frecuencia entre 5.2 y 5.4. En la región Sureste durante la campaña se analizaron 259 muestras, de las cuales, el 26 % presentó valores de  $\text{pH} \leq 5.6$ . Los resultados mostraron que la concentración de ion  $\text{SO}_4^{2-}$  fue mayoritaria (60%) con respecto a los otros iones y que su asociación al  $\text{H}^+$  incrementó en las estaciones de muestreo ubicadas al Suroeste de la ZMCM, alcanzando hasta un 30% en relación a la masa total de este ion.

**Cavazos Echagaray Guillermo (2013). Lluvia ácida y biodeterioro en la fortaleza de San Juan de Ulúa Veracruz, México, monumento del patrimonio cultural.**

***Sitio y año de muestreo:***

Fortaleza de San Juan de Ulúa Veracruz, México. Durante los años de 2009 y 2010

***Método de muestreo:***

Se seleccionaron los muros en donde la película microbiana se extendía cubriendo la mayor parte de la superficie. En cada sitio de muestreo se midió la temperatura sobre el crecimiento y sobre el área de la roca inmediata al mismo con un termómetro de luz infra roja. Se midió la humedad relativa superficial del sustrato y la humedad interior del mismo con un probrómetro. En cada muro se tomaron de dos a tres muestras de cada crecimiento, usando un bisturí previamente esterilizado al fuego. La muestra se introdujo en un frasco estéril y se guardó en una hielera a baja temperatura hasta su traslado a la Ciudad de México para su análisis. Se tomó otra muestra con el bisturí y se depositó en cajas de petri con medio medio de cultivo adecuado para el desarrollo de hongos. Cada caja fue cerrada con parafilm. Para el muestreo del depósito húmedo se utilizó un colector automático (Aerochem Metrics), Después de cada evento de lluvia, se midió el volumen de la precipitación en el pluviómetro y se almacenó en recipientes de 500 mL, fabricado de polietileno de alta densidad, el cual es inerte a la composición química de la lluvia.

***Análisis de muestras:***

Debido a que la acidez producida por los organismos es uno de los factores con más impacto sobre las rocas, se consideró importante evaluar los cambios de pH producidos por los hongos en el medio de cultivo y los efectos de la lluvia ácida durante este proceso. La identificación de estos organismos se hizo utilizando las claves adecuadas para cada caso y considerando la disposición solitaria o colonial y la morfología celular o filamentosa. La identificación de los hongos parte de las características macroscópicas de la colonia (color, textura y velocidad de crecimiento) y continúan con la observación de las hifas y conidios al microscopio. A partir de cada colonia, se montaron preparaciones permanentes con alcohol polivinílico y se observaron en microscopio fotónico, para identificar a los organismos con ayuda de las claves.

**Resultados:**

Se identificaron un total de 26 cianobacterias y 17 hongos creciendo sobre los muros de la fortaleza. De las 26 cianobacterias detectadas en la fortaleza, 18 son consideradas deteriorantes y de los 24 hongos detectados en la fortaleza, 13 son considerados como deteriorantes. La lluvia detectada durante el periodo del estudio presentó un pH de 4, por lo cual es considerada lluvia ácida. La llegada de la lluvia ácida incrementa el poder deteriorante de *Aspergillus niger* presente en la película microbiana, al acelerar la velocidad de su crecimiento. La lluvia ácida induce al crecimiento de las colonias de *Aspergillus niger* y *Cladosporium herbarum*, modificando el pH del medio donde se ubican. La película microbiana que se desarrolla sobre el estuco, causa un daño directo al contraerse en temporada secas y desprender fragmentos del muro.



**Puentes González Ana Karen (2014). Estimación de emisiones de precursores de lluvia ácida en el Estado de Veracruz.**

***Sitio y año de muestreo:***

Estado de Veracruz. Muestreo: año 2011.

***Método de muestreo:***

Para llevar a cabo el estudio fisicoquímico de la lluvia ácida se tomó como base las técnicas de muestreo y medición propuestas por el NADP de los EUA, con un colector automático “wet/dry”. Para la colección de las muestras de depósito húmedo, la muestra se trasvasa dentro de una botella y se mide el volumen de lluvia, pH y conductividad, valores denominados como “mediciones de campo”. Las botellas se colocan en refrigeración a 4°C. En el caso del depósito seco la cubeta es removida cada mes y tapada herméticamente e identificada para su posterior envío al laboratorio y su análisis químico.

***Análisis de muestras:***

Se determinaron los siguientes parámetros: pH, conductividad, concentración de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y concentración de aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , así como la alcalinidad expresada como concentración de  $\text{HCO}_3^-$ .

***Resultados:***

Las emisiones de contaminantes atmosféricos fueron calculadas teniendo en cuenta los consumos mensuales de combustible en cada una de las unidades generadoras de la planta de energía, después de la aplicación de los factores de emisión correspondientes a  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  se observaron valores de las emisiones que abarcan un intervalo mensual de 0 hasta 95 Ton/día de  $\text{SO}_2$ . Para esto fue necesario además del consumo, conocer el porcentaje de azufre contenido en el combustóleo. Estas características se obtuvieron para cada una de las seis unidades de generación. Cabe mencionar que dos unidades cuentan con quemadores frontales y cuatro con quemadores tangenciales, característica de gran importancia para el cálculo de emisiones de  $\text{NO}_x$ . Particularmente se puede decir que los meses con las emisiones mayores corresponde a mayo, junio y julio para ambos contaminantes.

**García Salas Anayeli. (2014). Comparación del depósito atmosférico y metales pesados utilizando corteza de oyamel [*Abies religiosa*] en un paraje del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl y Parque Nacional El Chico.**

**Sitio y año de muestreo:**

Parque Nacional Iztaccíhuatl–Popocatepetl, Parque Nacional El Chico. Periodo de septiembre y octubre de 2012.

**Método de muestreo:**

Dentro de estos sitios se seleccionaron treinta arboles de la especie *Abies religiosa*, las características que los organismos cumplieron son de un diámetro mayor a 50 cm, sin daño físico y sin parásitos en el fuste. Posteriormente, se recolectaron tres muestras de corteza de cada árbol (a la altura del pecho) con ayuda de un formón y con profundidad de 3 mm, tomando la primera muestra de la cara incidente a los vientos provenientes de la fuente contaminante en cada periodo de muestreo.

**Análisis de muestras:**

Para la cuantificación de metales pesados se tomaron 0.50 g de corteza, a los que se le añadió 1 mL de HClO<sub>4</sub> (60%), 5 mL de HNO<sub>3</sub> (conc.) y 0.5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (concentración), se digirió lentamente a calor moderado. Los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn se determinaron en un lote de quince muestras elegidas al azar por periodo húmedo y seco (60 en total), mediante EAA de flama

**Resultados:**

El Cedral registró las concentraciones promedio más altas durante el periodo seco en los metales Cd (0.14 mg/Kg), Pb (0.60 mg/Kg) y Zn (0.75 mg/Kg). La diferencia de acidez entre las pináceas y *Abies religiosa* es de 1.2 unidades ( $\pm 0.01$ ). Para el Parque Nacional Iztaccíhuatl–Popocatepetl, en investigaciones anteriores registró un promedio de pH de 4.1; el actual estudio registra un promedio de 3.94, por lo tanto, la acidez en este Parque Nacional para *Abies religiosa* ha aumentado en 0.16 unidades. Se obtuvo un pH promedio de 3.75 en muestras de corteza de *Pinus* colectadas en Paso de Cortés durante el periodo húmedo (septiembre–

octubre 2012), mientras que para el periodo seco (marzo–abril 2013) registró un promedio de 4.03.

La concentración promedio de los metales Cd, Cu, Pb y Zn en corteza de *Pinus* para la zona de paso de Cortés, fue siempre mayor durante el periodo seco; en el presente estudio las mayores concentraciones se presentaron durante el periodo húmedo (Cd 0.13, Cu 0.04 y Zn 0.68 mg/Kg), con excepción del metal Pb (0.58 mg/Kg durante el periodo seco).

**Zamora Vargas Eduardo (2016). Estimación y medición del depósito atmosférico húmedo en la zona de El Tajín, Veracruz, como producto de la operación de una fuente estacionaria.**

***Sitio y año de muestreo:***

Zona arqueológica de El Tajín, Veracruz, durante el año 2008.

***Método de Muestreo:***

Se colectaron 34 muestras de lluvia en la estación de muestreo de depósito atmosférico húmedo, por medio de CI, se cuantificó el contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$ , los cuales se compararon con los obtenidos en el mismo periodo mediante un modelo de dispersión (CALPUFF) con información de una central termoeléctrica.

***Análisis de muestras:***

En el laboratorio se determinó el pH, la conductividad y las concentraciones de los iones siguientes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  mediante CI.

***Resultados:***

Partiendo de los resultados de la simulación del depósito atmosférico húmedo, para el caso de  $\text{SO}_4^{2-}$ , se verificó su impacto en la estación de El Tajín, y posteriormente se comparó la concentración teórica con la concentración medida mediante el muestreo in situ, utilizando la expresión de Flux del depósito atmosférico. Se observan valores de contribución al depósito atmosférico húmedo de entre 1.85 a 49.54 %, los análisis de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en las muestras de depósito atmosférico húmedo fueron mayores a los estimados por el modelo.

#### 4.5 Variabilidad temporal de los estudios sobre el depósito atmosférico en México

Todos los estudios realizados sobre el depósito atmosférico en México han contribuido de manera importante y sustancial para el estudio de la lluvia ácida en nuestro país, sin embargo, la permanencia y continuidad sobre el desarrollo de estos estudios se dificulta cuando no hay recursos económicos para la operación de los sitios de muestreo.

Cabe señalar, que el objetivo de algunos estudios fue realizar el muestreo de agua de lluvia para una época del año en particular o por algún periodo de tiempo para fines de investigación, de acuerdo a los programas académicos como el PAPIIT y CONACyT, los cuales tienen renovación anualmente.

En la Figura 107 se muestra la cronología de los estudios realizados en México por diferentes instituciones y autores representando la variabilidad de estos estudios desde los años 80s hasta la fecha actual.

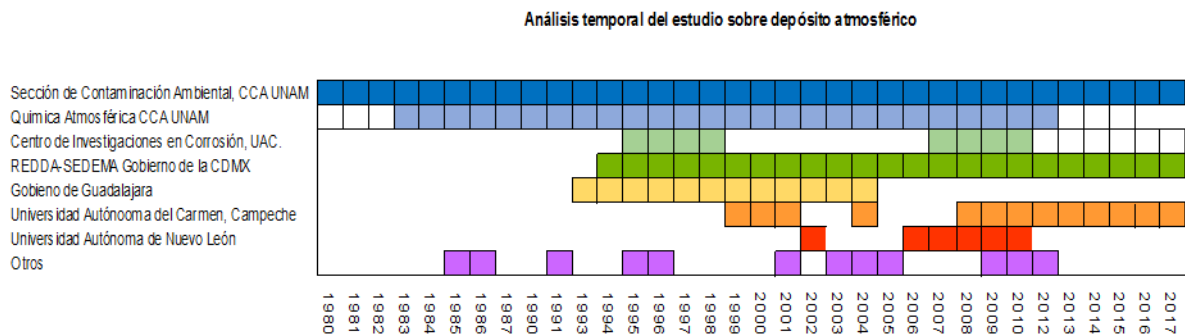


Figura 107. Variabilidad temporal de los estudios sobre el depósito atmosférico en México.

Las SCA y AC del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, así como la REDDA-SEDEMA de la Ciudad han continuado de una manera regular en el muestreo del depósito atmosférico.

Otras instituciones que han llevado a cabo investigaciones sobre depósito atmosférico en nuestro país son: Centro de Investigaciones en Corrosión, Gobierno de Guadalajara, Universidad Autónoma del Carmen, Universidad Autónoma de Nuevo León, entre otros.

#### **4.5.1 Cronología de muestreos realizados por la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM**

Considerando la información histórica generada por la SCA del CCA de la UNAM (SCA-CCA-UNAM), en los años 80's los estudios de lluvia ácida fueron instrumentados en la ZMCM, en colaboración con el Servicio Meteorológico Nacional (Aguilar, 1981b), desde entonces estos estudios se han realizado ininterrumpidamente por la SCA-CCA-UNAM en colaboración con el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Gobierno de la CdMx (SEDEMA, 1994-2016).

En el año de 1986 se llevó a cabo una investigación de gran alcance en el Golfo de México con la participación de la US-NOAA, la SEMAR de México, la Universidad de Texas y la SCA-CCA-UNAM. Este proyecto bilateral permitió evaluar la química atmosférica a todo lo largo del Golfo de México, siendo un buen ejemplo de cómo a nivel regional y global se pueden realizar campañas de monitoreo de contaminantes atmosféricos mediante proyectos de colaboración entre varios países (Parungo y Miller, 1988; Parungo et al, 1990). A finales de los noventas surgió el interés por parte de la Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte de llevar a cabo la evaluación de la lluvia ácida de la misma forma, tanto en Canadá como en los Estados Unidos y en México (CEC, 1997; Brydges et al, 1998), quedando desafortunadamente en la propuesta. En este mismo sentido cabe mencionar que la SCA-CCA-UNAM mantiene actualmente una estrecha colaboración con el US-NADP. Adicionalmente se está en contacto con la red de depósito atmosférico en Asia (EANET, 2006) y en Canadá.

La evaluación de la calidad del aire y del depósito atmosférico en el Golfo de México continuó en distintos cruceros de investigación realizados en el Buque Oceanográfico "Justo Sierra", en colaboración con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM (Bravo et al, 2004c, Bravo et al, 2005a; Bravo et al, 2006a).

Los primeros proyectos para la evaluación de los efectos dañinos del depósito atmosférico (húmedo y seco) sobre el material de construcción de monumentos históricos, se iniciaron en México en las zonas arqueológicas Mayas de Tulum, Quintana Roo y en Palenque en Chiapas (Bravo et al, 1991a; Bravo et al, 2000a; Bravo et al, 2000b; Bravo et al, 2000c; Bravo et al, 2001; Bravo et al, 2003b), a principios de los años 90's. Posteriormente, estos estudios continuaron en la Zona Arqueológica de El Tajín y en la Fortaleza de San Juan de Ulúa, ambas en el Estado de Veracruz (Bravo et al, 2003b; Bravo et al, 2005a; Bravo et al, 2006a). En colaboración con la Universidad Autónoma de Campeche se trabajó en la Zona

Arqueológica de Calakmul, y actualmente en la Ciudad Fortificada de Campeche (Torres, 2009).

En Monterrey Nuevo León, se llevaron a cabo los primeros estudios sobre la presencia de depósito atmosférico en conjunto con la Universidad Autónoma de Nuevo León (Ramírez, 2010). Los estudios en la costa del Golfo de México han continuado en colaboración con el Instituto de Ecología A.C. en sus instalaciones del Centro de Investigaciones Costeras “La Mancha” (Sosa et al., 2013, 2014, 2015).

#### **4.5.2 Cronología de muestreos realizados por la Sección de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM**

Los primeros estudios de este grupo de investigación datan de 1983, considerando siete sitios de muestreo de depósito atmosférico: una zona residencial al Noroeste de la Ciudad de México viento abajo de una zona industrial (Chapultepec); una zona ubicada al Sur de la ciudad sin emisiones industriales apreciables pero con emisiones de flujo vehicular (Ciudad Universitaria); tres zonas boscosas: una ubicada al Oeste a 20 km de la ciudad de Toluca que recibe altas concentraciones de contaminantes en la temporada de lluvias por la dirección predominante de los vientos y las restantes ubicadas a mayor altura de la ciudad (Rancho Viejo), las cuatro estaciones restantes fueron seleccionadas por su ubicación cerca de las partes altas del volcán (lagunas de Zempoala, Ajusco, Tlamacas y nevado de Toluca) (Báez et al., 1986). Los datos obtenidos en este estudio permitieron ver que la difusión vertical de contaminantes, su transporte vertical y un balance ácido-base fueron los principales mecanismos para la formación de lluvia ácida vía “rain out”, en áreas rurales.

Posteriormente en el periodo de 1984-1985, otro estudio comparativo fue conducido seleccionando tres sitios en el país: un área urbana (CdMx), un sitio completamente agrícola con zona industrial en crecimiento (Zona del Bajío-Guanajuato) y una zona costera en donde se encuentra instalado uno de los más grandes complejos petroquímicos del país (Minatitlán-Coatzacoalcos, en Veracruz) (Báez et al., 1987), los resultados mostraron que todas las concentraciones de los iones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ) variaron de lugar a lugar, siendo las concentraciones más altas encontradas en la CdMx, seguida del sitio en la Zona del Bajío, ambas por su atmósfera fuertemente contaminada, en comparación con la zona agrícola y el sitio ubicado en la zona costera bajo la influencia de corrientes marítimas. Los valores de pH en las muestras tipo “Bulk” para la CdMx fueron de 4.59-7.40 con ponderado de 5.34; Salamanca 5.45-8.10 con ponderado de 6.48; Veracruz 3.75-7.66 con ponderado de 4.60.



Enfocados en el estudio de los mecanismos más importantes en el lavado atmosférico y su relación con la composición de la lluvia, se realizó un muestreo manual secuencial de fracciones de lluvia durante dos años (1986 y 1987) en dos sitios: un área urbana con alta contaminación atmosférica (CdMx) y una zona rural ubicada a 80 Km de la ciudad (Rancho Viejo), pero bajo su influencia meteorológica (Báez et al., 1992). El objetivo de este estudio fue inferir el mecanismo más importante de lavado durante la precipitación y el posible origen de los iones analizados. Los resultados mostraron que en la CdMx el pH de las muestras de lluvia varió de 3.88-7.10 en 1986 y de 4.31 a 7.11 en 1987, mientras que en la estación Rancho Viejo el intervalo fue 4.05-5.40 en 1986 y de 4.46-5.40 en 1987. Los constituyentes químicos determinados en las muestras de lluvia colectadas secuencialmente decrecieron en su concentración iónica en la porción primera de los eventos de lluvia, mientras que esta concentración se incrementó o no varió durante la última parte de la temporada de lluvia. La concentración iónica de ambos sitios fue diferente significativamente siendo mayor en la CdMx que en RV, excepto para  $H^+$ . Al establecer relaciones entre las concentraciones de ambos sitios se observó que eran bajas para  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$ , lo cual fue justificado por las distancias que recorren sus precursores y la dispersión en la atmosfera, mientras que las relaciones inversas para  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  con  $H^+$  proporcionaron información sobre la neutralización de la acidez en estos sitios. El análisis comparativo entre estos dos sitios continuó manteniéndose durante 14 años de estudio (Báez et al., 1997b; 2006a).

Entre los estudios comparativos también se realizó el análisis de los eventos de lluvia en diferentes condiciones meteorológicas: la temporada de seca y la temporada de lluvia (Báez et al., 1997a) ya que alrededor del 97% de la precipitación anual ocurre en esta época, en comparación con solo el 21% en la estación seca en Xalapa. Los resultados estadísticos indicaron que hubo diferencias significativas en la concentración iónica. La menor concentración de aniones durante la temporada de lluvias se debería atribuir al proceso de dilución a partir de esta temporada. Aunque Xalapa se encuentra a menos de 100 km de la costa, la contribución marina de  $SO_4^{2-}$  y  $Ca^{2+}$  no fue significativa, en comparación con la contribución antropogénica cuyas fuentes de emisión se encontraban viento arriba. El análisis de viento por trayectorias indicó que los vientos predominantes fueron del Sureste, por otro lado, en la estación seca este enriquecimiento se debió a fuentes de emisión situadas en Tampico, Ciudad Madero, Poza Rica y Sur-Sureste de Texas, como lo indican los vientos predominantes del Noreste. Finalmente, las tasas del depósito húmedo fueron más altas durante la temporada de lluvias a pesar de los procesos de dilución.

Dentro de los estudios comparativos destaca el análisis de la fracción soluble e insoluble de la lluvia, esta investigación fue desarrollada en diferentes sitios y periodos: en un sitio al Suroeste de la CdMx en temporadas de lluvia de 2001 y 2002 (Báez et al., 1997b; 2006b; 2007), con el objetivo de analizar si la solubilidad de los metales traza dependía del pH del agua de lluvia, se analizaron:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}^+$  en fracciones solubles; Cr, Mn, Ni, Pb, V y Al en fracciones de lluvia soluble e insoluble. Se analizaron los vientos mediante trayectorias de la masa de aire y se asociaron a las concentraciones de oligoelementos y concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}^+$  observados durante cada día lluvioso. Las concentraciones de metales traza no fueron claramente relacionadas a la dirección del viento. Los EFc sugirieron que, en general los metales traza y los principales iones tenían un origen antropogénico. Al,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  fueron los únicos elementos que tuvieron una fuente significativa mientras que  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y V de fuentes antropogénicas.

En 1997, el muestreo de agua de lluvia bajo condiciones extremas, cerca del centro del huracán Paulina en Bahías de Huatulco, presentó una oportunidad única para estudiar la composición de lluvia oceánica (Padilla et al., 2000). La concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  no marino determinada fue por debajo del límite de detección y las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  fueron extremadamente bajas (0.02 y 0.025 mg/L, respectivamente). También se colectaron algunas lluvias ligeras en Tapachula y Manzanillo mientras los huracanes Paulina y Nora estaban afectando severamente las Bahías de Huatulco, en este trabajo se evaluó el profundo impacto de una planta de energía sobre la composición química de las lluvias del huracán Nora.

El último trabajo desarrollado por este grupo fue un estudio de variación en la composición química de la precipitación húmeda sobre un periodo de 16 años (Baez et al. 2009) El análisis de iones y su correlación indicaron que las emisiones antropogénicas fueron la fuente más importante. Las tendencias de  $\text{SO}_4^{2-}$ , en la precipitación húmeda mostraron una tendencia decreciente significativa, correspondiente a la reducción de las emisiones de  $\text{SO}_2$  en la CdMx, debido al cambio de combustible a gas en centrales termoeléctricas e industrias pesadas y medianas. El  $\text{NO}_3^-$  no mostró una tendencia creciente significativa a pesar del hecho de que el número de vehículos de motor ha aumentado considerablemente en la CdMx, La relación  $\text{NH}_4^+/\text{Ca}^{2+}$  mostró una tendencia creciente casi significativa, debido principalmente a la disminución en la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ . La contribución de  $\text{NH}_4^+$  a la neutralización fue relativamente pequeña, mostrando solo un aumento significativo durante el periodo de estudio, mientras que una

concentración considerable de  $\text{SO}_4^{2-}$  disminuyó, lo que podría significar que esa parte del  $\text{NH}_4^+$  reaccionó con otros iones, formando compuestos de amonio.

#### 4.5.3 Cronología de muestreos realizados por la Universidad Autónoma del Carmen

Los primeros trabajos desarrollados por Cerón y colaboradores fueron realizados en el periodo de agosto de 1999 a octubre de 2001 (Cerón et. al., 2005), para un estudio comparativo de la especiación química del depósito “wet” colectado en sitios de costa y en muestreos mar adentro: Acapulco, Cancún. Tapachula, Puerto Morelos y a bordo del barco oceanográfico “PUMA”. En estos primeros estudios el muestreo del depósito atmosférico se llevó a cabo mediante la instalación de un colector manual, de acuerdo a la metodología establecida por Galloway (Galloway et al. 1978).

Los resultados de este estudio mostraron valores de pH en el intervalo de 4.15-6.15 donde destacaron los valores de pH de Puerto Morelos cuyo pH mínimo fue de 3.48 y altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  (4.51 mg/L). Las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  fueron muy bajas en sitios expuestos principalmente al aire marítimo, como Cancún, Puerto Morelos y el Océano Pacífico por las altas tasas de precipitación, mientras que, en Cancún y Tapachula, fueron más altos debido a la absorción de partículas de suelo. Las principales fuentes de contaminación sugeridas por análisis de vientos fueron los incendios forestales.

Los resultados correspondientes a Puerto Morelos se detallan en otras publicaciones (Ceron et. al., 2002, 2004). En el año 2004 Cerón y colaboradores desarrollaron una investigación comparativa entre un sitio costero y una Isla: San Antonio Cárdenas e Isla del Carmen (Cerón et. al., 2006), cuyo propósito fue estudiar la composición química del agua de lluvia para evaluar el impacto de los aerosoles marinos y las emisiones antropogénicas mediante el uso de trayectorias de la masa de aire. El trabajo de campo se realizó entre junio y octubre de 2004, usando un colector automático wet/dry marca Tisch Inc. Un análisis de las trayectorias de retroceso de masa de aire indicó que la fuente principal para los altos niveles de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  encontrados fue la planta de compresión de gas amargo ubicada en Noreste de San Antonio Cárdenas. Los resultados de este estudio hicieron posible un diagnóstico ambiental y se concluyó que el sitio Isla del Carmen no se encontraba afectado, mientras que San Antonio Cárdenas mostró una fuerte acidez en el agua de lluvia con valores de pH en un intervalo de 3.01-6.27 (Cerón et al., 2008).

Este mismo estudio sirvió como base para un nuevo trabajo de investigación, en el cual, se analizaron las concentraciones de los elementos traza en estos dos sitios y su distribución. (Cerón et. al., 2010). La influencia de la corteza fue evidente en ambos sitios de muestreo, específicamente al determinar Al, Fe y Mn, Cu, Pb, Zn y Ni, estos elementos traza fueron más significativos en San Antonio-Cárdenas, lo que sugiere que estos oligoelementos tenían una fuente antropogénica (la planta de compresión de gas agrio en Atasta, ubicada al Noreste de San Antonio-Cárdenas y la flota vehicular de la zona), cuyo arrastre fue debido a los vientos dominantes en San Antonio-Cárdenas (Noreste).

Dada la importancia del muestreo del depósito atmosférico (wet/dry) en zonas aledañas a fuentes antropogénicas, de precursores de lluvia ácida, en el año 2009, el INE patrocinó a Cerón y un grupo de investigadores en el diseño y la operación en una fase preliminar de la Red de Depósito Atmosférico de México, esta red estaba integrada por cuatro estaciones (considerando sitios contaminados y sitios naturales), en 2010, la SEMARNAT apoyó un proyecto de investigación centrado en el estudio del depósito atmosférico en cinco sitios ubicados en el entorno de las centrales eléctricas que queman "combustóleo".

Derivado de estas investigaciones, se desarrollaron trabajos cuyo objetivo fue evaluar la composición química del depósito seco en sitios ubicados en las cercanías de las centrales eléctricas (Cerón et al., 2012a; 2012b).

El primer estudio se enfocó al análisis comparativo entre la reserva de biosfera "Los Petenes" en Campeche, y el Parque Nacional "El Chico" en Hidalgo, el segundo a una Reserva de la Biosfera ubicada en la península de Yucatán en el Sureste del país y otro sitio ubicado en Tula, Hidalgo en cuyas cercanías hay importantes monumentos históricos.

En México existen escasos estudios sobre el muestreo y análisis del depósito seco, dado que no existen procedimientos estándar para coleccionar depósito seco, en este estudio se siguió la metodología utilizada por Alonso et al (2005).

Bajo este mismo concepto, para establecer la influencia de fuentes antropogénicas locales, en el año 2010, Cerón y colaboradores coleccionaron muestras de depósito seco en Salamanca, Guanajuato y CdMx (Cerón et al., 2012c). Las muestras se coleccionaron semanalmente en un sitio ubicado a sotavento de una planta de energía alimentada con combustóleo, dos plantas de cemento y una refinería de petróleo. Los valores de pH oscilaron entre 5.1 y 6.3, con un valor medio de 5.66. Los resultados sugieren la influencia de fuentes locales ubicadas en Suroeste desde el sitio de muestreo que contribuyen a la incorporación de partículas alcalinas. Se encontró que las altas tasas de depósito seco generalmente están

más relacionadas con las emisiones locales. El depósito de N en Salamanca estuvo cerca del extremo superior del valor umbral informado para los ecosistemas sensibles, mientras que el depósito de S excedió ligeramente el valor informado como carga crítica.

Este concepto de carga crítica respaldó los estudios siguientes donde se determinaron, el depósito de N y S, trabajo desarrollado del 6 de junio de 2014 al 6 de enero de 2015 en la región de Xicalango-Atasta, para este estudio se innovó usando colectores pasivos basados en un ion de lecho mixto utilizando una columna de resina de intercambio (IER) para recoger muestras en trece puntos de muestreo distribuidos a lo largo de esta zona en un diseño de transectos múltiples. Los Flux de caída media para N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) y S ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) fueron 0.8 y 9.22 Kg ha/año, respectivamente.

El Flux de N no excedió la carga crítica propuesta para los ecosistemas sensibles; sin embargo, el Flux de caída para S fue 3 veces mayor que el propuesto para áreas sensibles, y 2 veces mayor que el valor reportado para bosques naturales, sugiriendo que el depósito S podría ser una amenaza para los ecosistemas de manglares y pesquerías en la región. Para confirmar el daño a la vegetación endémica de la región por exposición a contaminantes, Cerón y colaboradores, desarrollaron un nuevo proyecto donde se exponía a siete especies nativas de Isla del Carmen (Cerón et al., 2015a; 2015b; 2016a; 2016b).

#### 4.6 Ubicación espacial del muestreo para el depósito atmosférico en México

Para la creación espacial de los sitios de muestreo del depósito atmosférico en México se usó un mapa de relieve de Google Earth, en el cual se ingresó la ubicación de cada estación de muestreo correspondiente para cada estudio, considerando sus coordenadas geográficas.

En el Anexo 9.1 ([SitiosDAM.xlsx](#)) se muestra la información referente a las coordenadas geográficas para cada sitio de muestreo, así como sus claves de identificación. En el Anexo 9.2 ([direcciones URL.xlsx](#)) se presentan las direcciones del blog para cada sitio de muestreo, el cual se creó considerando un vínculo entre el mapa de relieve y la dirección del blog para visualizar y descargar directamente el estudio asociado con el sitio de muestreo visitado. El total de sitios registrados espacialmente para el muestreo del depósito atmosférico fue de 106.

En la Figura 108 ([..\03Mapa\Estaciones\\_v2.kmz](#)) se muestra la ubicación de las estaciones de muestreo para el depósito atmosférico en México, observándose que la mayoría de los estudios fueron y siguen siendo vigentes, en la zona centro del territorio nacional y en la parte del Golfo de México. En Baja California, Sinaloa

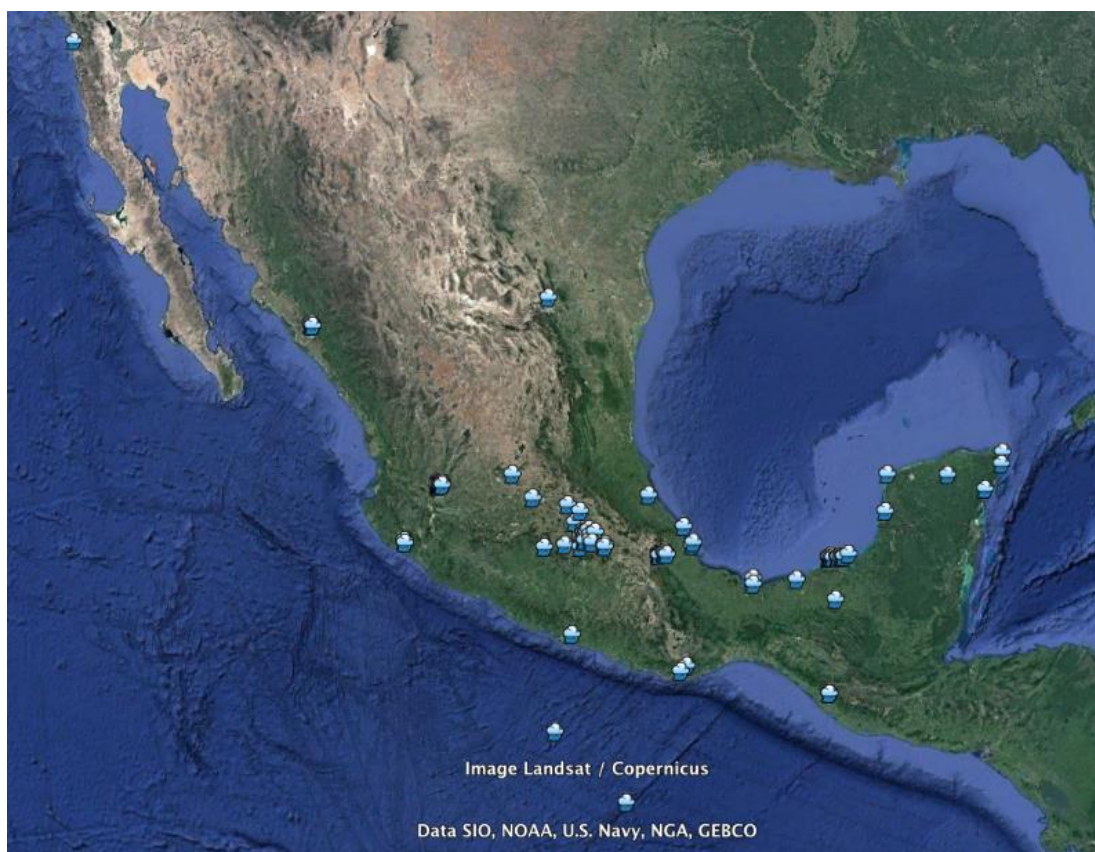
y Monterrey se realizaron algunos estudios sobre el depósito atmosférico, pero actualmente ya no siguen vigentes. En el lado del Pacífico se realizaron algunos estudios mediante cruceros oceanográficos, así como en Puerto Ángel, Oaxaca, Acapulco, Guerrero y Tapachula, Chiapas, sin embargo, el desarrollo de estos estudios ya no está vigente en nuestro país. Es importante destacar que en la parte del Golfo de México se localizan las zonas arqueológicas desde el Estado de Veracruz hasta la península del Estado de Yucatán, las cuales presentan un deterioro significativo en sus materiales de construcción a causa de la lluvia ácida que prevalece en esa zona de acuerdo a los estudios realizados en los monumentos de valor histórico.

Asimismo, debido a la actividad industrial de la Sonda de Campeche, plataformas petroleras, entre otras, se emite a la atmósfera  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , los cuales son precursores de la lluvia ácida, por lo que es necesario continuar con estos estudios de manera permanente, determinando no sólo el nivel de pH en la zona sino también especies tóxicas provenientes de esa zona industrial, e identificar su variabilidad espacial referente al transporte, dispersión y concentración.

En la parte Sur del territorio nacional se presentan los valores de pH más bajo, de acuerdo a los estudios reportados, esto es debido, principalmente a la dirección de los vientos predominantes de Norte a Sur. En la parte Norte del territorio se localizan centrales eléctricas a base de carbón y combustóleo, así como algunas centrales siderúrgicas, las cuales, por su emisión de contaminantes a la atmósfera tienen un impacto potencial en diferentes regiones causando un deterioro ambiental en la zona Sur del país.

Por ello, es necesario evaluar el transporte, dispersión, concentración y depósito atmosférico proveniente de esas zonas industriales para proponer medidas de prevención, minimización y control para reducir los efectos ambientales a escala regional, considerando los parámetros meteorológicos necesarios para ese propósito.





*Figura 108. Ubicación espacial de los sitios de muestreo para el depósito atmosférico en México.*



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Desde la década de los 80's a la fecha dos grupos de investigación han desarrollado esfuerzos para mantener de forma permanente el estudio del depósito atmosférico en México. Diez años después, este esfuerzo se incrementó con el trabajo de otros investigadores. De acuerdo a la información bibliográfica consultada, los estudios de depósito atmosférico en México están concentrados geográficamente en el centro del país: Distrito Federal y el Estado de México; hacia el Este en las zonas costeras de Veracruz, Tabasco, Campeche y la península de Yucatán; hacia el Oeste en el Estado de Colima, Guanajuato, Guadalajara y Guerrero, aunque cabe mencionar que se han hecho esfuerzos en la región Norte, en los Estados de Baja California, Sinaloa y Nuevo León, así como el muestreo mar adentro en cruceros oceanográficos en el Golfo de México y el Océano Pacífico.

No obstante los estudios se han realizado de forma aislada y en la mayoría de los casos no han sido permanentes y aquellos que lo son se han realizado en un solo sitio, todos los estudios han proporcionado información importante sobre la influencia de las emisiones en sitios costeros, urbanos, rurales y boscosos, tal es el caso de los estudios realizados en La Mancha-Veracruz, Puerto Morelos, Rancho Viejo, la ZMCM y de Guadalajara, así como la reserva de la Biósfera de "Los Petenes", así como diferentes Parques Nacionales, etc.

Cada autor maneja una línea de investigación distinta, por lo que la metodología empleada para el muestreo y análisis de depósito atmosférico es diferente. Para propósitos de este estudio cualitativo fue necesario considerar los siguientes aspectos:

- 1) Sitio de muestreo (zona urbana, rural, bosque, etc.).
- 2) Tipo de depósito atmosférico: húmedo (wet), seco (dry), total (bulk).
- 3) Metodología empleada para el muestreo (estándar, periodo, equipo).
- 4) Metodología empleada para la conservación y análisis.
- 5) Aplicación de protocolos de aseguramiento y control de calidad.
- 6) Valores de pH (mínimo-máximo) y si se reporta o no, el promedio ponderado.
- 7) Concentraciones iónicas de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  en  $\mu\text{eq/L}$  o depósito en  $\text{kg/ha}\cdot\text{año}$ .

Con respecto a los sitios de muestreo, la mayor parte de ellos fueron seleccionados para medir la influencia de la contaminación sobre los ecosistemas sensibles y sobre el material de construcción de edificaciones o estructuras que son patrimonio cultural de la humanidad. Estudios muestran que la recesión superficial causada por la lluvia ácida en sitios arqueológicos como Tulum, El Tajín, Palenque, Edzná, Calakmul y Dzibilnocac, pueden alcanzar valores de 4.12 a 28.63  $\mu\text{m}/\text{año}$ .

Los muestreos de la lluvia ácida en las áreas forestales del Sur de la ZMCM indican que estas zonas son las que han presentado los valores de pH más bajos y altos depósitos de S y N, los daños encontrados en especies endémicas situadas en los Parques Nacionales: Ajusco, Desierto de los Leones, Chapa de Mota, San Luis Ayucan (ubicado en el Norte), El Chico, Iztla-Popo, así como en manglares que son Reserva de la Biósfera como Atasta (zona costera) son indicativos del declive y muerte de sus bosques lo que indica que el problema de la lluvia ácida en los bosques de México no es local sino regional, cuyos contaminantes precursores provienen de sitios urbanos con grandes emisiones de contaminantes como la ZMCM, la zona Tula-Vito-Asasco, la Ciudad de Guadalajara, Salamanca y la zona Sureste del Golfo de México.

El muestreo y análisis del depósito atmosférico en sitios costeros, Acapulco, Colima, Puerto Morelos, San Juan de Ulúa, Universidad Veracruzana Campus Mocambo, Isla del Carmen, Ciudad del Carmen y muestreos mar adentro a bordo de los buques oceanográficos: H-02 de la Secretaría de Marina, así como el Puma y el Justo Sierra de la UNAM, indican la presencia de lluvia ácida, sin embargo, no pueden ser comparables puesto que no se muestrearon en el mismo periodo de tiempo. Un estudio en el cual se compararon cuatro sitios de muestreo en el mismo periodo (El Tajín, San Juan de Ulúa, Universidad Veracruzana- Campus Mocambo y la Mancha) indica que la acidez encontrada incrementa de Sur a Norte y sus precursores en temporada de lluvia provienen del Este mientras que en temporada de seca provienen del Norte.

Con respecto a la técnica de muestreo utilizada para coleccionar el depósito atmosférico se hallaron las siguientes: 60.56% de los trabajos se realizaron con colectores automáticos, 26.76% con colectores convencionales (embudo adaptado a un vaso de precipitado), 2.81% con colectores pasivos adaptados a resinas de intercambio iónico, 2.81% usando colectores adaptados a otras técnicas como "Depósito seco en superficies acuosas" (DAS) y superficies surrogadas, 5.63% a través de biomonitorio (corteza de árbol o musgos) y resalta un trabajo para colección de agua de nube por medios pasivos.

De los trabajos que usaron colectores manuales los estudios realizados fueron en su mayoría para el estudio de fracciones de lluvia o bien para el estudio del depósito total, encontrándose que tanto el valor de pH como la constitución química de la lluvia cambia con respecto al tiempo, debido al lavado atmosférico y a la dilución de sus constituyentes.

Con respecto a los resultados de pH del depósito atmosférico húmedo, no fue posible comparar los valores puesto que en algunos trabajos no se indicaba la periodicidad de la colección de eventos y cuando ésta se mencionaba fueron en diferentes periodos: por fracciones, diarios, semanales y cada 15 días. Sin embargo, se puede mencionar que todos los sitios analizados reportaron lluvia ácida. Los valores de acidez más alta se encontraron en Ciudad del Carmen con 2.02 unidades en el año 2012, este sitio presentó el 38% de los eventos muestreados por debajo de 5.0 unidades de pH. Seguido del Parque Nacional “El Chico” donde el valor más bajo determinado de pH fue de 2.8 unidades en el año 2009 en el depósito húmedo y de 4.4 en el depósito seco, en el año 2010 llegó a presentar el 98% de los eventos por debajo de 5.6 unidades. Por el contrario, la menor acidez en el depósito atmosférico se encontró en la Ciudad de Monterrey, cuyo pH determinado fue de 8.5 unidades, seguido de algunas estaciones de la Ciudad de México ubicadas en la parte Norte donde el pH alcanzó 8.4 unidades. La precipitación alcalina en Monterrey es debida a la presencia del ion  $\text{CO}_3^{2-}$ , esto puede ocurrir dada la presencia de sales como  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en la lluvia, producto de la industria cementera y erosión del suelo alrededor del sitio. La distribución de frecuencia para los valores de pH indica que el 43.47 % de las muestras analizadas en Monterrey presentaron valores alcalinos en un intervalo de 6.6 a 7.0.

A pesar de sus condiciones geográficas, determinadas zonas expuestas a la contaminación por plantas de compresión de gas, plantas de generación de energía y plataformas petroleras, presentaron una alta capacidad de amortiguamiento, tal es el caso de Isla del Carmen y la Ciudad de San Francisco Campeche. En el sitio urbano de Isla del Carmen el valor de pH promedio del depósito húmedo fue 6.43, en el caso del depósito seco el valor promedio fue 6.09; en la zona de manglar el pH promedio del depósito húmedo fue de 6.28, en el caso del depósito seco, el valor promedio fue 5.90. Para la Ciudad de San Francisco Campeche el intervalo de pH en 2007 fue de 5.6-7.5 unidades.

En lo que se refiere a las concentraciones iónicas, la mayoría de los estudios presenta la composición porcentual de las muestras de lluvia, un análisis de contribución por aerosoles marinos y no marinos, análisis de correlación y en pocos casos el Flux de depósito por N y S.

Para la mayoría de los casos el  $\text{SO}_4^{2-}$  fue el anión predominante, a excepción de un estudio realizado en Puerto Morelos donde la concentración de  $\text{NO}_3^-$  fue más alta. Los estudios analizados muestran concentraciones máximas de  $133 \mu\text{eq/L}$  en el Parque Nacional el Chico y para el  $\text{NO}_3^-$  de  $150$  a  $310 \mu\text{eq/L}$  en “Los Petenes” y en Isla del Carmen, valores que exceden las cargas críticas reportadas por otros autores.

Con respecto al análisis del depósito seco, existen pocos estudios en México por lo que no se tiene una técnica de muestreo específica, sin embargo, debería ser fomentada ya que proporcionan información importante sobre la influencia de las emisiones locales y el enriquecimiento de la corteza terrestre a través del análisis de metales en su parte soluble e insoluble.

De acuerdo a la búsqueda bibliográfica respecto al muestreo del depósito atmosférico en México es necesario considerar el desarrollo de nuevos estudios de manera permanente, debido a que algunos estudios se desarrollaron en periodos cortos de tiempo, sin embargo, para los autores fue benéfico su periodo de estudio demostrando que los sitios seleccionados para el muestreo de lluvia fueron representativos para identificar los valores de pH y especies químicas presentes en la lluvia. Asimismo, la matriz bibliográfica permitió analizar adecuadamente los estudios realizados por autor y por institución, lo cual representó de manera accesible visualizar los resultados más representativos de cada estudio, así como el estudio realizado año por año, la información del contenido de la matriz está en el Anexo 9.3 ([..\02Matriz\Matriz Final.xlsx](#)).

Los estudios realizados de manera permanente son muy importantes de considerar debido a que se puede identificar la variabilidad temporal de las especies químicas de la lluvia sin interrupciones, en este caso, el análisis de los resultados tiende a ser mucho más representativo considerando cada evento de lluvia, y no sólo se puede determinar el análisis del depósito atmosférico húmedo sino también el depósito atmosférico seco.

La mayoría de los estudios, que se han realizado en nuestro país son correspondientes a la Ciudad de México, debido a la disponibilidad de la información y a la colaboración por parte del SIMAT-GCdMx y de la UNAM.

La información generada por estas instituciones es una herramienta fundamental para aspectos vinculados a la investigación y toma de decisiones.

En algunos estudios se determinó la concentración de metales pesados en el depósito atmosférico húmedo debido a que los sitios de muestreo se instalaron cerca de las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, por ejemplo, la zona industrial de Tula, Sonda de Campeche, plataformas petroleras, entre otras.

En este caso, no sólo se determinaron las especies químicas iónicas del depósito atmosférico sino también tóxicas presentes en la precipitación pluvial.

De acuerdo a los protocolos de aseguramiento de calidad (AC) y control de calidad (CC) aplicados a los muestreos del depósito atmosférico para cada sitio, la mayoría correspondieron a la metodología de la US-EPA, en la cual, se indica el procedimiento del muestreo respecto a la colección, conservación, transporte y análisis de cada muestra, así como la cadena de custodia y reportes para cada evento de lluvia.

El análisis de las muestras colectadas para cada evento de lluvia realizado en diferentes regiones del país fue con base a la técnica de EAA y HPLC, las concentraciones obtenidas para las distintas especies químicas analizadas fueron confiables y válidas debido a que sus parámetros estadísticos asociados al control de calidad tuvieron coeficientes de correlación aceptables.

Cabe señalar que en los estudios realizados se analizó principalmente el  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , debido a que en las zonas industriales se emite  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  a la atmósfera, causando que el  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  estuvieran presentes en el agua de lluvia. Sin embargo, es necesario identificar que otras especies presentes en la lluvia han ido aumentando y cuáles han disminuido de acuerdo a la variabilidad temporal del depósito atmosférico. La concentración del ion  $\text{NH}_4^+$  va en aumento, de acuerdo a los estudios realizados en México; sin embargo, es necesario vigilar su comportamiento en la atmósfera.

En lo que se refiere a estudios en redes de muestreo y análisis de depósito atmosférico, destaca la colaboración entre la SCA-CCA-UNAM y la SEDEMA del Gobierno de la CdMx. Dicha colaboración consiste en el muestreo semanal en 16 estaciones del SIMAT y su posterior análisis en el laboratorio de la SCA-CCA-UNAM. Entre los resultados más sobresalientes se tienen: la zona Sur con valores de pH más ácidos, correspondiendo a la estación Ajusco, situación que es influenciada por los vientos dominantes en la ZMCM que provienen del Norte. La presencia de un mayor depósito de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se da en la región Noroeste y Oeste de la zona metropolitana influenciada principalmente por la precipitación. Al analizar conjuntamente la información sobre calidad del aire se observa a lo largo de los años una clara disminución en los niveles de  $\text{SO}_2$ , sin embargo la presencia de  $\text{SO}_4^{2-}$  es muy importante en la composición del depósito atmosférico húmedo por lo cual se requiere poner atención en las fuentes de  $\text{SO}_2$  externas a la zona metropolitana.

A nivel internacional, recientemente se viene realizando la investigación sobre depósito atmosférico húmedo en la Región del Golfo de México entre la UNAM y el

NADP de los Estados Unidos, en donde se han considerado las estaciones localizadas en los EU, desde Texas a Florida y su comparación con las observaciones obtenidas en México. Entre los resultados más importantes destacan los altos valores en la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  encontrados en el sitio localizado en el Estado de Veracruz, lo cual demuestra la alta contribución de compuestos de azufre en el depósito atmosférico y la necesidad de atender las fuentes de  $\text{SO}_2$  en México.

La información que puede generarse a través de una red de depósito atmosférico serviría para atender distintos problemas ambientales en colaboración con otros grupos de investigación, tanto a nivel nacional como internacional. Entre los temas a tratar existe el de cargas críticas las cuales se refieren a las cantidades, por ejemplo, de S y N que un ecosistema puede soportar sin verse afectado (NADP, 2014; Pardo, 2011).

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

La metodología aplicada en este informe permitió reunir y evaluar la información de manera cualitativa respecto al muestreo del depósito atmosférico en México desde los años 80's hasta la fecha, por lo que el uso de las bases de datos como Google Scholar, Open Journals, Revistas Electrónicas, Bidi-UNAM, TesiUNAM, entre otros, fue fundamental para la búsqueda y revisión de los estudios correspondientes.

Las investigaciones realizadas sobre depósito atmosférico húmedo han reportado la presencia del fenómeno de lluvia ácida al reportarse valores ponderados de pH menores a 5.6 en los sitios estudiados, con excepción de sitios como Monterrey, Nuevo León y Calakmul, Campeche.

La zona Sureste del territorio nacional presenta valores de pH ácido, indicando que existe un problema potencial de deterioro significativo en sitios de interés, tanto natural como cultural, por lo que es necesario que se atienda esta situación.

La acidez del agua de lluvia en la zona Sur de la Ciudad de México es predominante, de acuerdo a la variabilidad espacial del nivel de pH, debiéndose atender este problema considerando la dispersión, transporte, depósito y concentración de los precursores de la lluvia ácida; así como comprender los mecanismos de reacción.

Los estudios llevados a cabo en la ZMCM indican valores de pH más ácidos en la parte Sur, situación que es influenciada por los vientos dominantes que provienen del Norte.

La presencia de un mayor depósito de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  está en la región Noroeste y Oeste de la ZMCM, influenciada principalmente por la precipitación.

Al analizar conjuntamente la información sobre calidad del aire se observa a lo largo de los años una clara disminución en los niveles de  $\text{SO}_2$ , sin embargo, la presencia de  $\text{SO}_4^{2-}$  es muy importante en la composición del depósito atmosférico húmedo por lo cual se requiere poner atención en las fuentes de  $\text{SO}_2$  externas a la ZMCM.

La concentración y depósito de S y N encontrados en México, rebasan en todos los sitios los valores de fondo reportados por otros autores a nivel internacional.

Analizando la información de las estaciones localizadas en los EU, desde Texas a Florida y su comparación con las observaciones obtenidas en México, destacan los altos valores en la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  encontrados en el sitio ubicado en el



Estado de Veracruz, lo cual demuestra la alta contribución de compuestos de S en el depósito atmosférico y la necesidad de atender las fuentes de SO<sub>2</sub> en México.

Este informe representa un aporte científico a nivel nacional respecto a la evaluación del depósito atmosférico en México identificando que es necesario crear vínculos con diferentes instituciones para promover de manera conjunta y permanente esta actividad en nuestro país con el propósito de establecer una Red de Depósito Atmosférico en México.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Llevar a cabo de manera permanente estudios sobre depósito atmosférico en México.

Modelar a detalle el comportamiento de los eventos de lluvia, así como la variabilidad espacial y temporal de las especies químicas presentes en el depósito húmedo.

Ampliar los estudios sobre cargas críticas de S y N en nuestro país, para tomar las medidas pertinentes en la protección de ecosistemas.

Fortalecer los estudios de depósito atmosférico en la parte Norte del territorio nacional, así como en la costa del Pacífico.

Homogenizar los procedimientos de muestreo y análisis del depósito atmosférico de acuerdo a protocolos internacionales para que los datos obtenidos puedan ser comparables.

Evaluar la posibilidad de re-habilitar algunos sitios que en su momento hayan proporcionado resultados importantes para el estudio del depósito atmosférico en México.

## **7. AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen la colaboración de: P. de I.Q. Roberto Antonio Morales Yañes de la Facultad de Química de la UNAM, M. en C. Luis Miguel Urbina Leonor de la Universidad de Bologna, Dra. Julia Cerón Breton de la Universidad Autónoma del Carmen y Dr. Javier Reyes Trujeque de Centro de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche. También se extiende el agradecimiento al Dr. Víctor Hugo Páramo Figueroa, Dr. Arturo Gavilán García y al M. en C. Roberto Basaldud Cruz, del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la DGAPA-UNAM. Proyectos: “Evaluación del depósito atmosférico húmedo y seco en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y en la costa del Golfo de México para la prevención del deterioro ambiental significativo” (IN116215) y “Establecimiento de la red nacional de depósito atmosférico” (IN112318).

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, S.A, Bravo A. H, R. Magaña Z., M.I. Saavedra R., R. Torres J. (1981a). Lluvia Ácida en la Cuenca del Valle de México. Memorias de Resúmenes de la Reunión 1981 de la Unión Geofísica Mexicana. Manzanillo, Colima. Mayo, pp. 6-9.
- Aguilar, S.A., H. Bravo A., R. Magaña Z., M.I. Saavedra R., R. Torres J. (1981b). Estudio Preliminar de la Lluvia Ácida en la Cuenca del Valle de México. México, D.F., Departamento de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM/Servicio Meteorológico Nacional SARH. 22 pág.
- Aguilar, S.A., H. Bravo A., M.I. Saavedra R., R. Torres J. (1984a). Acid Precipitation in the Mexico City Basin. Proceedings of the Applications with Special Regard to Tropical Areas. World Meteorological Organization. Mexico City. November. pp. 3-4.
- Aguilar, S.A., H. Bravo A., M.I. Saavedra R., R. Torres J. (1984b). Acid Precipitation in the Mexico City Basin. México, D.F. Departamento de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 7 pág.
- Alarcón J.A., Bravo A.H., Sosa E.R., Torres B.M., Sánchez A.P., Retama H.A., Rivera O. (2011). Acid wet deposition in the Mexico City Metropolitan Zone. 104th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Orlando, Florida, USA. June.
- Alarcón Jiménez Ana Luisa (2012). Tesis UNAM: Lluvia ácida en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Evaluación y trascendencia. Maestría en Ingeniería; tutor Dr. Humberto Bravo Álvarez.
- Al-Momani, I.F., Ataman, O.Y., Anwari, M.A., Tuncel, S., Kose, C., Tuncel, G., (1995). Chemical composition of precipitation near an industrial area at Izmir. Turk. Atmos. Environ. 29, 1131-1143.
- Allan, M. A. (2004). Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme: Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures (No. WMO-TD-1251). World Meteorological Organization Geneva (Switzerland).
- Alonso, R., Bytnerowicz, A., & Boarman, W.I. (2005). Atmospheric dry deposition in the vicinity of the Salton Sea, California I: Air pollution and deposition in a

- desert environment. *Atmospheric Environment*, Vol. 39, No. 26, August 2005, pp. 4671-4679, ISSN 1352-2310.
- Ap S., H.M., Kruse, M., Bell, J.N.B., (1987). Ammonia emissions and their role in acid deposition. *Atmos. Environ.* 21, 1939-1946.
- Arróniz Crespo M., Ochoa Hueso R., Manrique Reol E. (2012) *Biomonitorización del depósito de nitrógeno atmosférico en México: detección y prevención de daños en ecosistemas naturales. Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México*, 21. UNACAR. Editores: Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. 115 páginas. Tiraje: 525 ejemplares. ISBN 978-607-7826-21-7.
- Bachmann, J. (2007). Will the circle be unbroken: A history of the U.S. National Ambient Air Quality Standards. *J. Air Waste Manage.* 57(6): 652–97. doi:10.3155/1047-3289.57.6.652.
- Báez A., Padilla H. y González O. (1986). Acid rain over Mexico City Valley and surrounding rural areas. *Geofísica Internacional.* 25 (2): 315-346.
- Báez A. and Belmont R. (1987). Comparative study of the chemical composition of rain of three different zones in Mexico. *Contaminación Ambiental*, 3: 25-36.
- Báez A.P., Belmont D. R. y Padilla H. (1993). Variation of chemical composition of wet precipitation, using a sequential sampling: urban-rural areas comparison. *Atmósfera*, 6: 163-174.
- Báez A.P., Belmont R.D., Azpra E., Torres M.B y Padilla H.G. (1997). Cloudwater and precipitation chemistry at Popocatepetl Volcano Mexico: a high elevation sampling site. *Journal of Environmental Quality*, 26 (1), 253-258.
- Báez A.P., H. Padilla, R. Belmont, J. Cervantes y D. Pereyra (1997). Rainwater chemistry at the eastern flanks of the Sierra Madre Oriental, Veracruz, México. *Journal of Geophysical Research.* 102(D19), 23,329-23,336.
- Báez A.P., R.D. Belmont, H.G. Padilla (1997). Chemical composition of precipitation at two sampling sites in Mexico: A 7 year study. *Atmospheric Environment.* 31(6), 915-925.
- Báez A.P., R.D. Belmont, R.M. García, M.C.B. Torres y H.G. Padilla. (2006). Rain water chemical composition at two sites in Central Mexico. *Atmospheric Research.* 80: 67-85.
- Báez A., R. Belmont, R. García, H. Padilla, M.C. Torres. (2007). Chemical composition of rain water collected at a southwest site of Mexico, City, Mexico. *Atmospheric Research.* 86, 61-75.

- Báez A.P., R.D. Belmont, R.M. García. H.G. Padilla y MC. B. Torres (2009). Trends in chemical Composition of Wet Precipitation in Mexico City, Mexico: 1992-2007. *The Open Atmospheric Science Journal*. Vol. 3, 155-163.
- Barboza N., Rivoir V., y Pistone Castró, S. C. (2009). Manual de procedimientos analíticos para muestras ambientales 4080 UY: Determinación de amonio en aguas naturales (superficiales o subterráneas) y efluentes industriales líquidos Método Espectrofotométrico. Departamento de laboratorio ambiental. DINAMA, Ministerio de ordenamiento territorial y medio ambiente p, 6.
- Barratt, R. W., y Horsfall, J. G. (1945). An improved grading system for measuring plant disease. *Phytopathology*, 35, 655.
- Belmont Dávila Gabriel Pablo (1988). Tesis UNAM: Influencia de la precipitación pluvial en la fertilidad de los suelos de la zona centro-sur del bajío. Ingeniero Agrícola; asesor Armando Báez Pedrajo.
- Benítez-Torres J.A.; R.M.Cerón-Bretón; J.G. Cerón-Bretón; y J. Rendón-Von Osten. (2014). The environmental impact of human activities in the Mexican Coast of the Gulf of Mexico: Review of status and trends. *Environmental Impact. Transactions on Ecology and Environment*. WIT Press. Reino Unido. Vol. 181. pp. 37-50. ISSN: 1743-3541.
- Brandt, A. R., G. A. Heath, E. A. Kort, et al. (2014). Methane leaks from North American natural gas systems. *Science* 343(6172): 733–35. DOI:10.1126/science.1247045.
- Bravo A.H., Báez A.P., S. Lares (1960). Estudio del depósito de polvo por gravedad en la Ciudad de México. *Revista Ingeniería Química*. 26-28.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Torres J.R. (1988). Preliminary study of the acid deposition in the Tijuana area (Mexico). Paper 89-136.3 Published by APCA 81st. Annual Meeting of the Air Pollution Control Association. Dallas, Texas. June 19-24.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Torres J.R. (1989). El problema fotoquímico y la lluvia ácida en la Ciudad de México. *Memorias de la Reunión sobre Salud y Ambiente en la Ciudad de México*. Secretaría de la Defensa Nacional. Departamento del Distrito Federal. México, D.F. Abril 17-21. pp. 61-69
- Bravo, A.H., M.I. Saavedra R., P. Sánchez A., R. Sosa E., R. Torres J. (1991a). Impact of the Acidic Deposition in the Decay of Mexican Mayan Monuments

- (Preliminary Study). Paper 91-143.2, 84th Air & Waste Management Association. Vancouver, B.C. June, pp.16-21.
- Bravo, A.H., R. Sosa E., R. Torres J. (1991b). Ozono y Lluvia Ácida en la Ciudad de México. Ciencias. Facultad de Ciencias. UNAM. 22: 33-40.
- Bravo A. H., Torres vJ. R., Harris J., Saavedra R. M.A., Sánchez A. P., Camacho C. R., Sosa E. R., Gamboa Rodriguez M.T. (1996). Estudios de caso sobre química atmosférica y lluvia ácida, p. 434-457. En. Vázquez-Botello A., Rojas G. J.L., Benitez A. J., Zárate L. D. (Eds.). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX Serie Científica 5. 666 p.
- Bravo A.H., Soto A.R., Saavedra R. M.I., Torres J.R., Granada M. L.M., Sánchez A. P. (1998). Acid Rain in Mexico Case: Maya Monuments. Sixth International Conference. Air Pollution 98. Genoa, Italy. September 28-30. WIT Press/Computational Mechanics Publications ISBN: 185312 605 5. 661-674 pp.
- Bravo, A.H., M.I. Saavedra R., P. Sánchez A., R. Torres J., L.M. Granada M. (1999b). A Preliminary Study of the Acid Rain Distribution along the Coast of the Gulf of Mexico. JAINA. Boletín del Centro EPOMEX. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche. Marzo.
- Bravo, A.H., M.I. Saavedra R., P. Sánchez A., R. Torres J., L.M. Granada M., R. Soto A., J. Harris (2000a). Efecto potencial de la lluvia ácida en monumentos mayas. Ciencia y Desarrollo. Julio-Agosto, pp. 49-57.
- Bravo, H.A., Saavedra M.I. R., Torres R.J., Sánchez P.A., Granada L.M.M. (2000b) Chemical Composition of Precipitation in a Mexican Maya Region. Atmospheric Environment. 34(8): 1197-1204.
- Bravo A.H., Soto A.R., Torres J.R., Sánchez A.P. (2000c). Effects of Wet Acidic Deposition on Maya Monuments, Mexico. 93rd Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Salt Lake City, UTAH. June.
- Bravo H.A., Saavedra M.I., Sánchez P.A., Torres R.J. and Granada L.M. (2000d), Chemical Composition of Precipitation in a Mexican Maya Region, Atmospheric Environment, 34 B, 1197-1204.
- Bravo A.H., R. Soto A., R. Torres J., P. Sánchez A. (2001). Surface recession due to acid rain on the Maya monuments: Tulum, Mexico. The PARI Journal. Pre-Columbian Art Research Institute. Vol. II. No. 1. Winter 2001, pp14-16.

- Bravo A.H., Soto A.R., Sosa E.R., Sánchez A.P. (2003a). Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* IV.4, pp.195-205.
- Bravo A.H., Soto A.R., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Ruíz B.J. (2003b). Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas. *Revista de la Sociedad Química de México*. Vol. 47, Núm. 4. ISBN 0583-7693, pp. 328-330.
- Bravo A.H., Soto A.R., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Ruíz B.J. (2004a). Effects of Wet Acidic Deposition on Stony Material at The Tajín Archaeological Site in Veracruz, Mexico. 97th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Indianapolis, Indiana. June.
- Bravo A.H., Soto A.R., Sosa E. R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Ruiz B.J., Kahl J. (2004b). Acid Deposition Effects Archeological Monuments in Mexico. 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress and Exhibition. London, UK. August.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Ruíz B.J., Soto A.R. (2004c). Particulate Air Quality over the Gulf of Mexico. 97th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Indianapolis, Indiana. June.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Soto A.R., José Hernández T. (2005a). Effects of Wet Acidic Deposition on Stony Material at The Tajín Archaeological Site in Veracruz, Mexico. 98th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. . Minneapolis, Minnesota. June.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Soto A.R., Alarcón J.A.L. (2005b). Precipitación Ácida en la Costa del Golfo de México”. En: “Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. 2da. Edición. Eds. A.V. Botello, J. Rendón von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández, EPOMEX. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología. ISBN 968-5722-37-4, pp. 535-552.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Soto A.R., José Hernández T. (2005c). Importance of characterization of building material of heritage pre-hispanic and early spanish monuments and the effects of acid



- deposition. 98th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Minneapolis, Minnesota. June.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Kahl J., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Soto A.R. (2006a). Acid Deposition Events during the Autumn of 2003 in a Research Cruise over the Gulf of Mexico. 99th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. New Orleans, Louisiana. June.
- Bravo A.H., Soto A.R., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Kahl J., Ruíz B.J. (2006b). Effect of Acid Rain on Building Material of the El Tajín Archaeological Zone, in Veracruz, Mexico. *Environmental Pollution*. Vol. 144, pp. 655-660.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Soto A.R. (2006c). La Lluvia Ácida en México. *El Faro. Boletín Informativo de la Coordinación de la Investigación Científica*. Mayo, año VI, No. 62.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Soto A.R., et. al. (2007a). Mesoamerica's Workshop on the effects of air pollution on the Mayan heritage monuments. 100th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Pittsburgh, Pennsylvania. June.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A., Herrera T. Ch. (2007b). Deposición ácida y sus efectos en el patrimonio cultural en el Estado de Veracruz. Segundo Foro del Medio Ambiente Atmosférico de Veracruz. USBI. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. Mayo.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Torres B.M.C., Alarcón J.A.L., Sánchez A.P. (2013a). Wet deposition in the Mexico City Metropolitan Zone. 2013 Annual Meeting and Scientific Symposium. National Atmospheric Deposition Program, Park City, Utah, USA. October 8-11.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Soto A.R. (2013b) Lluvia ácida sobre el Tajín. *EL FARO. Boletín Informativo de la Coordinación de la Investigación Científica*. Ciudad Universitaria, junio, año XIII, No.147.
- Bravo A. H., Sosa E, R., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C, Sánchez A. P, Jaimes P. M., Retama H. A., Granados H. E. (2015). Spatial and temporal variation of the acid rain in the Mexico City Metropolitan Zone. 9th International Conference on Acid Deposition, Rochester New York, USA. October.
- Bravo A. H., Sosa E, R., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C, Sánchez A. P, Jaimes P. M., Retama H. A., Granados H. E. (2016). Sulfur and nitrogen compounds in wet atmospheric deposition and in ambient air as indicators of emissions

- reduction strategies at Mexico City. Scientific Symposium Deposition, National Atmospheric Deposition Program. Santa Fe, NM, USA. October.
- Brydges T., Bravo A.H., Sosa E.R.L. (1998). Case Study. Acid Rain. Final Report to the Secretariat of the CEC, March.
- Carballo, C; Cerón, R; Cerón, J; Bolón, S; García, A., (2013). Evaluación de la depositación atmosférica seca en Ciudad del Carmen, Campeche. Revista de Investigación del Instituto Tecnológico de Orizaba. Vol. 1. No. 1. Octubre 2013. Pp.103-108. ISSN: 2007-8102
- Carlton, A. G., R. W. Pinder, P. V. Bhave, y G. A. Pouliot. (2010). To what extent can biogenic SOA be controlled? Environ. Sci. Technol. 44 (9):3376-80. doi:10.1021/es903506b.
- Cavazos Echagaray Guillermo (2013). Tesis UNAM: Lluvia ácida y biodeterioro en la fortaleza de San Juan de Ulúa Veracruz, Veracruz, México, monumento del patrimonio cultural. Maestría en Ciencias Biológicas; tutores principales de tesis Humberto Bravo Álvarez, Eberto Novelo Maldonado, María del Carmen Calderón Ezquerro.
- CEC (1997). Continental Pollutant Pathways. Commission for Environmental Cooperation.
- Cerón, B. R. M., Padilla G, H., Belmont, D. R., Torres, B. M. C., García, M. R., y Báez, P. A., (2002). Rainwater chemical composition at the end of the mid-summer drought in the Caribbean shore of the Yucatan Peninsula. Atmospheric Environment, 36(14), 2367-2374
- Cerón Breton Rosa María (2002). Tesis UNAM: Composición química de la precipitación pluvial en zonas costeras. Doctor en Ciencias de la Tierra; asesor Armando Báez Pedrajo.
- Cerón Bretón R.M., A. P. Báez, H. Padilla, J.G. Cerón Bretón, M. Muriel. (2004) "Contribución de los incendios forestales a los niveles de nitrato y a la acidez del agua de lluvia durante la época de secas: Puerto Morelos, Qroo, un caso de estudio". Revista Tecnología, Ciencia y Educación. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. Vol. 19. No. 2. Julio-diciembre 2004. pp. 55-64. ISSN: 11084006.
- Cerón R. M., H.P. Padilla., A. Báez., M. Muriel., J.G. Cerón., (2004) "Improvement of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> stabilization in rainwater samples". Global Nest, the International Journal. Volumen 6. No.2. pp. 151-159.

- Cerón, R. M., Cerón, J. G., Córdova, A. V., Zavala, J., y Muriel, M. (2005). Chemical composition of precipitation at Coastal and Marine sampling sites in Mexico. *Global NEST J*, 7(2), 212-221.
- Cerón R.M., J. G. Cerón y M. Muriel. (2006). Transactions on Ecology and the environment. Influence of geochemical and anthropogenic sources on rainwater chemical composition in two coastal sites impacted by the gas and oil industry in Campeche, México. Publicado en *Transactions on ecology and the environment Vol 88*. (ISSN 1743-3541). Pp. 419-429. 2006. WIT Press. Wessex Institute of Technology. UK.
- Cerón, R. M., J. G. Cerón y M. Muriel. (2006). Environmental problems in coastal regions. Influence of geochemical and anthropogenic sources on rainwater chemical composition in two coastal sites impacted by the gas and oil industry in Campeche, México. Vol. 88. (ISSN 1743-3541). Pp. 419-429. WIT Press. Reino Unido.
- Cerón-Bretón Julia G.; Rosa M. Cerón-Bretón; J. J. Guerra-Santos; y M. Muriel. (2007) Deposición atmosférica de metales traza en dos sitios costeros en Campeche, MEXICO. *Revista Tecnociencia-UNACAR*. Julio-diciembre 2007. ISSN: 1870-9133.
- Cerón, J.G., Cerón R. M., Muriel M. y B. Cárdenas, (2008). Identification of ion sources in rainwater of a coastal site impacted by the gas and oil industry in the southeast of Mexico. *Global Nest the Int. Journal*. Volumen 10. No. 1. pp. 92-100. Grecia. ISSN: 11084006.
- Cerón R. M., J. G. Cerón, J. J. Guerra, E. López, E. Endañu, M. Ramírez, M. García, R. Sánchez y S. Mendoza. (2009). Effects of simulated acid rain on tropical trees of the coastal zone of Campeche, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 126, 2009 WIT Press, pp 259-270. doi:10.2495/CP090191. ISSN: 1743-3541.
- Cerón R. M., J.G. Cerón; J Guerra; E. Núñez y M. Muriel. (2010) Contribution of trace elements in atmospheric precipitation in two coastal sites in Campeche, México. *International Journal of Sustainable Developments & Planning Vol 5, No. 3* pp 282-298. ISSN: 1743-7601
- Cerón R. M., J; Cerón, R; Guerra, J; López, E; Endañú, E., (2012). Efectos de contaminantes atmosféricos sobre especies de vegetación representativa de la zona costera del Estado de Campeche. Pp. 39-43. *Revista Fomix Campeche*. Conacyt. Año 4. Número 14. Octubre-diciembre 2012.

- Cerón, J; Cerón, R; Guerra, J; Aguilar, C; Montalvo, C; Guzmán, J; Peña, J; Carballo, C. (2012). Changes on foliar nutrients, proteins and photosynthetic pigments due to controlled exposures to sulfur dioxide in *Rizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* and *Conocarpus erectus* individuals. Pp. 516-523. International Journal of Energy and Environment. Vol. 6, No. 5. 2012. ISSN: 11089-9577.
- Cerón, R. M., Cerón, J.; Carballo, C; Aguilar, C; Montalvo, C; Vargas, C; Ortinez, A; Cárdenas, B; Córdova, A; Rodríguez, M. (2012). Chemical characterization of dry deposition of pollutants in one industrial site in Guanajuato, México. Pp. 532-539. International Journal of Energy and Environment. Vol. 6, No. 5. 2012. ISSN: 1109-9577.
- Cerón, R. M.; Cerón, J; Aguilar, C; Montalvo, C; Carballo, C; Cárdenas, B; Ortinez, A; Cocom, M; Carrillo, J. (2012). Atmospheric dry deposition in the proximity of oil-fired power plants at Mexican Pacific Coast. Pp. 1228-1237. Journal of Environmental Protection. Vol. 3. 2012. ISSN: 2152-2197.
- Cerón-Bretón, J. G; Cerón-Bretón, R. M; Cárdenas-González, B; Ortínez-Álvarez J. A.; Cruz Chavez, E; Díaz-Morales, B; Carballo-Pat, C. G; Pérez-López, T; Reyes-Trujeque, J; Muriel-García, M, y Guerra-Santos, J.J. (2012). On the dry deposition of ionic species at two National Parks located in the vicinity of power plants in Mexico. PP. 31-38. International Journal of Energy and Environment. Vol. 6. No. 1. ISSN: 1109- 9577.
- Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. In: Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México. (2012). UNACAR. Editores: Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. 115 páginas. Tiraje: 525 ejemplares. ISBN 978-607-7826-21-7.
- Cerón-Bretón, J; Cerón-Bretón, R; Guerra-Santos, J; Aguilar-Ucan, C; Montalvo-Romero, C. Capítulo 5. (2012). Efectos de depositación atmosférica sobre vegetación. Pp. 65-80. En: Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México. (2012). Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. Editores. UNACAR. 115 páginas. Tiraje: 525 ejemplares. ISBN 978-607-7826-21-7.
- Cerón-Bretón, R. M; Cerón-Bretón, J.G; Carballo-Pat, C; Díaz-Morales, B; Guerra-Santos, J; Aguilar-Ucan, C; Montalvo-Romero-C. (2012). Capítulo 4. Evaluación de la depositación ácida en los alrededores de una planta termoeléctrica en el Centro de México. (2012). Pp. 53-64. En: Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México. (2012). J.J. Editores. UNACAR. 115 páginas. Tiraje: 525 ejemplares. ISBN 978-607-7826-21-7.

- Cerón-Bretón, R.M., Cerón-Bretón, J.G., Cárdenas-González, B., Ortínez Álvarez, A., Díaz-Morales, B., Carballo-Pat, C., and Muriel-García, M. (2012). Chapter 8. Evaluation of dry atmospheric deposition in two sites in the vicinity of fuel oil-fired power plant in Mexico. Pp. 167-184. En el libro "Air Quality: Monitoring and modelling" Edited by Sunil Kumar and Rakesh Kumar ISBN 978-953-51-0161-1 de la editorial INTECH D.O.O. Croatia.
- Cerón, R.M; Cerón, J.G; Carballo, C.G; Aguilar, C; Montalvo, C; Benítez, J; Villareal, Y; y Gómez, M. (2013) Chemical composition, Fluxes and seasonal variation of acid Deposition in Carmen island, Campeche, Mexico. Journal of Environmental Protection. Volumen 4. No. 8A1. August 2013. Pp. 50-56. Scientific Research. ISSN: 1007-662X
- Cerón Bretón Rosa Ma.; Julia G. Cerón Bretón; Jorge A. Benítez Torres; Carmen G. Carballo Pat; Jesús J. Guerra Santos; José A. Ortínez Álvarez; A. Víctor Córdova Quiroz. (2014). Evaluación de los flujos de depósito atmosférico seco de elementos traza en Ciudad del Carmen, Campeche: Implicaciones ecológicas. En: A.V. Botello; J. Rendón Von ostén; J. Benítez; y G. Gold-Bouchot (Eds). Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental: diagnóstico y tendencias. UAC, UNAM-ICMyL, CINVESTAV UNIDAD MERIDA. ISBN: 978-607-7887-71-3.
- Cerón J.; R. Cerón. (2014). Wet and dry deposition of trace elements in two sites in Carmen island, Campeche, México. Transactions on environment and development. Vol. 10. 2014. Pp. 393-404. ISSN: 1790-5079
- Cerón-Bretón R.M, Cerón-Bretón J.G, Aguilar-Ucán C, Ramírez-Lara E, Ortínez-Álvarez J. A, Montalvo-Romero C, y Carballo-Pat C.G. (2014) Wet Deposition Fluxes and related atmospheric chemistry at three sites in Mexico. Open Journal of Air Pollution. Vol 3. No. 1. Marzo 2014. Scientific Research Publishing. ISSN: 2169-2653.
- Cerón R. M; Cerón, J.G; Muriel, M; Anguebes, F; Ramírez, M; Zavala, J; Carballo, C; Escoffie, R.C. (2015). Spatial and Temporal Distribution Of Throughfall Deposition Of Nitrogen And Sulphur The Mangrove Forests Associated To Terminos Lagoon. Chapter 7. Pp. 147-164. ISBN: 978-953-51-4199-0.
- Cerón, R. M; Cerón, J; Aguilar, C; Montalvo, C; Rustrian, E; Houbron, E; Ramirez, E; Muriel, M; Córdova, A; Carballo, C; García, A; Chi, H; y Hernández, M. (2015). Spatial and Temporal Trough fall Deposition Patterns on two regions at the Center and at the Southeast of Mexico WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT. Volumen 11, 2015, PP. 57- 72.

- Cerón J., R.M. Cerón, C. Aguilar, C. Montalvo, A. García, M. Muriel, E. Ramírez, A. Córdova<sup>1</sup> y C. Carballo. (2016). Mapping temporal and spatial variation of Sulphur and nitrogen deposition to a complex ecosystem in Campeche, Mexico. *Transactions on the Ecology and the Environment* Vol. 203. Pp.113-123. En: *Environmental Impact II*. WIT Press UK.
- Chávez Aguilar Griselda (2002). Tesis UNAM: Relación del daño en copa y el depósito atmosférico, como una causa del decline forestal en el bosque de Abies Religiosa de dos parques nacionales. Biólogo; asesor Germán Calva Vásquez.
- Clark K.L., Nadkarni N.M., Schaefer D. y Gholz H.L. (1998), Cloud Water and Precipitation Chemistry in a Tropical Montane Forest, Monteverde, Costa Rica, *Atmospheric Environment*, 32, 1595-1603.
- Cook, B. I., R. L. Miller, y R. Seager. (2009). Amplification of the North American Dust Bowl drought through human-induced land degradation. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 106(13): 4997–5001. doi:10.1073/pnas.0810200106.
- Correa Galicia Pedro (2006). Tesis UNAM: Correlación nutrimental del suelo y anillos de crecimiento del bosque de pino-oyamel del Parque Nacional Zoquiapan a través del depósito atmosférico mediante la técnica de PIXE. Biólogo; asesor Germán Calva Vásquez.
- Cruz Jiménez Elizabeth (2007). Tesis UNAM: Estudio comparativo entre la deposición húmeda y seca de Ciudad Universitaria (Zona Metropolitana de la Ciudad de México) y El Tajín (Veracruz). Licenciado en Química Industrial; asesor Humberto Bravo Alvarez, Rodolfo Sosa Echeverría.
- Després, V. R., J. A. Huffman, S. M. Burrows, C. Hoose, A. S. Safatov, G. Buryak, J. Fröhlich-Nowoisky, W. Elbert, M. O. Andreae, U. Pöschl, and R. Jaenicke. (2012). Primary biological aerosol particles in the atmosphere: A review. *Tellus B* 64: 1–58. doi:10.3402/tellusb.v64i10.155598.
- Díaz-Ibarra, M. A., Muy-Rangel, M. D., Rubio-Carrasco, W., y Ramos-Felix, E. (2014). Monitoreo del pH del agua de lluvia para la ciudad de Culiacán, Sinaloa. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 10 (1): 23-31.
- Ducros, M. (1845). Observation d'une pluie acid. *J. de Pharm. Chim.* 3, 273-277.
- EANET (2006). Periodic Report on the State of Acid Deposition in East Asia. Part. 1: Regional Assessment. Acid Deposition Monitoring Network in East Asia. 259p.



- Eklund T.J., McDowell W.H. y Pringle C.M. (1997), Seasonal Variation of Tropical Precipitation Chemistry: La Selva, Costa Rica, *Atmospheric Environment*, 31, 3903-3910.
- Erisman, J. W., C. Beier, G. Draaijers, y S. Lindberg (1994). Review of deposition monitoring methods. *Tellus*. 46B: 79-93.
- Fiore, A. M., D. J. Jacob, B. D. Field, D. G. Streets, S. D. Fernandes, y C. Jang. (2002). Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane. *Geophys. Res. Lett.* 29(19): 1919. doi:10.1029/2002GL015601.
- Fiore, A. M., V. Naik, D. V. Spracklen, et al. (2012). Global air quality and climate. *Chem. Soc. Rev.* 41: 6663–83. doi:10.1039/c2cs35095e.
- Fiore M. A., Vaishali N. y Leibensperger M.E. (2015a). A summary of the 45th A&WMA Critical Review: Air quality and climate connections. em *Magazine for environmental managers*, june, pp. 31-35.
- Fiore M. A., Vaishali N. y Leibensperger M.E. (2015b). Air quality and climatic conections. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(6):645-685. DOI. 10.1080/10962247.2015.1040526.
- Fisher, D.C., Oppenheimer, M., (1991). Atmospheric nitrogen deposition and the Chesapeake Bay estuary. *Ambio* 20, 102-108.
- Flannigan, M. D., M. A. Krawchuk, W. J. de Groot, B. M. Wotton y L. M. Gowman. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *Int. J. Wildland Fire* 18(5): 483–507. doi:10.1071/WF08187.
- Flores, J., Vaca, M., López, R., González, A., y Barceló, M. (2002). Plomo, cadmio y zinc en polvos sedimentados a diferentes alturas en la ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol.14.
- Flues, M., Hama, P., Lemes, M.J.L., Dantas, E.S.K., Fornaro, A. (2002). Evaluation of the rainwater acidity of a rural region due to a coal-fired power plant in Brazil. *Atmos. Environ.* 36, 2397-2404.
- Galloway J.N., Likens G.E., Keene W.C. y Miller J.M. (1982), The Composition of Precipitation in Remote Areas of the World, *Journal of Geophysical Research*, 87, 8771-8776.
- Galloway J.N., Knap A.H. y Church T.M. (1983), The Composition of Western Atlantic Precipitation Using Shipboard Collectors, *Journal of Geophysical Research*, 88, 1085910864.



- Galloway J.N., Keene W.C., Artz R.S., Miller J.M., Church T.M. y Knap A.H. (1989), Process Controlling the Concentrations of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, HCOOT and CH<sub>3</sub>COOT in Precipitation on Bermuda, *Tellus*, 41 B, 427-443.
- García M.R., Torres M.C, Padilla H., Belmont R. A, Arcega C. F., Báez A. (2006). "Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the state of Mexico, Mexico". *Rev. Atmospheric Environment*. Vol. 40 (32): 6088-6100.
- García M.R., Belmont, H. Padilla, M.C. Torres y A. Báez (2009). Trace metals and inorganic ion measurements in rain from Mexico City and a nearby rural area. *Chemistry and Ecology*. Vol. 25, No. 2, 71-86.
- García Martínez Rocío (2007). Tesis UNAM: Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y una zona rural (Rancho Viejo, Edo. de México). Doctor en Ciencias de la Tierra; asesor Armando Báez Pedrajo.
- García Salas Anayeli (2014). Tesis UNAM: Comparación del depósito atmosférico y metales pesados utilizando corteza de oyamel [*Abies religiosa* (h.b.k.) schlt et cham.] en un paraje del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl y Parque Nacional El Chico. Licenciatura en Biología; asesor Calva Vásquez Germán.
- García-Guadalupe, M. E., Sánchez, H. U. R., Peña, Á. R. M., Concepción, F. O. G., y Espinosa, M. L. (2013) La Contaminación Atmosférica precursor de lluvia Ácida en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), Jalisco, México. Proyecto integral de evaluación de la contaminación del aire en las ciudades: caso Zona Metropolitana de Guadalajara; hacia un modelo de prevención y mitigación.
- García, M. E., Ramírez, H. U., Meulenert, Á. R., García, F. O., y Alcalá, J. (2006). Influencia de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en la formación de lluvia ácida en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *e-Gnosis*, Vol. 4, Art. 7, 16 págs.
- Genescá, J., Salvador, L., Mariaca, L., y Uruchurtu, J. (1999). Corrosividad atmosférica. MICAT-México.
- Ginoux, P. A., J. M. Prospero, T. E. Gill, C. Hsu, y M. Zhao. (2012). Globalscale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Rev. Geophys.* 50: RG3005. doi:10.1029/2012RG000388.

- Gorham, E. (1961). Factors influencing supply of major ions to inland waters, with special reference to the atmosphere. *Geol. Soc. Am. Bull.* 72, 795-840.
- 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.
- Hansen A., y David Gay. (2003). Observations of mercury wet deposition in Mexico. *Environ Sci Pollut Res* (20):8316-8325. DOI: 10.1007/s11356-013-2012-3
- Heckel P.F., Keener T., Lu M. y Bravo A. H. (2007). A Summary of the International Workshop on the Influences of Air quality on the Mayan heritage Sites in Mesoamerica. *Environmental Manager of the Air & Waste Management Association*. February, pp 24-30. ISSN 1079-7343.
- Hendry C.D., Berish C.W. y Edgerton E.S. (1984), *Precipitation Chemistry at Turrialba, Costa Rica*, *Water Resources Research*, 20, 1677-1684.
- Herrera Tolama Chedy Adriana (2007). Tesis UNAM: Evaluación de la deposición húmeda en la Costa del Golfo de México para el periodo 2003-2005. Químico; asesor Humberto Bravo Álvarez.
- Hidalgo Navarro Marcos (2004). Análisis sobre el comportamiento de la lluvia en zonas boscosas aledañas al valle de México. Tesis Licenciatura. División: Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013a). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Isaksen, I. S. A., C. Granier, G. Myhre, et al. (2009). Atmospheric composition change: Climate–chemistry interactions, *Atmos. Environ.* 43: 5138–92. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.08.003.
- Jacob, D. J., y D. A. Winner. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmos. Environ.* 43(1): 51–63. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.051.
- Jones, M.L.M. (2005). Nitrogen deposition in upland grasslands: Critical loads, management and recovery. Thesis. University of Sheffield. U.K.
- Kagawa, J., (2002). Health effects of diesel exhaust emissions/a mixture of air pollutants of worldwide concern. *Toxicology*. 181-182, 349-353.

- Kahl, J. D., y Saunders, R. O. (2012). Análisis Meteorológico de la Depositación Ácida. Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México, 21. UNACAR. Editores: Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. 115 páginas. ISBN 978-607-7826-21-7.
- Kahl, J. D., Bravo-Álvarez, H., Sosa-Echeverría, R., Sánchez-Álvarez, P., Alarcón-Jiménez, A.L., y Soto-Ayala, R. (2007). Characterization of atmospheric transport to the El Tajín archaeological zone in Veracruz, México. *Atmósfera*, 20(4), 359-371.
- Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, et al. (2013). Near-term climate change: Projections and predictability. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 953–1028. New York, NY: Cambridge University Press.
- Krotkov, N.A., McLinden, C.A., Li, C., Lamsal, L.N., Celarier, E.A., Marchenko, S.V., Swartz, W.H., Bucsela, E.J., Joiner, J., Duncan, B.N., Boersma, K.F. (2016). Aura OMI observations of regional SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> pollution changes from 2005 to 2014. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 4605-4629.
- Lehman C., Kerschner B., Gay D. (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 & Waste Management Association. July. 6-11pp.
- Leibensperger, E. M., L. J. Mickley, D. J. Jacob, and S. R. H. Barrett. (2011). Intercontinental influence of NO<sub>x</sub> and CO emissions on particulate matter air quality. *Atmos. Environ.* 45(19): 3318–24. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.02.023.
- Likens, G.E., Bormann, F.H., (1974). Acid rain: a serious regional environmental problem. *Science* 184, 1176-1179.
- Marín Hernández Adrián (2009). Tesis UNAM: Evaluación, prevención y control de precursores de lluvia ácida en el estado de Veracruz. Maestro en Ingeniería Ambiental; asesor Rodolfo Sosa Echeverría.
- Marín H.A., Bravo A.H., Alarcón J.A.L., Sosa E.R., Sánchez A.P. (2010). Presencia de lluvia ácida en el Estado de Veracruz y el uso de modelos de trayectoria inversa para identificar regiones de emisión de precursores. Casos de estudio: El Tajín y La Mancha. Memorias del XIX Congreso Mexicano de Meteorología y IV Congreso Internacional de Meteorología. Saltillo, Coahuila, México. Octubre.

- McDowell W.H., Ginés S.C., Asbury C.E. y Ramos P.C. (1990), Influence of Sea Salt Aerosols and Long Range Transport on Precipitation Chemistry at El Verde, Puerto Rico, Atmospheric Environment, 24 A, 2813-2821.
- Miranda Quintero José Martín (2008). Tesis UNAM: Cuantificación de metales pesados tóxicos en la precipitación pluvial en la zona Sur de la Ciudad de México. Ingeniero Químico; asesor Rocío García Martínez.
- Mojica Avilés Maricela (2003). Tesis UNAM: Dendroanálisis, con pixe, de núcleos de pino y oyamel para el registro de los eventos del depósito atmosférico en los parques nacionales Iztapopocatepetl y Zoquiapan. Biólogo; asesor Germán Calva Vásquez.
- NADP (2011a). Measuring Critical Loads of Nitrogen Deposition in the U.S. Research Review. National Atmospheric Deposition Program. No. 14, Autumn.
- NADP (2011b). National Acid Precipitation Assessment Program Report to Congress: An integrated Assessment. National Atmospheric Deposition Program. 114 pp.
- NADP (2014). National Research Support Project Impacts. NRSP-3 (2009-2014). Impact Statement. National Atmospheric Deposition Program. 2 pp.
- NADP (2015). Governance Handbook. National Atmospheric Deposition Program. 16 pp.
- Nilsson, J. y Grennfelt, P. (1988). Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from a workshop held at Skokloster, Sweden. March 19-24. The Nordic Council of Ministers. Report 1988: 15, Copenhagen, Denmark. ISBN 87-7303-248-4.
- NMX-AA-051-scfi-2001 (2001). Análisis de agua-Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.
- NMX-AA-073-scfi-2001, (2001). Análisis de aguas. Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-074-1981, (1981). Análisis de aguas. Determinación del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-079-scfi-2001, (2001). Análisis de aguas. Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

- Oden, S. (1976). The acidity problem e an outline of concepts. *Water Air Soil Pollut.* 6, 137-166.
- Padilla Gordon Hugo Pascual (1989). Tesis UNAM: Estudio analítico de la composición química de la precipitación pluvial en el valle de México. Maestría en Ingeniería Ambiental; asesor Vicente Fuertes Gea.
- Padilla Gordon Hugo Pascual (1998). Tesis UNAM: Comparación de la composición química de las nubes y de la precipitación pluvial entre diferentes zonas montañosas de México. Doctor en Ingeniería; asesor Fernando García García.
- Padilla H.G., R. Belmont M.B. Torres y Báez A.P. (2000). Hurricanes Pauline and Nora rainwater chemical composition. *Rev. Canadian Journal of Earth Sciences* 37: 569-578.
- Pardo, L.H., Robin-Abbott, M.J., Driscoll, C.T., Eds. (2011). Assessment of nitrogen deposition effects and empirical critical loads of nitrogen for ecoregions of the United States. Gen. Tech. Report NRS-80. US Forest Service. Northern Research Station. May. 291 pp.
- Parker, G. G. (1983). Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv. Ecol. Res.* 13: 57-133.
- Parungo F. and J. Miller, Editors. (1988). *Air Chemistry Studies Over the Gulf of Mexico*. NOAA Technical Memorandum ERL ESG-29. Environmental Sciences Group. Boulder, Colorado. 254 pp.
- Parungo, F.N. Clarence, S. Hoyt, H. Bravo A. (1990). The Investigation of Air Quality and Acid Rain over the Gulf of Mexico. *Atmospheric Environment*. 24A (1): 109-123.
- Patiño Hernández Xóchitl. (2011). Caracterización de la deposición húmeda y seca en el Parque Nacional El Chico, mineral del Chico-Hidalgo, México. Implicaciones de la contaminación atmosférica. Licenciatura en Ingeniería Geología Ambiental. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.
- Pérez Suárez, M., Cetina Alcalá, V. M., Aldrete, A., Fenn, M. E., & Landois Palencia, L. L. (2006). Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la ciudad de México. *Agrociencia*, 40(2).
- Power, S.A., Green, E.R., Barker, C.G., Bell, J.N.B., y Ashmore, M.R. (2006). Ecosystem recovery: heathland response to a reduction in nitrogen

- deposition. *Global Change Biology*, Vol. 12, No. 7, July 2006, pp. 1241-1252, ISSN 1354-1013.
- Puentes González Anakaren (2014). Tesis UNAM: Estimación de emisiones de precursores de lluvia ácida en el Estado de Veracruz. Licenciatura en Química Farmacéutico Biológica; asesor Rodolfo Sosa Echeverría.
- Quinn, P. K., y T. S. Bates. (2011). The case against climate regulation via oceanic phytoplankton sulphur emissions. *Nature* 480(7375): 51–56. doi:10.1038/nature10580.
- Raes, F., y J. H. Seinfeld. (2009). New directions: Climate change and air pollution abatement: A bumpy road. *Atmos. Environ.* 43(32): 5132–33. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.06.001.
- Ramírez Blancarte Valeria (2005). Tesis UNAM: Evaluación del efecto de la lluvia ácida en el material de construcción de la Fortaleza de San Juan de Ulúa Veracruz, México. Ingeniero Químico; asesor Rogelio Soto Ayala.
- Ramírez L.E., Miranda G.R., Trujillo S.D., Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P. Alarcón J.A.L., Kahl J. (2007). Preliminary Study of the Chemical Composition of Rainwater in Northeastern México. 100th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Pittsburgh, Pensilvania. June.
- Ramírez Lara Evangelina (2009). Tesis: Aplicación de un modelo para la evaluación de fuentes potenciales de emisión de precursores de depositación ácida. Doctorado en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables. Facultad De Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Ramirez L. E., Miranda G. R., Gracia V. Y., Balderas R. I. (2010). Chemical composition of rainwater in northeastern Mexico. *Atmósfera*, Vol. 3 (3), pp. 213-224.
- Ramírez Lara E., Facundo Torres D.M. (2012) Estudio de la depositación atmosférica en una zona industrial del noreste de México. *Avances y Perspectivas de la Depositación Ácida en México*, 21. UNACAR. Editores: Cerón-Bretón, J.G., Cerón-Bretón, R.M. y Guerra-Santos, J.J. 115 páginas. ISBN 978-607-7826-21-7.
- Ramírez-Lara Evangelina; Rosa María Cerón Bretón; Julia Griselda Cerón Bretón; Ulrico López Chuken; Jonathan Kahl. (2016). Study of trace ions in wet



- Deposition of an industrial site in Monterrey's Metropolitan Area, Mexico. *Open of journal ecology*, 2016, 6, 1-12.
- Ravishankara, A. R., J. P. Dawson, y D. A. Winner. (2012). New directions: Adapting air quality management to climate change: A must for planning. *Atmos. Environ.* 50(0): 387–89. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.12.048.
- Robles Mora Gabriela (2003). Tesis UNAM: Dendroquímica con pino y oyamel, para el registro retrospectivo de 30 años de depósito atmosférico, en el Desierto de los Leones y el Chico. Biólogo; asesor Germán Calva Vásquez.
- Ruiz Barrios Jaime (2004). Tesis UNAM: Efecto de la lluvia ácida en el material pétreo constituyente de los monumentos de la zona arqueológica del Tajín, Veracruz, México. Ingeniero Civil; asesor Rogelio Soto Ayala.
- Seager, R., et al. (2007). Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. *Science* 316(5828): 1181–84. doi:10.1126/science.1139601.
- SEDEMA (1994). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1994. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA, 71
- SEDEMA (1995). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1995. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA, 54 pág.
- SEDEMA (1996). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1996. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA, 64 pág.
- SEDEMA (1997). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1997. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA, 67 pág.
- SEDEMA (1998). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1998. Gobierno del Distrito Federal, 75 pág.



- SEDEMA (1999). Secretaría del Medio Ambiente. Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe anual 1999. Gobierno del Distrito Federal, 93 pág.
- SEDEMA (2000). Secretaría del Medio Ambiente. Informe anual de la calidad del aire y precipitación ácida en el Valle de México (2000). Gobierno del Distrito Federal. 72 pág.
- SEDEMA (2001). Secretaría del Medio Ambiente. Informe de estado de la calidad del aire y tendencias 2001 para la Zona Metropolitana del Valle de México. Sistema de Monitoreo Atmosférico. Gobierno del Distrito Federal. 114 pág.
- SEDEMA (2002). Secretaría del Medio Ambiente. Informe de estado de la calidad del aire y tendencias 2002. Zona Metropolitana del Valle de México. Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Gobierno del Distrito Federal. 36 pág.
- SEDEMA (2003). Secretaría del Medio Ambiente. Informe del estado de la calidad del aire y tendencias 2003 para la Zona Metropolitana del Valle de México. Gobierno del Distrito Federal. 44 pág.
- SEDEMA (2004). Secretaría del Medio Ambiente. Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2004. Zona Metropolitana del Valle de México. Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Gobierno del Distrito Federal. 54 pág.
- SEDEMA (2005). Secretaría del Medio Ambiente. La Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. 20 años de monitoreo (1986-2005). Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Gobierno del Distrito Federal. 91 pág.
- SEDEMA (2006). Secretaría del Medio Ambiente. La Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 1986-2006. Informe del estado y tendencias de la contaminación atmosférica. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. 2007. 91 pág.
- SEDEMA (2007). Secretaría del Medio Ambiente. Informe de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México Estado y Tendencias 1990-2007. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. 2008. 58 pág.
- SEDEMA (2008). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2008. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire.

- Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2009. 148 pág.
- SEDEMA (2009). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2009. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2010. 188 pág.
- SEDEMA (2010). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México Informe 2010. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2010. 166 pág.
- SEDEMA (2011). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México Informe 2011. 25 años de monitoreo atmosférico (1986-2011). Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2012. 122 pág.
- SEDEMA (2013). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2013. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. México, D.F. 2014. 147 pág.
- SEDEMA (2014). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2014. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. junio 2015. 122 pág.
- SEDEMA (2015). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe anual 2015. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. julio 2016. 179 pág.
- SEDEMA (2016). Secretaría del Medio Ambiente. Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe anual 2016. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico. Cd. de México, noviembre 2017. 204 pág.
- Shindell, D. T., G. Faluvegi, D. M. Koch, G. A. Schmidt, N. Unger, y S. E. Bauer. (2009). Improved attribution of climate forcing to emissions. *Science* 326(5953): 716–18. doi:10.1126/science.1174760.
- Smith, R.A. (1852). On the air and rain of Manchester. *Mem. Manch. Lit. Philos. Soc. Ser. 1*, 207-217.
- Smith, R.A. (1872). *Air and Rain - the Beginnings of a Chemical Climatology*. Longmans & Green, London, p. 600.

- Smith, W. H. (1990). *Air Pollution and Forest. Interaction between Air Contaminants and Forest Ecosystems*. 2nd ed. Springer-Verlag. USA. 618 pp.
- Sosa E.R., Bravo A.H., Sánchez A.P., Alarcón J.A.L., Herrera T. Ch. A. (2008). *Acid Wet Deposition Evaluation in the Coast of the Gulf of Mexico*. 101st Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Portland, Oregon. June.
- Sosa E.R., H. Bravo A.H., Alarcón J.A.L., Torres B.M.C., Sánchez A.P., Jaimes P.M. (2013a). "Nine years of wet deposition evaluation in the Coast of the Gulf of Mexico". 106th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Chicago, Illinois, USA. June.
- Sosa E. R., Bravo A.H., Torres B. M.C., Alarcón J. A.L., Sánchez A. P. Jaimes P.M. (2013b) *Wet deposition in the Coast of the Gulf of Mexico*. Annual Meeting and Scientific Symposium. National Atmospheric Deposition Program, Park City, Utah, USA. October 8-11.
- Sosa E.R., Bravo A.H., Alarcón J., Torres B.M.C., Sánchez A.P., Jaimes P. M., Granados H.E. (2014a). *Chronology of acid rain in Mexico City and the Gulf of Mexico*. Scientific Symposium. National Atmospheric Deposition Program, Indianapolis, Indiana, USA. October 21-24, 2014.
- Sosa E.R., Bravo A.H., A.L. Alarcón J.A.L., Torres B.M.C., Sánchez A.P., Herrera T.Ch. (2014b). "Evaluación de la deposición atmosférica ácida en la Costa del Golfo de México". En: A.V. Botello, J. Rendón von Osten, J. Benitez y G. Gold-Boucht (eds.). *Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental: diagnóstico y tendencias*. 3era edición. UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV- Unidad Mérida. Tomo 2. 675-691 pp. ISBN 978-607-7887-71-3.
- Sosa E. R., Bravo A. H., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C, Sánchez A. P, Jaimes P. M., Granados H. E. (2015a). *Acid rain on the Coast of the Gulf of Mexico*. 9th International Conference on Acid Deposition, Rochester New York, USA. October.
- Sosa E. R., Bravo A.H, Alarcón J.A.L., Torres B. M.C., Sánchez A.P., Jaimes P. M., Granados H.E. (2015). *Importance and evaluation of acid rain and settled particles on the coast of the Gulf of Mexico (2003-2013)*. 108th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Raleigh, North Caroline, USA. June.
- Sosa E. R, Bravo A. H., Alarcón J. A., Torres B. M.C., Sánchez A. P., Jaimes P. M., Granados H. E. (2016). *Sulfate and nitrate in wet atmospheric deposition*

- at the Gulf of Mexico and possible source regions of their precursors. Symposium Deposition, National Atmospheric Deposition Program. Santa Fe, NM, USA. October.
- Sosa E.R., Bravo A.H., Alarcón J.A.L., Torres B.M.C., Sánchez A.P., Rosas A. S., Mateos D.E., Granados H.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. June.
- Sosa E. R., Bravo A. H., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C., Sánchez A. P., Jaimes P. M., Granados H. E., Gay D. (2017). Sulfate and nitrate in wet atmospheric deposition on the coast of the Gulf of Mexico from 2003 to 2015. 110th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Pittsburgh, Pennsylvania, USA. June.
- Sosa E, R., Bravo A. H., Alarcón J. A.L., Torres B. M.C, Sánchez A. P, Jaimes P. M., Granados H. E., Gay D., Lehmann C., Wetherbee G. (2017). Evaluation of wet atmospheric deposition along the coast of the Gulf of Mexico, an international collaboration opportunity. Symposium Deposition, National Atmospheric Deposition Program. San Diego California, USA. October.
- Soto Ayala Rogelio (1999). Tesis UNAM: Efecto de la lluvia ácida sobre el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos. Doctor en Ingeniería Ambiental; asesor Humberto Bravo Álvarez.
- Spracklen, D. V., L. J. Mickley, J. A. Logan, R. C. Hudman, R. Yevich, M. D. Flannigan, y A. L. Westerling. (2009). Impacts of climate change from 2000 to 2050 on wildfire activity and carbonaceous aerosol concentrations in the western United States. *J. Geophys. Res.* 114(D20): D20301. doi: 10.1029/2008JD010966.
- Suárez, M. P., Alcalá, V. M. C., Aldrete, A., Fenn, M. E., y Palencia, L. L. L. (2006). Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la Ciudad de México. *Agrociencia*, 40(2), pp. 239-248.
- Tamaki, M., Koyama, I. (1991). The acid rain observed on ground level in Japan. *J. Jpn. Soc. Air Pollut.* 26, 1-22.
- Tartari, G., A. Consuma, R. Balestrini, S. Valsecchi, t M. Camusso, (1995). Total atmospheric deposition measurements using an innovative dry deposition sampler. *Life chemistry Reports*, 13: 159-175.

- TFHTAP. Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution. (2010a). Hemispheric Transport of Air Pollution 2010 Part A: Ozone and Particulate Matter. Air Pollution Studies No. 17, ed. F. Dentener, T. Keating, and H. Akimoto. New York, NY: United Nations.
- TFHTAP. Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution. (2010b). Hemispheric Transport of Air Pollution 2010 Part B: Mercury. Air Pollution Studies No. 18, ed. N. Pirrone and T. Keating. New York, NY: United Nations.
- TFHTAP. Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution. (2010c). Hemispheric Transport of Air Pollution 2010 Part C: Persistent Organic Pollutants. Air Pollution Studies No. 19, ed. S. Dutchak and A. Zuber. New York, NY: United Nations.
- Torres González Fidel Angel (2009). Efecto de la lluvia en materiales pétreos del patrimonio histórico del Estado de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigación en Corrosión. Tesis Maestría. Maestría en Ciencias Marinas. Opción: Preservación de infraestructura marina. 123pp.
- Unger, N., D. T. Shindell, D. M. Koch, y D. G. Streets. (2006). Cross influences of ozone and sulfate precursor emissions changes on air quality and climate. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 103(12): 4377–80. doi:10.1073/pnas.0508769103.
- US-EPA (2009). Environmental Protection Agency. Endangerment and cause or contribute, findings for greenhouse gases under Section 202(a) of the Clean Air Act, Final Rule. Fed. Reg. 74(239): 66496–546. [http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/endangerment/Federal\\_Register-EPA-HQ-OAR-2009-0171-Dec.15-09.pdf](http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/endangerment/Federal_Register-EPA-HQ-OAR-2009-0171-Dec.15-09.pdf).
- US-EPA (2017). Environmental Protection Agency. Effects of Acid Rain. Other Effects of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. Disponible en: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- US-NPS. National Park Service (2001). Management Policies, Interpreting the Key Statutory Provisions of the 1916 NPS Organic Act. National Park Service (Available at: <http://www.nps.gov/protect/policysection.htm>).
- Vásquez, G. C., de la Isla, M. D. L., Gordon, H. P., Hernández, J. J. V., y Martínez, A. V. (2012). La corteza arbórea como biomonitor del depósito ácido en la Cuenca de México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 31(100).

- Velasco Saldaña, H. E., Segovia Estrada, E., Hidalgo Navarro, M., Ramírez Vallejo, S., García Romero, H., Romero Terán, I., y Montaña, J. (2002). Lluvia ácida en los bosques del poniente del Valle de México. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 28 (pp. 1-8). FEMISCA.
- Watson, J. G. (2002). Visibility: Science and regulation. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 52(6): 628–713. doi:10.1080/10473289.2002.10470813.
- Weaver, C. P., E. Cooter, R. Gilliam, et al. (2009). A preliminary synthesis of modeled climate change impacts on U.S. regional ozone concentrations. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 90(12): 1843–63. doi:10.1175/2009BAMS2568.1.
- Wu, S. L., L. J. Mickley, E. M. Leibensperger, D. J. Jacob, D. Rind, y D. G. Streets. (2008). Effects of 2000–2050 global change on ozone air quality in the United States. *J. Geophys. Res.* 113(D6): D06302.
- Zamora Vargas Eduardo (2016). Tesis UNAM: Estimación y medición del depósito atmosférico húmedo en la zona de el Tajín, Veracruz, como producto de la operación de una fuente estacionaria. Licenciatura en Ingeniería Química; asesor Rodolfo Sosa Echeverría.
- Zhao, D., Sun, B. (1986). Air pollution and acid rain in China. *Ambio* 15, 2-5.

## **9. ANEXOS**

### **9.1 Información de los sitios de muestreo del depósito atmosférico en México**

[SitiosDAM.xlsx](#)

### **9.2 Direcciones URL para cada sitio de muestreo usando la plataforma wix.com**

[direcciones\\_URL.xlsx](#)

### **9.3 Matriz bibliográfica de los estudios sobre el depósito atmosférico en México**

[..\02Matriz\Matriz Final.xlsx](#)