



GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
Secretaría del Medio Ambiente

Dirección General de Gestión Ambiental del Aire
Dirección de Monitoreo Atmosférico



Secretaría del Medio Ambiente

SERIE DE ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO
DE LA CIUDAD DE MÉXICO

ESTADO DE LA LLUVIA ÁCIDA EN LA
ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

Participantes

Roberto Muñoz Cruz

Gerardo Samuel López Venegas

Alejandro Campos Díaz

Dirección de Monitoreo Atmosférico / Dirección General de Gestión Ambiental del Aire / Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal

Enero 2008

calidadaire@sma.df.gob.mx
<http://www.sma.df.gob.mx/simat/>

ANTECEDENTES

En la década de 1980 se realizaron las primeras investigaciones sobre presencia, caracterización y efectos de las precipitaciones ácidas en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). En 1987 inició el monitoreo sistematizado de lluvia ácida mediante el Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PPAZMCM), que conducía el Instituto Nacional de Ecología (INE). En 1993 fue transferido junto con la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), a la Dirección General de Ecología del Departamento del Distrito Federal, hoy Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. En el año 2001 se consolidó la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) y se integró al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

La REDDA se encarga del monitoreo continuo y permanente del *depósito atmosférico*¹, con el objetivo de caracterizar el fenómeno conocido como lluvia ácida, evaluar su distribución temporal y espacial, y estudiar la transferencia de contaminantes del aire hacia el suelo e inferir sobre el efecto en los materiales y ecosistemas, así como en la evaluación de las acciones de prevención y control. El término técnico el *depósito atmosférico* se divide en *depósito seco*² y en *depósito húmedo*³ (SIMAT, 2002; Vet, 1991).

EQUIPOS DE MEDICIÓN Y NÚMERO DE ESTACIONES

Inicialmente las estaciones de monitoreo de la REDDA estaban equipadas con colectores convencionales de depósito total, entre 1997 y 1999 se reemplazaron por colectores semiautomáticos que separan el depósito atmosférico en sus componentes húmedo y seco. La REDDA opera de mayo a noviembre y consta de 16 estaciones de monitoreo distribuidas en las áreas urbana, rural y de conservación ecológica de la ZMVM, la colecta de muestras de agua de lluvia es semanal (Mapa 1).

El colector convencional consta de un embudo acoplado a un recipiente, en el primero de estos se captan los depósitos húmedo y seco durante, y la muestra se va acumulando en el recipiente. Esta muestra con los depósitos mezclados también se conoce como depósito total (Figura 1). En el caso del colector semiautomático, éste cuenta con un mecanismo controlado por un sensor eléctrico que permite muestrear los depósitos húmedo y seco en recipientes separados; cuando se presenta un evento de precipitación pluvial se abre por completo el recipiente de depósito húmedo y se tapa herméticamente el de depósito seco, cuando deja de llover ocurre lo contrario (Figura 2).

La forma en que operan estos equipos evita que las muestras se contaminen de impurezas o que pierdan volumen a causa de la evaporación; en consecuencia, la determinación de propiedades y compuestos es más precisa y garantiza una mejor caracterización del agua de lluvia.

En las muestras de depósito húmedo se mide la conductancia específica (CE), el potencial de hidrógeno (pH) y la concentración de los iones⁴ sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), cloruro (Cl^-), amonio (NH_4^+), sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+). Estos parámetros también se determinan en otros países, por ejemplo en el Programa Nacional de Depósito Atmosférico ([NADP](#)) de los EUA, la Red de Monitoreo de Lluvia Ácida del Japón ([JARN](#)), la Red de Monitoreo de Precipitación y Aire Canadiense ([CAPMoN](#)), la Red de Monitoreo de Depósito Ácido en el Este de Asia ([EANET](#)) y el Programa de Monitoreo y Evaluación en Europa ([EMEP](#)) de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE).

¹ El depósito atmosférico es el proceso por el cual los gases, aerosoles (sistema coloidal obtenido por dispersión de partículas ultramicroscópicas sólidas o líquidas en el seno de un gas) y partículas que contaminan la atmósfera, son removidos y depositados en la superficie.

² Materia sin presencia de la fase acuosa, que es dispersada por los vientos y depositada por gravedad.

³ Materia depositada durante los eventos de precipitación pluvial. El término precipitación se utiliza para referirse a la caída de hidrometeoros que alcanzan la superficie de la Tierra, como son: lluvia, llovizna, neblina, rocío, escarcha, granizo, nieve, etc.

⁴ Un ión es un átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica. Un anión es un ión con carga negativa y un catión es un ión con carga positiva.

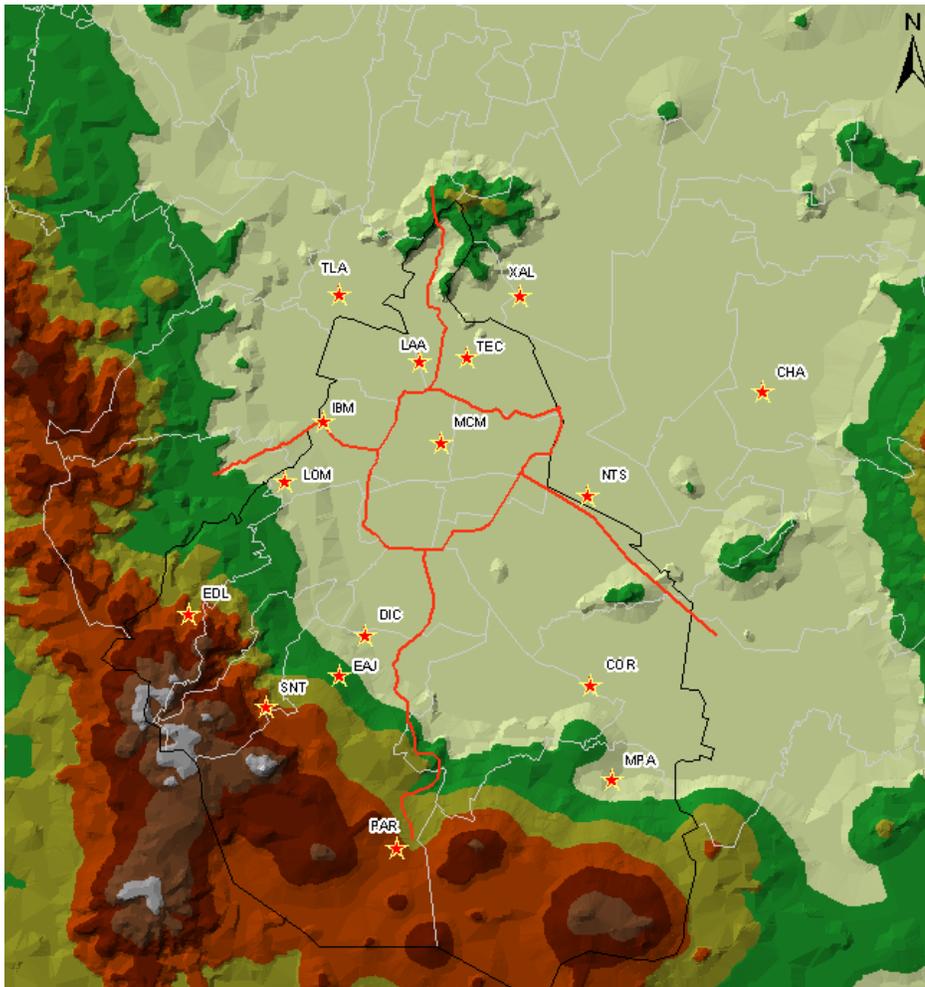
Figura 1. Colector convencional.



Figura 2. Colector semiautomático.



Mapa 1. Localización de las estaciones de la REDDA (2005)



ZONA	ESTACIÓN	CLAVE
NORESTE	Xalostoc	XAL
	Chapingo	CHA
	Netzahualcóyotl Sur Cerro del Tepeyac	NTS TEC
NOROESTE	Tlalnepantla	TLA
	Lab. de Análisis Ambiental	LAA
	IBM Legaría	IBM
CENTRO	Museo de la Cd. de México	MCM
SURESTE	CORENA	COR
	Milpa Alta	MPA
SOROESTE	Lomas	LOM
	DICONSA	DIC
	Ecoguardas Ajusco	EAJ
	San Nicolás Totolapan	SNT
	Parres	PAR
	Exconvento Desierto de los Leones	EDL

PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CONTAMINANTES PRECURSORES DE LA LLUVIA ÁCIDA

El proceso de transferencia de los contaminantes que propician la lluvia ácida (dióxido de azufre - SO_2 y óxidos de nitrógeno - NO_x), comprende el flujo y la dinámica de éstos con relación al origen de sus emisiones y su depósito, en asociación con las condiciones meteorológicas prevalecientes. El pH indica el nivel de acidez en el agua de lluvia y depende, principalmente, de la presencia de ácidos fuertes (H_2SO_4 y HNO_3) que se forman a partir de emisiones antropogénicas de SO_2 y NO_x . Para determinar la presencia de lluvia ácida en una región geográfica, se emplea como indicador el valor de 5.6 (ligera acidez) que tiene el pH del agua de lluvia en condiciones naturales.

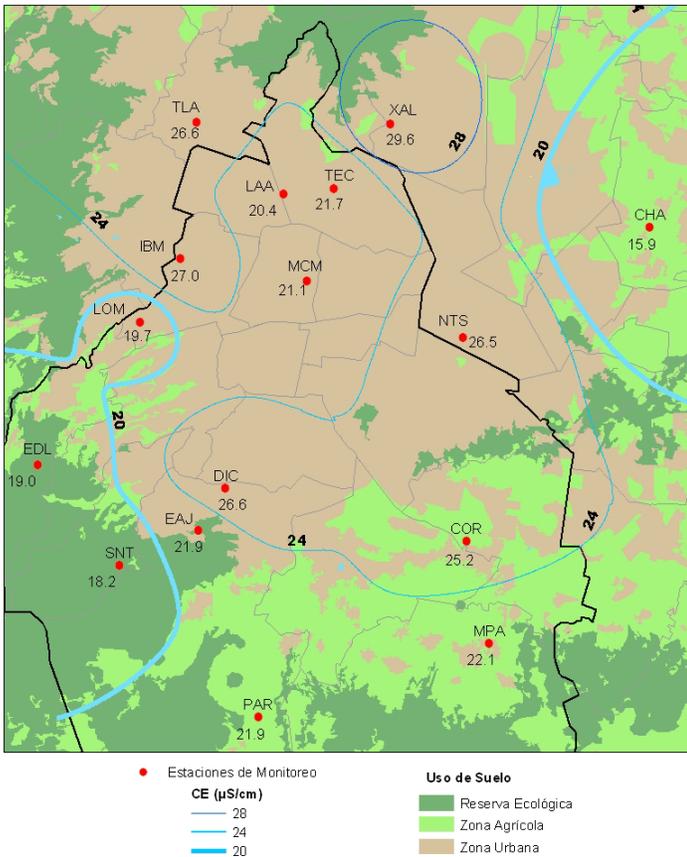
En el caso de la ZMVM, los resultados del Inventario de Emisiones 2004 (SMA, 2006) y las mediciones que realiza cotidianamente el SIMAT, indican que las emisiones de SO_2 y NO_x son mayores en las regiones centro, noroeste y noreste, lo cual se asocia con la afluencia vehicular y una mayor concentración de industrias. Esto se puede relacionar con el comportamiento espacial de la conductancia específica⁵ (CE) medida en el agua de lluvia (Mapa 2), que muestra que en estas regiones la precipitación pluvial contiene una mayor concentración de iones disueltos, como el SO_4^{2-} y el NO_3^- . Por su parte, en el sur de la Ciudad de México las emisiones son menores y en ésta predominan las áreas forestal y agrícola.

Además de lo anterior, en la ZMVM el patrón de viento predominante tiene una dirección norte – suroeste la mayor parte del año. Este fenómeno propicia que los contaminantes se trasladen hacia la región montañosa del sur de la Ciudad de México, donde se acumulan. En esta región las condiciones de presión y temperatura favorecen la condensación de la humedad atmosférica y con ello una mayor precipitación pluvial y una mayor deposición de contaminantes.

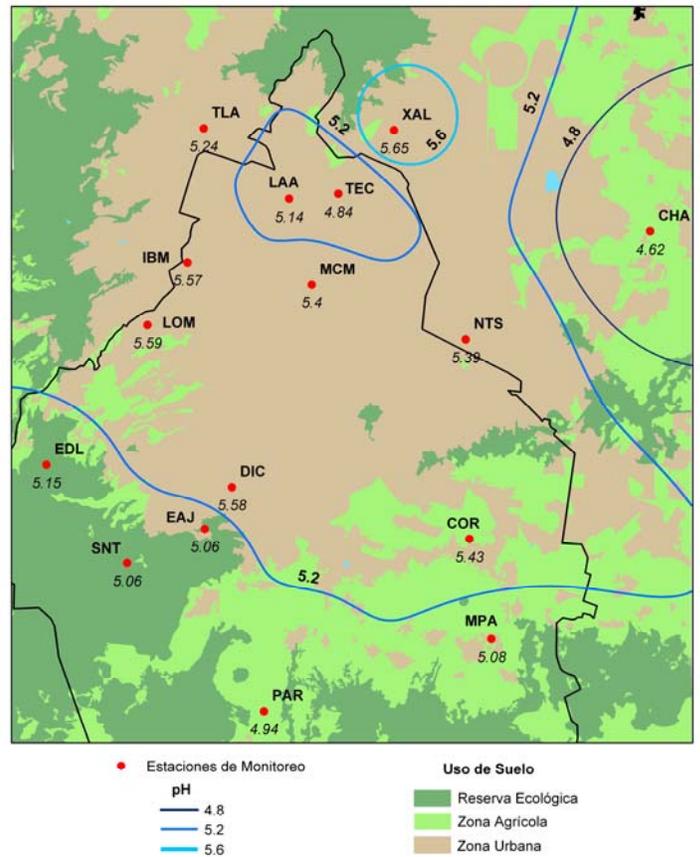
Por lo anterior, al explicar el proceso de transferencia con base en la distribución espacial del pH medido en el agua de lluvia durante el año 2006 (Mapa 3), se puede señalar que los contaminantes precursores de la acidez se emiten mayormente en el centro y norte de la Ciudad de México, y que estos se depositan en el suroeste, dando lugar a la precipitación pluvial con mayor acidez en la zona forestal y agrícola. Este fenómeno también se aprecia en el análisis espacial de SO_4^{2-} y NO_3^- registrados en el año 2006 (Mapas 4 y 5).

⁵ La conductividad eléctrica de una muestra de agua es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica, lo cual depende de la concentración total de iones, de su movilidad, su carga o valencia y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura. Debido a que la geometría de la celda de medición afecta los valores de conductividad, las mediciones se normalizan para compensar por variaciones en las dimensiones del electrodo.

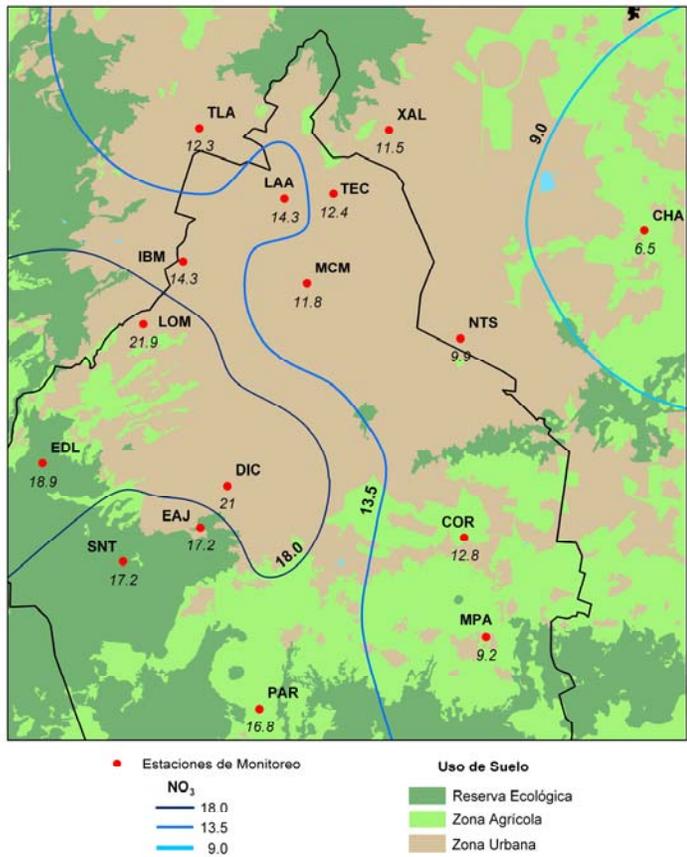
Mapa 2. Conductancia específica en la ZMVM, 2005



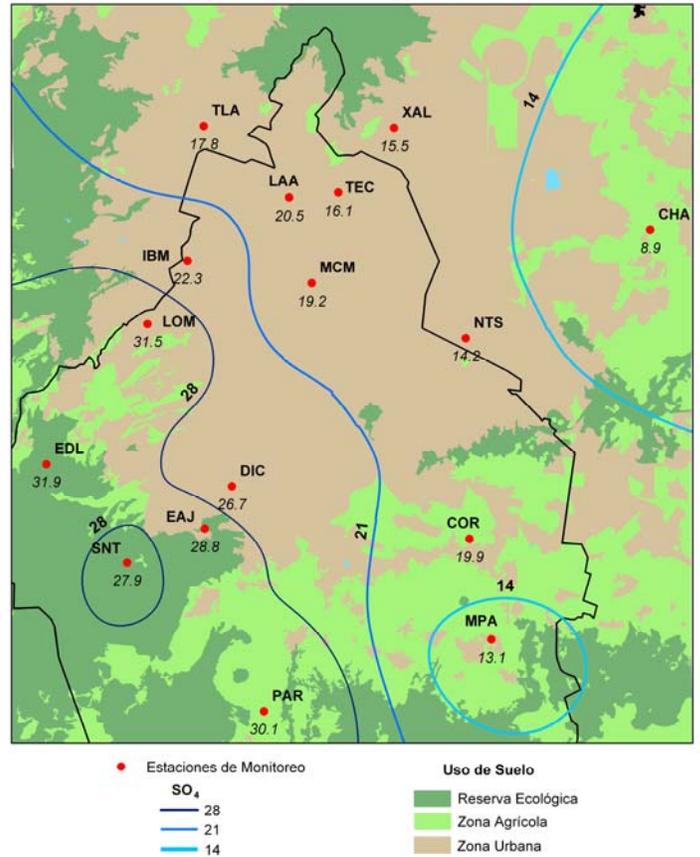
Mapa 3. Potencial de hidrógeno (pH) en la ZMVM, 2006.



Mapa 4. Depósito húmedo de NO_3^- (kg/ha) en la ZMVM, 2006.



Mapa 5. Depósito húmedo de SO_4^{2-} (kg/ha) en la ZMVM, 2006.

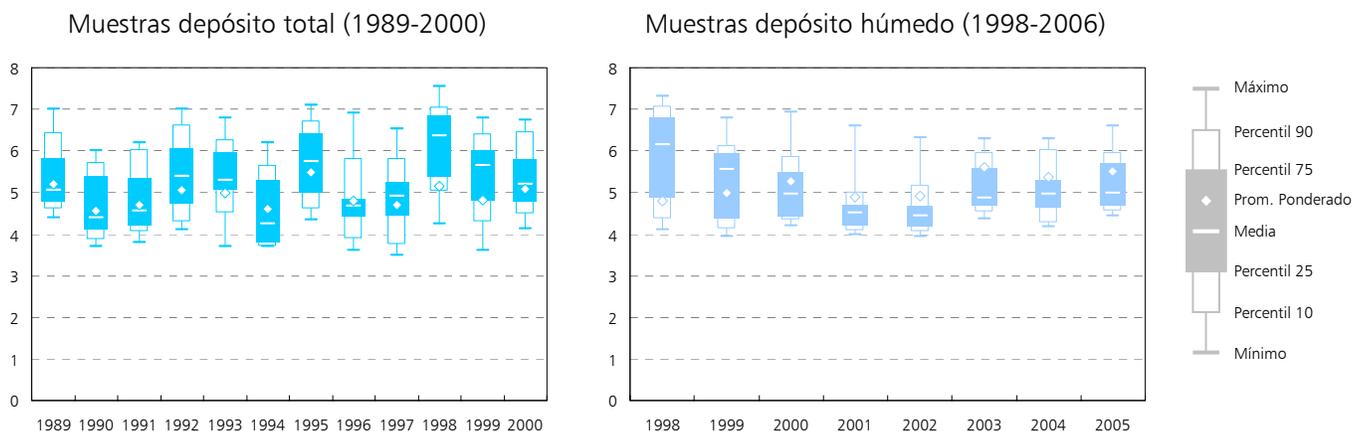


EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL pH EN LA ZMVM

La evolución histórica de los valores de pH en la ZMVM, indica fluctuaciones en la acidez de los depósitos total y húmedo. Sin embargo, sabemos que las muestras de depósito húmedo tienen una mayor representatividad del agua de lluvia.

Por su parte, la evolución del pH medido en depósito húmedo, indica un decremento en el número de muestras ácidas ($\text{pH} \leq 5.6$) a partir de 2001. La evolución del pH ponderado por volumen de precipitación pluvial, presenta un comportamiento fluctuante con valores máximos en 2003, 2004 y 2005, esto indica que la acidez es menor en los últimos años (Figura 2).

Figura 2. Evolución de las mediciones de pH en la ZMVM.



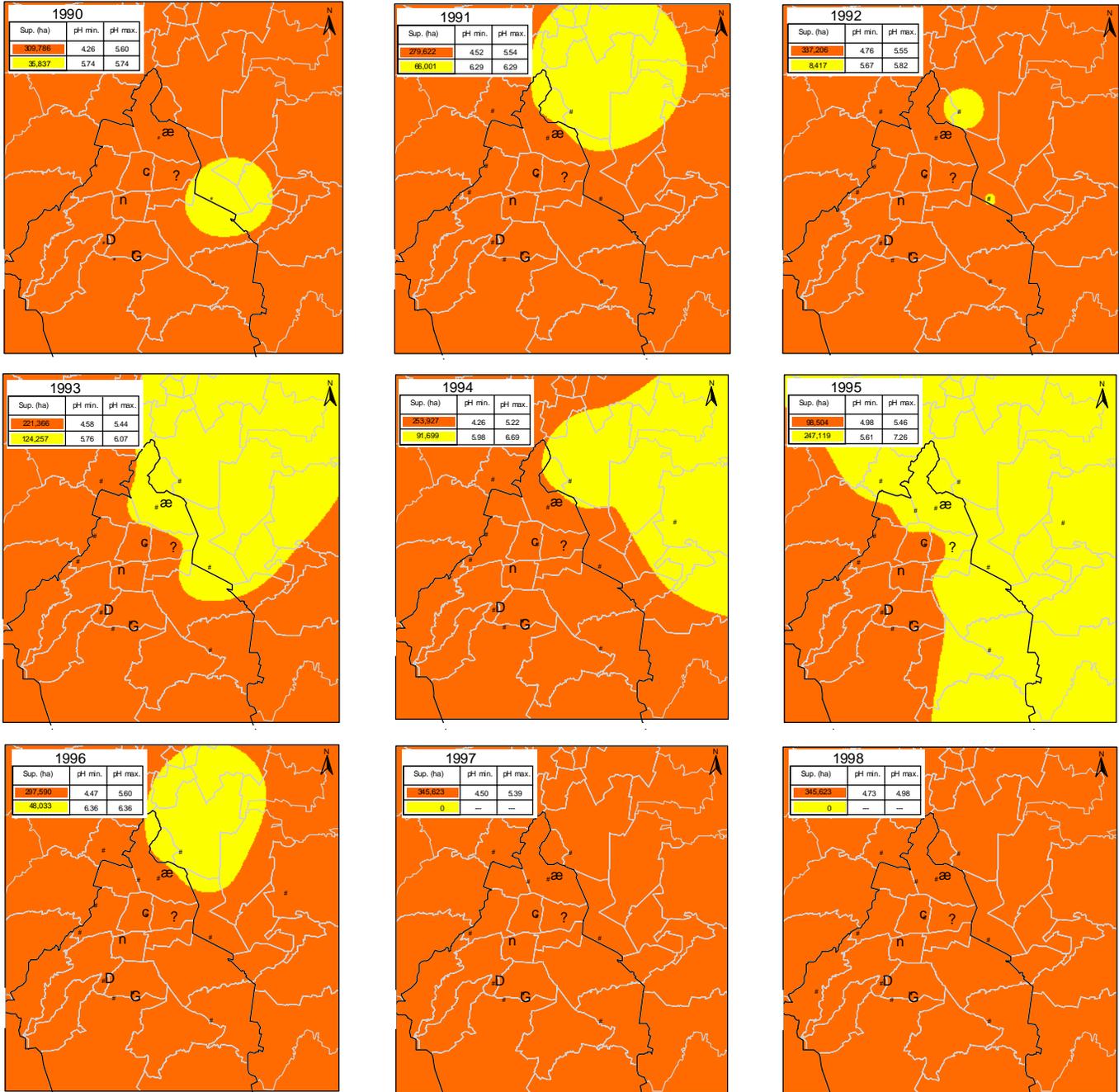
La distribución espacial mediante interpolación de distancias inversas a la cuarta potencia, del pH medido en depósitos total (1990-1996) y húmedo (1997-2005), indica que la superficie de la ZMVM que presenta lluvia ácida ($\text{pH} \leq 5.6$) ha disminuido a lo largo de los años. En el mapa de 1990, se muestra que el 90% de la superficie analizada presentaba eventos de lluvia ácida, mientras que en 2005 la superficie afectada era del 33% (Mapa 6).

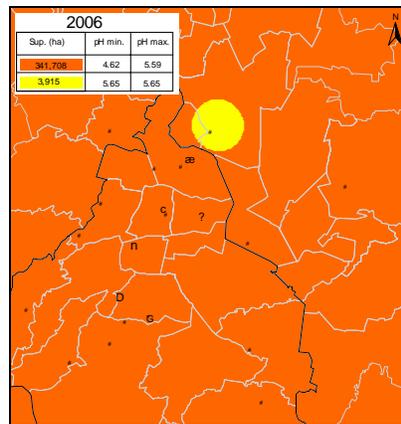
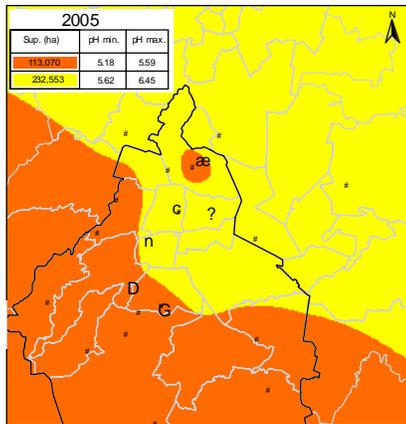
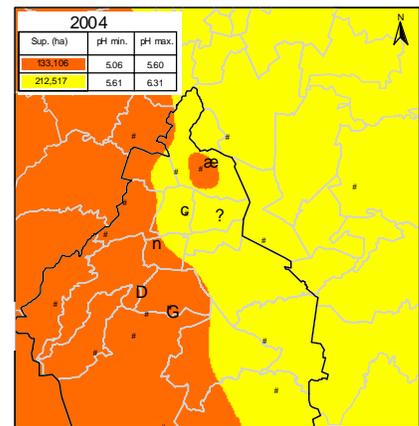
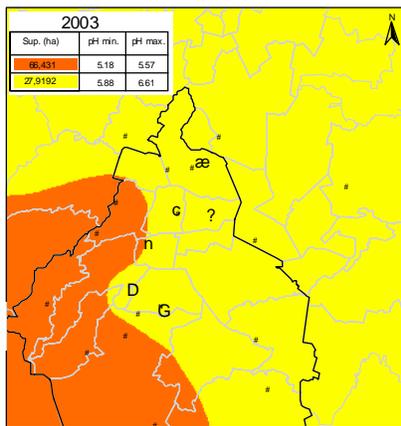
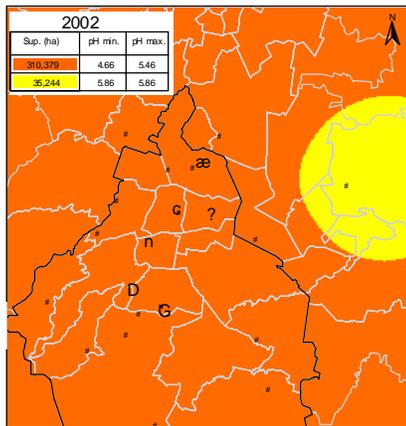
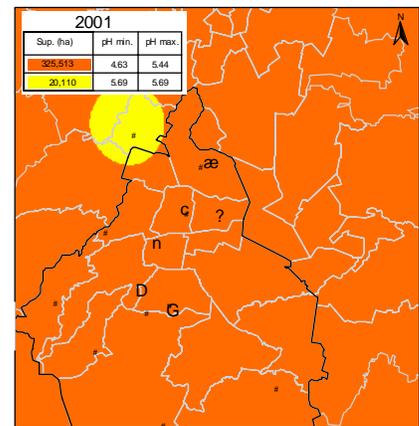
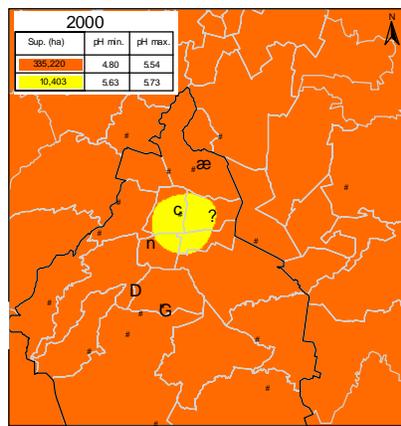
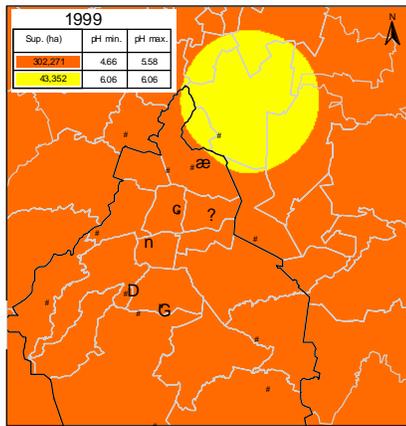
La distribución espacial del pH medido en depósito húmedo, indica que la superficie afectada por eventos de lluvia ácida fue mayor en 1997, 1998 y 2000. Precisamente en estos años, el SIMAT registró los niveles máximos de NO_x (Mapa 6).

El análisis espacial de superficie afectada indica que la región con suelo forestal y agrícola ha sido la más impactada desde 1990, lo cual puede incidir en su productividad y en los servicios ambientales que brinda a la ZMVM (Mapa 6).

En la época de lluvias de 2006, la ZMVM presentó valores ponderados de pH que oscilaron entre 4.62 (CHA) y 5.65 (XAL), esto indica que la acidez del agua de lluvia presentó la mayor variación en la zona noreste. En general, la precipitación pluvial presentó características ácidas y nuevamente la zona de conservación al sur del Distrito Federal, es de las más afectadas (Mapa 3)

Mapa 6. Distribución espacial del pH en la ZMVM (1990-2006).





- Estaciones de Monitoreo
- pH < 5.6
- pH > 5.6
- Sitios de referencia
- ? Aeropuerto
- æ Basílica
- ⊕ Estadio Azteca
- D C.U.
- n WTC
- c Zocalo

BIBLIOGRAFÍA

- SMA. 2006. "Inventario de Emisiones a la Atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México 2004". Secretaría del Medio Ambiente del GDF. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Inventario de Emisiones y Fuentes Estacionarias.
- SIMAT. 2002. "Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2001 para la Zona Metropolitana del Valle de México". Secretaría del Medio Ambiente del GDF. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.
- Vet, Robert J. 1991. "Wet Deposition: Measurement Techniques. The Handbook of Environmental Chemistry" Volumen 2 Parte F Reactions and Processes. Ed. Springer-Verlag Alemania