



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN

CIENCIAS QUÍMICAS

*“Estudio de la contaminación atmosférica  
en tres sitios perimetrales de la Ciudad de México:  
Santa Ana, Xicalco y Ávila Camacho”*

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

QFB. NORMA TREJO MEDINA



TUTOR: DRA. TELMA GLORIA CASTRO ROMERO

AÑO: 2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **AGRADECIMIENTOS:**

### **A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

Con especial agradecimiento a la Dra. *Telma Castro Romero* por su apoyo y paciencia.

A la *RAMA-GDF* por el uso de la Unidad Móvil en las tres campañas de muestreo.

Al CONACYT por el apoyo económico para llevar a cabo este estudio. Proyecto SEMARNAT-2002-C01.

A la Quím. Maria Isabel Saavedra por su apoyo en la enseñanza del análisis gravimétrico y del equipo utilizado en las campañas de muestreo.

A la Q. Ma. del Carmen Torres y al Dr. Hugo Padilla por el análisis químico de los iones inorgánicos por medio de cromatografía líquida (HPLC) y a la Dra. Rocío García y Raúl Belmont por el análisis químico por medio de espectrofotometría de absorción atómica.

# INDICE

## Resumen

## Objetivos

Objetivos Generales

Objetivos Particulares

## Justificación

## Capítulo 1

### 1.1 Introducción

1.1.1 Química Atmosférica

1.1.2 Zonas Urbanas y Semirurales

### 1.2 Calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

### 1.3 Métodos de Analíticos

1.3.1 Determinación de partículas

1.3.2 Análisis Gravimétrico

1.3.3 Análisis Químico

1.3.3.1 Cromatografía de intercambio iónico

1.3.3.2 Determinación de gases

## Capítulo 2

### Metodología

### 2.1 Sitios de muestreo

2.1.1 Santa Ana

2.1.2 Xicalco

2.1.3 Ávila Camacho

### 2.2 Equipos utilizados

### **Capítulo 3**

Análisis de Resultados y Discusiones

3.1 Gases

3.2 Partículas

3.2.1 Análisis Gravimétrico

3.2.2 Análisis de iones en Xicalco y Santa Ana

3.3 Balance iónico

### **Capítulo 4**

4.1 Conclusiones y Recomendaciones

### **Referencias**

### **Anexo. Estudio Estadístico**

## INDICE DE ABREVIATURAS

msnm	Metros sobre el nivel del mar
ZMCM	Zona metropolitana de la Ciudad de México
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
NO <sub>2</sub>	Bióxido de nitrógeno
SO <sub>2</sub>	Bióxido de azufre
HCHO	Hidrocarburos
O <sub>3</sub>	Ozono
HO	Oxidrilo
CO	Monóxido de carbono
UV	Ultravioleta
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
PM <sub>10</sub>	Materia particulada de 10 micrómetros de diámetro
PM <sub>2.5</sub>	Materia particulada de 2.5 micrómetros de diámetro
COV's	Compuestos orgánicos volátiles
HAP's	Hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos
Cl <sup>-</sup>	Ion cloruro
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Ion sulfato
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ion nitrato
Na <sup>+</sup>	Ion sodio
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ion amonio
Ca <sup>2+</sup>	Ion calcio
Mg <sup>2+</sup>	Ion magnesio
ha	Hectáreas
µm	Micrómetros
MOUDI	Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor, modelo 100
°C	Grados centígrados
HPLC	Cromatografía líquida de alto poder
µl	Microlitros
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
nm	Nanómetros
CENICA	Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental
DF	Distrito Federal
ppm	Partes por millón
ppb	Partes por billón
modo	Tamaño de partículas

## RESUMEN

En las zonas urbanas la contaminación del aire es causada principalmente por emisiones de gases y partículas. El uso de combustibles fósiles incrementa la concentración de gases, la presencia de aerosoles influye grandemente en la salud de los habitantes y en los ecosistemas.

El presente trabajo se desarrolló en tres lugares cercanos a la ZMCM, Xicalco (delegación Talpan), Santa Ana (delegación Milpa Alta) y Ávila Camacho (municipio de Ixtapaluca, Edo. de México), en estos sitios se analizó la atmósfera local para conocer si ésta es afectada por las emisiones de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Los tres sitios se caracterizan por encontrarse en áreas consideradas pasos de montaña de la Ciudad de México, con una altura que varía entre los 2,750 y 2,850 metros sobre el nivel del mar (msnm) y son poblaciones semi-rurales.

Los análisis de interés fueron: Tamaño de partículas, concentración de masa e iones (cloruro, sulfato, nitrato, sodio, amonio, potasio, calcio y magnesio) y concentración de gases ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$  y  $\text{SO}_2$ ).

Los análisis de las concentraciones de ozono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y monóxido de carbono; obtenidos en los tres sitios junto con los datos registrados por la RAMA (Red Automática de Monitoreo Ambiental); muestran que estos sitios son impactados de manera importante por la contaminación atmosférica generada en la ZMCM.

## **OBJETIVO GENERAL**

El presente trabajo es parte del estudio "*Ventilación de contaminantes de la Ciudad de México*". El principal objetivo es determinar el impacto de la contaminación generada en la ciudad sobre regiones vecinas a ella, realizando una comparación del comportamiento de los contaminantes atmosféricos generados en la ZMCM y tres sitios semi-rurales.

La realización de este estudio permitirá responder las siguientes preguntas ¿Los gases y partículas generadas en la ZMCM son ventilados a regiones fuera de ella? Si la ventilación ocurre ¿Cuál es la conexión entre la contaminación dentro y fuera de la ciudad?

### **Objetivos particulares**

- Realizar mediciones de gases y composición de partículas en tres zonas semi-rurales vecinas a la ZMCM.
- Analizar el comportamiento de gases para la ZMCM y tres sitios cercanos a ella.
- Analizar las propiedades químicas de las partículas en tres sitios cercanos a la ZMCM.

## JUSTIFICACIÓN

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México presenta un grave problema de contaminación atmosférica. El aumento de la población, del parque vehicular, el uso de combustibles no adecuados para zonas con las características de la Zona Metropolitana de Ciudad de México y de la actividad industrial, aunado al decremento de las zonas boscosas, han aumentado la generación de gases y aerosoles, los cuales tienen un gran efecto sobre la salud de los habitantes, el clima y la visibilidad de la zona.

Estudios anteriores demuestran que la contaminación generada en zonas urbanas es transportada fuera de las mismas afectando a zonas rurales, incrementando de esta forma la concentración de los contaminantes en esos sitios (Castro et al, 2003; Roy M. Harrison, 2005).

Este trabajo pretende determinar los impactos generados por los contaminantes producidos en la ZMCM sobre sitios cercanos. Trabajos anteriores muestran la relación entre el tamaño y composición química de las partículas. Los resultados obtenidos permitirán emitir recomendaciones que ayuden en el mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad de México e indirectamente mejorar la calidad del aire de las zonas cercanas.

## **CAPITULO 1.**

### **1.1 INTRODUCCIÓN.**

#### **1.1.1 QUÍMICA ATMOSFÉRICA**

La atmósfera terrestre es una mezcla de gases en diferentes proporciones fijas o variables. Gracias a la presencia de la atmósfera, nuestro planeta posee presión y una temperatura promedio de 16° C. (Jacobson et al, 2002). Durante millones de años la atmósfera terrestre ha tenido modificaciones, en una escala de corto tiempo la producción y pérdida de constituyentes atmosféricos están balanceadas y las concentraciones de las diferentes especies involucradas no varían.

La contaminación de la atmósfera se origina por la emisión de gases y partículas de origen biogénico o antropogénico; si éstos se emiten directamente a la atmósfera se les llama contaminantes primarios, mientras que si se forman en ella como producto de las reacciones entre los contaminantes primarios, reciben el nombre de contaminantes secundarios (Seinfeld y Pandis, 1998). Entre ambos tipos de contaminantes se llevan a cabo reacciones químicas, lo que tiene como resultado la transformación de los mismos, estas reacciones se describen a continuación:

El fenómeno de nucleación se origina cuando especies con baja presión de vapor se condensan formando una nueva partícula, se clasifican en dos clases: la primera es la nucleación homogénea que ocurre cuando los gases involucrados originan una nueva partícula sin ayuda de una superficie y la segunda es denominada nucleación heterogénea, donde existe una superficie en donde los gases se condensan.

La coagulación es un fenómeno físico de choque entre partículas, dando como resultado la adherencia de las partículas involucradas. La coalescencia es un proceso mediante el cual las partículas chocan entre sí formando partículas de mayor tamaño. Las transformaciones químicas pueden dar origen a la formación de nuevas especies y a la eliminación de las originales; la secuencia fuente-transporte-eliminación define la vida media de las especies (Jacobson, 2002).

La fotoquímica en la troposfera está dominada por especies como O<sub>3</sub> (ozono), NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno), SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) e HCHO (hidrocarburos), las cuales absorben luz en la región ultravioleta (UV).

Procesos fotoquímicos primarios: La absorción por radiación por una molécula, conduce a una excitación electrónica. Este proceso se puede representar simbólicamente como:



La molécula excitada AB\* tiene diferentes fases y varias de ellas ocurren en la atmósfera, pueden emitir energía como radiación (fluorescencia), disiparla por colisiones, utilizar la energía para transformaciones químicas (isomerización, disociación, ionización, etc).

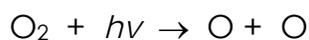
<b>AB*</b> ESPECIE EXCITADA	{	Disociación	A + B*
		Ionización	AB <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>
		Luminiscencia	AB + λν
		Transferencia de energía intermolecular	AB + CD*
		Transferencia de energía intramolecular	AB*
		Estabilización por colisiones	AB + M
		Reacción química	Especies químicamente diferentes

Las rutas de ionización y disociación conducen a la fragmentación de una clase en otra. El proceso de luminiscencia o re-emisión de radiación tiene dos variantes, se llama fluorescencia cuando la re-emisión es inmediata y, de lo contrario, fosforescencia. Si las especies excitadas se originan de una reacción química, la emisión de luz se llama quimiluminiscencia. Las transformaciones de energía intramolecular e intermolecular involucran población de otras especies excitadas que se produjeron primero por excitación. La transferencia de energía intramolecular excita a diferentes moléculas, las cuales frecuentemente son de naturaleza química distinta a las especies que absorbieron la energía. La estabilización por colisiones es un caso de energía intramolecular donde la excitación electrónica se degrada a modos vibracionales, rotacionales y traslacionales. El proceso de reacción química incluye todos los procesos donde la reacción es posible para cambios que están enlazados con reactantes electrónicamente excitados (Wayne, 1995).

La formación del "smog" fotoquímico involucra una compleja dinámica de reacciones. Las temperaturas en las máquinas en combustión interna hacen que el oxígeno y nitrógeno reaccionen de la siguiente forma:



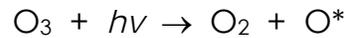
El oxígeno molecular se fotoliza y produce átomos de oxígeno:



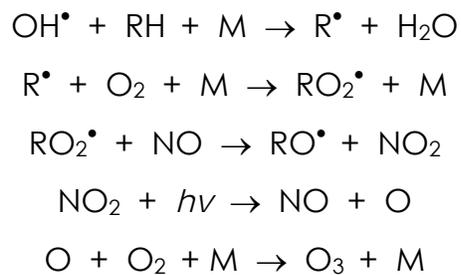
El ozono se forma por reacción de un tercer cuerpo (M) con un átomo de oxígeno libre y uno molecular.



El ozono formado se fotoliza, obteniendo una molécula de oxígeno y un átomo de oxígeno excitado.



Las reacciones químicas que se llevan a cabo en la formación del "smog" fotoquímico se pueden resumir como sigue:



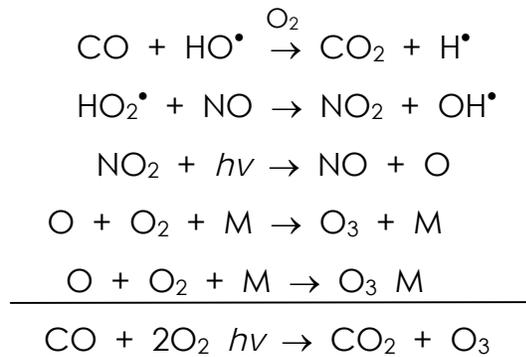
Donde RH son hidrocarburos generados por vapores o por una mala combustión de gasolina y R<sup>•</sup> es un radical libre orgánico. En la Ciudad de México existe una gran insolación, así que la interacción de NO<sub>2</sub> con luz incrementa la producción de ozono.

En general podemos decir que la formación de "smog" puede representarse por:

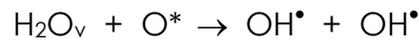


Donde HC son hidrocarburos estables.

Otro componente importante es el monóxido de carbono (CO). La oxidación del CO puede resumirse con las siguientes reacciones:

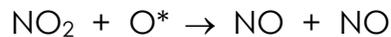


Estos átomos de oxígeno excitados, también pueden reaccionar con otros constituyentes, por ejemplo, el vapor de agua.

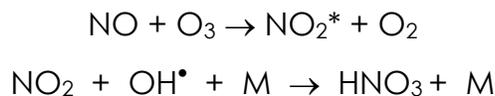


A través de esta reacción se produce uno de los más importantes constituyentes químicos presentes en la atmósfera, el radical hidroxyl. Este radical reacciona muy eficientemente con hidrocarburos, CO y algunos elementos tóxicos.

También los átomos de oxígeno excitados pueden reaccionar con óxido nitroso y generar óxido nítrico.



Los óxidos de nitrógeno también participan en otras reacciones.



En la última ecuación se forma el ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  a partir del dióxido de nitrógeno y el radical hidroxyl, este proceso en la atmósfera hace que los  $\text{NO}_x$  se consuman y formen lluvia ácida (Wayne, 1995).

### 1.1.2 ZONAS URBANAS Y SEMIRURALES

En el área urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) la contaminación atmosférica es un problema que ha tenido un aumento considerable en los últimos 20 años; esto debido al incremento de la población, que conlleva a la deforestación de áreas boscosas para usarlas como zonas habitacionales y provocando erosión del suelo. El incremento de los medios de transporte e industrias ha provocado aumento en las emisiones de contaminantes primarios, así como el uso de combustibles inadecuados (Bravo et al, 1987; Jialiang Feng et al, 2006) favoreciendo la presencia de partículas en el aire que tienen impacto en la salud de los habitantes de la ZMCM (Edgerton et al, 1999).

La ciudad de México se encuentra rodeada por montañas que forman una barrera natural que impide la circulación de los vientos, teniendo como consecuencia una baja ventilación, además de existir en la zona sistemas de alta presión, lo anterior favorece la estabilidad atmosférica evitando así la dispersión de los gases y partículas que se encuentra en el área ([www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx) última visita 12/sep/2007, Jialiang Feng et al, 2006; Carvalho et al, 2005).

En 1998 como parte del proyecto *Investigación Sobre Partículas y Deterioro Atmosférico* (Aerosol and Visibility Evaluation Research), se realizaron estudios de los patrones meteorológicos de la Cuenca de México, basándose en el modelo meteorológico de meso escala RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, por sus siglas en inglés), en este estudio se identificaron algunos procesos responsables del transporte de contaminantes como son la difusión vertical, transporte horizontal, recirculación, convergencia cerca de la superficie y ventilación de la cuenca (Fast et al, 1998).

La eliminación de los contaminantes generados en la ciudad se presenta en ciclos diurnos, en base a estudios teóricos se sugiere que zonas cercanas a la ciudad de México pueden ser afectadas por la movilidad de la masa de aire contaminante (Whiteman et al, 2000; Raga et al, 2001; Castro et al, 2006; A. Márquez et al, 2005). Es de suma importancia conocer el impacto que tienen las emisiones de contaminantes generadas en la ZMCM sobre zonas aledañas, en 1997 las emisiones de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se estimaron en 7,032 Ton/año y 4,568 Ton/año respectivamente (Doran et al, 1998, PROAIRE 1995-2000). Se sabe que la capa de mezcla sobre la ciudad de México puede alcanzar una altura de 3 Km, es posible que parte de la contaminación pueda ser transportada fuera de la ciudad e impacte en el ambiente de áreas vecinas (Salcido et al, 2003; Doran, 1998; Whiteman et al, 2001).

En las zonas urbanas los principales contaminantes son: partículas, polen, óxidos de azufre, ozono, metano, óxidos de nitrógeno, monóxido y dióxido de carbono, iones como el amonio, nitrato, sodio, cloruro y metales (Seinfeld and Pandis, 1998). Los contaminantes pueden ser transportados horizontal y verticalmente en el lapso comprendido entre su emisión y depositación. Los procesos de eliminación física son depositación seca, en la cual las especies se adsorben en el suelo, agua o superficie de las plantas y depositación húmeda en la que los constituyentes se incorporan en los elementos de precipitación (nubes, gotas de lluvia y aerosoles) y son arrastrados a la superficie terrestre (Seinfeld and Pandis, 1998).

La presencia de contaminantes en las zonas rurales se ve afectada por el transporte de contaminantes de ciudades que se encuentren cercanas, esto debido a la dirección de los vientos que permiten el transporte de los mismos. Debido al movimiento de masas de aire la concentración de contaminantes puede disminuir por difusión o aumentar al incorporarse partículas de otras fuentes

lejanas que también han sido transportadas por los vientos (Roy M. Harrison, 2005; Vana et al, 1999).

Dentro de los contaminantes atmosféricos las partículas de fracción respirable tienen severos efectos en la salud de los seres vivos (Castillejos et al, 2000; Chang et al, 1999; Moolgavkar, 2000). Las investigaciones muestran que las concentraciones más altas de partículas se registran en las áreas urbanas y en aquellas cercanas a grandes avenidas o autopistas (Roy M. Harrison et al, 2005; S. Mogo et al, 2005; Hideman et al, 1991). En los seres humanos el diámetro de las partículas que respiramos es importante, aquellas partículas cuyo diámetro sea superior a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) son retenidas en la nariz, mientras que las de diámetro de  $2.5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) afectan las vías respiratorias bajas, ya que no encuentran barreras físicas y llegan hasta los alveolos, siendo muy difícil su expulsión (Jacobson, 2002; Roy M. Harrison et al, 2005).

Las partículas sólidas y/o líquidas que se encuentran suspendidas en un gas son denominadas aerosoles, éstos pueden ser emitidos en forma directa a la atmósfera o formados mediante procesos fisicoquímicos (Jacobson, 2002). Si las partículas son líquidas forman las nubes o el rocío, si son sólidas los humos y tolvaneras (Wark et al, 1997).

La presencia de aerosoles tiene otros efectos en el clima, intervienen en la dispersión y absorción de la luz solar logrando que llegue menos radiación a la superficie terrestre (Castro et al, 2003; S. Mogo et al, 2005), en contraste con los sulfatos que presentan un efecto antagónico. Por lo anterior los ecosistemas se ven afectados, tanto por las variaciones de temperatura como por la cantidad de energía solar, sin olvidar que la vida de diversas plantas y animales tanto terrestres como acuáticos, depende del cambio entre el día y la noche.

México y otros países centroamericanos son vulnerables al cambio climático, ejemplo de esto tenemos la severa sequía que se presentó en 2001, donde vastas regiones de Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua (Petrich 2001). En nuestro país se han realizado estudios teóricos sobre los efectos que provoca la contaminación en los cultivos de café, sorgo, trigo, cártamo, cebada y maíz; estas investigaciones pronostican una drástica disminución en la producción agrícola para el año 2020 (Conde et al, 2000; Flores et al, 1996, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch), última visita 12/sep/2007).

## 1.2 CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO.

El aumento considerable de algunos contaminantes aunado a condiciones atmosféricas desfavorables para su dispersión, han dado como resultado alteraciones en la salud de los habitantes de las zonas urbanas. Las enfermedades a nivel de vías respiratorias cada vez son más abundantes; las partículas  $PM_{2.5}$  se instalan en los alveolos y afectan al sistema respiratorio, además de aumentar el riesgo de enfermedades cardiovasculares; estudios recientes han sugerido que los efectos en la salud pueden ser causados más por la concentración que por la cantidad de masa (Mc Murry, 2000; Laden et al, 2000). Los compuestos tóxicos pueden ingresar vía torrente sanguíneo y llegar hasta los riñones e hígado, donde serán filtrados y eliminados; dependiendo de la concentración, naturaleza química y frecuencia del contaminante, estos tejidos pueden ser dañados (Lighty et al, 2000).

En la ciudad de Bogotá se estableció la relación entre la concentración de partículas menores a 10 micrones ( $PM_{10}$ ) y las enfermedades respiratorias en niños menores de 14 años (Solarte et al, 2002). Se reporta que las partículas menores de 2.5 micrones ( $PM_{2.5}$ ) estas son responsables de la disminución en la visibilidad, enfermedades respiratorias crónicas, cáncer y muerte prematura (Shendrikar et al, 2003; Seung Joo et al, 2005; Lighty et al, 2000; Jin Xu et al, 2006).

La ZMCM es considerada una de las zonas más densamente pobladas del mundo. La ciudad se encuentra a 2,240 metros sobre el nivel del mar (msnm), en el año 2000 contaba con una población aproximada de 17.8 millones de habitantes y una superficie de 145,000 ha ([www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx), última visita 12/sep/2007).

Después de un análisis de datos históricos se estima que el calentamiento global observado durante el siglo XX se debe muy probablemente (90% de confianza) al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero causado por actividades humanas ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch), última visita 12/sep/2007).

En la ZMCM el clima ha sufrido cambios, hasta hace unos años podíamos decir que el clima se dividía en tres épocas bien definidas, los meses de noviembre a febrero se caracterizaban por la presencia de un clima frío y poca precipitación pluvial, los meses de marzo a abril se distinguían por un calor seco, mientras que los meses de mayo a octubre presentaban abundantes lluvias (Jauregui et al, 1993; Oke et al, 1999), situación que en los últimos años ha cambiado debido a la variación climática y en parte por el drástico cambio que ha sufrido el ecosistema del área, las zonas forestales que rodean la ciudad se han visto disminuidas en tamaño, parte se han utilizado para la agricultura, así como para uso habitacional o industrial, existiendo también una indiscriminada tala clandestina, lo que genera una menor precipitación pluvial, que conlleva a una menor recarga de los mantos acuíferos.

Podemos decir que las condiciones climáticas, la topografía, la población, el uso de la tierra, las fuentes de contaminantes y el estilo de vida, tienen un importante impacto en la calidad del aire de la región (Jialiang Feng et al, 2006; Cheng et al, 2000). Los estudios realizados en zonas urbanas donde se relacionaron la concentración de partículas, las horas de máximo tráfico y la geografía del lugar, demostraron que generalmente es al mediodía donde se registra la mayor concentración de partículas menor a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) (Roy M. Harrison, 2005; Nilson et al, 2001).

Estudios en la ZMCM al igual que en otras ciudades, como Los Ángeles, han demostrado que el deterioro de la calidad del aire puede ser atribuido primero a la emisión de gases y partículas, seguido de la producción de contaminantes secundarios a través de procesos fotoquímicos (Jaimes, 2004; Raga et al, 2001). En la ZMCM la contaminación a lo largo del año demuestra una mayor concentración de partículas en la época invernal, contrastante con una menor concentración en los meses de verano ([www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx), última visita 12/sep/2007).

En la ZMCM las estimaciones actuales de las emisiones de partículas PM<sub>10</sub> indican que el 40% de ellas provienen del suelo y la vegetación, seguidas de las fuentes móviles con el 36%. En esta zona se generan 1,768,836 toneladas de monóxido de carbono (CO), 205,885 toneladas de óxidos de nitrógeno (NOx), 475,021 toneladas de hidrocarburos (HC), 22,466 toneladas de bióxido de azufre (SOx) y 19,889 toneladas de partículas suspendidas (Castro et al, 2006; [www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx), última visita 12/sep/2007).

Se puede concluir que el tamaño, concentración, naturaleza y morfología de las partículas suspendidas en el aire tienen afecto en el balance de energía radiactiva local y en la atmósfera global, a demás de causar enfermedades tanto en humanos como en animales, estos contaminantes pueden tener su origen en fuentes antropogénicas o naturales (Jacobson et al, 2002; Molnar-Meszaros, 2001; Mogo et al, 2005).

Cuando una ciudad crece en tamaño es inevitable la demanda de recursos para su funcionamiento, tales como industrias, centros escolares, zonas habitacionales, medios de transporte, toda esta prosperidad económica va aunada a un deterioro de la zona geográfica. Se genera tala de bosques provocando erosión del suelo, generación de contaminantes provenientes de las industrias, transporte

y zonas habitacionales. En la ZMCM se han realizado diversos proyectos que tienen como único fin mejorar la calidad del aire.

Los principales proyectos realizados para mejorar la calidad del aire en nuestra ciudad son:

“Programa Coordinado para el mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México” 1979-1982.

“Veintiún Medidas para Controlar la Contaminación en el Valle de México” 1986.

“Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en Zona Metropolitana del Valle de México” (PICCA) 1989.

“Mexico City Air Quality Research Initiative (MARI)”, inviernos 1990-1993.

“Programa Integral para el control de la contaminación Atmosférica 1990-1994” (SEMARNAT 1991).

“Programa para el Mejoramiento la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000” (<http://www.ine.gob.mx>, octubre 21- 2007, Proaire 1995-2000).

“Investigación sobre partículas y deterioro atmosférico (Aerosol and Visibility Evaluation Research)” Investigación enfocada a identificar: la naturaleza de las partículas PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> (Doran et al, 1998; Edgerton et al, 1999).

“Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 2002-2010” dada la baja calidad que el aire presenta en la ZMCM, este proyecto tiene enormes retos que se agrupan en: reducción en la generación de partículas PM<sub>10</sub>,

óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles (COV's), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y ozono (O<sub>3</sub>).

“Investigación sobre el impacto local y Global de la contaminación de la Ciudad de México” (Megacity Impact Local and Global Research Observation: Mexico City). Campaña Marzo 2006.

De todos estos programas no ha surgido una estrategia aceptable para minimizar y controlar la contaminación atmosférica de la ZMCM (Dr. Humberto Bravo, comunicación personal).

## 1.3 METODOS ANALITICOS

### 1.3.1 Determinación de partículas.

Durante la campaña en Santa Ana y Xicalco se realizaron mediciones de partículas con el equipo MOUDI (Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor, modelo 100). Este equipo es un impactor de cascada que permite muestrear aerosoles y cuenta con 8 etapas para separar partículas con diámetros aerodinámicos de 10, 5.6, 3.2, 1.8, 1.0, 0.56, 0.32 y 0.18 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ).

En el equipo existen micro orificios que permiten recolectar partículas a bajas velocidades de flujo y al mismo tiempo evitan caídas excesivas de presión, las cuales se pueden presentar en las diferentes etapas del impactor, cuenta con dos manómetros que indican la caída de presión en las etapas 10-1.8 $\mu\text{m}$  y 1.0-1.8 $\mu\text{m}$ ; la caída de presión indica que algunos micro orificios están obstruidos (Figura 1.1)



Figura 1.1 El impactor MOUDI en su estructura giratoria y una etapa con su plato de impacto.

El aire muestreado es introducido al MOUDI a una velocidad promedio de 30 litros por minuto;  $Q_{\text{moudi}} = 30 \text{ LPM}$ ; las distintas etapas del equipo son giratorias y al rotar provocan un movimiento uniforme de los orificios con lo que se obtienen depósitos homogéneos de partículas sobre cada plato de impactación; cada plato contiene un sustrato de aluminio (47 mm) el cual se fija mediante imanes impidiendo su movimiento. Las partículas más grandes son colectadas en la etapa superior, mientras que las de menor tamaño continúan la trayectoria en la corriente de aire, hasta ser separadas de acuerdo a su diámetro aerodinámico. En cada etapa se separan las partículas de acuerdo al diámetro de los micro orificios (Marple et al, 1991). La figura 1.2 muestra el corte transversal de dos etapas del impactador.

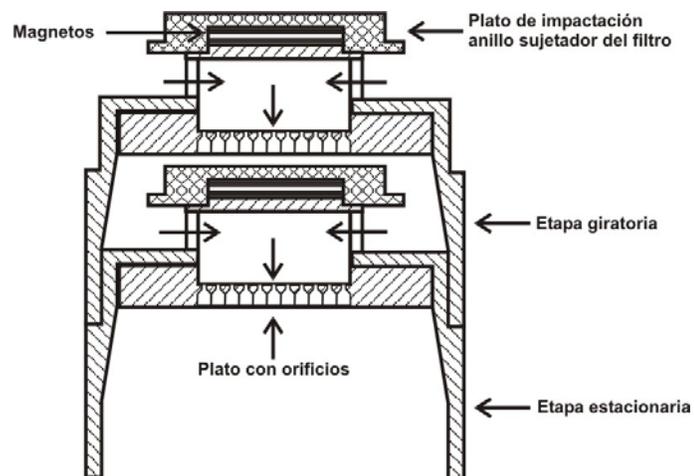


Figura 1.2. Corte transversal de dos etapas del MOUDI.

Al inicio de cada campaña el impactor MOUDI es calibrado tanto en el laboratorio como en el lugar de muestreo con el sistema Gilian Gilibrator II. (Manual de operación del equipo, [www.sensidyne.com](http://www.sensidyne.com), última visita 15/sep/2007). Este sistema es un estándar primario de fácil uso para la calibración de equipos de muestreo de aire. La variable principal que debe controlarse en el MOUDI es el flujo de aire que pasa a través él (30 LPM). Esto se logra debido a que el equipo tiene dos manómetros (uno para la sección de partículas grandes y otro para las finas) que controlan la presión en el interior de cada etapa. Los muestreos de partículas se realizaron bajo las siguientes condiciones de presión y temperatura ambiente: Santa Ana: 570 mm Hg, 20 °C y Xicalco: 565 mm Hg, 20 °C.

Al terminar el tiempo de muestreo los sustratos son trasladados al laboratorio para su análisis, el traslado no representa dificultad ya que se cuenta con cubiertas selladas para facilitar el transporte, tanto los sustratos como los platos de impactación son intercambiables.

El funcionamiento del impactor en cascada MOUDI se caracteriza por un sistema de curvas que muestran la eficiencia de recolección de partículas en cada etapa. Teóricamente las curvas presentan pendientes infinitas, todas las partículas con diámetros mayores que el diámetro nominal serán colectadas y las partículas menores pasaran a la siguiente etapa.

Para cada etapa existe un tamaño nominal de partículas que pueden ser colectadas como se muestra en la Tabla 1.

La Figura 1.3 muestra la eficiencia de colección en el MOUDI, entre menor es el diámetro aerodinámico de la partícula mayor es la eficiencia del equipo, las pérdidas de material son directamente proporcionales al tamaño de la partícula. En las etapas con diámetro superior a 15  $\mu\text{m}$ , la pérdida puede llegar a ser del 20%, pero en las etapas de 3.2 y 0.18  $\mu\text{m}$  es cercana al 2%.

Tabla 1 Tamaños nominales. Tomada de Aerosol Science and Technology (1991).

ETAPA	Tamaño nominal ( $\mu\text{m}$ )	Calibración ( $\mu\text{m}$ )	Número de orificios en la etapa
<i>entrada</i>	18	18	1
1	10.0	9.9	3
2	5.6	6.2	10
3	3.2	3.1	10
4	1.8	1.8	20
5	1.00	1.00	40
6	0.56	0.56	80
7	0.32	0.32	900
8	0.18	0.18	900

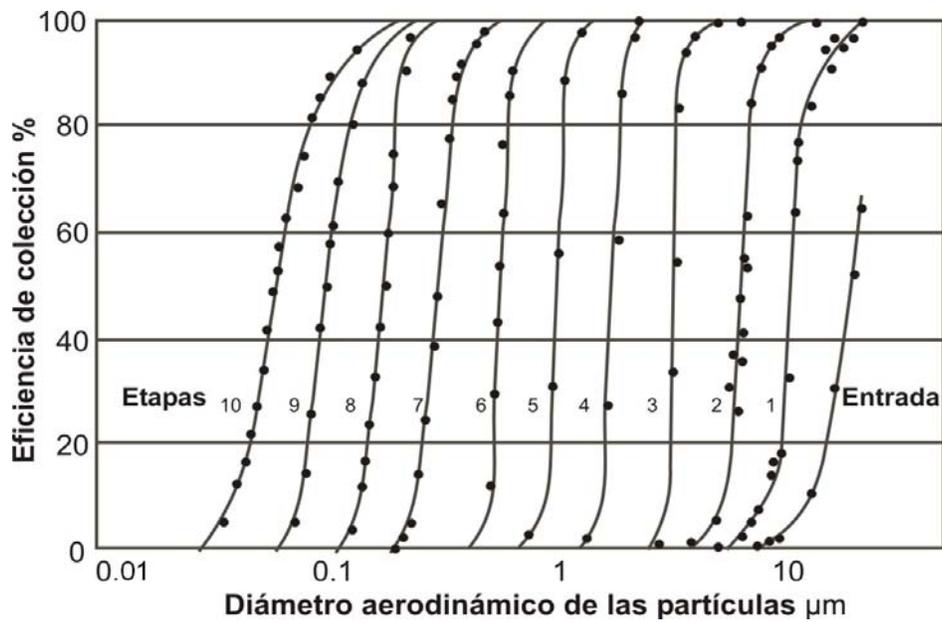


Figura 1.3 Curvas de eficiencia de colección de las partículas.

(Marple et al, 1991)

### 1.3.2 Análisis gravimétrico.

Para el análisis gravimétrico se pesan los sustratos de aluminio en una balanza analítica (Marca Sartorius RC 210, Modelo MC1, sensibilidad 0.01 µg) antes y después de haber realizado la medición. La concentración de las partículas en el ambiente se determina utilizando los pesos de los platos, el tiempo de uso del MOUDI y el flujo de alimentación de aire de  $Q_{\text{moudi}} = 30$  LPM (ver ecuación 1 y 2).

$$\text{Concentración} \left[ \frac{\text{g}}{\text{L}} \right] = \frac{\text{Material total en el sustrato}}{Q_{\text{moudi}} \times \Delta \text{ tiempo de uso MOUDI}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$$\text{Material total en el sustrato} = \text{peso del sustrato}_{\text{final}} - \text{peso del sustrato}_{\text{inicial}} \quad \text{Ec. 2}$$

Todos los sustratos antes de ser utilizados deben de ser acondicionados para eliminar la materia orgánica que pudiera estar presente en ellos. Los sustratos se introducen en una mufla a 450°C y permanecen un mínimo de 8 horas, posteriormente se pasan a una habitación con condiciones de humedad y temperatura controladas (menos del 40+/-10 % de humedad y aproximadamente 20+/-°C) donde permanecen durante 24 horas. Terminada la etapa de estabilización los sustratos son pesados (peso inicial), colocados en cajas petri y sellados con parafilm, si no se usan inmediatamente se guardan en el refrigerador hasta el momento de ser usados en el MOUDI (Mc Murry, 2000).

Terminado el tiempo de exposición en el MOUDI los sustratos se colocan en cajas petri y se sellan con parafilm, con ello se evita la pérdida de compuestos orgánicos volátiles y la adición de materia particulada. Finalmente los sustratos se pesan (peso final).

Es muy importante tomar en cuenta la volatilidad de los compuestos, los filtros usados en la recolección de muestras son afectados por cambios en la temperatura, la pérdida de compuestos puede afectar la concentración y composición química de la muestra de aerosol (Mc Murry 2000).

Como en todos los equipos existen errores experimentales que pueden presentarse al realizar mediciones. Dentro de las principales causas de error son:

- Cambios de presión que generan variaciones en la temperatura, en la velocidad y en la humedad relativa de las partículas (Biswas y Flagan, 1984).
- Variaciones en el flujo de aerosol, que lleva a que los tamaños nominales en cada etapa cambien.
- Variación en la densidad del aire que puede afectar los tamaños nominales de las partículas en las etapas del MOUDI, ya que la densidad del aire cambia con la altitud..
- Error aleatorio en el peso de las muestras.

### **1.3.3 Análisis químico.**

El contenido de iones inorgánicos se determinó por cromatografía líquida de intercambio iónico empleando un cromatógrafo Perkin-Elmer.

#### **1.3.3.1 Cromatografía líquida de intercambio iónico**

La cromatografía líquida HPLC (High Performance Liquid Chromatography, por sus siglas en inglés) de intercambio iónico se utilizó para la determinación de los iones inorgánicos sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ).

En la cromatografía iónica basada en supresores, la columna supresora de eluyente se coloca inmediatamente después de la columna de intercambio de iones. La columna supresora se empaqueta con una resina de intercambio de iones, que convierten de forma efectiva los iones de disolvente eluido a una especie molecular de limitada ionizabilidad, sin afectar a la conductividad debida a los iones del analito.

Existen dos tipos de columna supresora dependiendo de la naturaleza iónica del analito.

1. Separación de cationes, en este caso se usa el ácido clorhídrico como reactivo eluyente y la columna supresora es una resina de intercambio de aniones en forma de hidróxido, esta segunda columna no retiene los cationes del analito.
2. Separación de aniones, en la columna supresora se utiliza la forma ácida de una resina de intercambio de cationes, con el bicarbonato o carbonato de sodio como eluyente.

Las reacciones que se llevan a cabo en cada caso son:

<b>TIPO DE SEPARACIÓN</b>	<b>REACCIÓN QUE SE LLEVA A CABO</b>
catiónica	$\text{H}^+_{(\text{ac})} + \text{Cl}^-_{(\text{ac})} + \text{resina}^+\text{OH}^-_{(\text{s})} \rightarrow \text{resina}^+\text{Cl}^-_{(\text{s})} + \text{H}_2\text{O}$
aniónica	$\text{Na}^+_{(\text{ac})} + \text{HCO}_3^-_{(\text{ac})} + \text{resina}\text{H}^+_{(\text{s})} \rightarrow \text{resina}\text{Na}^+_{(\text{s})} + \text{H}_2\text{CO}_3_{(\text{ac})}$

La cromatografía iónica, que no requiere columna supresora, depende de pequeñas diferencias de la conductividad entre los iones de la muestra y los que predominan en el eluyente. La conductividad residual es amplificada con

intercambiadores de baja capacidad, que permiten la elusión con disoluciones de baja concentración de electrolitos (Skoog, et al 2005).

### 1.3.3.2 Determinación de gases

En la ZMCM existen 36 estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, 24 están localizadas en el Distrito Federal y 12 en el Estado de México. Para este proyecto se trabajó con los datos de diez estaciones que cuentan con una unidad meteorológica y se encuentran ubicadas en diferentes sitios de la Ciudad de México: Tacubaya (TAC), ENEP Acatlán (EAC), San Agustín (SAG), Tlanepantla (TLA), Xalostoc (XAL), La Merced (MER), Pedregal (PED), Cerro de la Estrella (CES), Plateros (PLA) y Hangares (HAN), para efectos de este estudio el conjunto de las diez estaciones antes mencionadas se les denominará "Estación RAMA". Esto significa que en esta estación, siempre se reportan los valores promedio de las diez estaciones de la variable de estudio.

Las estaciones de monitoreo cuentan con criterios técnicos para su ubicación, como son densidad de población, distribución de fuentes de emisión y topografía. Las características del entorno de cada estación se describen en el Mapa Sensible del SIMAT (Figura 1.4) ([www.sma.df.gob.mx/simat](http://www.sma.df.gob.mx/simat)).

En estas estaciones se realizan mediciones continuas y permanentes de ozono ( $O_3$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), monóxido de carbono (CO), partículas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) y partículas menores a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ). La información que proporciona esta red es primordial en la evaluación oportuna de la calidad del aire en la Ciudad de México. Las concentraciones máximas de contaminantes permitidas en la ZMCM se muestran en Tabla 2.

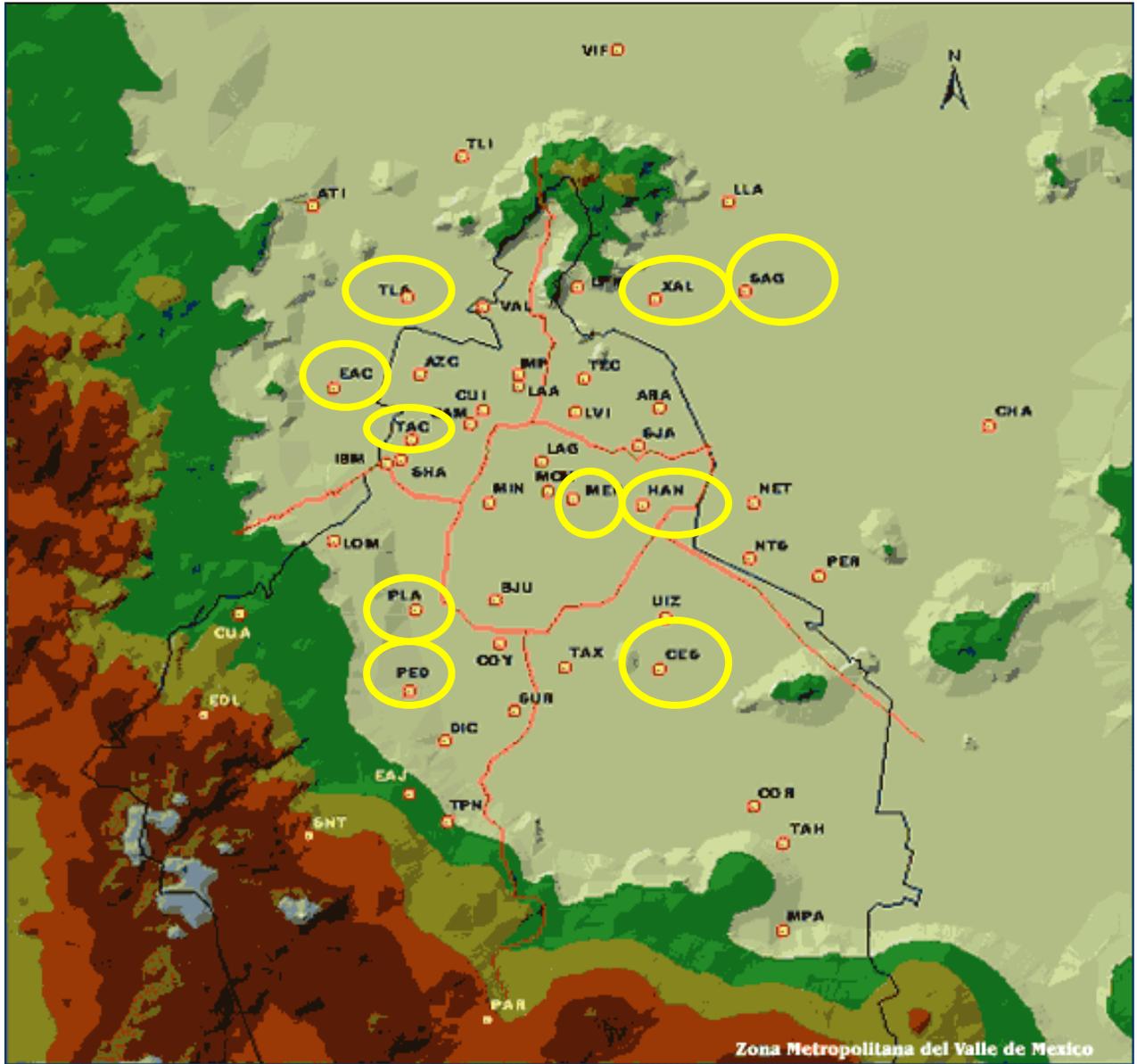


Figura 1.4 Localización de los 36 sitios de la RAMA en la ZMCM.

[www.sma.df.gob.mx/simat](http://www.sma.df.gob.mx/simat)

Tabla 2. Normas oficiales de contaminación ambiental. [www.sma.df.gob.mx/simat](http://www.sma.df.gob.mx/simat)

Concentraciones que equivalen a los 100 puntos IMECAS				
Contaminante		Norma	Concentración Máx. permitida	Tiempo de exposición (horas)
Monóxido de Carbono	CO	<a href="#">NOM-021-SSAI-1993</a>	11.0 ppm	8
Bióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	<a href="#">NOM-022-SSAI-1993</a>	0.13 ppm	24
Ozono	O <sub>3</sub>	<a href="#">NOM-020-SSAI-1993</a>	0.11 ppm	1
Bióxido de Nitrógeno	NO <sub>2</sub>	<a href="#">NOM-023-SSAI-1993</a>	0.21 ppm	1
Partículas Menores a 10 Micras	PM 10	<a href="#">NOM-025-SSAI-1993</a>	120 µg/m <sup>3</sup>	24
Partículas Menores a 10 Micras	PM 10	<a href="#">NOM-025-SSAI-1993</a>	50 µg/m <sup>3</sup>	promedio anual
Partículas Menores a 2.5 Micras	PM 2.5	<a href="#">NOM-025-SSAI-1993</a>	60 µg/m <sup>3</sup>	24
Partículas Menores a 2.5 Micras	PM 2.5	<a href="#">NOM-025-SSAI-1993</a>	15 µg/m <sup>3</sup>	promedio anual
Partículas suspendidas totales		<a href="#">NOM-025-SSAI-1993</a>	210 µg/m <sup>3</sup>	24

### Determinación de O<sub>3</sub>

La detección de ozono está basada en la absorción de luz UV a 254 nm debido a una resonancia electrónica interna de la molécula de O<sub>3</sub>. Para este análisis se utilizó un analizador de O<sub>3</sub> API 400A<sup>a</sup>.

A través de la ecuación de Lambert-Beer se calcula la concentración de ozono por medio de la relación de las intensidades de luz.

$$[O_3] = -\frac{10^9}{\alpha \times \ell} \times \frac{T}{273 \text{ } ^\circ K} \times \frac{29.92 \text{ inHg}}{P} \times \ln \frac{I}{I_o} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$I$  = Intensidad de luz que atraviesa la muestra.

$I_o$  = Intensidad de luz que atraviesa la muestra libre de ozono.

$\alpha$  = Coeficiente de absorción.

$\ell$  = Longitud de recorrido.

$[O_3]$  = Concentración de ozono en ppb.

$T$  = Temperatura de la muestra en grados Kelvin.

$P$  = Presión en pulgadas de mercurio.

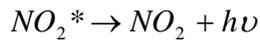
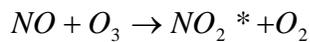
Como puede verse la concentración de ozono depende sobre todo de la relación de la intensidad ( $I/I_o$ ). La temperatura y presión influyen en la densidad de la muestra, pero los cambios en estos parámetros son compensados automáticamente por el equipo.

El coeficiente de absorción es un número que refleja la habilidad del ozono para absorber la luz a 254 nm. La absorción a lo largo del tubo de absorción determina cuantas moléculas están presentes en la columna de gas. La intensidad de luz es convertida en voltaje por el módulo detector- preamplificador. Dicho voltaje es

digitalizado por un convertidor analógico digital (ADC) a una resolución de 80,000 muestras/segundo. La señal digitalizada, junto con otras variables son usadas por una computadora para calcular la concentración usando la ecuación arriba descrita ([www.teledyne-api.com](http://www.teledyne-api.com), última visita junio 15, 2007; Atkinson 2000).

### Determinación de NOx

El analizador API 100 está diseñado para medir la concentración de óxido nítrico [NO], óxidos de nitrógeno totales [NOx] y, por cálculo, dióxido de nitrógeno [NO<sub>2</sub>]. El instrumento mide la intensidad de luz de la reacción quimioluminiscente en fase gaseosa, entre el óxido nítrico [NO] y el ozono [O<sub>3</sub>], la reacción es la siguiente:



La reacción del óxido nítrico (NO) con el ozono (O<sub>3</sub>) da como resultado moléculas electrónicamente excitadas de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>\*), éstas moléculas, liberaran su exceso de energía emitiendo un fotón y bajando a un nivel de energía inferior. Está demostrado que la intensidad de luz emitida es proporcional a la concentración presente de NO<sub>2</sub>\*.

La muestra de gas se hace pasar por un convertidor que contiene molibdeno caliente, donde se reduce todo el NO<sub>2</sub> presente a NO por la siguiente reacción.



De esta forma el analizador mide la concentración total de NOx. El rendimiento de la concentración de NO<sub>2</sub> es obtenido mediante las diferencias de concentraciones de NOx y NO realizadas por el microprocesador del equipo. Los

tres resultados obtenidos de concentraciones [NO], [NO<sub>x</sub>] y [NO<sub>2</sub>] son posteriormente procesadas y guardadas en el sistema interno del equipo. ([www.teledyne-api.com](http://www.teledyne-api.com), última visita junio 15, 2007; Atkinson 2000).

### **Determinación de CO**

La detección y medición de monóxido de carbono se realizó utilizando el analizador de CO API 300, basándose en la absorción de radiación en el infrarrojo (IR) por moléculas de CO, a longitudes de onda cercanas a 4.7 micrones.

Se utilizan calentadores de alta energía para generar luz infrarroja de banda ancha. Esta luz pasa a través de un filtro rotativo de gas el cual causa que el rayo pase alternamente a través de una celda llena de gas nitrógeno (celda de medición) y otra con una mezcla CO/Nitrógeno (celda de referencia). Esta alternancia ocurre a una frecuencia de 30 ciclos por segundo y causa que el rayo se module en los pulsos de referencia y medida. Durante el pulso de referencia, el CO en el filtro rotativo de gas libera al rayo de toda la energía IR a longitudes de onda que éste puede absorber. Como resultado se obtiene un rayo que no es afectado por ninguna molécula de CO en la *Celda Muestra*. Durante el pulso de medición, el nitrógeno en el filtro rotativo no afecta el rayo el cual puede subsecuentemente ser alterado por cualquier molécula de CO en la *Celda Muestra*. El filtro rotativo incorpora una marca óptica la cual superpone una modulación binaria luz/oscuridad de 360 ciclos por segundo en el rayo infrarrojo. Esta modulación de alta frecuencia se incluye para optimizar la relación señal a ruido del detector.

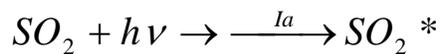
Después del filtro rotativo el rayo infrarrojo entra a la *Celda Muestra*. Esta celda emplea una lente plegable para generar una vía de absorción de 16 metros para obtener una máxima sensibilidad. A la salida de la celda muestra, el rayo pasa a

través de un filtro para limitar la luz a la longitud de onda de interés. Finalmente, el rayo golpea el detector el cual es un fotoconductor de estado sólido enfriado termoeléctricamente. Este detector, junto con su preamplificador y fuente de alimentación convierten la señal luminosa en una señal modulada en voltaje. La salida del detector es electrónicamente remodulada para generar dos voltajes de corriente directa (CD), CO MEAS y CO REF. Estos voltajes son proporcionales a la intensidad luminosa que incide en el detector durante el Pulso de Medición y el Pulso de Referencia, respectivamente. ([www.teledyne-api.com](http://www.teledyne-api.com), última visita junio 15, 2007).

### Determinación de SO<sub>2</sub>

Esta determinación esta basada en la medición de la fluorescencia producida por el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) debido a la absorción de luz UV, esta molécula absorbe energía en la región entre 190 y 230 nm. Utilizando el analizador de SO<sub>2</sub> API 100 las interferencias causadas por los compuestos aromáticos poli-nucleares (PNA) son reducidas selectivamente sin afectar las concentraciones de SO<sub>2</sub> en la muestra de gas.

Una lámpara emite radiación ultravioleta (214 nm) la cual excita las moléculas de SO<sub>2</sub> presentes en la muestra, produciéndose fluorescencia.



La excitación de luz ultravioleta en cualquier punto del sistema esta dado por:

$$I_a = I_0 [1 - \exp(-ax(SO_2))] \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

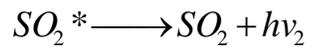
$I_0$  = Intensidad de luz UV.

$I_a$  = Coeficiente de absorción de  $SO_2$ .

$ax$  = Longitud de trayectoria.

$(SO_2)$  = Concentración de bióxido de azufre.

Cuando el  $SO_2$  excitado decae regresa al estado basal, emitiendo una fluorescencia característica.



La fluorescencia producida es convertida en una señal eléctrica, siendo directamente proporcional a la concentración del  $SO_2$  presente ([www.teledyne-api.com](http://www.teledyne-api.com)).

## **CAPITULO 2**

### **METODOLOGÍA**

El desarrollo experimental de este trabajo consistió de tres campañas en diferentes lugares y tiempos, en los que se midieron concentraciones de gases y partículas. El primer sitio fue Santa Ana, la campaña se realizó del 7 al 30 de abril de 2003; el segundo sitio Ávila Camacho del 15 al 26 de marzo de 2004 y en tercer lugar Xicalco con un período comprendido del 24 de noviembre al 4 de diciembre de 2004. Este estudio tiene la finalidad conocer si existe una influencia de una zona sobre otra, para lo cual se realizó una comparación entre los contaminantes generados en la Ciudad de México y los tres sitios perimetrales mencionados.

#### **2.1 SITIOS DE MUESTREO**

Los sitios de muestreo fueron seleccionados de acuerdo al modelo MM5 (modelo de meso escala de la Universidad Nacional del Estado de Pensylvania) versión 3.6.3, haciendo simulaciones para tres dominios de 27, 9 y 3 Km., realizados por Benjamín De Foy (De Foy et al, 2006). Las condiciones iniciales fueron tomadas del Global Forecast System (GFS) a 6 horas de resolución. Las simulaciones fueron para 7 días y cuatro horarios (0, 6, 12 y 18 hrs.).

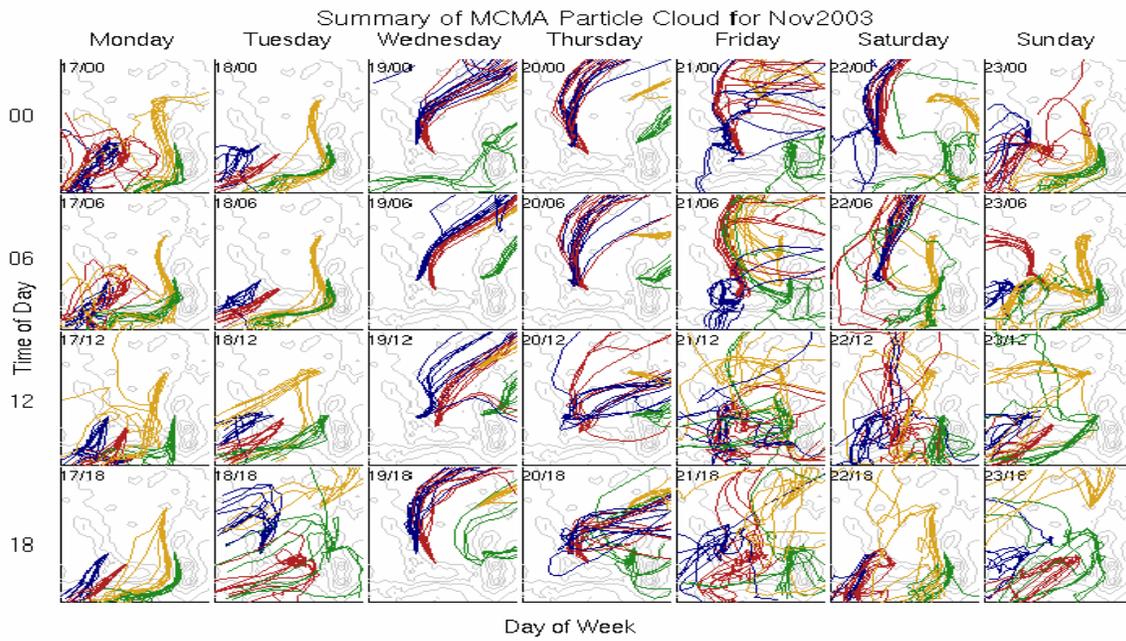
El modelo FLEXPART se acopló al MM5 para trazar las trayectorias siguiendo partículas en un flujo de aire, identificando las áreas más impactadas por la fuente de contaminación (De Foy, 2006).

En cada imagen de las Figuras 2.1 y 2.2 contiene a la zona metropolitana de la Cd. de México donde se muestran las trayectorias de vientos obtenidos con el modelo MM5, se observa que en algunos días el viento es de norte a sur, ejemplo de esto son los días de noviembre (19, 20 y 28) y marzo (20 y 21); la dirección sur a norte se observa en los días 17 - 18 de noviembre y 15 - 16 de marzo, llegando hasta el área que comprenden los sitios de estudio. Las líneas en color identifican las trayectorias hacia diferentes sitios:

- Línea verde Ávila Camacho (este)
- Línea roja Xicalco (sur)
- Línea amarilla Cerro Gordo (noreste)
- Línea azul Desierto de los leones (oeste)

Estos resultados aunados al conocimiento previo de la geografía de los sitios de estudio, los cuales son canales de ventilación natural, permitieron seleccionar a Ávila Camacho y Xicalco para este estudio. Con la misma metodología en la campaña MCMA 2003 se eligió Santa Ana como sitio frontera de la zona Metropolitana de la Ciudad de México.

# Back-Trajectory by Site for 17-23 Nov 2003



# Back-Trajectory by Site for 24-30 Nov 2003

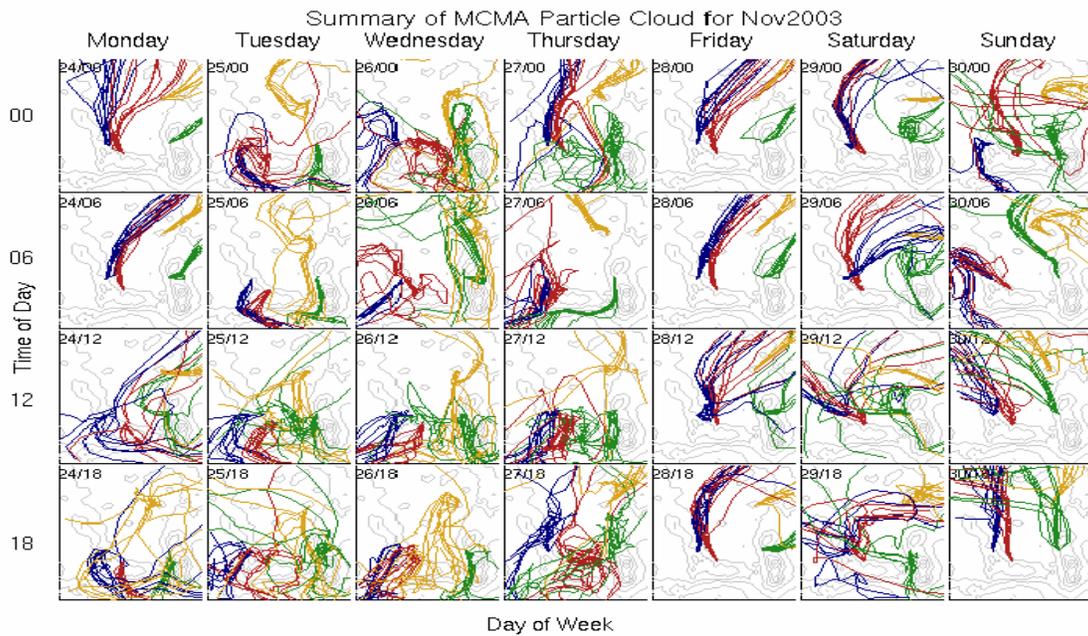
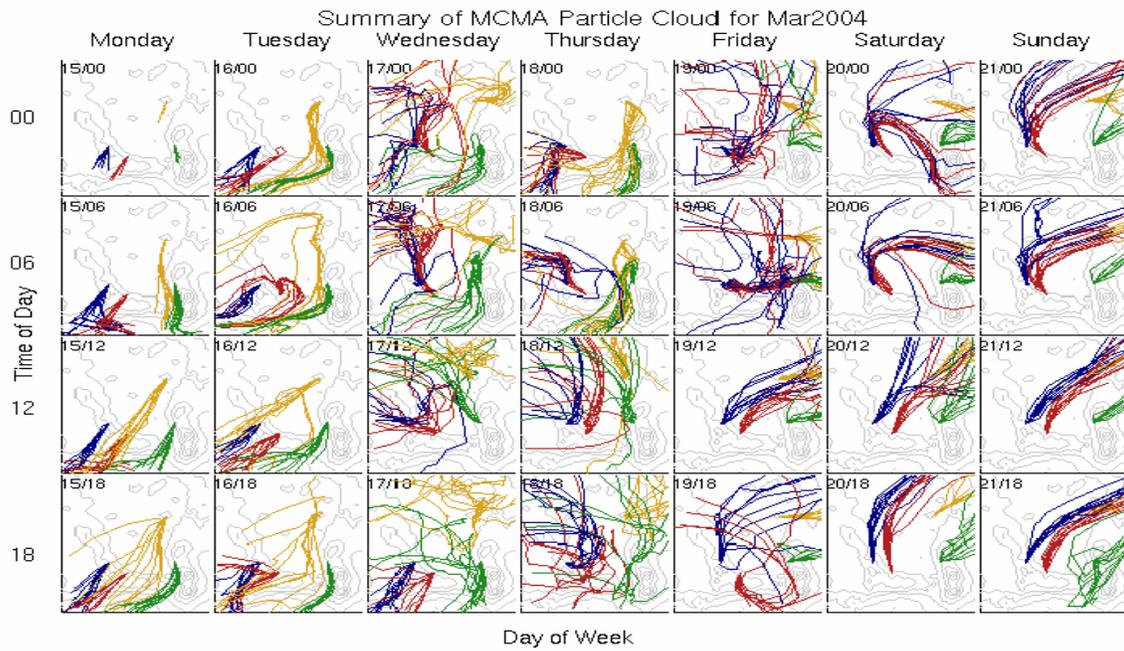


Figura 2.1 Trayectorias de los vientos para el periodo del 17 al 30 de noviembre de 2003.

(De Foy, 2006)

## Back-Trajectory by Site for 15-21 Mar 2004



## Back-Trajectory by Site for 22-26 Mar 2004

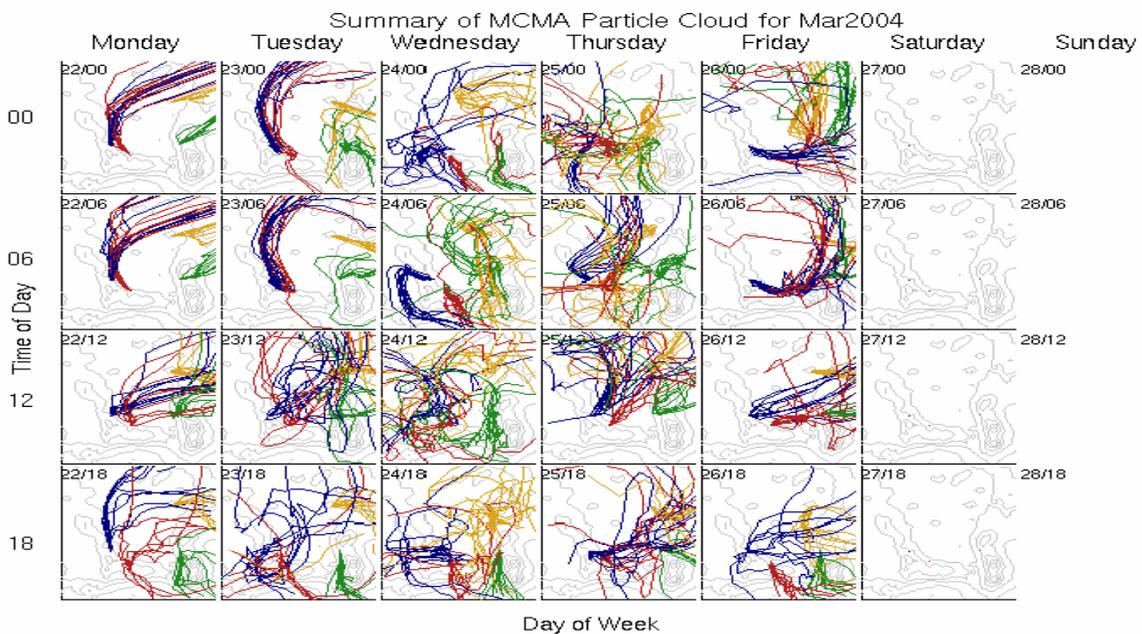


Figura 2.2 Trayectorias de los vientos para el periodo del 15 al 26 de marzo de 2004. (De Foy, 2006).

En los sitios de muestreo se realizaron mediciones de gases y meteorología, la medición de partículas sólo se realizó en dos sitios, Xicalco y Santa Ana. Los sitios se encuentran en áreas consideradas pasos de Montaña de la Ciudad de México, con una altura que varía entre los 2,750 y 2,850 msnm (Figura 2.3).

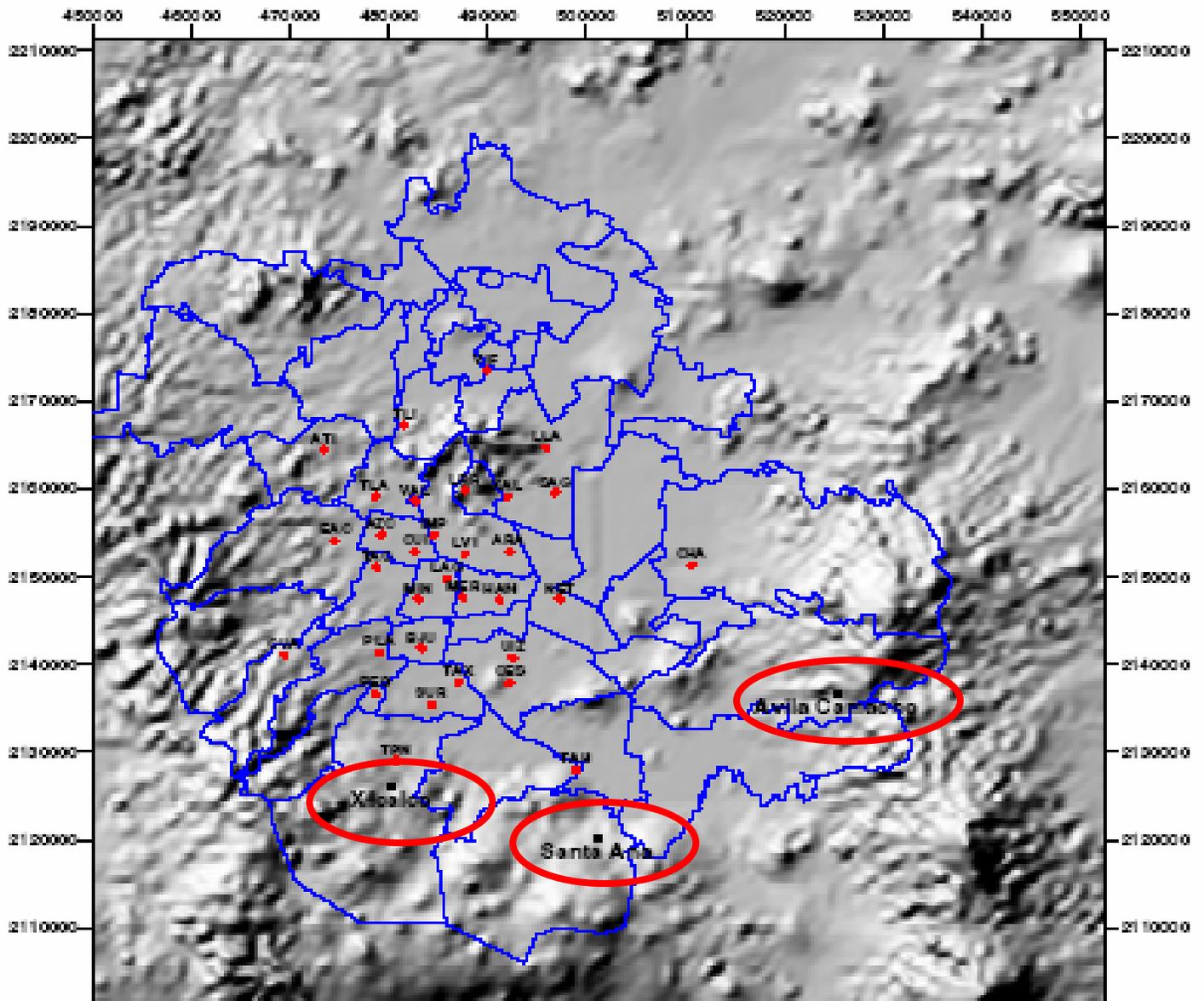


Figura 2.3 Localización de las estaciones de la RAMA y los sitios de estudio. Xicalco, Santa Ana y Ávila Camacho. Cortesía de Secretaría del Medio Ambiente, GDF.

Para la medición de gases en Santa Ana se utilizó la unidad móvil de CENICA, la cual está equipada con analizadores de gases (NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub>), estos son semejantes a los que se encuentran en las estaciones de la RAMA; el muestreo en Ávila Camacho y Xicalco se utilizó la unidad móvil de la RAMA. En el estudio del tamaño y composición de partículas en Santa Ana y Xicalco se utilizaron impactores de cascada de ocho etapas.

### **2.1.1 Campaña Santa Ana**

En el periodo del 7 al 30 de abril de 2003 se colectaron muestras de gases y partículas en el poblado de Santa Ana, localizado en la delegación Milpa Alta del Distrito Federal (DF). Es una zona suburbana ubicada en una dirección sur-este de la ciudad (19.1772° N, 98.99° W), en un paso de montaña a 2,850 msnm. Geográficamente el poblado se encuentra en un canal de ventilación natural de aire ocupando un área de 174 hectáreas, al momento del estudio contaba con una población de 63,537 habitantes ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)), presenta una topografía accidentada con clima templado con abundante precipitación pluvial lo que favorece el cultivo de la tierra.

Santa Ana cuenta con dos vías de acceso, el circuito regional que comunica con Milpa Alta y la carretera México-Oaxtepec. La zona urbana tiene los servicios de jardín de niños, escuela primaria, secundaria, oficina delegacional, centro de salud, cementerio, biblioteca, iglesia, capillas, mercado, unidad deportiva, juegos infantiles y recientemente un módulo de bienestar social. Los habitantes para transportarse ocupan autobuses urbanos, microbuses y automóviles particulares.

Imágenes del sitio



Gases, Met y Prop. Ópticas



Radiación



Partículas



Figura 2.4 Sitio Santa Ana.  
Fotografías tomadas durante la campaña.

### 2.1.2 Campaña Xicalco.

En un lapso de 11 días, comprendidos entre el 24 de noviembre al 4 de diciembre de 2004; se realizó una campaña de medición gases y partículas en Xicalco, ubicado en la Delegación Tlalpan del Distrito Federal (19° 13' 47" N, 99° 10' 15" W) El sitio se encuentra localizado en la frontera sur de la ZMCM y en un paso de montaña a 2,791 msnm.

A tan solo tres kilómetros de Xicalco se encuentra la autopista y carretera federal México-Cuernavaca, este poblado es considerado semi-rural, siendo la principal actividad la agricultura, entre los cultivos que destacan están el maíz, frijol y flores. San Miguel Xicalco cuenta con escuelas, centro de salud, iglesia, viviendas y mercado.

X  
i  
c  
a  
l  
c  
o



Figura 2.5 Sitio Xicalco. Fotografías tomadas durante la campaña.

### 2.1.3 Campaña Ávila Camacho.

En el periodo del 15 al 26 de marzo de 2004 sólo se analizaron gases en la población de Ávila Camacho, ubicada en el municipio de Ixtapaluca en el Estado de México.

Ávila Camacho se encuentra localizado en la frontera este de la zona metropolitana de la Ciudad de México, ( $19^{\circ} 19' 29''$  N,  $98^{\circ} 45' 32''$  W) y sobre un paso de montaña a 2,958 msnm, formando un canal de ventilación natural desde la ciudad hacia el este, la región presenta un clima templado y sub-húmedo, es una región 100% agrícola, cuenta con más de 5,000 habitantes y su principal vía de acceso es la carretera federal México-Puebla ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)).

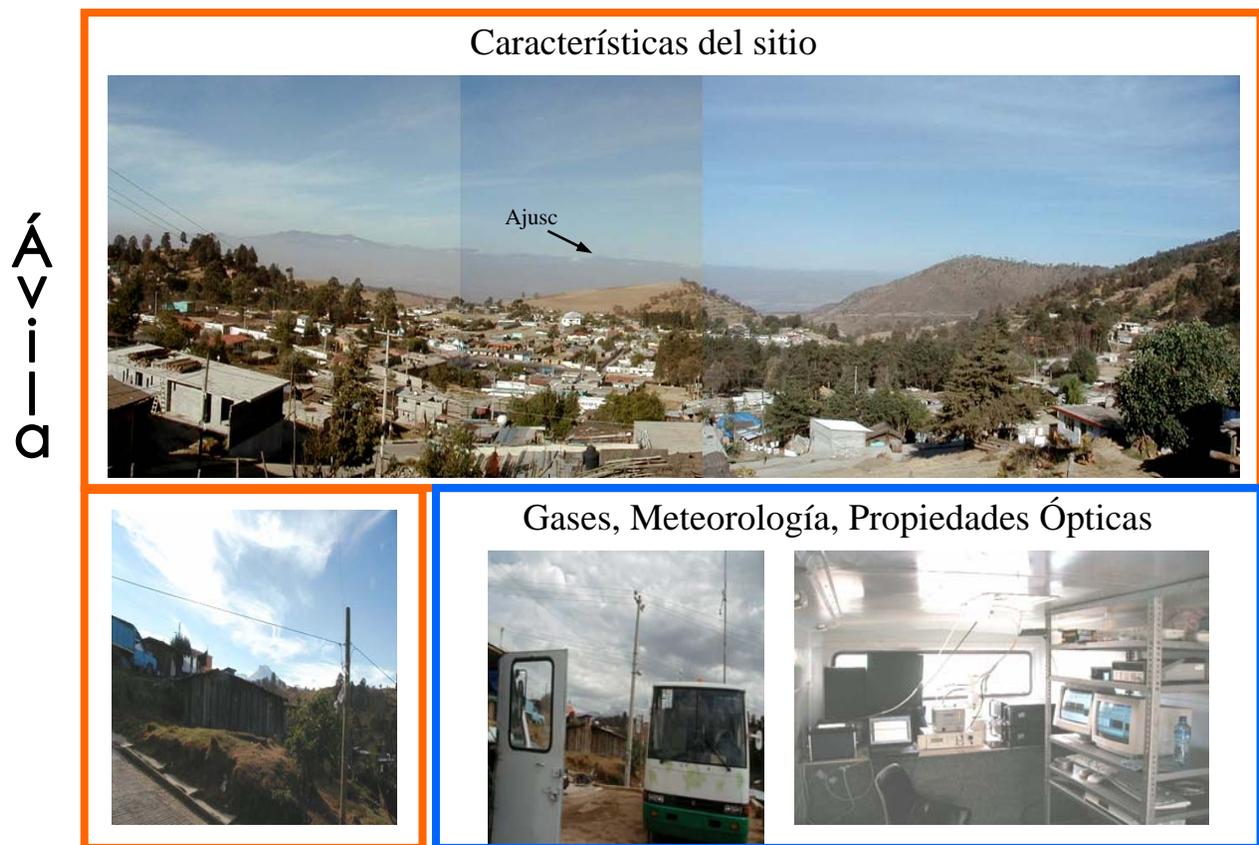


Figura 2.6 Sitio Ávila Camacho. Fotografías tomadas durante la campaña.

## 2.2 Equipos utilizados

- Balanza analítica. Marca Sartorius RC 210, Modelo MC1, sensibilidad 0.01  $\mu\text{g}$ .
- Los iones cloruros, sulfatos y nitratos se analizaron por cromatografía iónica no-supresora en una columna Hamilton PRP-X100, con un volumen de inyección de 100  $\mu\text{l}$  a un flujo de 2  $\text{ml min}^{-1}$ , la fase móvil estaba constituida por ácido ftálico 2 mmolar: 10% acetona. Mientras que el potasio ( $\text{K}^+$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y amonio ( $\text{NH}_3^+$ ) se analizaron por cromatografía iónica supresora, que consta de un módulo supresor de cationes Alltech 335SPCS con un volumen de inyección de 50  $\mu\text{l}$  y un flujo de 2  $\text{ml min}^{-1}$ , en una columna Hamilton PRP-X200, la fase móvil utilizada fue ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 4 mmolar en una solución metanol: agua (3:7).
- Los equipos utilizados en los tres sitios se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción del equipo utilizado en las campañas.

Equipo	Parámetro	Rango	Exactitud	Compañía
Analizador de $\text{SO}_2$	Concentración de $\text{SO}_2$	0 – 1 ppmv	$\pm 25\%$	API, modelo 100
Analizador de CO	Concentración de CO	0 – 10 ppmv	$\pm 15\%$	API, modelo 300
Analizador de $\text{O}_3$	Concentración de $\text{O}_3$	0 – 1 ppmv	$\pm 15\%$	API, modelo 400A
Analizador de $\text{NO}_x$ , NO, $\text{NO}_2$	Concentración de $\text{SO}_2$	0 – 1 ppmv	$\pm 25\%$	API, modelo 100
Estación Meteorológica (14w3555)	Temperatura Humedad Relativa	-55° a +55° -100%	$\pm 0.5^\circ$ -+ 3.5%	Qualimetrics
Impactor de cascada de 8 etapas (en Xicalco y Santana)	Masa de partículas en función del tamaño	0.18 a 10 $\mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{g}$	MSP (MOUDI, Modelo 100)

## **CAPITULO 3.**

### **ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES**

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones de los contaminantes en superficie en algunas estaciones de la RAMA y en tres sitios perimetrales de la ZMCM localizados al sur, sureste y este de la misma, buscando con ello el caracterizar el comportamiento de los mismos y establecer si existe un transporte desde la Ciudad hacia regiones vecinas.

#### **3.1 Gases**

Los datos de las diez estaciones de la RAMA (Figura 1.4) se promediaron para obtener una serie de tiempo, representativa de todas ellas. Las series de tiempo promedio obtenidas de esta manera se compararon con las de los sitios en estudio. Los datos utilizados fueron los promedios de 1 minuto.

En las Figuras 3.1a y 3.1b se presentan las series de tiempo de las concentraciones de ozono ( $O_3$ ) y bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) respectivamente, registradas en cada uno de los tres sitios y en la RAMA.

Como puede observarse en las gráficas de ozono para cada sitio (figura 3.1a), las series de tiempo correspondientes presentan varios rasgos de similitud con las series promedio de la RAMA, los picos diurnos están presentes en cada pareja de series y ocurren aproximadamente a la misma hora en un 90%.

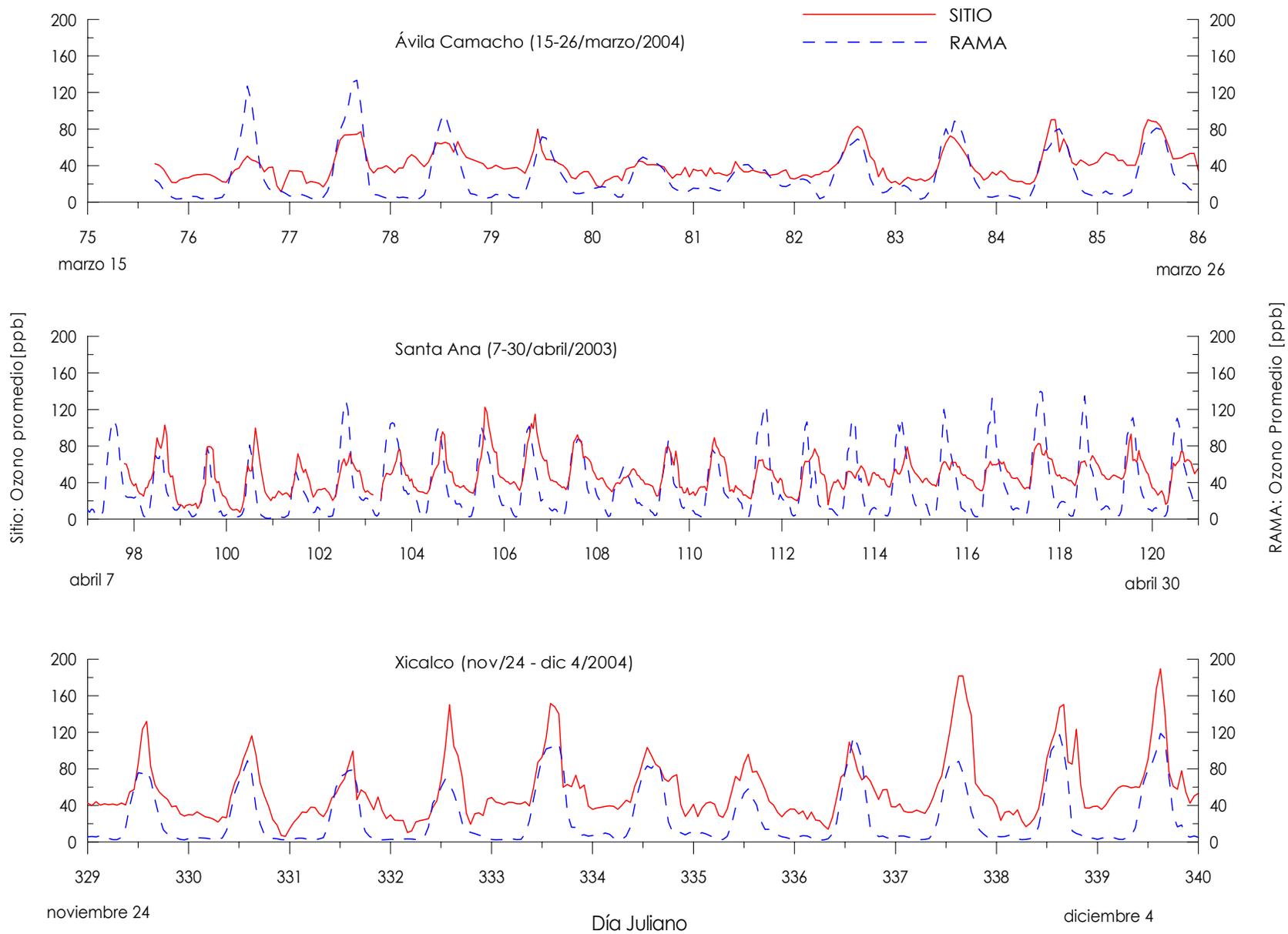


Figura 3.1a Series de tiempo para el gas O<sub>3</sub> en Xicalco, Santa Ana y Ávila Camacho.

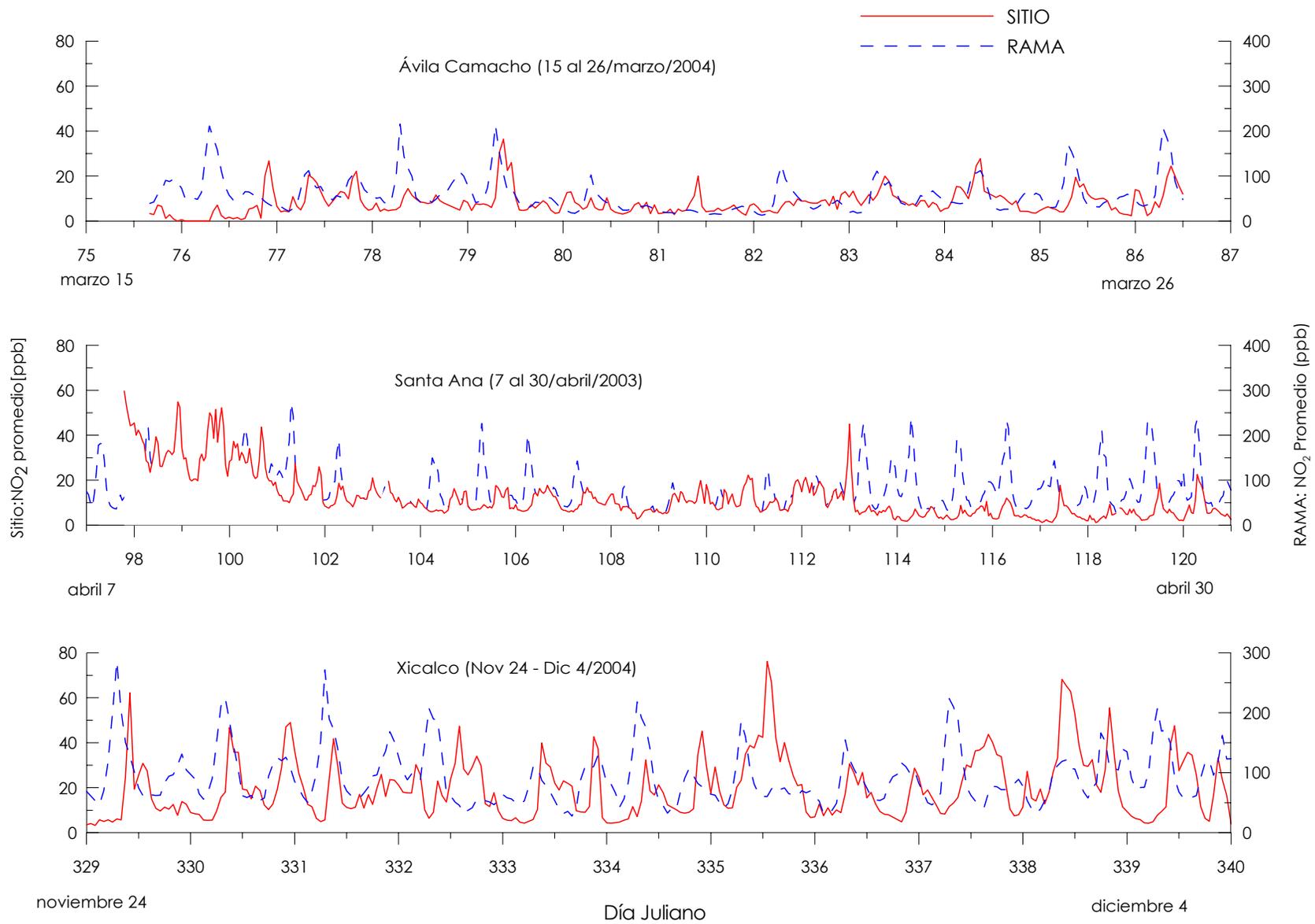


Figura 3.1b Series de tiempo para el gas NO<sub>2</sub> en Xicalco, Santa Ana y Ávila Camacho.

Aunque los tamaños de estos picos difieren de una serie a otra en cada gráfica se puede observar en general que son similares, es decir cuando se presentan picos grandes o pequeños en una serie, en la otra también se observan. Al realizar los promedios de estos parámetros en 24 hrs. se observa que en general los máximos de concentración para el caso de ozono, se presentan a las mismas horas tanto en el sitio como en la RAMA (figura 3.1c).

Para el NO<sub>2</sub> las series de tiempo (figura 3.1b) muestran varios rasgos de similitud con las series promedio de la RAMA. Los picos diurnos están presentes en cada pareja de series, excepto para Santa Ana, observándose un desfase, esto es, primero se presentan en la RAMA y después en el sitio. Para visualizar mejor este comportamiento se consideraron los promedios de 24 hrs. (figura 3.1d). En Xicalco se observa que el máximo de concentración en la Ciudad se presenta aproximadamente una hora y media antes que el máximo en el sitio. En el caso de Ávila Camacho este comportamiento es similar, aquí el desfase observado entre los dos máximos es aproximadamente de una hora. Para Santa Ana el comportamiento del NO<sub>2</sub> en el sitio es anómalo lo cual indica falla en el equipo. Por lo que no es posible hacer una comparación de la concentración del NO<sub>2</sub>.

El monóxido de carbono (figura 3.2) es un contaminante primario y es emitido directamente de las fuentes. El CO en los tres sitios presenta los picos que naturalmente se esperaría por el inicio del movimiento vehicular, esto es, temprano por la mañana y hasta el medio día. Se observa una concentración más alta en Xicalco, seguido por Santa Ana y menor en Ávila Camacho que es el lugar más alejado (Figura 3.2), además la población es mayor en Xicalco, seguida de Santa Ana y Ávila Camacho ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)).

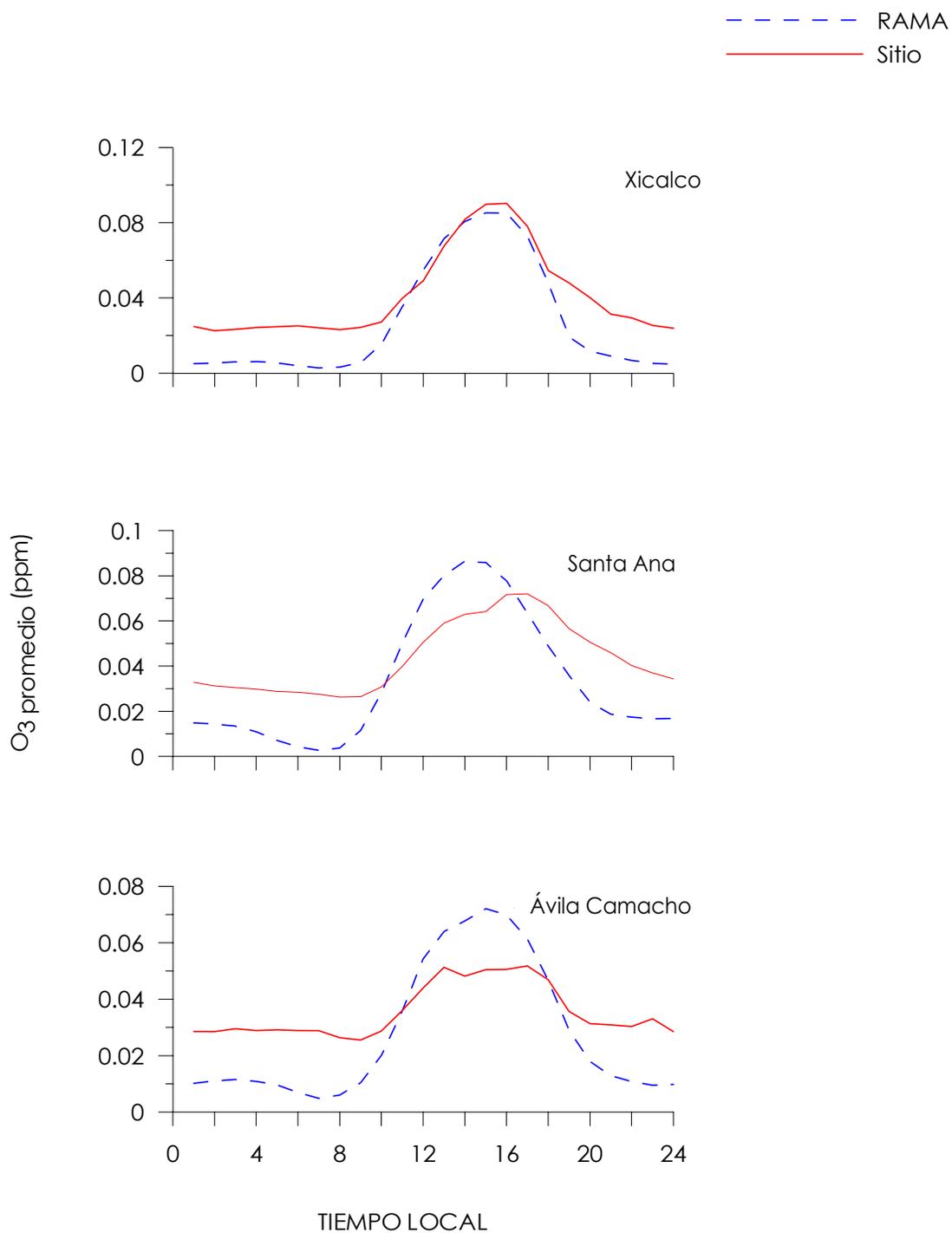


Fig. 3.1 Concentraciones de ozono medidas en los sitios de estudio y por la RAMA. Promedio de 24 horas

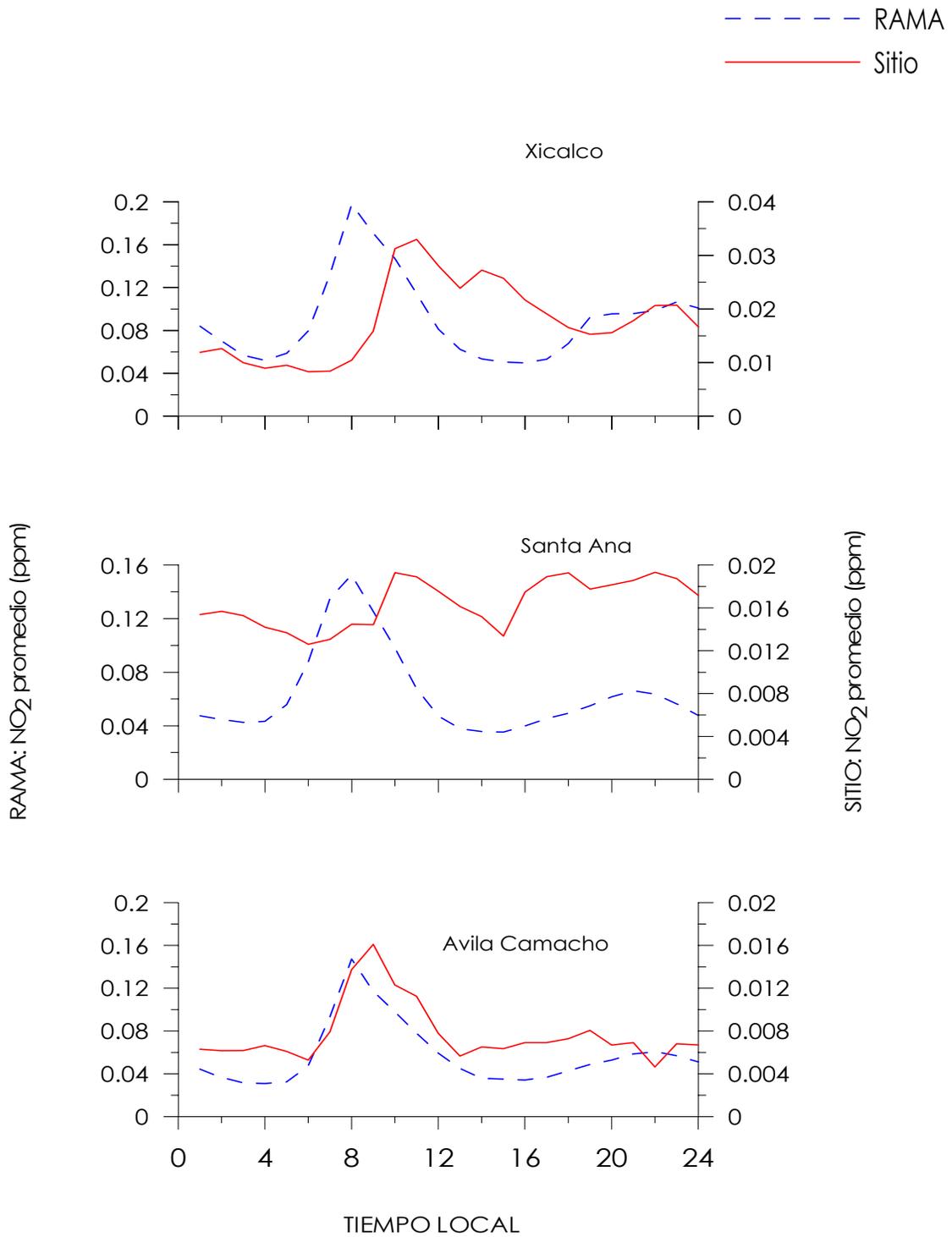


Fig. 3.1d Concentraciones de NO<sub>2</sub> medidas en el sitio de estudio y por la RAMA. Promedio de 24 hrs.

Para visualizar mejor el comportamiento del CO se consideraron los promedios en 24 hrs. (figura 3.3), en Xicalco se observa que el máximo de concentración está desfasado por casi dos horas después que el máximo en la Ciudad. En Ávila Camacho el comportamiento es similar, aquí el desfase observado entre los dos máximos es de aproximadamente una hora. Para Santa Ana el comportamiento de CO presenta también un desfase de dos horas. Lo anterior permite sugerir una influencia de la Ciudad.

El SO<sub>2</sub> (Figuras 3.4) presenta mayor concentración en Xicalco, seguido por Santa Ana y finalmente Ávila Camacho, como se comentó anteriormente la población es mayor en Xicalco, seguida de Santa Ana y Ávila Camacho ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)). En Santa Ana hay tres eventos importantes, en los días Julianos 100 al 101, 102 al 103 y 109 al 110 (*9 y 10, 11 y 12, 18 y 19 de abril*, respectivamente), donde las concentraciones están por arriba de los 15 ppb. De acuerdo con Dunn et al, 2004, el evento de los días 11 y 12 se explica por influencia del volcán Popocatepetl y los días 18 y 19 por influencia de la Ciudad dado que esos días el viento predominante fue del Norte.

Estudios teóricos (Fast and Zhong, 1998; Whiterman, et al 2000; Salcido et al 2003) muestran que en la Ciudad de México la mezcla de contaminantes alcanza una altura de 1800 m en marzo y 1200 m en abril, lo que facilita la limpieza del Valle de México. Los estudios de Raga et al, (1999) durante dos semanas en noviembre de 1997 sugieren que la limpieza de los contaminantes generados en la ciudad presentan ciclos diurnos, con esta base, Raga et al (2001) realizan un estudio teórico que sugiere que lugares fuera de la ciudad pueden ser impactados.

Se requiere hacer un análisis comparativo de la trayectoria de los vientos tanto en los sitios como en la Ciudad, a la misma altura para comprobar que la contaminación observada en cada uno de los lugares de interés es el resultado

de contaminantes generados *in situ* y los transportados desde la Ciudad de México, esto nos permitiría realizar una estimación de las magnitudes de los corrimientos de los picos diurnos de la serie de tiempo del contaminante en los sitios con respecto a su correspondiente en la RAMA. Complementando los datos de los gases estudiados se observó que durante las campañas el porcentaje de horas en la que existió una componente del viento desde la Ciudad hacia Xicalco fue del 72.88%, para Santa Ana fue del 65% y para Ávila Camacho un 63.31% (Castro, et al 2006), lo que indica que los tres sitios de estudio tuvieron una influencia desde la Ciudad durante los periodos de estudio.



Figura 3.2 Series de tiempo. Concentración de CO en Xicalco, Santa Ana y Ávila Camacho.

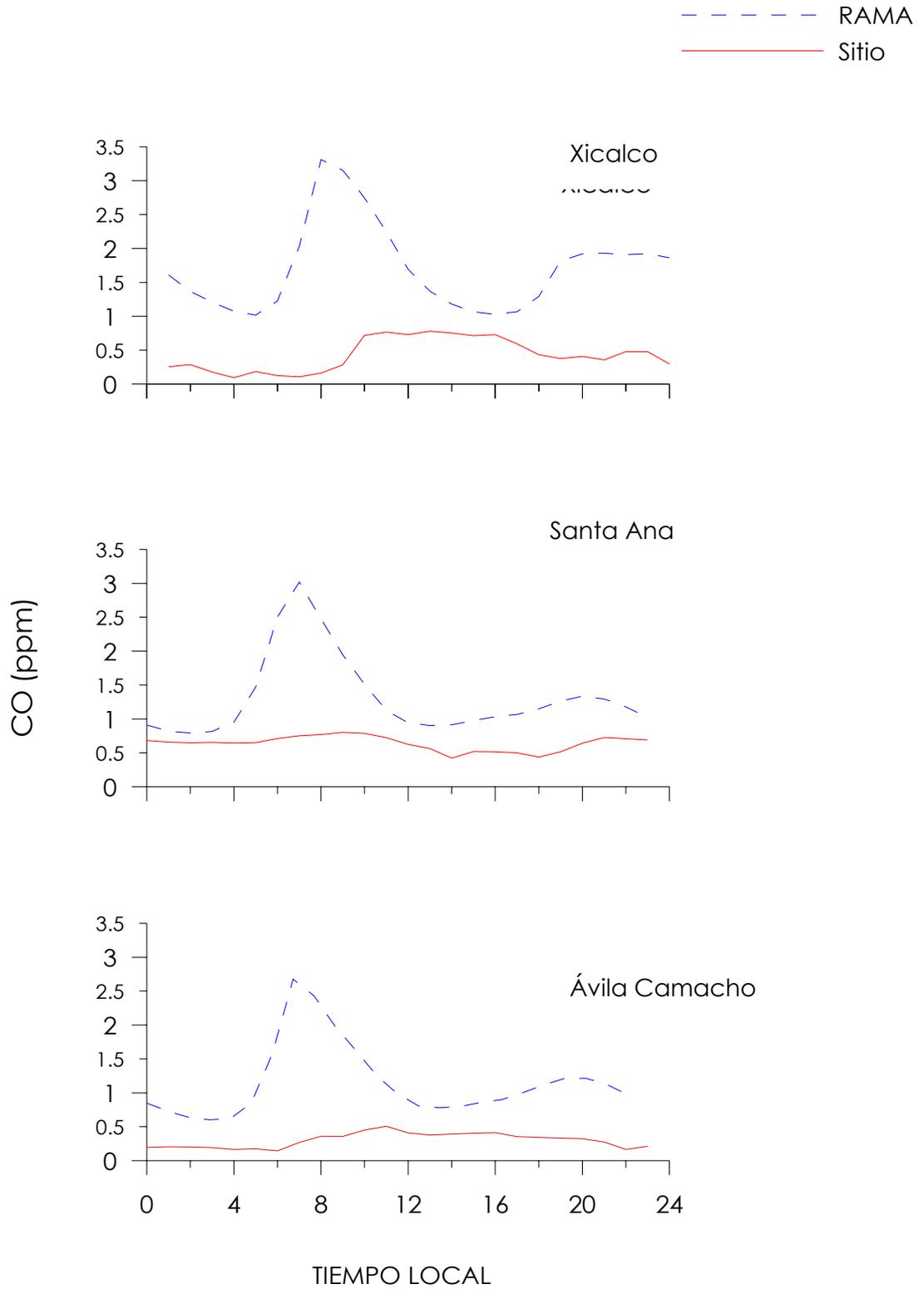


Figura. 3.3 Concentraciones de CO medidas en los sitios de estudio y por la RAMA. Promedio de 24 hrs.

Fig. 3.3 Concentraciones de CO medidas en el sitio de estudio y por la RAMA. Promedio de 24 hrs.

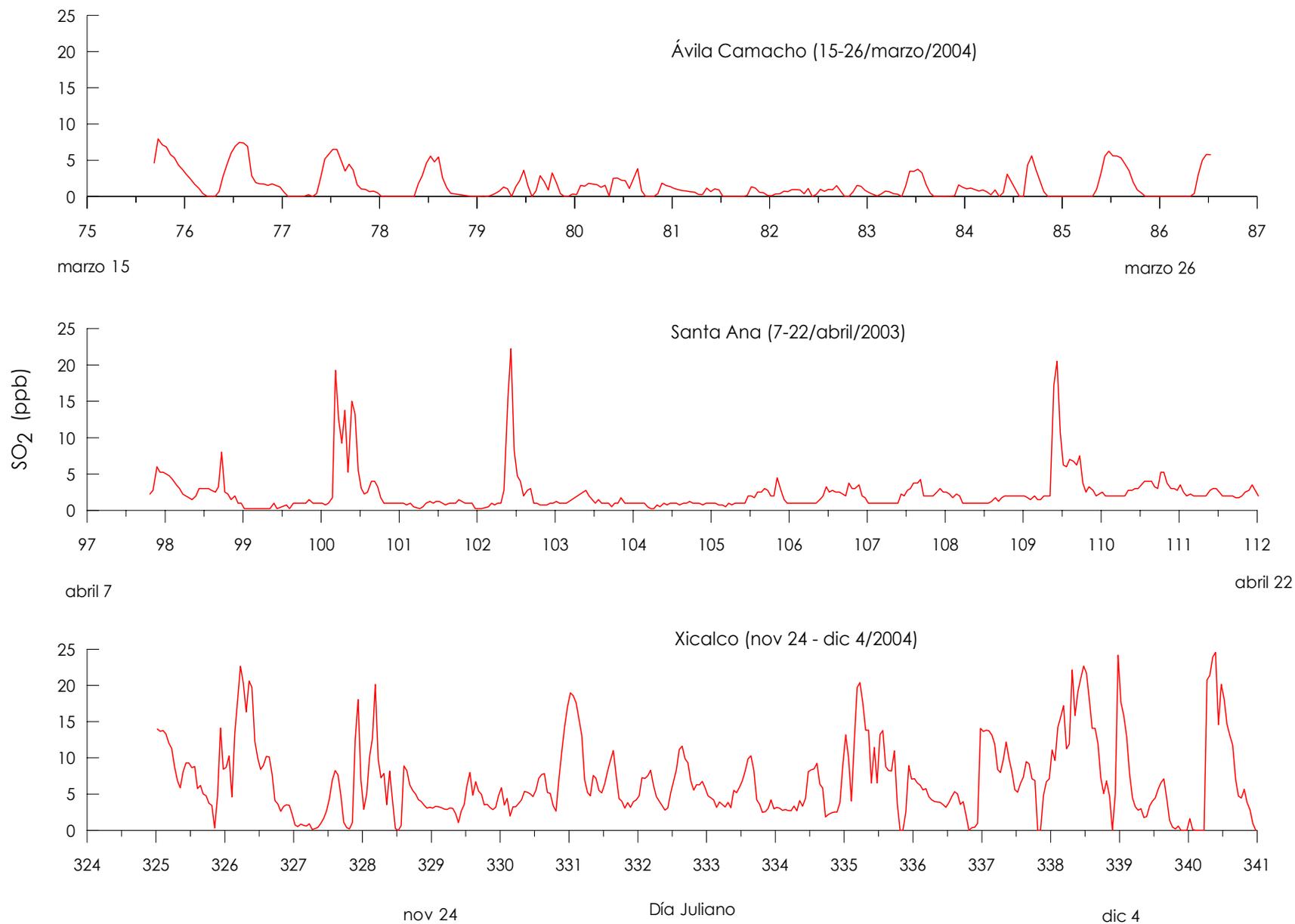


Figura 3.4 Series de tiempo de SO<sub>2</sub> en Xicalco, Santa Ana y Ávila Camacho.

## 3.2 Partículas

Se presentan los resultados de las partículas colectadas para Xicalco y Santa Ana. Para Ávila Camacho no se colectaron muestras.

### 3.2.1 Análisis Gravimétrico

La concentración [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] de masa de las partículas presentes en la atmósfera se obtiene mediante el análisis gravimétrico. Para este estudio definiremos a las partículas *finas* aquellas cuyo diámetro aerodinámico es menor a  $1.0 \mu\text{m}$ , en tanto que las mayores de este tamaño son partículas *gruesas*.

El análisis gravimétrico por tamaño de partículas se presenta en la Figura 3.5 para la campaña de Xicalco y Santa Ana, donde se puede observar que para ambos sitios el tamaño predominante es de  $0.32 \mu\text{m}$ . En ambos lugares se puede observar un comportamiento bimodal de las partículas, es decir un pico en las partículas finas y otro de menor tamaño en las partículas gruesas ( $5.62 \mu\text{m}$ ). De acuerdo al análisis estadístico (Análisis Estadístico para Dos Muestras, [Rojo, 2007]) las concentraciones de las partículas en ambos sitios son semejantes, sólo mostrando una diferencia significativa en los tamaños de  $0.18$  y  $10.0 \mu\text{m}$ .

La concentración [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] de los diferentes diámetros de partículas durante las campañas se muestra en la Figura 3.6a y 3.6b. Para Xicalco se tienen dos días que muestran una concentración de partículas elevada, el 30 de noviembre (día juliano 335) y el 3 de diciembre (día juliano 338). Esta concentración está relacionada con la alta concentración de CO, SO<sub>2</sub> y humedad relativa, por lo cual el origen primario de estas partículas puede ser de emisiones frescas y formación de partículas secundarias con alto contenido de sulfatos (Figura 3.9a).

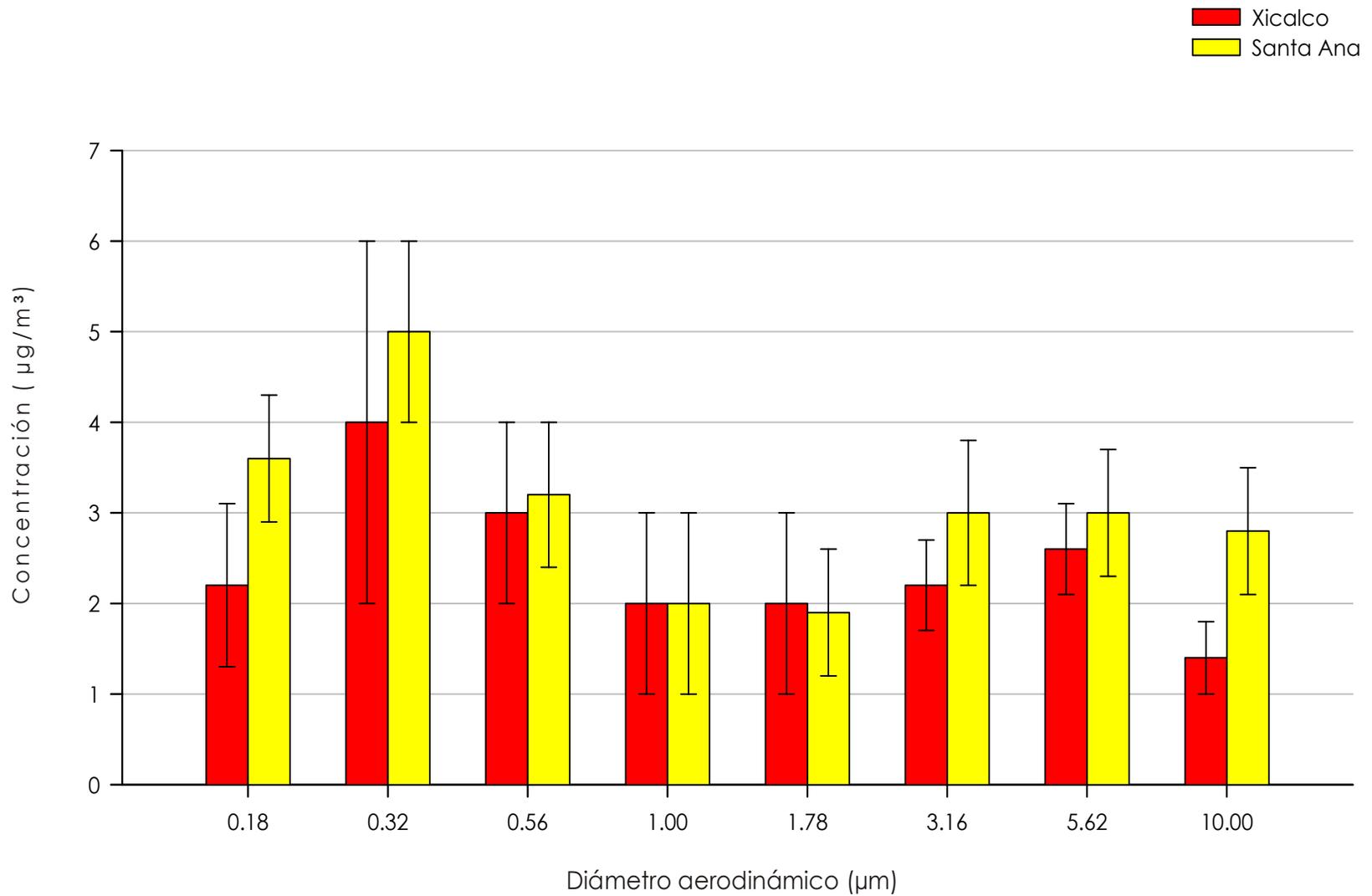


Figura 3.5 Análisis gravimétrico. Datos promedio de las concentraciones de cada diámetro aerodinámico a lo largo de las campañas en Xicalco (24 de Nov al 4 de Dic, 2004) y Santa Ana (7 al 21 de Abril, 2003).

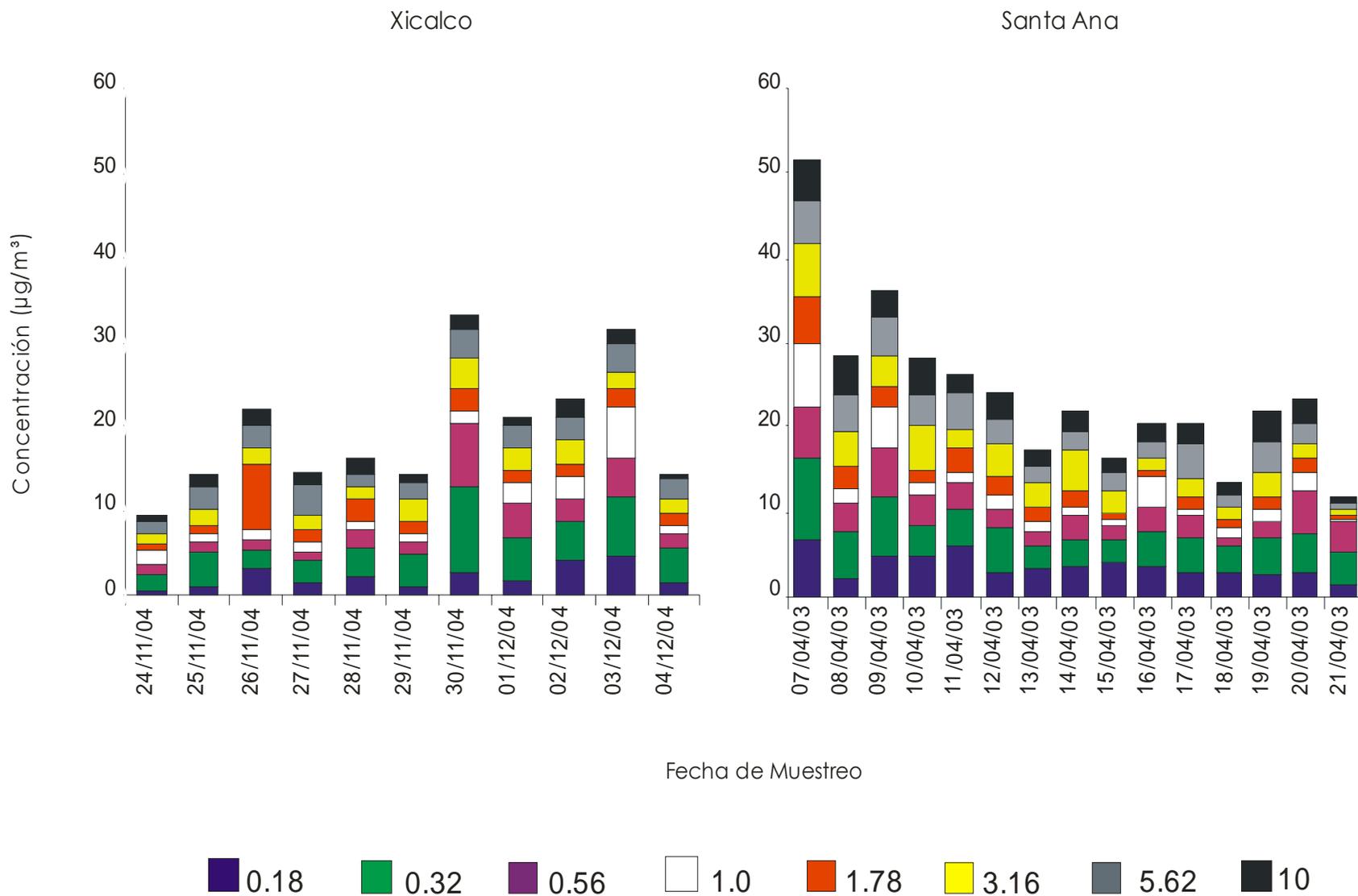


Figura 3.6a Serie de tiempo. Concentración de los diferentes diámetros aerodinámicos en la atmósfera de Xicalco y Santa Ana (análisis gravimétrico).

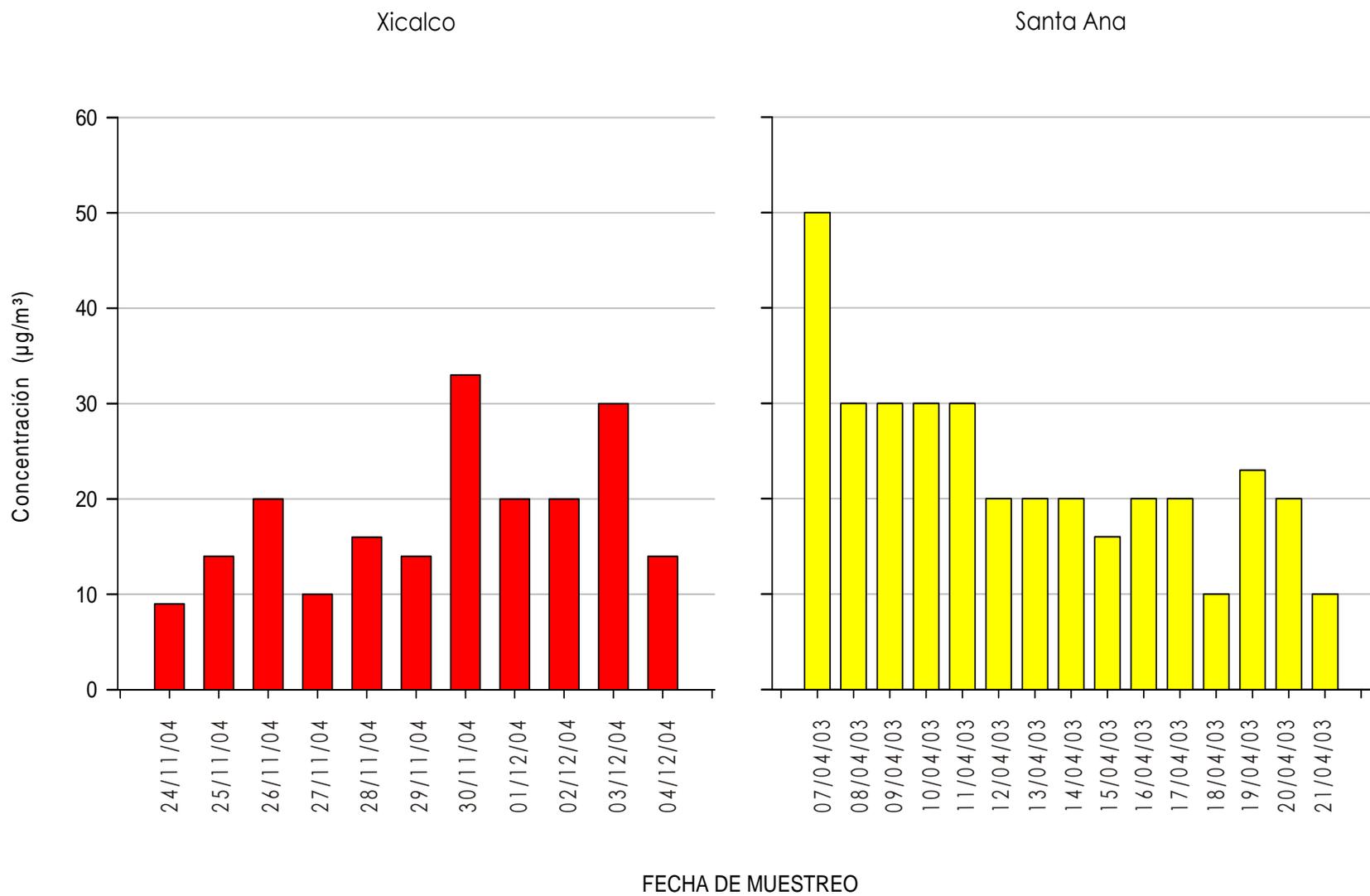


Figura 3.6b Serie de tiempo. Acumulado de partículas menores e iguales a PM<sub>10</sub> (análisis gravimétrico).

en la atmósfera de Xicalco y Santa Ana.

También en la Figura 3.6b se puede observar para Santa Ana que el día de mayor concentración de partículas fue el 7 de abril (día juliano 97), la explicación a este comportamiento no se puede soportar en el comportamiento de los gases dado que no se cuenta con datos. Sin embargo para los días subsecuentes 8, 9, 10 y 11 se puede observar nuevamente altas concentraciones de CO, SO<sub>2</sub> y humedad relativa alta, con lo cual se puede inferir que el origen de las partículas es de emisiones frescas y posteriormente formación de partículas secundarias por la combinación de SO<sub>2</sub> y humedad relativa.

Para un mejor entendimiento del origen de las partículas se puede hacer el análisis en diferentes horarios, esto es, matutino (8:00 – 14:00 hrs.), vespertino (14:00 – 20:00 hrs.) y nocturno (20:00 – 2:00 hrs.).

En los sitios Xicalco y Santa Ana se observa un comportamiento semejante para los horarios matutino y vespertino (Figura 3.7). Durante la mañana se registra mayor acumulación en las partículas finas, esto se debe a que éste es un periodo de una actividad vehicular alta, lo que nos indica gran cantidad de procesos de combustión. En el horario vespertino, los procesos de transformación (partículas viejas) dan como resultado que se presente un ligero aumento en la concentración de las partículas gruesas (>1µm), siendo el tamaño de 5.62 µm el de mayor concentración; sin embargo la concentración de partículas finas (< 1.0 µm) sigue siendo alta, en un estudio de Harrison et al, (2005) se realizaron mediciones en diferentes sitios del Reino Unido encontrando un comportamiento similar.

Por la noche es donde se presenta la mayor diferencia en ambos lugares (tabla 4), se observa una disminución en la concentración de las partículas finas y un aumento de las gruesas, esto puede ser el resultado de disminución de fuentes

fijas y móviles así como de los procesos de transformación (de gases y partículas) que originan un aumento en la concentración de partículas gruesas.

En ambos sitios se sigue observando un comportamiento bimodal en el horario nocturno. En Santa Ana el tamaño de mayor influencia es el de  $3.16 \mu\text{m}$  y en Xicalco es  $0.32 \mu\text{m}$ . La presencia de partículas gruesas en Santa Ana por la noche se puede deber a resuspensión de polvo por vientos dado que en los meses de marzo y abril las tierras de cultivo se preparan para la siembra (campaña del 7 al 30 de abril) y para Xicalco en el mes de noviembre las tierras están cultivadas (campaña de nov 24 a dic 4).

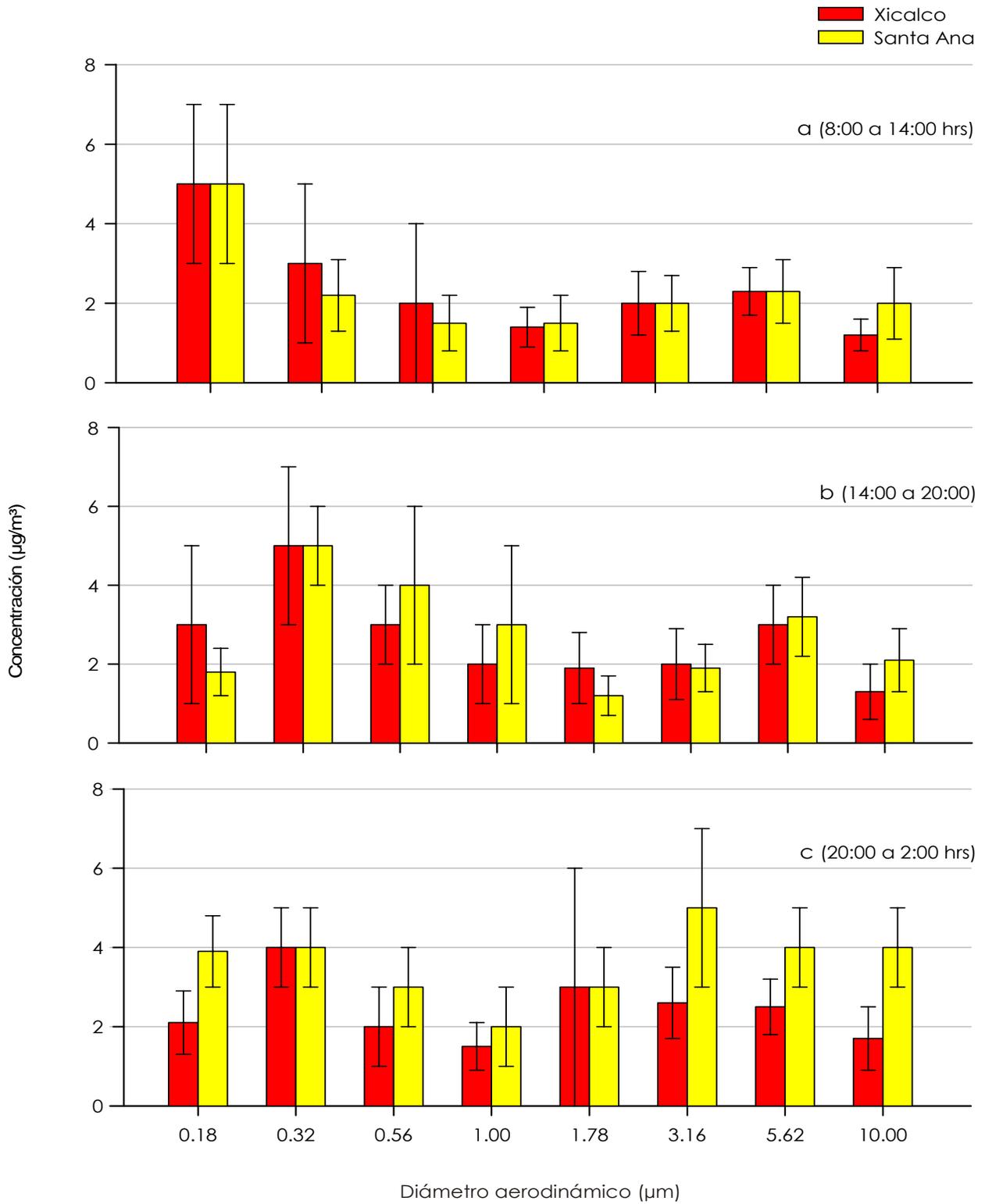


Fig. 3.7 Datos promedio del análisis gravimétrico en el horario matutino (a), vespertino (b) y nocturno (c) en Xicalco y Santa Ana.

En la Tabla 4 se muestra las concentraciones por distribución de tamaño de partículas presentes en Xicalco y Santa Ana durante las campañas respectivas.

Tabla 4 Datos comparativos de distribución del tamaño de las partículas en los tres horarios, en los sitios de Xicalco y Santa Ana.

Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Xicalco ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			Santa Ana ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
	8 a 14 hrs	14 a 20 hrs	20 a 2 hrs	8 a 14 hrs	14 a 20 hrs	20 a 2 hrs
0.18	1.80	2.73	2.12	5.02	1.76	4.15
0.32	4.66	4.90	4.12	4.56	4.75	4.11
0.56	3.05	2.58	2.31	2.25	3.88	3.04
1.0	2.45	1.85	1.47	1.49	2.59	1.67
1.78	1.40	1.86	2.65	1.49	1.20	3.43
3.16	1.98	1.98	2.63	2.01	1.86	5.75
5.62	2.27	3.08	2.46	2.27	3.16	4.01
10	1.16	1.28	1.71	1.99	2.11	4.71

### 3.2.2 Análisis de iones en Xicalco y Santa Ana

Los iones de mayor abundancia durante la campaña de Xicalco fueron sulfato, cloruro y sodio (Figuras 3.8 y 3.8a), en el periodo comprendido del 26 al 28 de noviembre se registraron altas concentraciones de cloruro y sodio; mientras que el sulfato registró la mayor concentración entre el 30 de noviembre al 3 de diciembre.

Para Santa Ana tenemos que los iones de mayor abundancia son cloruro, nitrato, sulfato y sodio y en menor cantidad potasio (Figuras 3.8 y 3.8b), los días del 7 al 13 de abril presentan la concentración más alta de sodio y cloruro respecto a los demás iones y el día 9 reporta la concentración más alta de potasio en toda la campaña. A partir del día 17 de abril se observó una disminución notoria en las concentraciones de todos los iones.

De acuerdo con la literatura el origen del cloro fundamentalmente proviene de la quema de biomasa y de piedra caliza, para el caso del sodio la fuente principal es el uso de aceite crudo, mientras que el origen del potasio principalmente viene de la quema de biomasa (Seinfeld and Pandis, 1998).

Para una mejor comprensión del comportamiento de los iones por día en cada sitio observar las figuras 3.8a y 3.8b, mientras que en las figuras 3.8c y 3.8d se presenta el mismo comportamiento en porcentajes.

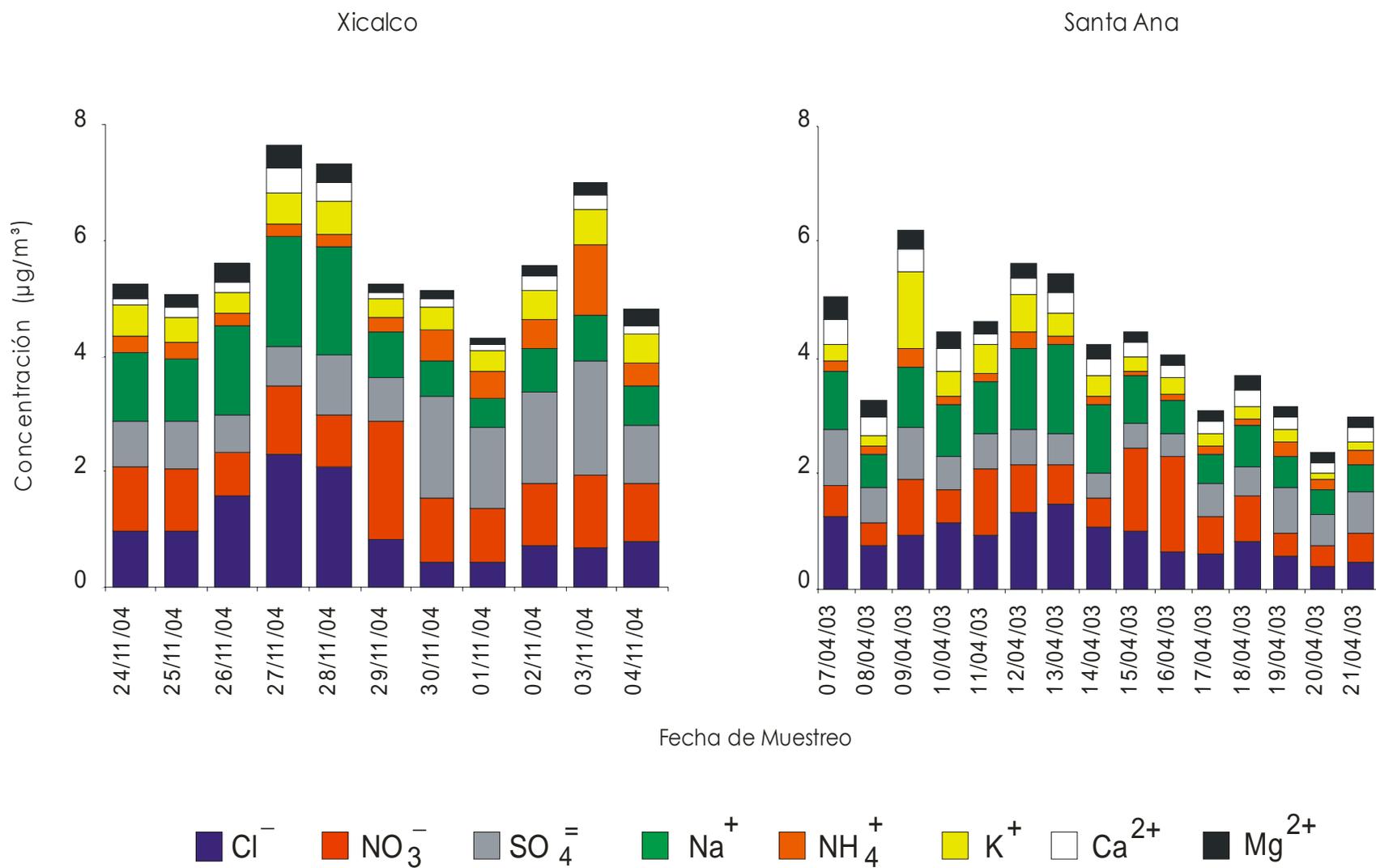


Figura 3.8 Series de Tiempo. Presencia de iones en la atmósfera de Xicalco y Santa Ana.

Promedio de 24 horas.

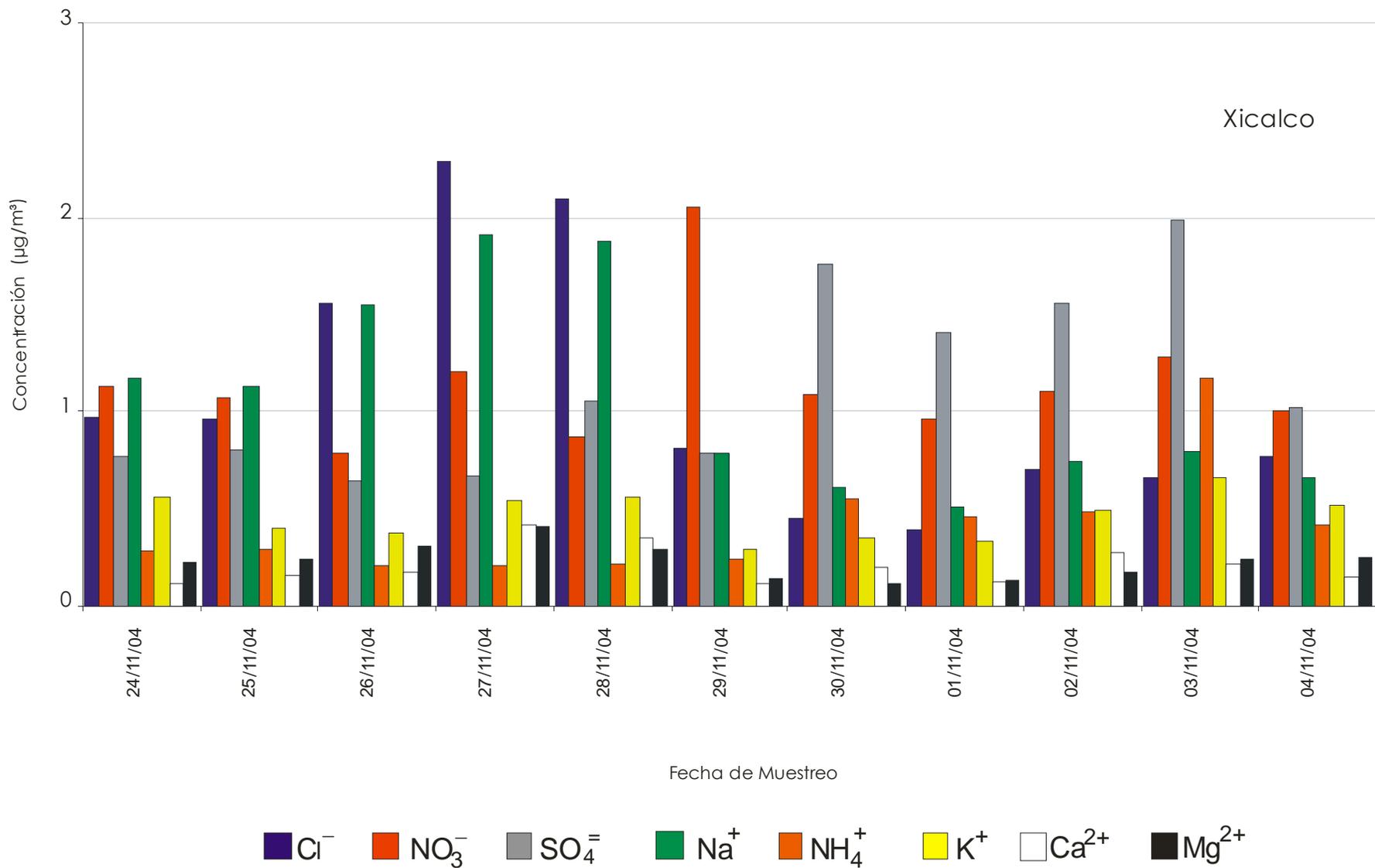


Figura 3.8a Serie de Tiempo. Presencia de iones en la atmósfera de Xicalco.

Promedio de 24 horas.

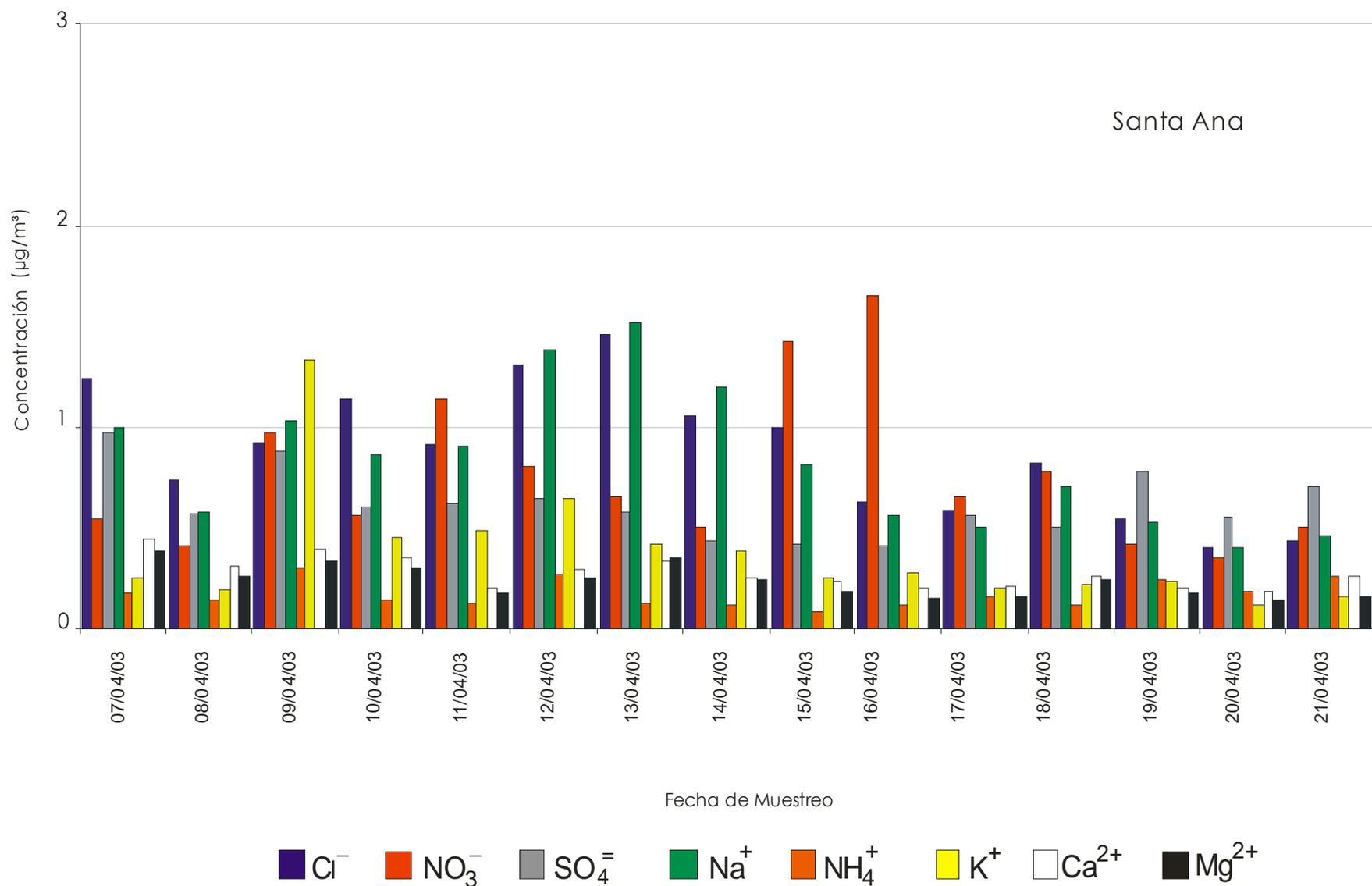


Figura 3.8b Serie de Tiempo. Presencia de iones en la atmósfera de Santa Ana.

Promedio de 24 horas.

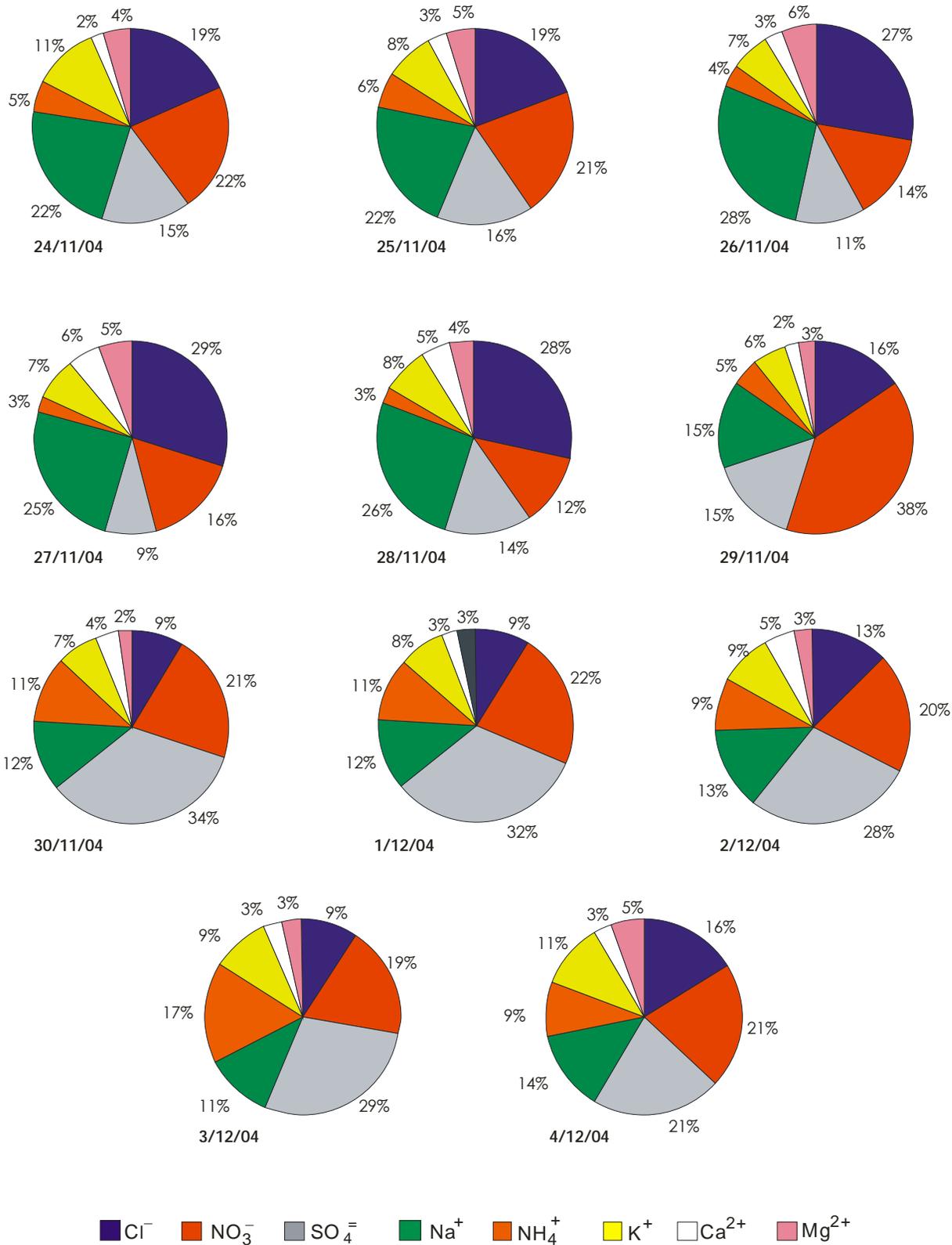


Figura 3.8c. Presencia de iones en la atmósfera de Xicalco.

Porcentajes promedio de 24 hrs.

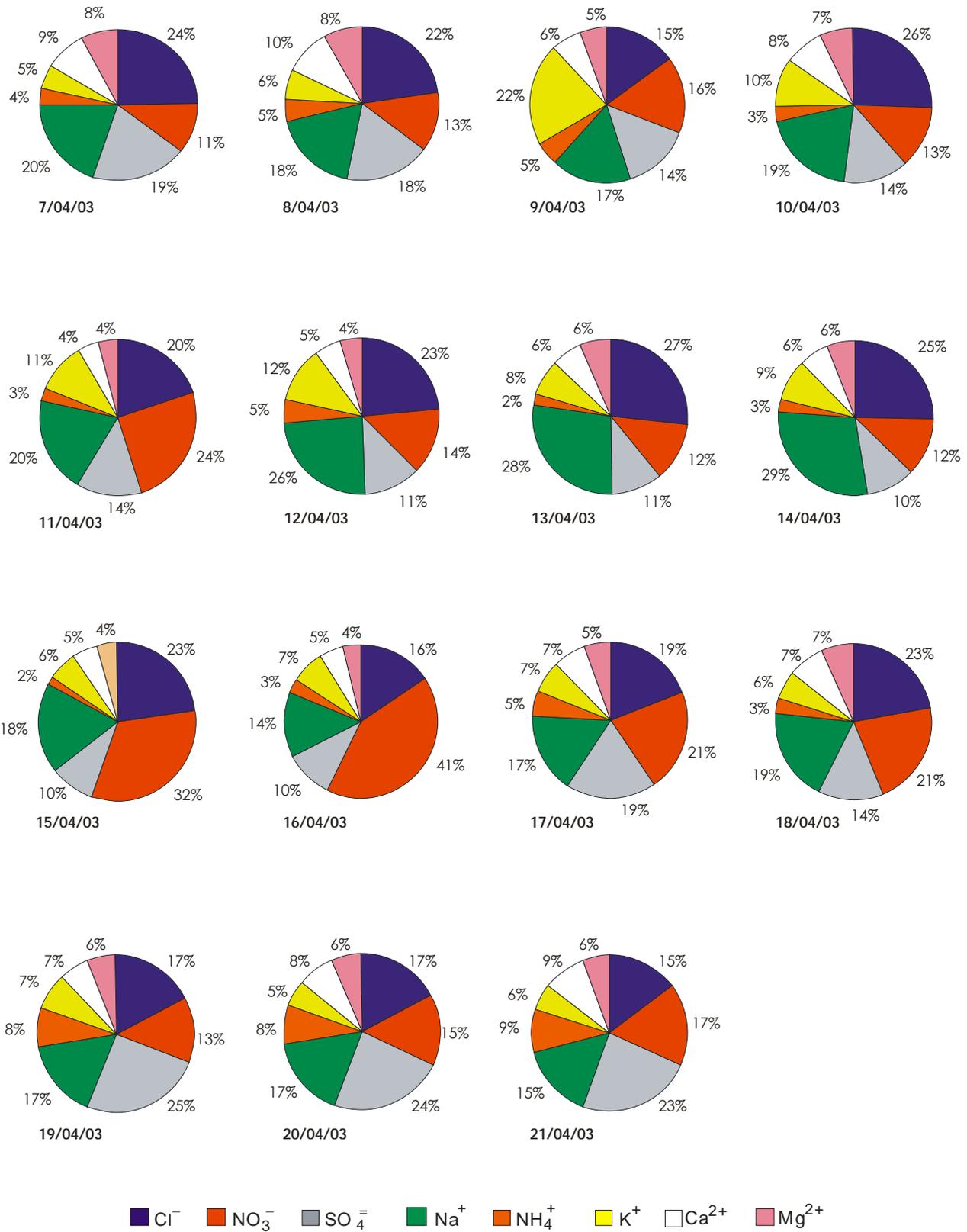


Figura 3.8d Presencia de iones en la atmósfera de Santa Ana.

Porcentaje promedio de 24 hrs.

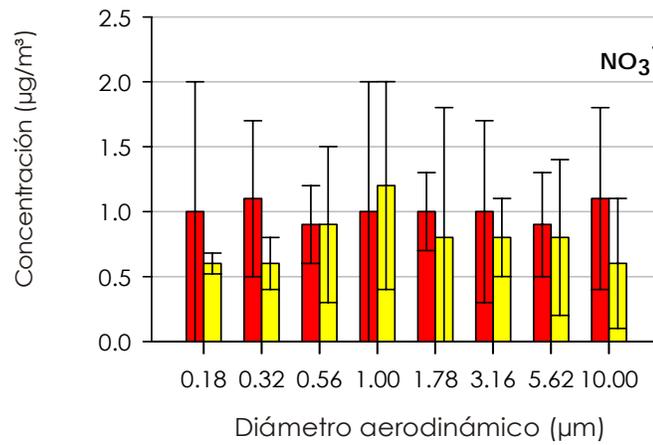
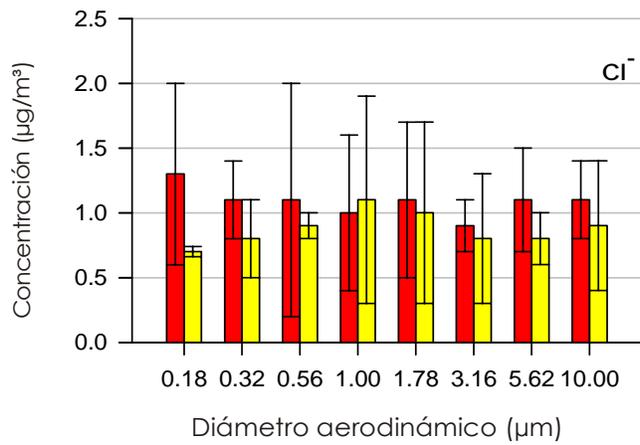
En las Figuras 3.9 y 3.10 se presenta el comportamiento de los aniones y cationes por distribución de tamaño en los dos sitios de estudio.

De acuerdo del análisis estadístico (Análisis Estadístico para Dos Muestras, [Rojo, 2007]) se desprende que en la zona de Xicalco las concentraciones de cloruros y nitratos en los diferentes tamaños se encuentran en  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, mientras que para Santa Ana los datos promedio son  $0.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para cloruros y  $0.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para nitratos.

El sulfato reportó un comportamiento muy diferente en relación a los otros dos aniones, en ambos sitios la mayor concentración se presenta en las partículas finas, en Xicalco la concentración más alta es de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el tamaño  $0.32$  y  $0.56 \mu\text{m}$ , en Santa Ana estos diámetros también son los más altos en concentración, sin rebasar  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los diámetros predominantes encontrados en este proyecto concuerdan con estudios anteriores sobre la naturaleza química de aerosoles en la ZMCM (Raga et al, 2001; Zepeda, 2003; Moya et al, 2003).

En Figura 3.10 tenemos que las concentraciones de los cationes en los diferentes tamaños no presentan una variación drástica, estadísticamente el comportamiento es semejante, a excepción del ión amonio el cual muestra una fuerte presencia en Xicalco en los tamaños de  $0.32$  y  $0.56 \mu\text{m}$ . El origen del amonio al igual que del sulfato en estos lugares puede ser debido al uso de fertilizantes en cuya formulación contengan sulfato de amonio. Las gráficas de estos dos iones presentan la misma tendencia, es decir, las concentraciones más altas se registran en las partículas finas, mientras que las concentraciones de las partículas gruesas están muy por debajo. Para poder determinar con exactitud el origen de nitratos y sulfatos se requiere hacer un estudio del tipo de fertilizantes utilizados en el área así como la frecuencia de uso.

El porcentaje de los iones en Xicalco y Santa Ana se muestra en la Figura 3.11 donde se corrobora nuevamente que los iones más abundantes en Xicalco fueron sulfato, cloruro y sodio, mientras que en Santa Ana se une el nitrato.



■ Xicalco  
■ Santa Ana

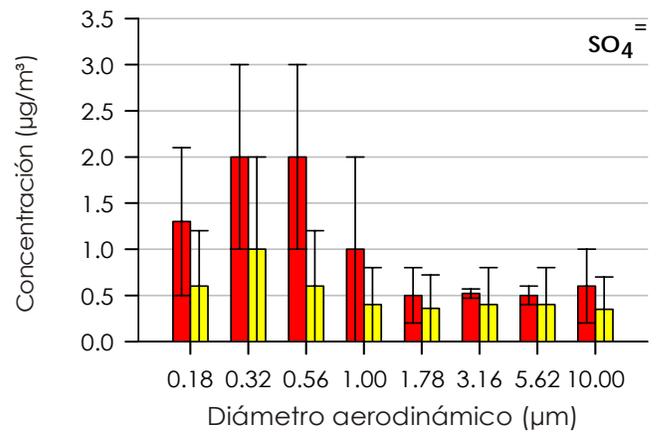


Figura 3.9 Datos promedio de la concentración de aniones en Xicalco y Santa Ana.

Horario 8:00 - 2:00 hrs.

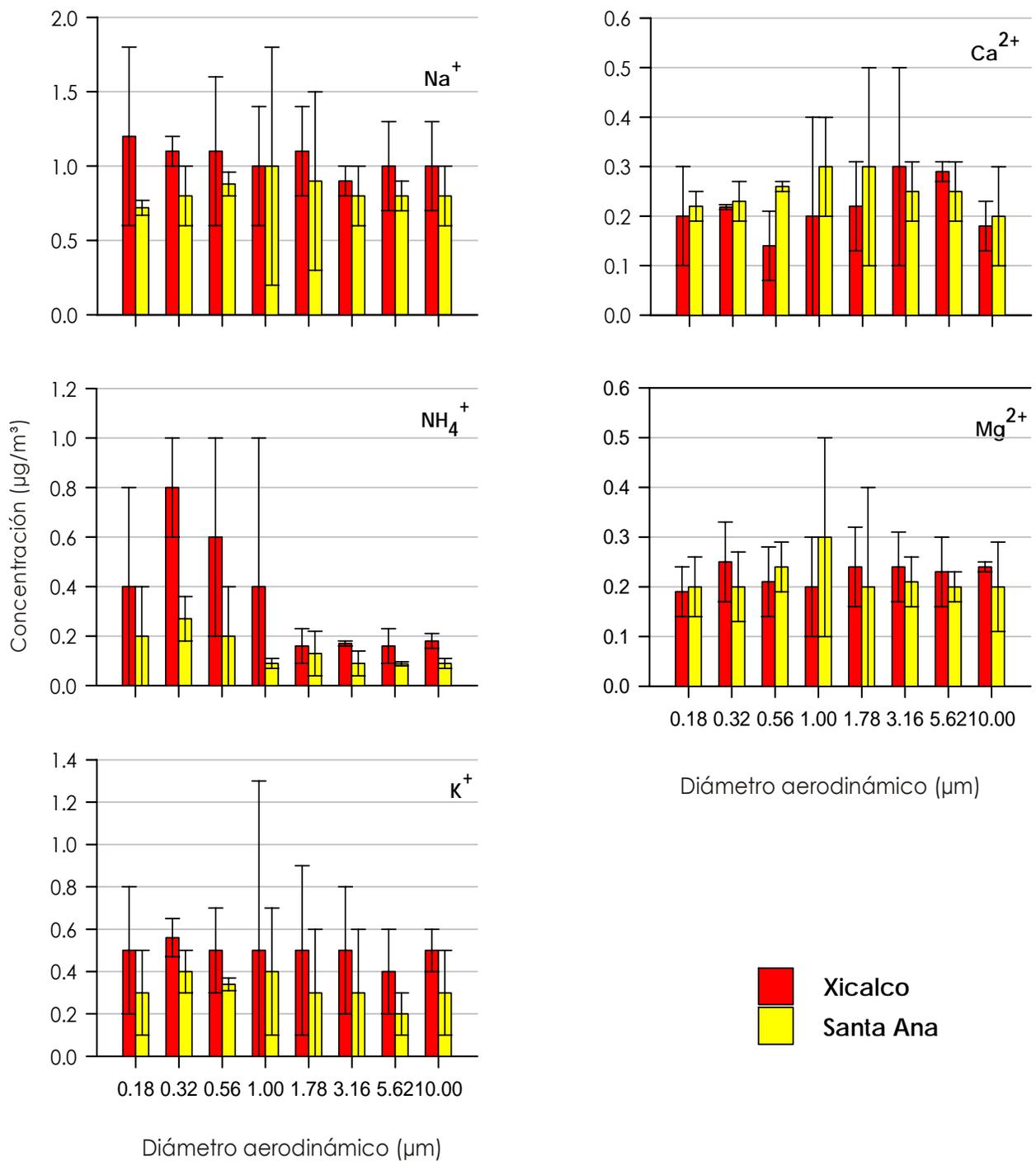
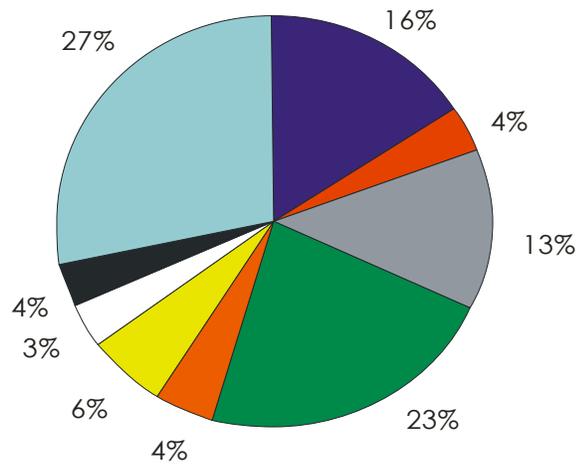


Figura 3.10 Datos promedio de la concentración de cationes en Xicalco y Santa Ana.

Horario 8:00 - 2:00 hrs.

### Xicalco



### Santa Ana

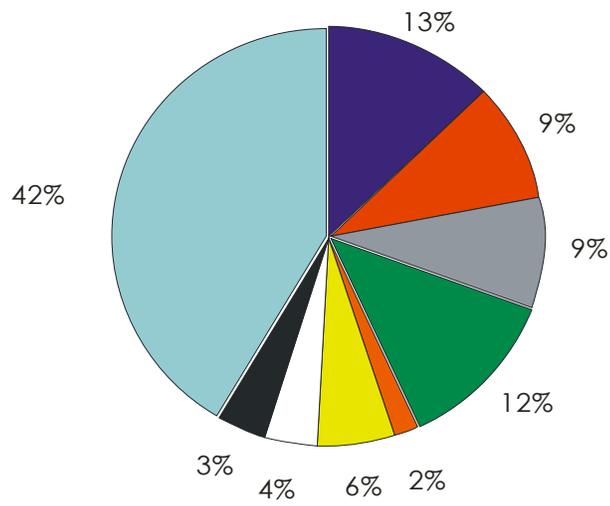


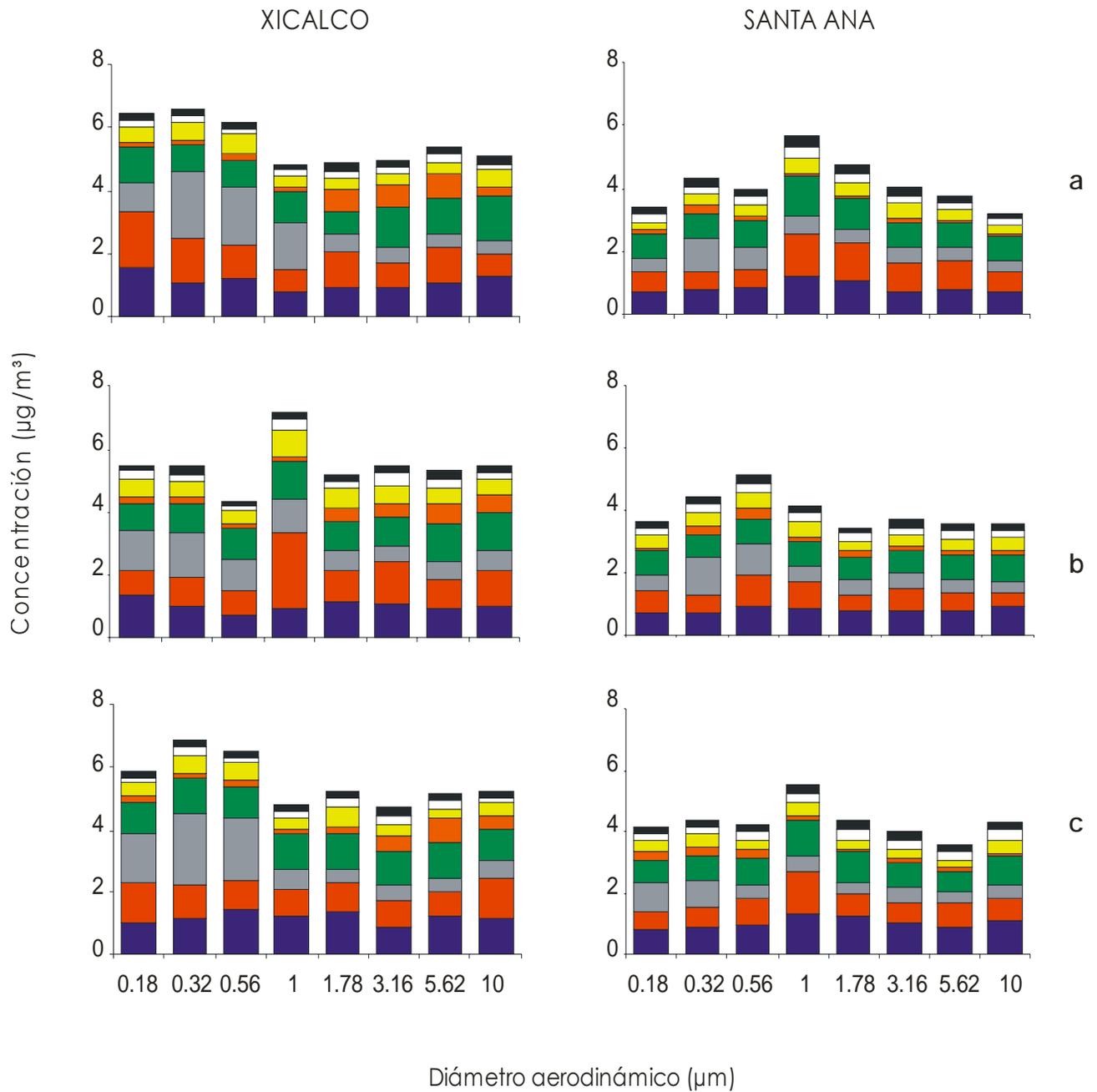
Figura 3.11 Datos promedio de iones a lo largo de las compañías en Xicalco y Santa Ana

A lo largo del día, las especies químicas detectadas pueden variar en concentración, por lo que un estudio de las especies en diferentes periodos nos da un indicio del comportamiento de las fuentes de emisión. La Figura 3.12a muestra un acumulado de los iones por diámetro de partícula y por tiempo, en el periodo matutino en Xicalco se observa que las partículas  $<PM_{10}$  son las que presentan mayor concentración, en el periodo vespertino la situación cambia, la concentración de las partículas se homogeniza a excepción del diámetro de  $PM_{10}$  en el cual se observa un aumento considerable en la concentración, esto puede deberse a procesos de envejecimiento de las partículas, durante la noche las partículas vuelven a tener un comportamiento semejante al turno matutino.

Para el sitio de Santa Ana (figura 3.12a) el turno matutino reporta la mayor concentración en las partículas  $PM_{10}$ , al igual que en Xicalco las concentraciones tienden a homogenizarse en el turno vespertino y por la noche todos los diámetros aumentan su concentración debido a los procesos de envejecimiento, las partículas  $PM_{10}$  reportan casi la misma concentración que en la mañana.

Durante la mañana las emisiones de partículas son principalmente emisiones primarias, mientras que al medio día y por la noche, pueden ser de origen secundario por lo que se lleva a cabo la conversión de gas partícula.

La misma tendencia de las concentraciones que se describen para la figura 3.12a lo podemos observar si se grafica la media vs. diámetro aerodinámico (figura 3.12b).



Cl<sup>-</sup>
 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>
 SO<sub>4</sub><sup>-</sup>
 Na<sup>+</sup>
 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>
 K<sup>+</sup>
 Ca<sup>2+</sup>
 Mg<sup>2+</sup>

Figura 3.12a Comportamiento de los iones respecto al diámetro de partículas en las campañas de Xicalco y Santa Ana respectivamente.

Horarios a) 8- 14 hrs, b) 14- 20 hrs y c) 20 - 2 hrs.

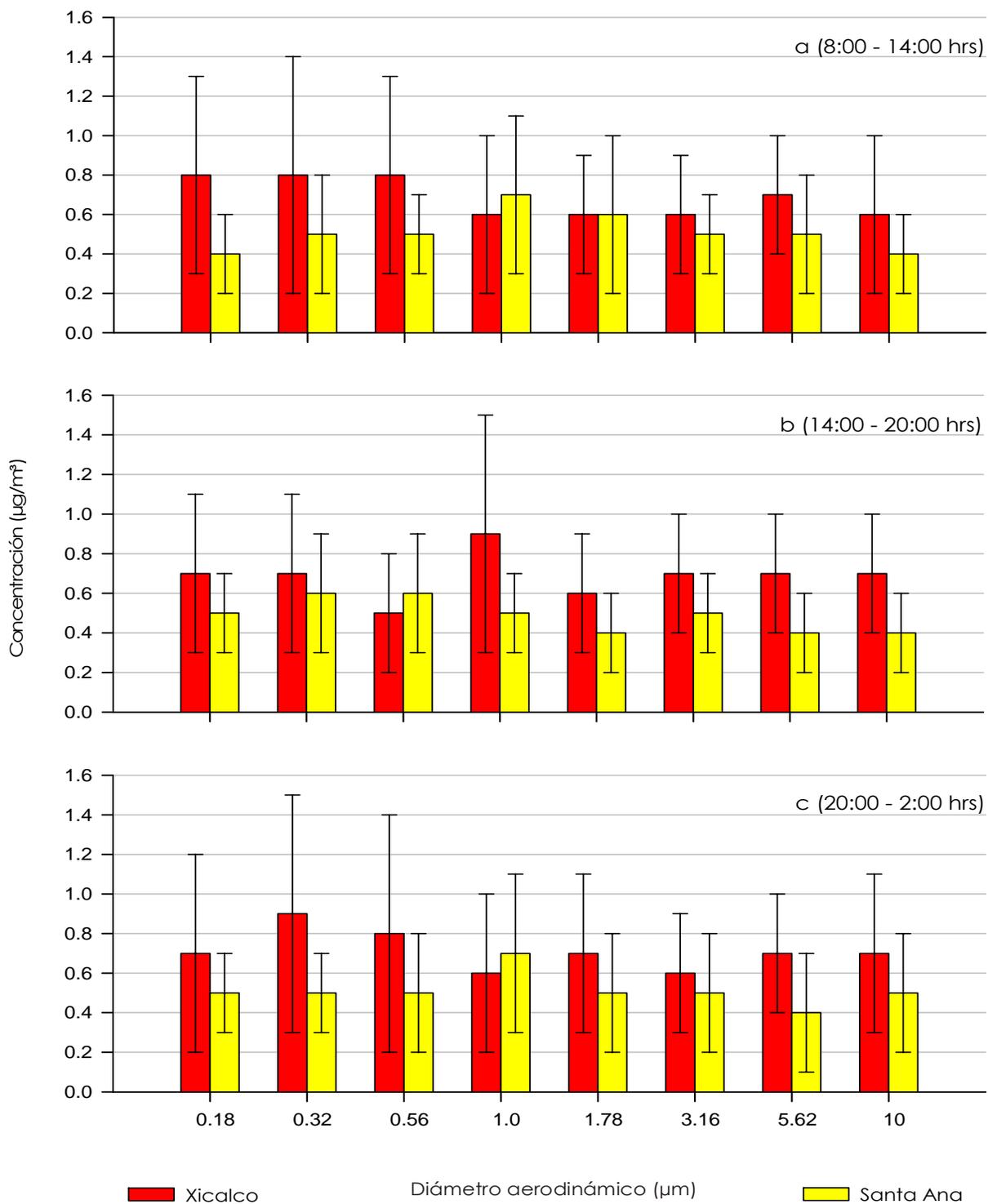


Figura 3.12b Acumulado de iones por diámetro de partículas en las campañas de Xicalco y Santa Ana, en los tres diferentes horarios de muestreo.

En la Figura 3.13 y la Tabla 5 se muestran los porcentajes y concentraciones, respectivamente, de los diferentes iones en los sitios estudiados.

Tabla 5 Datos comparativos de concentración por especie en los tres diferentes horarios en los sitios de Xicalco y Santa Ana.

ION	8:00 a 14:00 hrs Xicalco/Santa Ana ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	14:00 a 20:00 hrs Xicalco/Santa Ana ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	20:00 a 2:00 hrs. Xicalco/Santa Ana ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Cl <sup>-</sup>	95 / 103	89 / 105	103 / 122
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	41 / 80	49 / 72	25 / 81
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	75 / 69	71 / 89	82 / 66
Na <sup>+</sup>	132 / 108	131 / 103	147 / 106
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	28 / 16	23 / 23	28 / 16
K <sup>+</sup>	34 / 45	31 / 56	38 / 44
Ca <sup>2+</sup>	19 / 33	17 / 35	25 / 37
Mg <sup>2+</sup>	21 / 29	22 / 30	25 / 29
OTROS	117 / 135	193 / 117	204 / 358

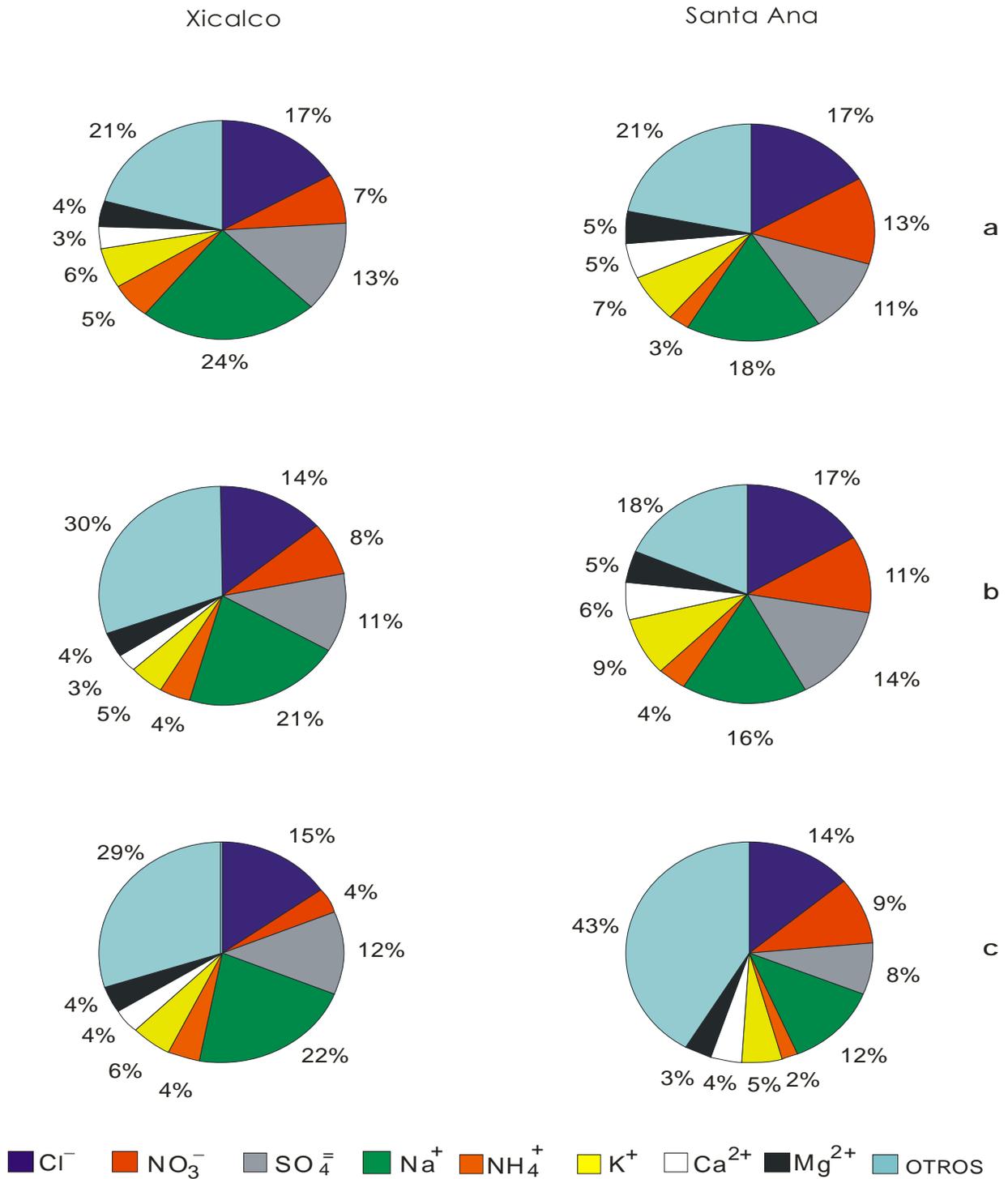


Figura 3.13 Porcentajes de los diferentes iones en la atmósfera de Xicalco y Santa Ana.

Horarios a) 8-14 hrs, b) 14-20 hrs y c) 20 - 2 hrs.

### 3.3 Balance iónico

En la Figura 3.14 se presenta la relación entre el total de cationes (sodio, amonio, potasio, calcio y magnesio) y el total de aniones (cloruro, nitrato, sulfato) por distribución de tamaño. La pendiente de la gráfica muestra la rapidez de cambio de una variable con respecto a otra, para ambos sitios se obtuvo una buena correlación, en Xicalco es de 0.73 y para Santa Ana es de 0.68.

En ambos sitios la pendiente tiene una desviación hacia los cationes, siendo más evidente en Xicalco, esto indica que los cationes presentes neutralizan a los aniones.

El estudio del balance iónico es importante ya que nos permite conocer la naturaleza ácida o básica del ambiente, una deficiencia de cationes es reflejo de un ambiente ácido, que tiene como consecuencia corrosión de metales, contaminación de cuerpos de agua, alteraciones en las construcciones y daños en la salud. Teóricamente se debe tener un sistema neutro, la expresión matemática de electro neutralidad para los iones es: (Moya et al 2003).

$$\sum v_a n_a - \sum v_c n_c = 0 \quad \text{Ec. 3.1}$$

Despejando tenemos

$$\sum v_a n_a = \sum v_c n_c \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

$v$  = carga de ión.

$n$  = número de moles

$a$  = aniones

$c$  = cationes

El número de moles se calculan a partir de:

$$moles = \frac{gramos}{PesoMolecular} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Si sustituimos en la ecuación 3.3 las concentraciones de los iones que se midieron en ambos sitios tenemos:

$$\frac{[SO_4^{2-}]^2}{96} + \frac{[NO_3^-]}{62} + \frac{[Cl^-]}{35} = \frac{[Na^+]}{23} + \frac{[NH_4^+]}{18} + \frac{[K^+]}{39} + \frac{[Ca^{2+}]^2}{40} + \frac{[Mg^{2+}]^2}{24} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Sustituyendo las concentraciones encontradas para cada ión y los pesos moleculares ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en la ecuación 3.4, se tiene:

Para Xicalco:

$$\frac{[71.22]^2}{9.6E+7} + \frac{[64.38]}{6.2E+7} + \frac{[91.64]}{3.5E+7} = \frac{[0.8333]}{2.3+E+7} + \frac{[0.1881]}{1.8E+7} + \frac{[0.4451]}{3.9E+7} + \frac{[0.1462]^2}{4.0E+7} + \frac{[0.2839]^2}{2.4E+7}$$

$$\therefore 5.1E-6 = 9.37E-6$$

Para Santa Ana:

$$\frac{[66.44]^2}{9.6E+7} + \frac{[87.12]}{6.2E+7} + \frac{[105.9]}{3.5E+7} = \frac{[99.97]}{2.3E+7} + \frac{[16.01]}{1.8E+7} + \frac{[45.459]}{3.9E+7} + \frac{[33.034]^2}{4.0E+7} + \frac{[28.659]^2}{2.4+E+7}$$

$$\therefore 5.8E-06 = 1.044E-05$$

Los resultados indican que la concentración de cationes supera a la concentración de aniones, por lo tanto los aniones son neutralizados totalmente.

El origen de cationes como sodio, calcio y magnesio fundamentalmente es por resuspensión de suelo que ocurre en época de secas, hay quema de biomasa y

se preparan las tierras para el cultivo, además de registrarse incendios forestales (Seinfeld and Pandis, 1998). Uno de los resultados preliminares del proyecto MILAGRO ([www.windows.ucar.edu](http://www.windows.ucar.edu)) fue que los incendios forestales que se registraron en la parte sur de la ZMCM afectaron directamente en el comportamiento de la contaminación de la zona metropolitana. En nuestro estudio la cantidad de potasio registrada en los sitios de estudio puede ser explicado por esta vía.

En el caso de los aniones las principales fuentes para el nitrato son la quema de biomasa y el uso de productos que contengan sales de sodio como el nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) y el nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), como pueden ser fertilizantes. Las principales fuentes de  $\text{SO}_4^-$  son las emisiones biogénicas, el uso de aceite crudo y compuestos que contengan sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ). Finalmente la presencia del ión cloruro se explica por la quema de biomasa que se registra en la zona (Seinfeld and Pandis, 1998).

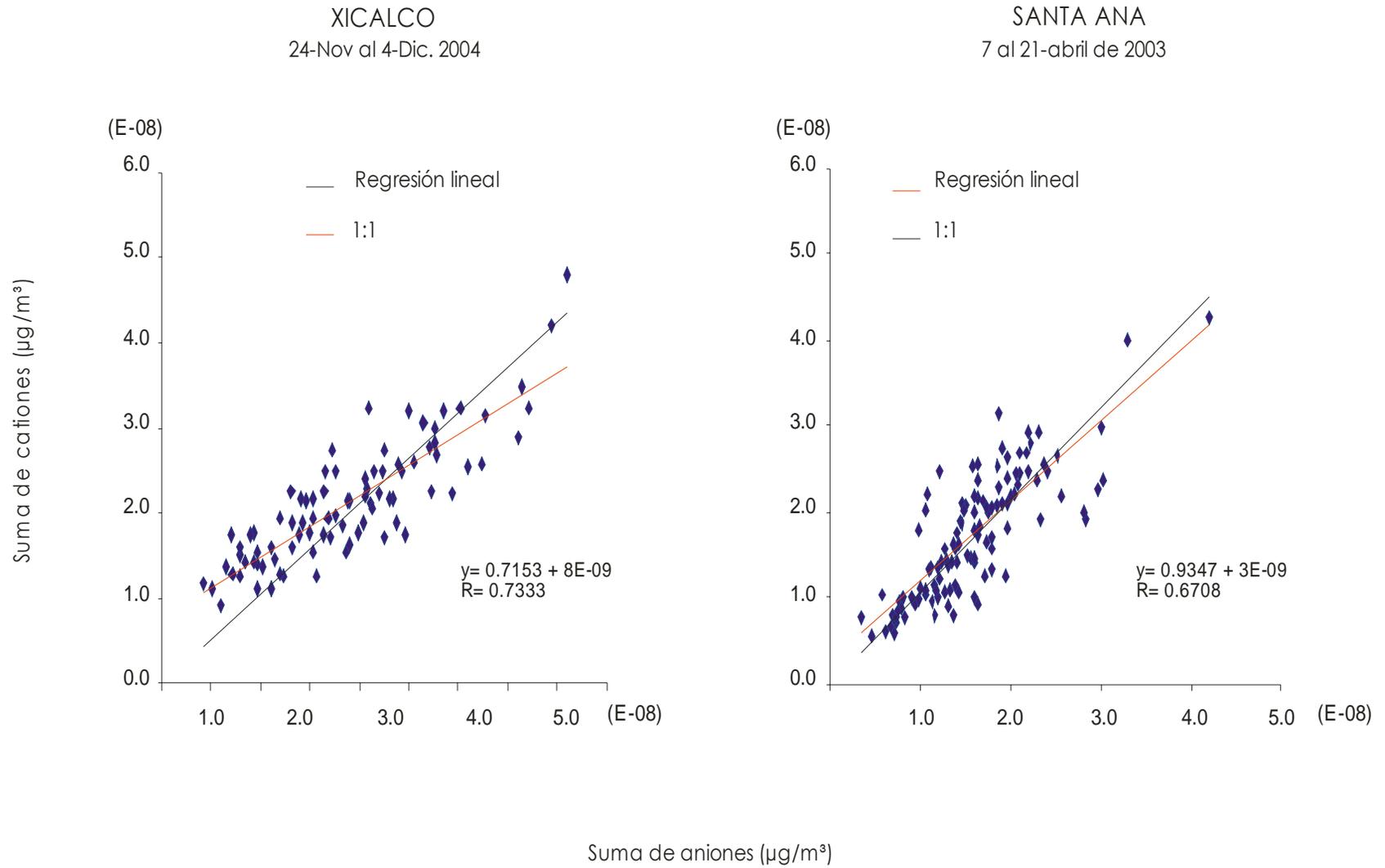


Figura 3.14 Balance iónico presente en la atmósfera de Xicalco y Santa Ana.

## CAPITULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

El análisis de datos de las concentraciones de ozono, bióxido de nitrógeno y monóxido de carbono, obtenido en los tres sitios perimetrales Xicalco, Santa Ana y Ávila Camacho, junto con los datos promedios de la estación que denominamos RAMA (donde se consideró el promedio de la concentración de la variable de estudio de 10 estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico: Tacubaya, ENEP Acatlán, San Agustín, Tlanepantla, Xalostoc, La Merced, Pedregal, Cerro de la Estrella, Plateros y Hangares) muestra que los sitios de estudio, presentan un comportamiento similar a la pluma de contaminantes generada en Ciudad de México, esto es, los picos de ozono se presentan a las mismas horas tanto en los sitios como en la pluma que representa la concentración promedio de las 10 estaciones. En caso del bióxido de nitrógeno y monóxido de carbono se observó un desfase en los picos sugiriendo la existencia de un transporte desde la Ciudad hacia los sitios de interés.

Durante la mañana en Xicalco y Santa Ana las concentraciones de partículas son principalmente emisiones primarias, mientras que al medio día y por la noche, pueden ser de origen secundario. Los resultados obtenidos en estudios anteriores realizados para la ZMCM muestran que la concentración de las partículas finas es alta, concordando con nuestros resultados, esto es, en la mayoría de los casos los tamaños  $0.18$  y  $0.32 \mu\text{m}$  son los que presentan mayor concentración en masa y en iones.

El análisis de iones realizado en dos sitios perimetrales de la Ciudad de México muestra que las especies más abundantes son cloruro, sulfato, sodio y nitrato, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en estudios anteriores para la Ciudad de México.

La atmósfera de las poblaciones cercanas a la Ciudad se puede alterar por los contaminantes que son emitidos desde la misma, el comportamiento observado en cada lugar dependerá de la concentración y composición química de los contaminantes, de los vientos y de la geografía del lugar.

El balance iónico para Xicalco y Santa Ana muestra una buena correlación entre los aniones y cationes, observándose un predominio de los cationes. Para establecer mejor el balance iónico es necesario considerar más iones.

## **4.2 Recomendaciones**

Se considera continuar con el monitoreo del tamaño y composición de las partículas en la ZMCM y en otros sitios perimetrales, para conocer el grado en que están siendo afectados por la contaminación generada en la Ciudad.

En el presente estudio se observó que las partículas finas son las de mayor concentración, por lo cual, se recomienda hacer una mejor caracterización de estas partículas. Investigaciones sobre la salud del ser humano han mostrado que este tipo de partículas son responsables de causar daños a nivel del sistema respiratorio.

Realizar un análisis de vientos en la ZMCM respecto a otros sitios perimetrales, para conocer el porcentaje de horas en las que una componente del viento se dirige desde la Ciudad hacia los sitios de interés.

## REFERENCIAS

Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub>. *Atmos Environ.* 2000. 34: 2063-2101.

Biswas P., Flagan C.R. High velocity inertial impactors. *Environ. Sci. Technol.* 1984. 18, 611-616.

Bond T.C., Anderson T.L., Campbell D. Calibration and intercomparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols. *Aerosol Sci. Technol.* 1999. 30: 582-600.

Bravo A.H., Perrin F., Sosa R. y Torres R. Contaminación atmosférica en la zona metropolitana de la Ciudad de México: Ocurrencia y estrategias de control. *Boletín GEOS*: 1987. 7 (1), 3-9.

Carvalho A.C., Carvalho A., Gelpi I., Barreiro M., Borrego C., Miranda A.I. and Pérez-Muñuzuri V. Influence of topography and land use on pollutants dispersion in the Atlantic coast of Iberian Peninsula. *Atmos Environ.* 2006. 40, Issue21: 3969-3982.

Castillejos M., Borja-Aburto V.H., Dockery D.W., Gold D.R., Loomis D. Airborne coarse particles and mortality. *Inhalation Toxicology.* 2000. 12: 61-72.

Castro T., Raga G.B, Baumgardner D. ¿Puede la contaminación atmosférica generada en la zona metropolitana de la Ciudad de México afectar lugares más allá de sus fronteras? *Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias.* 2003. 54,1. 54-59.

Castro T., Salcido A. "Influencia de la contaminación atmosférica de la zona metropolitana de la Ciudad de México en tres sitios perimetrales". *Serie Contaminación Atmosférica, Colegio Nacional, México. Capítulo V. México.* 2006. 119-144.

Chang L.T., Sarnat J., Wolfson J.M., Rojas-Bracho L., Suh H.H., Koutrakis P. Development of a personal multi-Pollutant exposure sampler for particulate matter and criteria gases. In: *Pollution Atmospherique.* 1999. Numero Special 40e Anniversaire de L'APPA, 31-39.

Cheng M.T., Tsai Y.I. Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas. *Sci. Total Environ.* 2000. 263: 101-114.

Chow C.J., Watson J.G., Edgerton S.A. y Vega E., Chemical composition of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City during winter 1997, *Sci. Total Environ.* 2002. 287: 177-201.

Conde C., Ferrer R.M., Magaña V., Araujo R. y Gay C. Regional Climate Forecast for Summer of 2000 and it's application in the Agricultural Activities of Tlaxcala, Mexico. *Proceedings of the International Forum Climate Prediction, Agriculture and Development.* April 26 –28. Palisades, New York. 2000.

De Foy B., Varela J.R., Molina L.T., Molina M.J.. Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban pluma. *Atm. Chem. Phys.* 2006. 6: 2321-2335.

Doran J.C., et al. The IMADA-AVER boundary layer experiment in the Mexico City Area. *Bull Am Meteorol Soc.* 1998. 79: 2497-2508.

Dunn M.J., Jiménez J.L., Baumgarner D., Castro T., McMurry P.H., Smith J.N. Measurements of Mexico City nanoparticles size distributions: Observations of new particle formation and growth. *Geophysical Research Letters.* 2004. 31: L10102.

Edgerton S.A., et al. Particulate air pollution in Mexico City. *J Air Was Man Assoc.* 1999. 49: 1221-1229.

Fast J.D., Zhog S. Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin. *J Geophys Res.* 1998. 103: 927-946.

Flores E.M., Araujo R., Betancourt E. y Liverman D. Comportamiento de la superficie potencialmente apta para el cultivo del maíz de temporal ante un cambio climático. *Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. México Ante el Cambio Climático.* 1996. 8 a 11 mayo, 179-184. Cuernavaca, Morelos, México.

Harrison R.M., Jones A.M. Multisite study of particle Number Concentrations in Urban Air. *Environ. Sci. Technol.* 2005. 29: 6063 -6070.

Hideman M.L., Markowsky G.R. y Cass G.R. Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol, *Environ. Sci. Technol.* 1991. 25: 744-759.

Jacobson M.Z. Atmospheric pollution. History, Science, and regulation. Cambridge. 2002. E.U.A. 50-116.

Jaimes P.M.C. Análisis de la tendencia y comparación de la contaminación atmosférica por ozono para la Ciudad de México y Los Ángeles, California EUA. Tesis de Mestría, UNAM, 2004.

Jáuregui E. Mexico City's heat island revisited. *Erdkunde*. 1993. 47, 185-195.

Jialiang Feng, Min Hu, Chak K. Chan, P.S. Lau, Ming Fang, Lingyan He and Xiaoyan Tang. A comparative study of the organic matter in PM<sub>2.5</sub> from three Chinese megacities in three different climatic zones. *Atmos Environ*. 2006. 40, Issue 21: 3983-3994.

Jin Xu DuBois D., Pitchford M., Green M. and Etyemezian V. Attribution of sulfate aerosols in Federal Class I areas of the western United States based on trajectory regression analysis. *Atmos Environ*. 2006. 40, Issue 19: 3433-3447.

Laden F., Neas L.M., Dockery D.W. and Schwartz J. Association of Fine Particulate Matter from Different Sources with Daily Mortality in Six US Cities, *Environ. Health. Persp*. 2000. 108: 941-947.

Lighty S.A., Veranth J.M. and Sarofim A.F. Combustion aerosol factors governing their size and composition and implications to human health. *Air Waste Manage. Assoc*. 2000. 50: 1565-1618.

Marple V.A, Rubow K.L., Behm S.M. A Microorifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI): Description, calibration and use. *Aerosol Sci Technol*. 1991. 14: 434-446.

Marple, V.A., Kenneth L.R., Behm S.M. A microorifice Uniform deposit impactor (MOUDI): descripción, calibración, and use. *Aerosol Science and Technology*. 1991. 14:434-446.

Márquez C., Castro T., Muhlia A., Moya M., Martínez-Arroyo A., Báez A. Measurement of aerosol particles, gases and flux radiation in the Pico de Orizaba National Park, and its relationship to air pollution transport. *Atmos. Environ*. 2005. 39, Issue 21, 3877-3890.

McMurry P.H. A review of atmospheric aerosol measurements. *Atmos. Environ*. 2000. 34: 1959-1999.

Mogo S., Cachorro V.E., Frutos A.M. Morphological, chemical and optical absorbing characterization of aerosol in the urban atmosphere of Valladolid. *Atmos. Chem. Phys. Discuss*. 2005. 5:3921-3967.

Molnár A, Mészáros E. On the relation between the size and chemical composition of aerosol particles and their optical properties. *Atmos Environ* 2001. 35: 5053-5058.

Moolgavkar S.H. Airpollution and daily mortality in Three US counties. *Environmental Health Perspective*. 2000.108: 777-784.

Moya M., Castro T., Zepeda M., Báez A. Characterization of size-differentiated inorganic composition of aerosols in Mexico City. *Atmos Environ*. 2003. 37: 3581-3591.

Nilsson E.D., Rannik U., Kulmala M., Buzorius G., O'Dowd C.D. Effect of continental boundary layer evolution, convection, turbulence and entrainment, on aerosol formation. *Tellus*. 2001. 53B: 441-461.

Oke T.R., Spronken-Smith R.A., Jáuregui E., Grimmond C.S.B. The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmos. Environ*. 1999. 33. 3919-3930.

Petrich B. 2001. El desastre alimentario de Centroamérica. Desnutrición, cambios climáticos y el proceso globalizador azotan la región. En: *La Jornada*. 2 octubre, 2001. México.

PROAIRE. Programa para mejorar la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México. 1995-2000.

PROAIRE. Programa para mejorar la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México. 2002-2010.

Raga G.B., Baumgardner D., Castro T., Martínez-Arroyo A., Navarro-González R. Mexico City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960-2000). *Atmos Environ*. 2001. 35: 4041-4058.

Raga G.B., Castro T., Baumgardner D. The impact of megacity pollution on local climate and implications of the regional environment; Mexico City. *Atmos. Environ*. 2001. 35: 1805-1811.

Raga G.B., Kok G.L., Baumgardner D., Báez A., Rosas I. Evidence for Volcanic Influence on Mexico City Aerosols. *Geophys Res Lett*. 1999. 26: 1149-1152.

Rojo C. Francisco. 2007. Comunicación personal.

Salcido A., Sozzi R., Castro T. Least squares variation approach to the convective mixing height estimation problem. *Environ Model Soft*. 2003.

Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air pollution to Climate Change. Ed. Wiley, New York. 1998.

Seung J.L., Demokritou P., Koutrakis P., Delgado-Saborit J.M. Development and evaluation of personal respirable particulate sampler (PRPS). Atmos Environ. 2005. 40: 212-224.

Shendrikar A.D., Steinmetz W. K. Integrating nephelometer measurements for the airborne fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) mass concentrations. Atmos Environ. 2003. 37: 1383-1392.

Skoog Douglas A., West Donal M., Holler F. James., Crouch Stanley R., Fundamentos de Química Analítica. Octava Edición. Editorial Thomson. 2005

Solarte P.I., Caicedo M., Restrepo S. "Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Bogotá" Revista Médica Sanitas. 2002. 5. Num. 2.

Vana M., Tamm E., Viil M. Experimental study of the air pollution transport by synchronized monitoring of atmospheric aerosols. Atmospheric Environment. 1999. 37: 4615-4628.

Wark Kenneth, Warner C.F. Contaminación del aire, origen y control. LIMUSA. México 1997. pp 526,527, 194.

Wayne Richard P. Chemistry of atmospheres. Secon Edition. Ed. Oxford University Press. 1991.

Whiteman C.D., Zhong S., Bian X., Fast J.D., Doran J.C. Boundary layer evolution and regional-scale diurnal circulations over the Mexico Basin and Mexican plateau. J Geophys Res. 2000; 105(D8):10081-10102.

[www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)

[www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)

[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

[www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)

[www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx)

[www.sma.df.gob.mx/simat](http://www.sma.df.gob.mx/simat)

[www.teledyne-api.com](http://www.teledyne-api.com)

[www.sensidyne.com](http://www.sensidyne.com)

[www.windows.ucar.edu](http://www.windows.ucar.edu)

Zepeda Pérez M. B. Composición química de partículas finas de la zona suroeste de la Ciudad de México. Tesis de Maestría, UNAM . 2003.



ESTUDIO ESTADISTICO

Estadística para gráficas por horario

Figura 3.7 20:00-2:00 hrs

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	11	15	11	15	11	14	11	15	11	14	11	14	11	14	11	15
media	2.1	3.9	4	4	2	3	1.5	2	3	3	2.6	5	2.5	4	1.7	4
incetidumbre +/-	0.8	0.9	1	1	1	1	0.6	1	3	1	0.9	2	0.7	1	0.8	1
desv. stdr.	1.19	1.62	1.96	1.88	1.97	2.12	0.82	2.1	3.8	2.18	1.33	3.09	1.11	2.14	1.11	1.84
coef. de var. %	56.52	41.79	47.66	46.72	85.68	64.57	55.97	102.2	143.4	68.1	50.57	57.14	45.31	56.9	65.5	41.59
mediana	1.85	3.98	4.25	3.42	1.57	2.54	1.11	1.38	1.29	2.91	2.59	5.04	2.68	3.24	1.48	4.16
media geométrica	1.82	3.23	3.69	3.67	1.88	2.73	1.28	1.49	1.62	2.58	2.32	4.57	2.06	3.18	1.18	3.94
varianza	1.43	2.63	3.85	3.54	3.9	4.52	0.67	4.41	14.46	4.77	1.77	9.6	1.24	4.61	1.25	3.41
Ho: $\mu_1=\mu_2$	rechazar		aceptar		aceptar		aceptar		aceptar		rechazar		aceptar		rechazar	

Estadística para gráficas ANIONES, CI-

Figura 3.9

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
media	1.3	0.7	1.1	0.8	1.1	0.9	1	1.1	1.1	1	0.9	0.8	1.1	0.8	1.1	0.9
incetidumbre +/-	0.7	0.04	0.3	0.3	0.9	0.1	0.6	0.8	0.6	0.7	0.2	0.5	0.4	0.2	0.3	0.5
desv. stdr.	0.26	0.2	0.11	0.11	0.349	0.054	0.247	0.307	0.22	0.28	0.099	0.18	0.16	0.07	0.134	0.2
coef. de var. %	20.13	6.2	10.48	14.29	31.04	6.2	25.08	28.45	19.93	28.7	10.46	22.26	15.14	9.62	12.14	23.08
mediana	1.33	0.72	1.03	0.74	1.2	0.85	0.92	1.18	1.11	1.023	0.89	0.72	1.03	0.76	1.14	0.81
media geométrica	1.29	0.73	1.05	0.77	1.08	0.87	0.96	1.04	1.12	0.95	0.94	0.81	1.054	0.79	1.09	0.87
varianza	0.06	0.002	0.012	0.012	0.122	0.003	0.06	0.09	0.05	0.07	0.009	0.03	0.02	0.005	0.01	0.04
Ho: $\mu_1=\mu_2$	rechazar		rechazar		aceptar											

Estadística para gráficas ANIONES, NO3-

Figura 3.9

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
media	1	0.6	1.1	0.6	0.9	0.9	1	1.2	1	0.8	1	0.8	0.9	0.8	1.1	0.6
incetidumbre +/-	1	0.08	0.6	0.2	0.3	0.6	1	0.8	0.3	1	0.7	0.3	0.4	0.6	0.7	0.5
desv. stdr.	0.5	0.03	0.25	0.06	0.13	0.24	0.96	0.31	0.123	0.382	0.3	0.11	0.16	0.22	0.26	0.18
coef. de var. %	39.37	5.2	22.26	10.12	15.15	28.44	74.5	25.7	11.99	46.39	31.17	14.72	17.23	28.49	24.43	28.34
mediana	1.31	0.59	1.04	0.6	0.95	0.91	0.82	1.41	1.02	0.73	0.82	0.73	0.89	0.89	1.12	0.62
media geométrica	1.2	0.6	1.11	0.6	0.9	0.84	1.8	1.2	1.02	0.76	0.93	0.78	0.92	0.76	1.054	0.062
varianza	0.25	0.0009	0.06	0.004	0.019	0.06	0.92	0.1	0.012	0.146	0.09	0.013	0.025	0.05	0.069	0.032
Ho: $\mu_1=\mu_2$	aceptar		rechazar		aceptar											

Estadística para gráficas ANIONES, SO4=

Figura 3.9

### ESTUDIO ESTADISTICO

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
media	1.3	0.6	2	1	2	0.6	1	0.4	0.5	0.36	0.52	0.4	0.5	0.4	0.6	0.35
incetidumbre +/-	0.8	0.5	1	0.5	1	0.6	1	0.1	0.3	0.07	0.05	0.2	0.1	0.1	0.4	0.07
desv. stdr.	0.3	0.2	0.46	0.2	0.55	0.23	0.44	0.06	0.1	0.026	0.02	0.07	0.06	0.05	0.15	0.029
coef. de var. %	24.22	34.55	23.78	21.19	33.7	38.12	40.86	14.3	19.26	7.28	4.16	17.06	12.02	15.08	26.35	8.37
mediana	1.3	0.47	2.16	1.05	1.87	0.7	1.05	0.4	0.49	0.518	0.518	0.44	0.48	0.41	0.59	0.34
media geométrica	1.23	0.56	1.92	0.95	1.56	0.59	1.02	0.41	0.53	0.35	0.52	0.41	0.49	0.38	0.55	0.35
varianza	0.09	0.04	0.21	0.04	0.3	0.05	0.19	0.003	0.011	0.0006	0.0004	0.005	0.003	0.003	0.02	0.0008
Ho: $\mu_1=\mu_2$	rechazar		rechazar		rechazar		aceptar		rechazar		aceptar		aceptar		aceptar	

Estadística para gráficas ANIONES, Na+ Figura 3.10

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
media	1.2	0.72	1.1	0.8	1.1	0.88	1	1	1.1	0.9	0.9	0.8	1	0.8	1	0.8
incetidumbre +/-	0.6	0.05	0.1	0.2	0.5	0.08	0.4	0.8	0.3	0.6	0.1	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2
desv. stdr.	0.23	0.01	0.056	0.09	0.5	0.08	0.176	0.318	0.138	0.223	0.045	0.064	0.128	0.051	0.139	0.08
coef. de var. %	19.17	2.61	4.91	12.25	0.18	0.03	18.52	30.96	12.51	23.84	4.9	8.4	13.2	6.72	13.85	10.81
mediana	1.19	0.72	1.14	0.78	16.77	3.51	0.92	1.08	1.17	1.057	0.91	0.78	0.97	0.76	1.03	0.84
media geométrica	1.19	0.71	1.14	0.75	1.07	0.88	0.94	0.99	1.1	0.91	0.92	0.76	0.96	0.75	0.99	0.8
varianza	0.05	0.0003	0.003	0.008	0.033	0.0009	0.031	0.101	0.01	0.049	0.002	0.004	0.016	0.0026	0.01	0.007
Ho: $\mu_1=\mu_2$	aceptar		rechazar		aceptar		aceptar		aceptar		rechazar		aceptar		aceptar	

Estadística para gráficas ANIONES, NH4+ Figura 3.10

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
media	0.4	0.2	0.8	0.27	0.6	0.2	0.4	0.09	0.16	0.13	0.17	0.09	0.16	0.088	0.18	0.09
incetidumbre +/-	0.4	0.2	0.2	0.09	0.4	0.2	0.6	0.02	0.07	0.09	0.01	0.05	0.07	0.008	0.03	0.02
desv. stdr.	0.14	0.086	0.062	0.035	0.143	0.066	0.23	0.008	0.02	0.03	0.005	0.01	0.026	0.003	0.011	0.009
coef. de var. %	35.11	57.38	8.16	13.37	25.96	35.53	53.14	8.62	16.57	28.28	3.07	19.6	16.9	3.47	6.2	10.3
mediana	0.41	0.1	0.78	0.27	0.52	0.177	0.39	0.092	0.15	0.12	0.17	0.09	0.146	0.089	0.18	0.086
media geométrica	0.38	0.36	0.75	0.26	0.53	0.179	0.4	0.09	0.16	0.12	0.17	0.09	0.15	0.087	0.1788	0.087
varianza	0.02	0.007	0.003	0.001	0.02	0.004	0.5	0.000064	0.0007	0.001	0.00002	0.0003	0.0006	0.000009	0.0001	0.00008
Ho: $\mu_1=\mu_2$	aceptar		rechazar		rechazar		aceptar		aceptar		rechazar		rechazar		rechazar	

Estadística para gráficas ANIONES, K+ Figura 3.10

0.18	0.32	0.56	1	1.78	3.16	5.62	10
------	------	------	---	------	------	------	----

### ESTUDIO ESTADISTICO

	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
media	0.5	0.3	0.56	0.4	0.5	0.34	0.5	0.4	0.5	0.3	0.5	0.3	0.4	0.2	0.5	0.3
incetidumbre +/-	0.300	0.200	0.090	0.100	0.200	0.030	0.800	0.300	0.400	0.300	0.300	0.300	0.200	0.100	0.100	0.200
desv. stdr.	0.112	0.066	0.037	0.055	0.090	0.012	0.320	0.120	0.144	0.116	0.114	0.111	0.082	0.051	0.049	0.079
coef. de var.%	23.627	22.047	6.544	14.432	16.454	3.385	61.566	28.908	27.581	35.330	25.209	33.302	22.402	21.859	10.161	23.082
mediana	0.451	0.275	0.574	0.367	0.572	0.337	0.336	0.483	0.594	0.359	0.389	0.347	0.349	0.222	0.502	0.313
media geométrica	0.465	0.294	0.562	0.379	0.539	0.342	0.464	0.402	0.507	0.311	0.442	0.319	0.359	0.231	0.482	0.335
varianza	0.013	0.004	0.001	0.003	0.008	0.000	0.102	0.014	0.021	0.013	0.013	0.012	0.007	0.003	0.002	0.006
Ho: $\mu_1=\mu_2$	aceptar		rechazar		aceptar											

Estadística para gráficas ANIONES, Ca 2+

Figura 3.10

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
media	0.2	0.22	0.218	0.23	0.14	0.26	0.2	0.3	0.22	0.3	0.3	0.25	0.29	0.25	0.18	0.2
incetidumbre +/-	0.100	0.030	0.005	0.040	0.070	0.010	0.200	0.100	0.090	0.200	0.200	0.060	0.020	0.060	0.050	0.100
desv. stdr.	0.045	0.014	0.002	0.018	0.028	0.005	0.074	0.056	0.037	0.063	0.094	0.023	0.006	0.025	0.021	0.040
coef. de var.%	19.981	6.383	0.980	7.900	19.239	1.872	31.756	19.345	16.756	23.841	30.693	9.233	2.114	10.159	11.557	17.050
mediana	0.220	0.215	0.219	0.220	0.160	0.267	0.196	0.305	0.209	0.273	0.295	0.241	0.286	0.246	0.187	0.236
media geométrica	0.224	0.220	0.218	0.226	0.143	0.264	0.227	0.284	0.220	0.258	0.297	0.249	0.288	0.248	0.184	0.235
varianza	0.0021	0.0002	0.0000	0.0003	0.0008	0.0000	0.0055	0.0031	0.0014	0.0039	0.0088	0.0005	0.0000	0.0006	0.0005	0.0016
Ho: $\mu_1=\mu_2$	aceptar		aceptar		rechazar		aceptar									

Estadística para gráficas ANIONES, Mg

Figura 3.10

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA	XICALCO	STA. ANA
No de datos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
media	0.19	0.2	0.25	0.2	0.21	0.24	0.2	0.3	0.24	0.2	0.24	0.21	0.23	0.2	0.24	0.2
incetidumbre +/-	0.050	0.060	0.080	0.070	0.070	0.050	0.100	0.200	0.080	0.200	0.070	0.050	0.070	0.030	0.010	0.090
desv. stdr.	0.021	0.025	0.031	0.029	0.027	0.022	0.038	0.093	0.031	0.061	0.030	0.018	0.028	0.013	0.005	0.037
coef. de var.%	11.149	13.016	12.112	14.853	12.584	9.142	18.770	35.204	13.202	26.161	12.506	8.809	12.142	6.367	2.088	18.102
mediana	0.179	0.183	0.269	0.194	0.203	0.245	0.223	0.277	0.221	0.245	0.241	0.199	0.218	0.204	0.246	0.208
media geométrica	0.189	0.194	0.251	0.195	0.210	0.236	0.202	0.252	0.237	0.226	0.240	0.205	0.233	0.204	0.244	0.200
varianza	0.0004481	0.0006471	0.0009364	0.000848	0.000705	0.0004699	0.001476	0.00865	0.000992	0.0036733	0.000907	0.0003291	0.0008078	0.000169	2.6E-05	0.001336
Ho: $\mu_1=\mu_2$	aceptar		aceptar		aceptar		aceptar		aceptar		aceptar		aceptar		aceptar	

Estadística para gráficas por horario

Figura 3.12b 8:00-14:00 hrs

0.18	0.32	0.56	1	1.78	3.16	5.62	10
------	------	------	---	------	------	------	----

**ESTUDIO ESTADISTICO**

	XICALCO	STA. ANA														
No de datos	8	8	8	8	8	8	8.00	8.00	8.00	8.00	8	8	8	8	8	8
media	0.8	0.4	0.8	0.5	0.8	0.5	0.6	0.7	0.6	0.60	0.6	0.5	0.7	0.5	0.6	0.4
incetidumbre +/-	0.5	0.2	0.6	0.3	0.5	0.2	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2
desv.stdr.	0.64	0.25	0.70	0.30	0.60	0.29	0.49	0.49	0.34	0.43	0.36	0.29	0.38	0.31	0.48	0.26
coef. de var.%	79.11	57.68	84.73	55.94	77.43	58.70	81.10	68.97	56.51	72.17	58.15	58.35	56.48	66.32	75.05	63.99
mediana	0.69	0.39	0.71	0.48	0.75	0.47	0.50	0.51	0.60	0.41	0.62	0.48	0.65	0.37	0.46	0.32
media geométrica	0.56	0.35	0.57	0.47	0.55	0.41	0.44	0.55	0.51	0.45	0.53	0.41	0.57	0.37	0.49	0.33
varianza	0.41	0.06	0.49	0.09	0.36	0.08	0.24	0.24	0.12	0.18	0.13	0.09	0.14	0.10	0.23	0.07

Estadística para gráficas por horario

Figura 3.12b 14:00-20:00 hrs

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA														
No de datos	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
media	0.7	0.5	0.7	0.6	0.5	0.6	0.9	0.5	0.6	0.4	0.7	0.5	0.7	0.4	0.7	0.4
incetidumbre +/-	0.4	0.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.6	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
desv.stdr.	0.4668	0.2414	0.4625	0.3261	0.3580	0.3274	0.7277	0.2884	0.3487	0.2325	0.3671	0.2619	0.3277	0.2569	0.3789	0.2770
coef. de var.%	68.0169	52.8120	68.0383	58.5167	65.9660	51.3654	81.1571	55.2433	53.7778	53.7240	53.5468	56.6271	49.5963	58.1725	55.2811	61.9629
mediana	0.6773	0.4895	0.7291	0.5006	0.5944	0.6745	0.9069	0.5411	0.6304	0.4312	0.5500	0.3966	0.6292	0.4236	0.6257	0.4110
media geométrica	0.5293	0.3896	0.5173	0.4839	0.4129	0.5541	0.6411	0.4350	0.5530	0.3739	0.6043	0.3827	0.5854	0.3633	0.5787	0.3670
varianza	0.2179	0.0583	0.2139	0.1063	0.1282	0.1072	0.5295	0.0832	0.1216	0.0541	0.1348	0.0686	0.1074	0.0660	0.1435	0.0767

Estadística para gráficas por horario

Figura 3.12b 20:00-2:00 hrs

	0.18		0.32		0.56		1		1.78		3.16		5.62		10	
	XICALCO	STA. ANA														
No de datos	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
media	0.7	0.5	0.9	0.5	0.8	0.5	0.6	0.7	0.7	0.5	0.6	0.5	0.7	0.4	0.7	0.5
incetidumbre +/-	0.5	0.2	0.6	0.2	0.6	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3
desv.stdr.	0.5623	0.2806	0.7125	0.2904	0.6723	0.3081	0.4467	0.5041	0.4412	0.3947	0.3033	0.3121	0.3984	0.3117	0.4314	0.3456
coef. de var.%	76.8869	53.6621	82.6886	53.1131	82.8704	57.9966	74.3157	72.7430	67.3964	72.1041	51.1746	62.4403	61.2547	70.0632	65.2330	64.4189
mediana	0.7054	0.4723	0.8193	0.5441	0.7644	0.3902	0.4981	0.5093	0.5459	0.3679	0.5130	0.4175	0.6182	0.3016	0.5135	0.4230
media geométrica	0.5151	0.4559	0.6148	0.4720	0.5513	0.4570	0.4489	0.5126	0.5259	0.4261	0.5246	0.4053	0.5399	0.3495	0.5306	0.4315
varianza	0.3162	0.0787	0.5077	0.0843	0.4519	0.0949	0.1995	0.2541	0.1946	0.1558	0.0920	0.0974	0.1588	0.0972	0.1861	0.1194