



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS PROPIEDADES
DE LAS PARTÍCULAS ANTROPOGÉNICAS EN
ALTZOMONI DURANTE MARZO DE 2006**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

P r e s e n t a

Lluvia Sofía Gómez Texon

J U R A D O

Dr. Fernando García García

Dr. Michel Grutter de la Mora

Dra. Beatriz Cárdenas González

Dr. Juan Cervantes Pérez

Director de Tesis: Dr. Darrel Baumgardner Gibson



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.

Dedicatoria

A Dios por el don de la vida y darme la capacidad de tomar las decisiones que me han convertido en lo que ahora soy.

A mis padres Guadalupe y Juan. Gracias por todo el amor y apoyo en todo momento. Mamá tu capacidad de amor, tu fuerza y amistad me han enseñado mucho de la vida. Papá eres extraordinario te admiro muchísimo. A los dos los amo.

A mis hermanos Erick y Juan, son el regalo más hermoso que hasta ahora me ha dado Dios, los quiero mucho. Gracias por su amistad, su apoyo y la alegría que me contagian.

A mis abuelitos: Raquel mi viejita consentida, Estela y Efrén (†) no olvido tus consejos y aunque ya no estás entre nosotros te sigo queriendo mucho.

A mis tíos: Sofía y Manuel. Gracias por su apoyo incondicional, su preocupación y su cariño para conmigo y mis hermanos, de verdad son unas excelentes personas. Los quiero mucho.

Agradecimientos

Al Dr. Darrel por todo lo que de usted he aprendido, su apoyo económico y su comprensión durante todo este tiempo que tuve la oportunidad de trabajar en su grupo. No hay palabras para describir la gran persona que es, solo puedo decirle que estoy muy agradecida.

A la Dra. Graciela por darme la oportunidad de realizar esta tesis dentro de su grupo y el apoyo que me brindó.

A todos los miembros del jurado por su interés, comentarios y sugerencias las cuales fueron una gran aportación para este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgó para continuar con mis estudios de maestría.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra al permitirme realizar la maestría, por lo mucho que aprendí gracias a esta institución y por el apoyo económico otorgado para la impresión y encuadernación de esta tesis.

A la familia Alarcón Olivares por todo el apoyo que me brindaron y por darme el calor de una familia cuando estuve lejos de la mía.

A las personas del Centro de Ciencias de la Atmósfera que a lo largo de mi estancia en esta institución se convirtieron en mis amigos. Especialmente a Harry y Carlos Ochoa por todo el apoyo que me han brindado para concluir este trabajo pero principalmente por su amistad y por los maravillosos momentos compartidos.

Al CUPREDER por la comprensión y facilidades brindadas para culminar esta tesis.

A toda mi familia y amigos que de alguna manera han sido parte especial de mi vida.

¡A todos muchas gracias!

Índice general

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen | VI |
| 1. INTRODUCCIÓN | |
| 1.1 Antecedentes | 3 |
| 1.2 Efecto de los aerosoles en el clima | 5 |
| 1.3 Formación de las nubes y su interacción con las partículas de aerosol | 8 |
| 1.4 Remoción de partículas | 9 |
| 1.4.1 Remoción húmeda | 10 |
| 1.4.2 Remoción seca | 10 |
| 1.5 Motivación y justificación del proyecto | 11 |
| 1.6 Objetivos | 12 |
| 1.6.1 Objetivo General | 12 |
| 1.6.2 Objetivos específicos | 12 |
| 1.7 Hipótesis nula | 12 |
| 2. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN | |
| 2.1 Descripción del sitio de medición | 13 |
| 2.2 Periodos de medición | 14 |
| 2.3 Descripción de los instrumentos | 17 |
| 2.3.1 Nefelómetro | 18 |
| 2.3.1.1 Principio de medición | 19 |
| 2.3.1.2 Calibración | 19 |
| 2.3.1.3 Errores | 20 |
| 2.3.2 Aerosol Mass Spectrometer (AMS)..... | 21 |
| 2.3.2.1 Principio de medición | 21 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.2.2 Calibración | 23 |
| 2.3.2.3 Errores | 24 |
| 2.3.3 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) | 25 |
| 2.3.3.1 Principio de medición | 25 |
| 2.3.3.2 Errores | 26 |
| 2.3.4 Contador de Núcleos de Condensación (CNC) | 26 |
| 2.3.4.1 Principio de medición | 27 |
| 2.3.4.2 Calibración | 27 |
| 2.3.4.3 Errores | 28 |
| 2.3.5 Particle Soot Absorption Photometer (PSAP) | 28 |
| 2.3.5.1 Principio de medición | 29 |
| 2.3.5.2 Calibración | 30 |
| 2.3.5.3 Errores | 30 |
| 2.3.6 Ceilómetro | 31 |
| 2.3.6.1 Principio de medición | 31 |
| 3. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS | |
| 3.1 Análisis de las series de tiempo | 32 |
| 3.2 Análisis de los histogramas de frecuencia relativa | 38 |
| 4. DISCUSIÓN | |
| 4.1 Análisis de la correlación entre las variables de estudio | 50 |
| 4.2 Análisis de los espectros de tamaño | 72 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | |
| REFERENCIAS | 81 |

Resumen

Las partículas antropogénicas juegan un papel muy importante en el balance energético de la atmósfera y por ende en el clima global. De aquí se deriva la importancia de estudiar las propiedades de las partículas en función de la evolución de la capa de mezcla y las condiciones meteorológicas, y su interacción con el clima no solo en las grandes ciudades, sino también en sitios remotos.

En este trabajo se realizó un análisis estadístico de las propiedades de las partículas antropogénicas en el sitio de Alzomoni utilizando los datos obtenidos durante la campaña MILAGRO efectuada durante marzo del 2006. El objetivo principal de esta tesis fue relacionar las propiedades físicas, químicas, y ópticas de las partículas antropogénicas bajo diferentes condiciones meteorológicas para entender el posible impacto que tienen las partículas en el ambiente y los procesos que modifican estas propiedades.

La metodología empleada fue: describir el sitio de medición; posteriormente se realizó la separación de los datos en tres periodos de acuerdo a las condiciones meteorológicas que dominaron en el sitio: días sin nubes, días con nubes y días con precipitación. Se realizaron series de tiempo de los datos de: Núcleos de Condensación (CN), Carbono Negro (BC), Carbono Orgánico (OC), Sulfatos (SO_4) y del Coeficiente de Dispersión (B_{scat}). También se determinó el comportamiento de los datos mediante los histogramas de frecuencia de cada variable para cada periodo y, finalmente se realizó un análisis de correlación de las variables y gráficas de concentración por volumen como función del diámetro de las partículas.

Del análisis se concluye de manera general que la fuente de emisión de partículas es muy importante en la determinación de sus propiedades químicas. Sin embargo las propiedades físicas de las partículas se ven afectadas principalmente por procesos de su formación en la atmósfera y las condiciones meteorológicas dominantes. Las propiedades físicas y químicas influyen en las propiedades ópticas. Sin embargo se encontró que éstas últimas son más sensibles a la composición química que a la concentración total de partículas.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

Las partículas de aerosol son partículas sólidas o líquidas que consisten esencialmente de sustancias diferentes al agua, y en la que las fases estables líquida o sólida del agua no están presentes. Estas partículas juegan un papel muy importante en el balance energético de la atmósfera y por ende en el clima global.

Las grandes ciudades son una fuente principal de la emisión de partículas de aerosol antropogénicas. Las partículas de aerosol antropogénico tienen un gran impacto regional y global debido a que pueden modificar el clima a través de la interacción con la radiación solar de manera directa y mediante la modificación de las nubes de manera indirecta.

La ciudad de México está ubicada en el centro del país y es una de las urbes más grandes del mundo, por lo que cuenta con una alta emisión de partículas de aerosol. Esta ciudad tiene a sus alrededores aproximadamente a 100 km otras grandes ciudades, las cuales también contribuyen a la propagación de partículas a otras regiones. Una característica muy importante de la cuenca de México son las cadenas montañosas que se encuentran al este, sur y oeste que afectan la circulación del aire.

Como se describirá más adelante, se hicieron mediciones continuas de gases y partículas en un sitio dentro del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan en el cerro de Altzomoni durante la campaña Milagro.

La campaña MILAGRO (Megacity Initiative Local and Global Research Observations) fue un proyecto de colaboración científica enfocado a estudiar el impacto local, regional y global de la contaminación del aire de una megaciudad. La campaña se centró en la caracterización química, física y óptica de los aerosoles y las transformaciones que sufren.

Se instaló una serie de instrumentos para hacer observaciones del estado físico y químico de la atmósfera en las regiones circundantes de la ciudad de México durante el mes de marzo de 2006. Los datos analizados en este trabajo fueron obtenidos de las mediciones realizadas en el sitio de Alzomoni durante esta campaña.

Para estudiar las propiedades físicas, químicas y ópticas de las partículas medidas, se separó el periodo de estudio de acuerdo a las condiciones de nubosidad, precipitación y hora del día para posteriormente hacer un análisis estadístico de dichas propiedades.

A continuación en este capítulo se presenta una breve descripción de los efectos de los aerosoles en el clima, la interacción entre éstos y las nubes, y los procesos de remoción de las partículas, además de exponer la justificación y los objetivos generales y particulares de este proyecto.

En el capítulo II se explica la clasificación de los periodos, las características y ubicación del lugar de medición, y el funcionamiento de los instrumentos que se emplearon para realizar las mediciones.

En el capítulo III se presentan los resultados sobre las propiedades físicas, químicas y ópticas de las partículas. En el capítulo IV se muestra la discusión de los resultados, y finalmente, las conclusiones del análisis son descritas en el capítulo V.

1.1 Antecedentes

Los aerosoles pueden ser de origen antropogénico y natural. Los primeros (derivados de la actividad humana) pueden ser humo de chimeneas, partículas surgidas de procesos industriales, partículas producidas fotoquímicamente a partir de contaminantes gaseosos, entre otros. Mientras que los segundos son aquéllos contenidos en cenizas volcánicas, esporas, polen, sal marina, polvo, entre otros. Se esperaría que las partículas de aerosol presentes en Altzomoni sean principalmente de origen natural debido a que se encuentra lejos de fuentes de emisiones antropogénicas y muy cerca del volcán Popocatepetl (el cual es un volcán activo).

El diámetro de las partículas atmosféricas varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micrómetros (μm). Generalmente se identifican diferentes intervalos de tamaños de partícula llamados “modos”, los cuales son: de Aitken, grandes y gigantes

El modo de Aitken lo conforman todas aquellas partículas cuyo diámetro es menor a $0.2 \mu\text{m}$. La fuente principal de estas partículas es la combustión y la conversión de gas a partícula, su vida media en la atmósfera es del orden de segundos a pocas horas. Los aerosoles grandes tiene un diámetro que oscila entre 0.2 y $2 \mu\text{m}$, se forman principalmente por la coagulación de núcleos de Aitken y la evaporación de gotitas de nube, tienen una vida media de algunos días. Las partículas de aerosol

gigantes tienen un diámetro mayor a 2 μm , su fuente de emisión son las industrias, polvo, ceniza, polen, etc. y tienen un tiempo de vida de horas a días.

A continuación en la tabla 1.1 se ilustran los diferentes modos.

| Designación | Núcleos de Aitken | Aerosoles Grandes | Aerosoles Gigantes | |
|----------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|-----------------|
| Fuentes | ← Combustión → | | ← Polvo → | |
| | ← Conversión de gas a partícula → | ← Ceniza, sal marina, polen → | | |
| | | ← Coagulación de núcleos de Aitken → | ← Industrias → | |
| | ← Evaporación de gotitas de nube → | | | |
| Sumideros | ← Coagulación → | ← Barrido por precipitación → | | |
| | ← Captura por partículas de nube → | ← Remoción seca → | | |
| Tiempo de vida | Menor a una hora en aire contaminado o en nubes | Días | Horas a días | Minutos a horas |

Tabla 1.1 Fuentes, sumideros y tiempo de vida de las partículas en la atmósfera.

La concentración de aerosoles atmosféricos puede alcanzar niveles que afectan tanto al clima como a la salud humana. El efecto climático se produce de manera directa por fenómenos de absorción y dispersión de la radiación solar (balance de calor), e indirectamente al funcionar como núcleos de condensación de nube (CCN, por sus siglas en inglés) que modifican las propiedades radiativas y el tiempo de vida de las nubes (Cozic et al., 2007; McFiggans et al., 2006).

Los efectos en la salud humana se deben al hecho de que los aerosoles inferiores a 10 μm pueden ser fácilmente inhalados y, por lo tanto, son potencialmente dañinos

para las funciones tanto pulmonar como cardiovascular. Además éstos tienen un impacto local, regional y global. El impacto local incluye emisiones vehiculares, quema de biomasa y procesos industriales, mientras que regionalmente pueden ser transportados desde áreas donde se generan altas emisiones a regiones remotas relativamente limpias, como sucede en el sitio de investigación utilizado para este estudio, al cual llegan partículas cuyas fuentes se encuentran en las ciudades aledañas.

1.2 Efecto de los aerosoles en el clima

El clima de la tierra depende del balance entre la energía absorbida de la radiación solar y la que es emitida en onda larga hacia el espacio. Existen factores que pueden perturbar este balance, los cuales pueden ser cambios en la salida de la radiación solar, cambios en la concentración de los gases de efecto invernadero, o un cambio en la concentración y tamaño de las partículas de aerosol.

La variación natural de las partículas, especialmente debida a erupciones volcánicas como la generada por el volcán Pinatubo en 1991, causan un forzamiento climático significativo, que es un factor que altera el balance radiativo de la Tierra y, por lo tanto, tiende a generar un cambio global de temperatura (Deshler et al., 1993).

Debido a que las partículas de aerosol retro-dispersan la luz hacia el espacio, hay una reducción en la cantidad de energía que el planeta absorbe, manteniéndolo fresco. Sin embargo, si las partículas contienen especies como carbón elemental o polvo mineral, las cuales pueden absorber, esto conduce a un calentamiento de la baja atmósfera.

Las partículas de aerosol pueden afectar el clima de manera indirecta, modificando las propiedades de las nubes a través de procesos microfísicos. Este efecto indirecto causa alteraciones al albedo y al balance de energía, afectando otros procesos de transporte tales como la convección y la precipitación (Huang et al., 2007).

Los mecanismos de forzamiento directo son aquéllos que alteran directamente la fuente de energía solar primaria y los sumideros de radiación terrestre. La desviación del flujo resultante afecta el calentamiento adiabático de la atmósfera, así como el almacenamiento de calor en el océano y la criosfera y el suelo sobre áreas continentales. Las variables que se ven afectadas por este forzamiento son la precipitación, la humedad y la estabilidad estática, principalmente.

El forzamiento de las partículas de aerosol ocurre principalmente por la interacción con la radiación solar y es modulado por un ciclo diurno. Los gases de efecto invernadero tienen larga vida y son mezclados casi uniformemente dentro de la atmósfera. Por otra parte las anomalías climáticas debidas a las partículas de aerosol son el resultado de una concentración local persistente.

En escala global, se considera que la dispersión de las partículas de aerosol conduce a un efecto directo en el balance de energía del sistema de la Tierra. Este efecto directo de las partículas de aerosol en la radiación infrarroja es generalmente débil debido a que el tamaño de las partículas es relativamente pequeño, ya que la magnitud del forzamiento directo en un lugar y tiempo particulares depende del tamaño y propiedades ópticas de las partículas y de su abundancia.

Es importante entender las propiedades de las partículas para estimar el forzamiento radiativo directo que ejercen sobre el clima. Existen dos clases de propiedades radiativas importantes de los aerosoles: propiedades fundamentales y propiedades radiativas derivadas. Las propiedades fundamentales incluyen el tamaño, la composición y el coeficiente óptico, que a su vez depende de la longitud de onda de la luz incidente y del índice de refracción de la partícula. Las propiedades derivadas dependen de la longitud de onda e incluyen el espesor óptico, el albedo de dispersión simple, el factor de asimetría y la función de dispersión angular. Para poder estimar el efecto directo de las partículas con certeza se necesita conocer las propiedades ópticas como función de la longitud de onda, junto con la concentración como función del tamaño, así como su distribución espacial.

El impacto más significativo que tienen los aerosoles sobre el clima es probablemente en su rol como CCN. La concentración de CCN a menudo se intensifica por actividades humanas, esto afecta a las propiedades radiativas de las nubes, la precipitación, la estructura de la nube y, por ende, al clima. Esto es conocido como forzamiento indirecto de los aerosoles, el cual puede ser dividido en dos categorías:

- 1) Efecto Twomey o primer efecto indirecto. Para una sobresaturación particular, una masa de aire con una alta concentración de CCN puede producir una nube con una elevada concentración de gotitas, dando como resultado una mayor reflectividad de las nubes. Este efecto tiende a enfriar el clima debido a que incrementa el espesor óptico de las nubes: si se produce un incremento en el espesor óptico, aumenta el albedo de las nubes y, por lo tanto, la

reflectividad. El espesor óptico de una nube de tipo stratus es determinado principalmente por la cantidad de agua condensada y la distribución por tamaños de las gotas, lo cual es fuertemente influenciado por la velocidad de ascenso y la concentración de CCN (Penner et al., 2006).

- 2) El efecto indirecto identificado por Albrecht. También proviene de los diámetros más pequeños de las gotas en nubes contaminadas, ya que esto inhibe el desarrollo de la precipitación y, por consiguiente, incrementa el tiempo de vida de las nubes y la cubierta nubosa (Albrecht, 1989).

Este efecto indirecto relaciona cambios en la morfología de las nubes asociados con cambios en la eficiencia de precipitación de la nube. Los procesos microfísicos de las nubes que forman la precipitación dependen del tamaño de las gotas, el tiempo de vida de las nubes, del contenido de agua líquida y la altura de las nubes, entre otros factores (Twohy et al., 2005; Broekhuizen et al., 2006; Penner et al., 2006, VanReken et al., 2003; Ackerman et al., 2004).

1.3 Formación de las nubes y su interacción con las partículas de aerosol

Una nube es un agregado visible de partículas de hielo o agua líquida en la atmósfera.

Las nubes se forman debido al enfriamiento de parcelas de aire húmedo con una humedad relativa tal que éstas puedan alcanzar un estado de sobresaturación (la saturación es la situación de equilibrio en la que las velocidades de evaporación y condensación son iguales). Sin embargo, se necesitan sustancias nucleantes que

inicien la transición de fase del vapor de agua a gotitas de agua líquida de las cuales consiste la nube.

En la atmósfera existen grandes concentraciones de partículas de diversos tamaños llamados aerosoles. Algunas de estas partículas tienen afinidad por el agua y pueden actuar como centros de condensación del vapor y se les conoce como núcleos de condensación de nube (CCN, por sus siglas en inglés).

La interacción de las nubes con los aerosoles juega un rol importante en el contexto del impacto de las partículas antropogénicas en el clima debido a la influencia de los núcleos de hielo (IN, por sus siglas en inglés) y CCN en procesos de formación de nubes y, subsecuentemente, en las propiedades microfísicas de las mismas (distribución por tamaño de las gotitas, propiedades ópticas, albedo de las nubes); y, finalmente, en el balance radiativo de la tierra. La modificación de la microfísica de nubes debido al impacto de los aerosoles (cambio en el tamaño de las gotitas y la concentración) afecta la absorción de energía solar dentro de la nube, cambiando el balance termodinámico interno.

1.4 Remoción de partículas

Los aerosoles son removidos de la atmósfera para ser depositados o transportados a la superficie. Los procesos de remoción son clasificados en húmedos y secos, dependiendo de si las partículas son removidas por precipitación o en ausencia de hidrometeoros.

1.4.1 Remoción húmeda

La remoción húmeda consiste en un proceso natural por el cual las partículas son removidas por hidrometeoros atmosféricos como precipitación, que puede ser líquida (gotas de lluvia) o sólida (cristales de hielo y graupel) y consecuentemente son transportadas a la superficie de la tierra. La precipitación remueve de manera efectiva las partículas de la atmósfera (Loosmore et al., 2004).

1.4.2 Remoción seca

La remoción seca es un proceso de transporte de partículas de la atmósfera a la superficie terrestre sin la intervención de precipitación. La deposición depende de las siguientes características de las partículas: tamaño, forma, densidad, reactividad, higroscopicidad y solubilidad, además de las características de la superficie y las condiciones atmosféricas como velocidad del viento, humedad, estabilidad y temperatura (Sehmel, 1980).

El mecanismo de remoción seca más simple es la caída de las partículas bajo la influencia de la gravedad, y está relacionada a movimientos atmosféricos como el viento.

Durante los días en los cuales se realizaron las mediciones, cuyos datos se analizan en este trabajo, se presentaron fenómenos meteorológicos que actúan como sumideros de partículas, tales como la precipitación, por lo que se espera que durante estos días la concentración de partículas en Altzomoni disminuya debido a la remoción de las mismas por gotas de lluvia, alterando las propiedades ópticas y físicas. Se esperaría que la deposición seca de partículas sea más pronunciada

durante la noche en días cuya intensidad del viento fue muy baja o se mantuvo en calma. Sin embargo, será en el análisis del periodo de días sin nubes que podamos observar si la remoción seca es un sumidero eficiente durante este periodo de medición.

1.5 Motivación y justificación del proyecto

La justificación para la realización de esta investigación es la importancia que tienen las partículas en el cambio climático, su impacto en el ciclo hidrológico, además de la necesidad que existe de estudios sobre las partículas y los procesos que modifican sus propiedades.

En este trabajo se estudia la relación que existe entre las propiedades físicas, químicas y ópticas de los aerosoles y su importancia por el papel que juegan en diversos procesos atmosféricos como el balance radiativo, la reducción de la visibilidad, la formación de nubes y el sistema climático en general. Este estudio se enfocó principalmente en las partículas formadas por hollín (BC)¹, carbono orgánico (OC)² y sulfatos.

Para llevar a cabo este proyecto, se analizó la relación que existe entre las propiedades físicas, químicas y ópticas de las partículas. Se evaluó la evolución de la distribución de la concentración en número y volumen, separando el periodo de medición en periodos de acuerdo a las condiciones meteorológicas que imperaron en el sitio de mediciones, y se interpretaron los resultados obtenidos.

¹ BC, OC abreviados por sus siglas en inglés.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es relacionar las propiedades físicas, químicas y ópticas de las partículas bajo diferentes condiciones meteorológicas para entender el posible impacto que tienen en el ambiente y los procesos que modifican estas propiedades.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la relación que existe entre las propiedades de las partículas en Altzomoni, de acuerdo a las condiciones meteorológicas que dominaron en el sitio.
- Evaluar la evolución de la distribución de la concentración por número y volumen en función del tamaño en Altzomoni y los días bajo condiciones de cielo despejado, días con precipitación y días con nubes.

1.7 Hipótesis nula

- Las propiedades de las partículas antropogénicas son las mismas durante días con capa de mezcla sin nubes, que durante días con nubes y precipitación en el sitio de Altzomoni.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

En este capítulo se describe el sitio de medición, la clasificación de los periodos de acuerdo a las condiciones meteorológicas que dominaron en el sitio y, finalmente, se describen las características más importantes de los instrumentos cuyas mediciones se analizan en esta tesis.

2.1 Descripción del sitio de medición

Las mediciones se realizaron en el sitio de Alzomoni (98° Lon, 19° Lat, 4010 msnm), el cual se localiza al norte de Paso de Cortés en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, entre los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl, aproximadamente a 60 km al SE de la ciudad de México. Esta región está aislada de emisiones locales de combustión; sin embargo, hay una incursión casi diaria de contaminantes de la Ciudad de México y de Cuautla cuando el viento es del oeste, o del valle de Puebla cuando la dirección del viento es del este. La vegetación predominante la integran los bosques de coníferas y encinos, los cuales juegan un papel esencial en relación con el ciclo hidrológico, la formación y conservación de suelos y la biodiversidad que sustentan. En la figura 2.1 se observa la ubicación del sitio de Alzomoni con respecto a las ciudades de Puebla, México y Cuernavaca.



Figura 2.1. Localización del sitio de Altzomoni con respecto a las ciudades de México, Puebla y Cuernavaca; y los vientos con dirección oeste y este que transportan contaminantes de las ciudades. (Imagen tomada de Google Earth <http://maps.google.com/>).

2.2 Periodos de medición

Las mediciones se llevaron a cabo del 3 al 31 de marzo del 2006 en el sitio de Altzomoni descrito anteriormente.

Las mediciones fueron clasificadas en tres categorías considerando las siguientes condiciones en la región de Altzomoni: días bajo condiciones de cielo despejado, días con nubes y días con precipitación en Altzomoni. La clasificación de estos periodos se obtuvo observando las fotografías de una pequeña cámara web instalada en el sitio de medición y la evaluación de las imágenes diarias registradas por el ceilómetro. En la figura 2.2 se observa una imagen del sitio tomada por la cámara web durante un día nublado: las imágenes fueron capturadas cada cinco minutos. Sin embargo, la cámara web sólo muestra imágenes durante el día, a partir de las 10:00 h y hasta las 18:00 h aproximadamente.



Figura 2.2. Imagen del sitio de medición obtenida de la cámara web.

Debido a que las observaciones con la cámara web no fueron evidencia suficiente para la clasificación de estos periodos, se complementó el análisis con las gráficas diarias del coeficiente de retrodispersión registradas de manera continua por el ceilómetro instalado en el pueblo de Tenango del Aire al pie de las montañas. El pueblo está situado aproximadamente a 15 km de Alzomoni y a una altitud de 2300 msnm. En la figura 2.3 se muestra una gráfica obtenida del ceilómetro para el día 24 de marzo de las 04:00 a las 06:00 h.

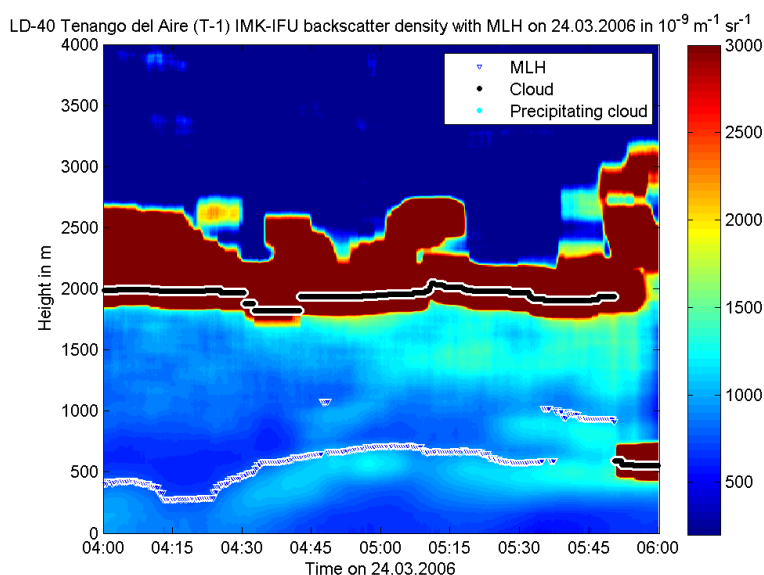


Figura 2.3. Gráfica obtenida del ceilómetro. La abcisa indica las horas mientras que la ordenada muestra la altura en metros sobre el suelo. Alzomoni está localizado a 1700 m por encima de la ubicación del ceilómetro.

La tabla 2.1 muestra los intervalos de tiempo que pertenecen a las categorías definidas según las condiciones meteorológicas que dominaron en Alzomoni al momento de hacer las mediciones. Durante algunos días se presentaron condiciones de capa de mezcla sin nubes, con nubes e incluso lluvia; es por ello que estos días

son considerados en los tres periodos. Sin embargo, para el análisis únicamente se consideraron las horas en las que ocurrieron las condiciones correspondientes a cada periodo o categoría.

Tabla 2.1 Clasificación de los periodos de acuerdo a las condiciones meteorológicas que dominaron en Altzomoni durante marzo de 2006.

| Día | Periodo y Horas | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| | Sin nubes | Nubes | Precipitación |
| 3 | 00:00-24:00 | | |
| 4 | 00:00-24:00 | | |
| 9 | 00:00-03:30, 03:55-10:50, 17:35-24:00 | 03:35-03:50, 10:52-17:31 | |
| 10 | 00:00-09:50, 15:05-24:00 | 09:59-15:00 | |
| 12 | 00:00-24:00 | | |
| 13 | 00:00-24:00 | | |
| 14 | 00:00-08:05, 10:00 -24:00 | 08:10-09:55 | |
| 15 | 00:00-24:00 | | |
| 16 | 00:00-20:00, 20:35-21:15 21:35-24:00 | 20:05-20:30 | |
| 17 | 00:00-12:50, 13:15-14:35, 15:20-24:00 | 14:40-15:15 | |
| 18 | 00:00-24:00 | | |
| 19 | 00:00-24:00 | | |
| 21 | 00:00-14:20, 15:15-21:30 , 21:35-24:00 | | |
| 22 | | 01:05-01:15 ,12:20- 18:46, 19:55-21:45 | |
| 24 | 05:50-06:15, 06:35-08:05, 12:30-13:45, 16:30- 16:40, 16:55-18:40 | 00:00-01:20,04:40 - 05:45, 06:20-06:30, 08:10-09:00, 09:20- 12:25,13:50-16:25, 16:45-16:50, 18:45- 23:35 | 01:30-04:35, 09:05-09:15, 23:40-23:55 |
| 25 | | 11:45-12:55, 13:50- 16:10, 16:50-24:00 | 00:00-11:40, 13:00-13:45, 16:15-16:45 |
| 26 | 01:20-02:45, 03:25-04:45,07:40-12:40, 14:30- 14:50, 18:40-19:15 | 12:45-14:25, 14:55- 18:35, 19:20-24:00 | 00:00-01:15, 02:50-03:20, 04:10-04:20, 04:35- 07:40 |
| 27 | 07:50-12:40 | 00:00-07:45, 12:45- 13:45, 14:05-24:00 | |
| 28 | 03:25-03:45, 03:50-13:55 | 00:00-03:20, 03:50- 06:35, 07:15-08:30, 12:55-13:45, 14:00- 24:00 | |
| 29 | 02:45-03:00, 04:05-13:30, 13:50-14:00, 14:25- 16:00, 18:20-19:10 | 00:00-00:15, 00:30- 02:40, 03:05-04:00, 13:35-13:45, 14:05- 14:20, 16:05-18:15, 19:15- 24:00 | |
| 30 | 02:55-04:00, 05:20-10:50, 20:15-21:15, 23:35- 24:00 | 00:00-02:50, 04:05- 05:15, 10:55-20:10, | |

| | | | |
|----|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 31 | 03:25-09:20, 11:35-12:15 | 21:20-22:30 00:00-00:15, 00:35 - 01:00, 01:20-03:20, 09:24-09:55, 09:59- 11:34, 12:20-15:10, 15:50-15:55, 16:05- 20:35, 21:30-24:00 | |
|----|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

2.3 Descripción de los instrumentos

Las propiedades físicas, químicas y ópticas de las partículas y la concentración de algunos gases fueron medidos usando una variedad de instrumentos, los cuales serán descritos en este capítulo. En la figura 2.4 se presenta un diagrama de bloques que muestra todos los instrumentos que operaron en Alzomoni para medir la meteorología, concentración de gases y las propiedades de las partículas. Aquí sólo se describen aquellos instrumentos cuyas mediciones se utilizaron en el análisis de este trabajo y son: espectrómetro de masas para aerosoles (Aerosol Mass Spectrometer-AMS); sensor de tamaño de partículas por movilidad (Scanning Mobility Particle Sizer SMPS); nefelómetro (nephelometer); fotómetro de absorción (Particle Soot Absorption Photometer PSAP); y contador de núcleos (Nuclei counter-CN).

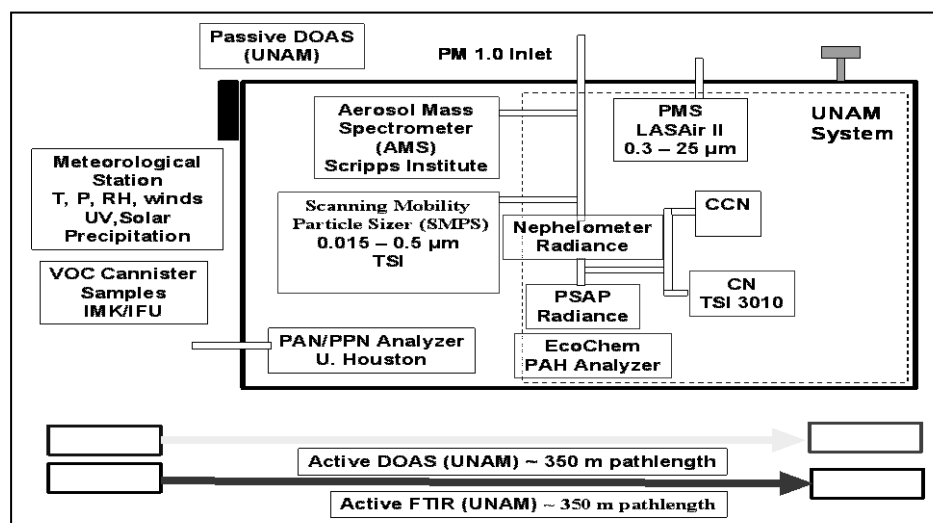


Figura 2.4 Diagrama de bloques que muestra todos los instrumentos que operaron en el sitio de investigación para medir las condiciones meteorológicas, la concentración de gases y las propiedades físicas, químicas y ópticas de las partículas.

La tabla 2.2 muestra un resumen de las características principales de los instrumentos, tales como el límite de detección y la precisión.

| INSTRUMENTO | PARÁMETRO | LÍMITE DE DETECCIÓN | PRECISIÓN |
|--------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|
| NEPHELOMETER | Coefficiente de dispersión | 1 Mm^{-1} | $\pm 25\%$ |
| AMS | SO_4^{2-} , NO_3 , NH_4 , OC | $0.1 \mu\text{g m}^{-3}$ | 14% |
| SMPS | Distribución de tamaño | $0.020 \mu\text{m} - 0.514 \mu\text{m}$ | $\pm 15\%$ |
| PSAP | Coefficiente de absorción | 1 Mm^{-1} | $\pm 25\%$ |
| CN | Núcleos de Condensación | $0.01 \mu\text{m}$ | $\pm 1.5\%$ |

Tabla 2.2 Características principales de los instrumentos que operaron en Altzomoni cuyas mediciones son analizadas en esta tesis.

2.3.1 Nefelómetro

El nefelómetro es un instrumento diseñado para medir el coeficiente de dispersión de luz visible de los aerosoles atmosféricos (Carr y Burrige, 2004). El nefelómetro usado para este proyecto utiliza la técnica de integración y consiste en un fotómetro que mide la luz dispersada a partir de la cantidad total de los aerosoles atmosféricos, sobre un rango completo de integración angular. La figura 2.5 muestra un diagrama esquemático del nefelómetro de integración y las partes que lo constituyen.

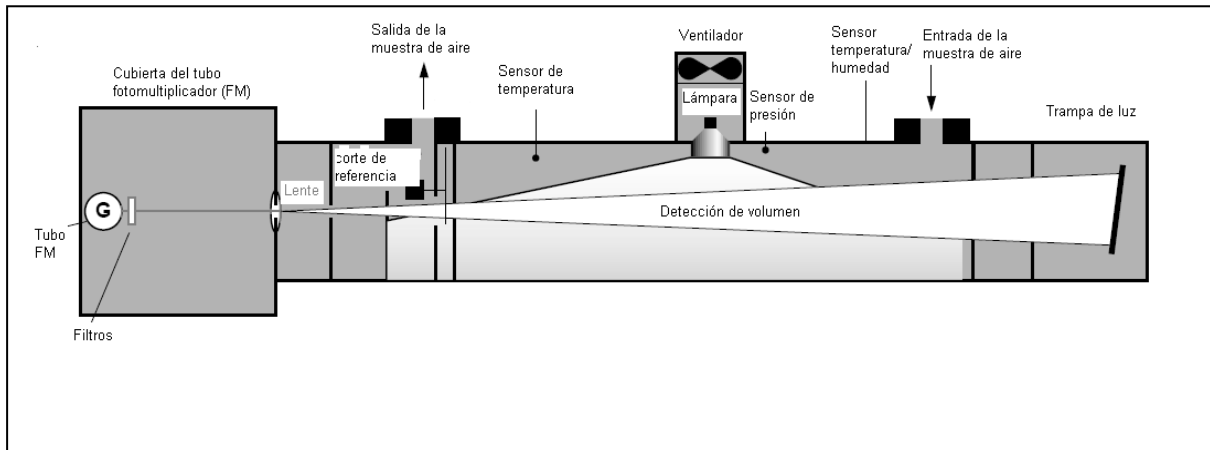


Figura 2.5. Esquema del nefelómetro de integración y las partes que lo conforman (modificada de Carr y Burrige, 2004).

2.3.1.1 Principio de medición

El nefelómetro opera bajo el siguiente proceso: se inserta la muestra de aire en el cuerpo del nefelómetro, la cual es iluminada por una lámpara de halógeno dirigida a través de un tubo de luz, y el volumen de la muestra es visto mediante tres tubos fotomultiplicadores a través de un conjunto de placas de apertura. La dispersión de los aerosoles se ve frente a un telón que es un medio muy eficaz para la trampa de luz (ver figura 2.5), donde todas las superficies internas están recubiertas para dar una muy baja reflectividad (Lunden et al., 2006).

2.3.1.2 Calibración

La calibración del nefelómetro de integración sigue el principio general de producir un medio con un coeficiente de dispersión conocido y ajustar la lectura del instrumento a un valor deseado. La calibración se puede llevar a cabo con moléculas conocidas que se aproximen a los aerosoles ambiente, es decir, ajustando el instrumento con gases de referencia conocidos pero con diferentes coeficientes de

dispersión; entonces se registran las lecturas de dispersión de luz, la cual depende directamente de la densidad. Así, la temperatura y la presión del gas de calibración son medidos y el coeficiente de dispersión de luz del gas es calculado (Heintzenberg y Chaelson, 1996).

Uno de los gases de calibración es el aire libre de partículas, el cual se obtiene pasando aire ambiente a través de un filtro con el fin de proporcionar el primer punto de calibración. El nefelómetro de integración que se utilizó en Alzomoni fue calibrado antes de ser instalado en el sitio y después de que se llevó a cabo el proyecto.

2.3.1.3 Errores del instrumento

Los errores o interferencias afectan la habilidad del nefelómetro de integración para medir las propiedades de dispersión de luz. Los principales errores que se presentan en el manejo del equipo son los siguientes:

Error de truncamiento. Se presenta durante la medición de la dispersión de luz por las partículas, principalmente cuando la población de éstas consta de una fracción significativa de partículas cuyo diámetro es mayor que 1 μm . Dado que la recolección de luz ocurre aproximadamente entre los ángulos de 7° y 170° , parte de la luz dispersada se pierde. Por esta razón, durante el proyecto se colocó un impactador a la toma de aire del nefelómetro, cuya función fue remover partículas mayores que $1\mu\text{m}$ y registrar la dispersión de luz únicamente para partículas menores, reduciendo el error de truncamiento.

Error de calibración. El error de calibración más común es la falla al desplazar todo el aire ambiente en la cámara de dispersión con el gas de calibración. Otros factores son la falta del filtro del gas de calibración para remover todas las partículas y las determinaciones incorrectas de la temperatura y presión del gas de calibración.

2.3.2 Aerosol Mass Spectrometer (AMS)

El Aerosol Mass Spectrometer (AMS) fue instalado en el sitio de Alzomoni para medir la composición química y concentración de masa en tiempo real de la materia particulada.

2.3.2.1 Principio de medición

El AMS consta de tres partes principales que son: el orificio crítico por donde entra la muestra con el aerosol, una cámara donde se mide el tamaño de las partículas y una sección que detecta la composición de las partículas (fig. 2.6). Las partículas entran a través del orificio crítico que mantiene un flujo de $1.4 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ y son aceleradas por una lente aerodinámica, que consiste en una serie de aperturas encajadas en un tubo externo de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro (diámetro interno de 1 centímetro). Cuando los aerosoles salen de la lente, son acelerados en la expansión supersónica generada por la diferencia de presión que existe entre la cámara donde se mide el tamaño de las partículas y la cámara de muestreo, dando como resultado velocidades diferentes para diferentes tamaños de aerosoles.

El AMS contiene una subcámara cilíndrica separada por una apertura de 1 mm, la cual contiene las celdas de vaporización e ionización. La detección de partículas es

realizada enfocando las partículas de aerosol dentro de las celdas de vaporización e ionización (Allan et al., 2003).

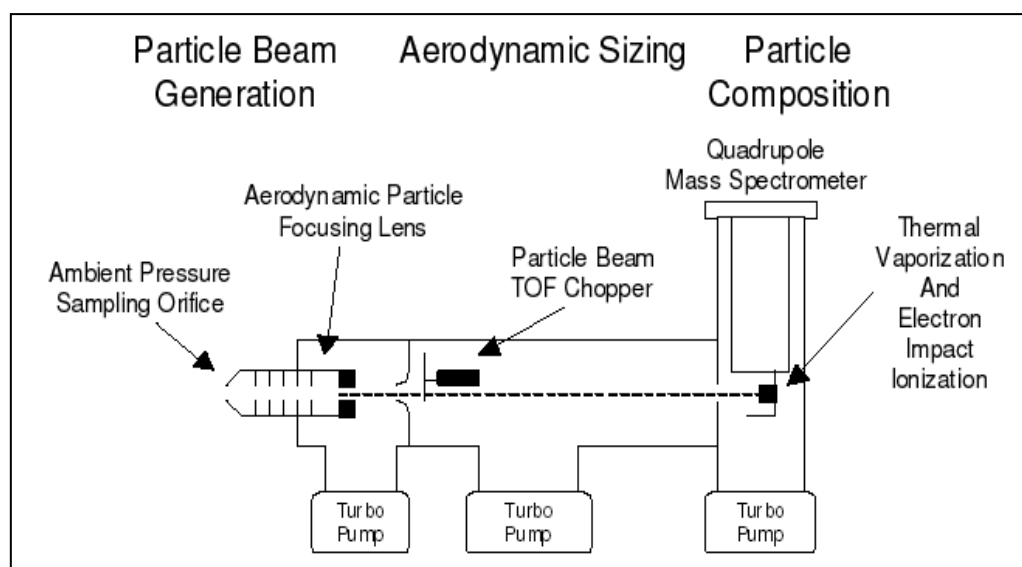


Figura 2.6 Esquema del Aerosol Mass Spectrometer (Allan et al., 2003).

El AMS puede operar en varios modos. Durante las mediciones realizadas en Alzomoni operó en los dos modos comunes: espectrómetro de masas (MS, por sus siglas en inglés) y tiempo de vuelo (ToF, por sus siglas en inglés). Durante el modo de operación MS, el espectrómetro de masas cuadrupolo realiza escaneos continuamente, mientras que las partículas de aerosol son directamente impactadas dentro del vaporizador. Esto provee un espectro de masas completo del conjunto total de iones de partículas de aerosol sin información del tamaño de las éstas. El modo de operación ToF mide la distribución por tamaños para una composición seleccionada (Drewnick et al., 2005).

2.3.2.2 Calibración

La calibración de la eficiencia de ionización se define como el cociente del número de iones generados respecto del número total de moléculas disponibles para ionizar. Esta calibración es importante debido a que determina la eficiencia de ionización del nitrato de amonio que sirve como base para calcular las concentraciones de otros iones (Jayne et al., 2000).

La calibración del multiplicador de electrones tiene como propósito determinar la ganancia de éste y hacer compensaciones debido al decaimiento de la misma por el uso del equipo. La ganancia se calcula a partir de la comparación del área observada con el área esperada de un solo ión. Este tipo de calibración se debe realizar de manera constante debido a que la ganancia decrece a medida que avanza la vida del multiplicador de electrones.

La calibración del ToF determina la manera de calcular el diámetro aerodinámico de las partículas en el vacío. La calibración se realiza utilizando esferas de poliestireno, cubriendo un rango de tamaños de aproximadamente 100 a 1000 nm. Al usar las partículas de látex de poliestireno la temperatura del vaporizador es de 750°C para asegurar una rápida evaporación de las partículas.

El equipo utilizado en Altzomoni fue calibrado en el laboratorio del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) antes de iniciar el proyecto, y dos veces más después de instalarlo en el sitio, dado que hay un cambio en la presión atmosférica de 770 mb en la ciudad de México a 630 mb en Altzomoni.

2.3.2.3 Errores

Los errores que se presentan en las mediciones se deben principalmente a que la cantidad de iones detectados es finita, además de que hay un alto número de moléculas disponibles, pero la probabilidad de que éstas sean ionizadas y detectadas es baja. Esta distribución de iones se puede aproximar a una distribución de Poisson, con lo que se puede estimar el error asociado a la señal con la ecuación dada por Allan et al. (2003):

$$\Delta I = \alpha \frac{\sqrt{I}}{\sqrt{t_s}} \quad (2.1)$$

donde I es la concentración, t_s es el tiempo en que se tarda de hacer el muestreo, y α es un factor que indica que la señal del ión no es constante. Se deben hacer correcciones debido al desgaste del multiplicador de electrones, lo cual genera una disminución en la magnitud de la señal detectada por el ión. Para realizar las correcciones debidas a la degradación del multiplicador es necesario tomar las señales del aire que llegan al detector, las cuales deben ser constantes durante el periodo de medición para hacer la siguiente corrección a la señal, mediante la ecuación dada en Allan et al. (2003):

$$I_t^{Corregida} = I_t^{Medida} \cdot \frac{AB_0(Q_t + Q^*)}{AB_t(Q_0 + Q^*)} \quad (2.2)$$

donde AB_t es la señal del aire dada a un tiempo t , Q_t es el flujo volumétrico a un tiempo t y Q^* es una constante de compensación. El subíndice cero indica el tiempo inicial.

El AMS tiene un límite de detección de $0.1 \mu\text{g m}^{-3}$, con una resolución temporal de aproximadamente 30 s. Las muestras de partículas líquidas tienen una eficiencia de casi el 100%, mientras que las muestras de partículas sólidas tienen una eficiencia del 24%. La eficiencia del AMS varía para diferentes tipos de aerosol.

2.3.3 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

El SMPS es un sistema que mide la distribución por tamaños de aerosoles, usando una técnica de detección de movilidad eléctrica, en un rango de tamaños de 5 a 1000 nm. El SMPS consta de dos partes que son: un clasificador electrostático (Sección A en la figura 2.7), y un analizador de movilidad diferencial (DMA) que incluye un contador de núcleos (Sección B en la figura 2.7) (Ober et al., 2002; Krüger et al., 2005; Matthew et al., 2007).

2.3.3.1 Principio de medición

El SMPS se basa en el principio de movilidad de una partícula cargada en un campo eléctrico: se usa una carga bipolar en el clasificador electrostático para que las partículas sean cargadas a una distribución de carga conocida. La movilidad de las partículas en el campo eléctrico depende no tanto de la densidad de éstas sino de la carga y el diámetro, conocido como diámetro de movilidad, suponiendo que se tienen partículas esféricas (Krüger et al., 2005). Las partículas son clasificadas según su habilidad para cruzar un campo eléctrico, de las cuales las que entran al sistema son neutralizadas de tal modo que tengan una distribución de carga en equilibrio; éstas entran al Analizador de Movilidad Diferencial (DMA) donde los aerosoles son clasificados de acuerdo a la movilidad eléctrica con que salen a través del orificio de salida. Esta distribución monodispersa va a un Contador de Partículas

de Condensación, el cual determina la concentración de partículas de un determinado tamaño.

2.3.3.2 Errores

Un error del equipo es la determinación del tiempo que el aerosol viaja desde la columna del clasificador hasta que es detectado por el CPC. Los efectos de este tipo de error son más pronunciados para escaneos rápidos con un amplio rango del tamaño de las partículas, ya que el rango de detección del SMPS es de $0.020 \mu\text{m}$ a $0.514 \mu\text{m}$. Se estima que el SMPS tiene una precisión de $\pm 15\%$.

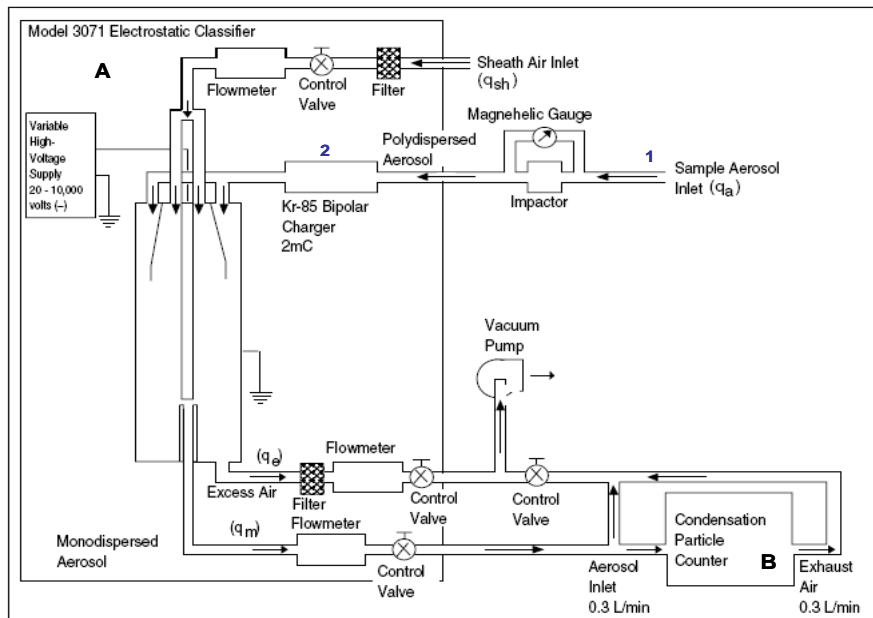


Figura 2.7 Esquema del Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). A) DMA, B) CPC, 1) Entrada de la muestra de aerosol, 2) Neutralizador.

2.3.4 Contador de Núcleos de Condensación (CNC)

Para conocer la concentración total de aerosoles en el sitio de Altzomoni se instaló un Contador de Núcleos (CN), en el cual las partículas mayores a $0.01 \mu\text{m}$ se hacen crecer para ser detectadas ópticamente y posteriormente contadas.

2.3.4.1 Principio de medición.

El contador de partículas de condensación opera de la siguiente manera: las partículas crecen a cierto tamaño, crecimiento que es causado por la activación de las partículas en un ambiente sobresaturado (mayor que 400 % con respecto al butanol). El crecimiento de las partículas permite medir la concentración de las mismas por medio de un sensor óptico o contador. El parámetro de trabajo más importante del CNC es el tamaño inicial de las partículas que son activadas para crecer y finalmente ser detectadas por el equipo (Rashaid, 2002).

La cámara de saturación del CNC consta de un cilindro que es calentado, y cuyas paredes son cubiertas con butanol. La temperatura de la cámara de saturación se incrementa a bajas presiones para mantener una sobresaturación adecuada. El aire y las partículas pasan a la cámara del condensador donde hay una expansión rápida y una temperatura más baja. Es aquí donde aumenta la sobresaturación que da lugar a un rápido crecimiento de las partículas por la condensación de las moléculas de butanol. El CNC opera con un flujo de $1.67 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ (Deshler, 2002).

2.3.4.2 Calibración

Para calibrar el equipo se generan partículas de aerosol y el instrumento es ajustado hasta que la respuesta de medición del instrumento sea consistente con la respuesta teórica del mismo para un cierto tamaño e índice de refracción de las partículas usadas. Normalmente los instrumentos son calibrados usando esferas de látex de poliestireno con un radio de aproximadamente $0.5 \mu\text{m}$; estos aerosoles estándar se han usado desde 1970. Para la calibración es suficiente utilizar un solo tamaño de partícula.

2.3.4.3 Errores

Los errores en el equipo se deben principalmente a las variaciones en la respuesta del fotomultiplicador para una entrada óptica constante. Las variaciones en la intensidad de la luz y variaciones en la trayectoria de los aerosoles a través del haz juegan un papel secundario.

El CNC tiene un límite de detección de $0.01\mu\text{m}$, un rango de temperatura de operación de entre 10 y 35°C , y un rango de operación de humedad de entre 0 y 90%. Tiene una precisión de $\pm 1.5\%$ (tabla 2.2).

2.3.5 Particle Soot Absorption Photometer (PSAP)

Muchos de los datos de absorción de luz por partículas provienen de métodos que miden el cambio en la transmisión de luz a través de un filtro en el cual las partículas son colectadas. La respuesta de las mediciones basadas en filtros para la dispersión depende de tres factores que son: la presencia de partículas de dispersión en el filtro, la presencia de partículas de absorción en el filtro y la distribución por tamaños de las partículas, ya que la retrodispersión por éstas depende de su tamaño (Bond et al., 1999).

Uno de los instrumentos que se basa en filtros para mediciones continuas de absorción de luz es el Particle Soot Absorption Photometer (PSAP, por sus siglas en inglés). Usa filtros los cuales permiten que las partículas lleguen parcial o completamente en un ambiente óptimamente difusivo (Bond et al., 1999; Snyder y Schauer, 2007).

El BC es la especie más eficiente en la absorción de luz en el rango visible. La relación entre el coeficiente de absorción, b_{abs} (m^{-1}), y la concentración de BC es establecida por la eficiencia de absorción ($\sigma_{\text{abs BC}}$) a través de la siguiente ecuación:

$$b_{\text{abs}} = [\text{BC}] \cdot \sigma_{\text{abs BC}}$$

donde $\sigma_{\text{abs BC}}$ y b_{abs} dependen de la longitud de onda. De esta forma se puede obtener la concentración de BC a partir del coeficiente de absorción (Cozic et al., 2007).

2.3.5.1 Principio de medición

El PSAP se usa para medir el coeficiente de absorción de luz en tiempo real. El método de medición se basa en una técnica de un plato de integración (figura 2.8), en la cual el cambio en la transmisión óptica del filtro causado por la remoción de partículas está relacionado con el coeficiente de absorción óptica de las partículas depositadas. Usando la ley de Beer (Virkkula et al., 2005; Marinoni et al., 2008):

$$A = \ln (I_0/I)$$

donde: A es la absorbancia de la luz mientras pasa a través del filtro, I es la intensidad de la luz transmitida, e I_0 es la intensidad original de la luz antes de que pase a través del filtro.

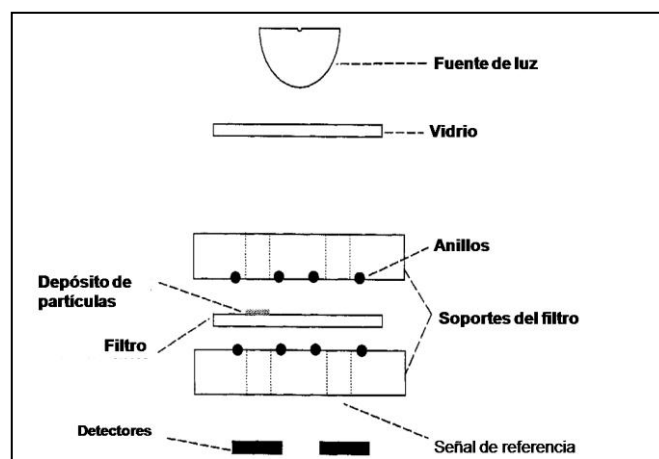


Figura 2.8 Sección transversal de la operación del filtro en el PSAP (modificado de Bond et al., 1999).

2.3.5.2 Calibración

Existe un método de calibración empírico, el cual consiste en una comparación entre la respuesta del instrumento y la diferencia entre la extinción y la dispersión. Para la calibración del PSAP se generan partículas generalmente de sulfato de amonio usando para ello un nebulizador ultrasónico y esferas de látex (Virkkula et al., 2005).

2.3.5.3 Errores

El error en la velocidad de flujo del PSAP puede ser del 20%. Las incertidumbres que se presentan al realizar las mediciones son las siguientes: el de flujo de calibración es de aproximadamente el 2%; la corrección por altitud es del 2%; la respuesta a la dispersión, 2%; la respuesta a la absorción, 22%; la precisión del instrumento es de $\pm 6\%$. El PSAP que operó en Alzomoni durante la campaña de medición tiene una precisión de $\pm 25\%$.

2.3.6 Ceilómetro.

El ceilómetro mide la intensidad de la retrodispersión óptica del aire a una longitud de onda de 905 nm (Eresmaa et al., 2006). En esta investigación, se utilizó la información de un ceilómetro que fue instalado en Tenango del Aire (98°Lon, 19° Lat, 2300 msnm), aproximadamente a 15 km de Alzomoni, para determinar los días en los cuales hubo nubes en dicho sitio y separar los días de medición en los periodos que en capítulos posteriores serán detallados. A continuación se da una breve descripción del funcionamiento del ceilómetro y sus aspectos principales.

2.3.6.1 Principio de medición

El principio por el cual opera el equipo es a través de un láser que emite pulsos de manera vertical a la atmósfera. La retrodispersión resultante por partículas de aerosol y las nubes se analiza por la intensidad de luz dispersada. La altura de las nubes es determinada mediante el tiempo que tarda el pulso en ser detectado después de la retrodispersión.

Debido al sistema óptico y a la pequeña divergencia del haz, los efectos de dispersión múltiple son despreciables y domina la dispersión de Mie con ángulos de dispersión entre 179.9° y 180.1° . La intensidad de la retrodispersión depende principalmente de la concentración de partículas en el aire y su tamaño; sin embargo las nubes con gotitas más grandes generadas a partir de algunas partículas de aerosol dominan en las mediciones, de tal forma que se identifica más fácilmente la altura de las nubes.

Capítulo III

ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de los datos. Las variables consideradas son: núcleos de condensación (CN)¹, coeficiente de dispersión (B_{scat})¹, carbono negro u hollín (BC)¹, carbono orgánico (OC)¹ y sulfato (SO_4^{-2}).

Con la finalidad de entender mejor los resultados, se inicia con el análisis de las series de tiempo y posteriormente los histogramas de frecuencia que ilustran la distribución de los datos.

3.1 Análisis de las series de tiempo

En las figuras 3.1 a 3.3 se presentan las series de tiempo de las variables de estudio, las cuales nos permiten observar su ciclo diurno así como la concentración de partículas en el sitio según las condiciones meteorológicas que dominaron durante los días de medición.

En la tabla 3.1 se muestra el rango de valores máximos alcanzados durante los tres periodos. Durante días sin nubes los valores fueron más altos que en días con nubes y con precipitación, excepto el sulfato y el coeficiente de dispersión cuyos valores son similares en los tres casos.

¹ CN, BC, OC, B_{scat} por sus siglas en inglés

Tabla 3.1 Rangos de valores máximos de las variables de estudio durante cada uno de los tres periodos de medición: días sin nubes, con nubes y con precipitación.

| Variable | Días sin nubes | Días con nubes | Días con precipitación |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| CN | 15000 a 25000 cm^{-3} | 5000 y 10000 cm^{-3} | 1000 y 5000 cm^{-3} |
| Hollín | 0.8 y 1.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ | 0.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ | 0.09 y 0.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ |
| OC | 40 y 60 $\mu\text{g m}^{-3}$ | 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ | 1 y 7 $\mu\text{g m}^{-3}$ |
| Sulfato | 2.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ | 1.5 y 2 $\mu\text{g m}^{-3}$ | 2.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ |
| B_{scat} | 5 y 40 Mm^{-1} | 5 y 30 Mm^{-1} | 5 y 25 Mm^{-1} |

Hitzenberger y Tohno (2001) compararon la concentración de hollín en dos zonas urbanas Viena y Uji: el estudio se realizó durante 14 meses bajo condiciones meteorológicas típicas y encontraron que la concentración promedio de hollín durante los días de muestreo fue de $5 \mu\text{g m}^{-3}$.

Mediciones de hollín realizadas durante 24 horas en los sitios rurales Nanyuki y Meru, localizados al noroeste y noreste de Kenya, registraron una concentración de hollín en Meru de $1.4 \mu\text{g m}^{-3}$, mientras que en Nanyuki un valor de $0.72 \mu\text{g m}^{-3}$ (Gatari y Boman, 2003).

Al comparar los resultados mostrados en la tabla 3.1 con los obtenidos en los dos estudios citados anteriormente, se observa que en zonas aisladas de fuentes de emisión antropogénica la concentración de hollín es menor. Los datos obtenidos en las zonas rurales son similares a los que se registraron en Alzomoni, principalmente bajo condiciones de cielo despejado.

Las condiciones a escala sinóptica controlan en gran medida el transporte de contaminantes de las ciudades aledañas al sitio. El paso de un sistema frontal durante los días de medición incrementó la humedad en el sitio y la formación de nubes. Esto fue un factor muy importante durante la campaña MILAGRO debido a que el incremento de la nubosidad que generó el sistema frontal ocasionó precipitación en el sitio, removiendo algunas partículas de la atmósfera (Figuras 3.1-3.3).

La gráfica 3.1 ilustra las series de tiempo de las variables durante días sin nubes. La máxima concentración de CN se registró durante la tarde. Sin embargo, las demás variables presentaron su valor máximo a distintas horas del día.

La figura 3.2 corresponde al periodo con nubes. La máxima concentración de partículas se presentó a diferentes horas del día y en algunos casos no se observa un máximo.

Durante días con precipitación, la concentración registra valores más bajos que los registrados durante los periodos con días sin nubes y periodo días de nublados, dado que muchas partículas posiblemente fueron removidas a la superficie por la lluvia generada por el sistema frontal. La concentración máxima de los núcleos de condensación, el hollín y el coeficiente de dispersión se presentó durante la tarde, mientras que el carbono orgánico y el sulfato registraron valores de concentración más altos durante la mañana (ver figura 3.3).

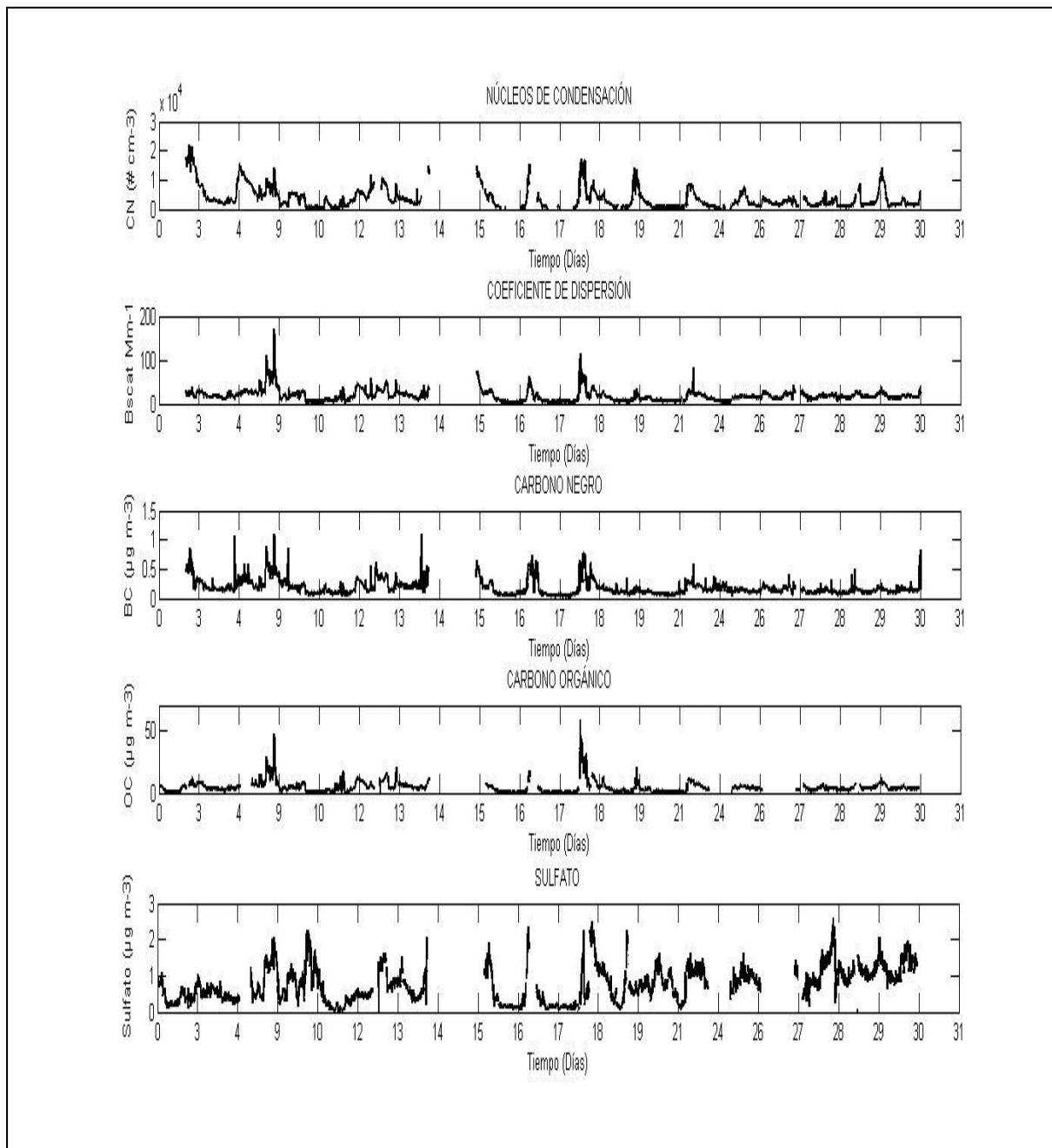


Figura 3.1 Series de tiempo de las variables de estudio durante días sin nubes.

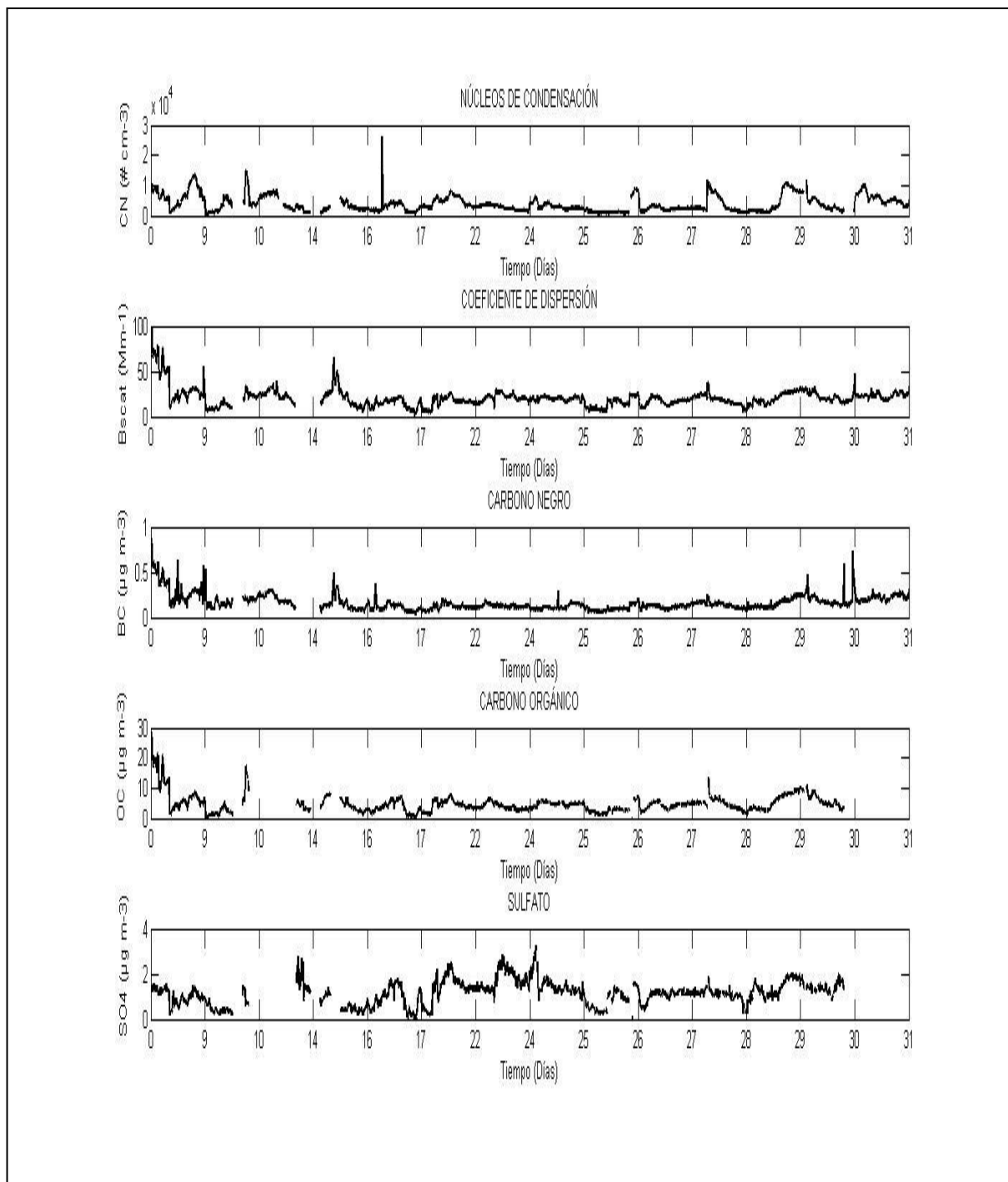


Figura 3.2 Series de tiempo de las variables de estudio durante días con nubes

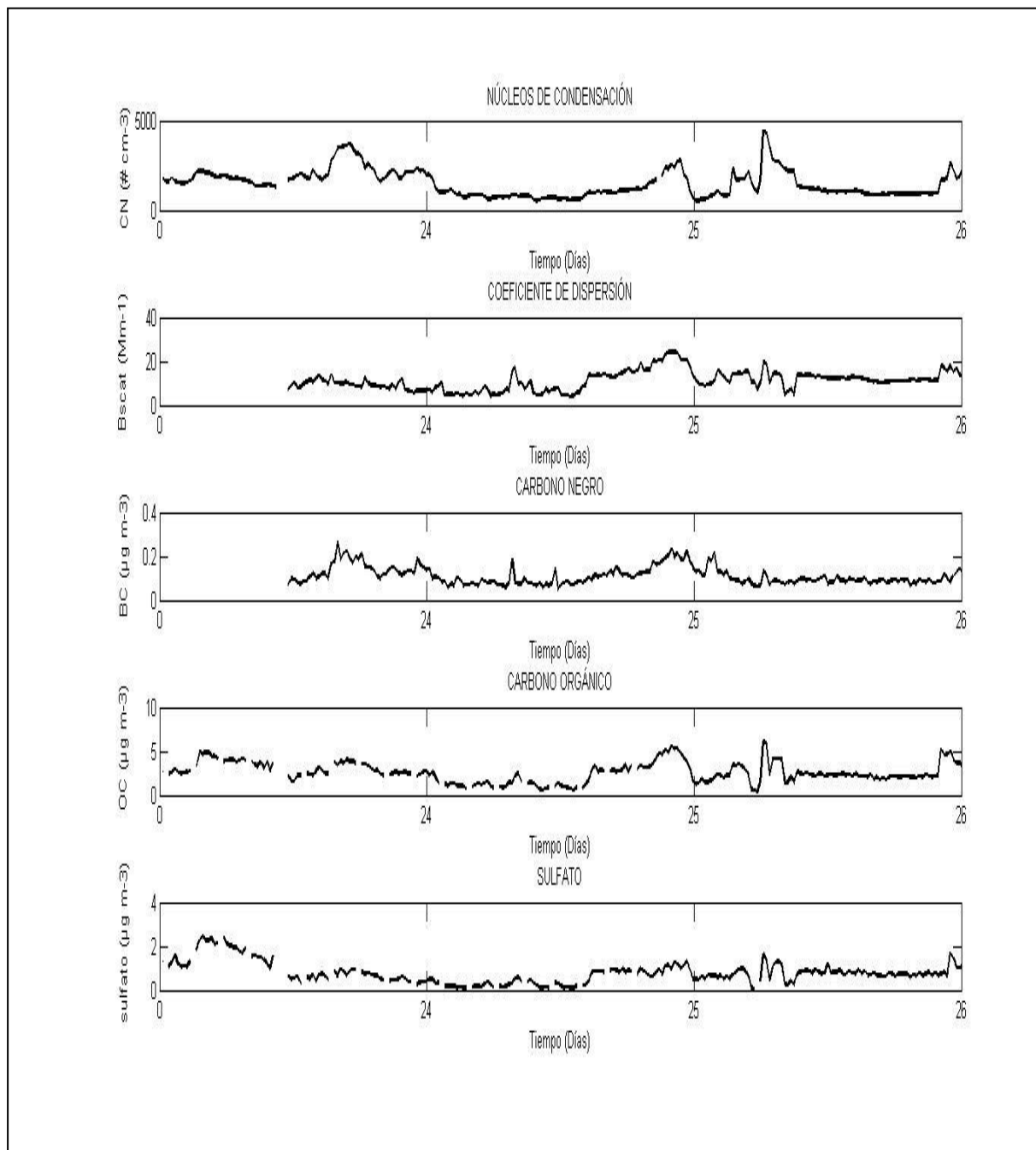


Figura 3.3 Series de tiempo de las variables de estudio durante días con precipitación.

3.2 Análisis de los histogramas de frecuencia relativa

En las figuras 3.4 a 3.8 se muestran los histogramas de frecuencia relativa, los cuales nos permiten conocer el comportamiento de los datos. La abscisa en las gráficas señala los rangos de valores tomados por la variable, mientras que la ordenada representa la frecuencia relativa en el que los datos caen en estos rangos. Cada figura contiene tres histogramas que corresponden a tres intervalos de tiempo de las 00:00 a las 09:00 h, de las 09:00 a las 17:45 h y de las 17:45 a las 24:00 h según la evolución de la capa de mezcla en el sitio.

Se pueden encontrar distintos tipos de distribuciones en los histogramas dependiendo del comportamiento de los datos. Algunas distribuciones comunes son: distribución en forma de campana que presenta una forma simétrica con un pico en la mitad del recorrido de los datos; distribución de doble campana: esta forma generalmente es la combinación de dos distribuciones y sugiere la presencia de dos procesos distintos; y distribución sesgada o truncada: su forma es asimétrica con un pico descentrado dentro del recorrido de los datos, y las colas descienden bruscamente en un lado y suavemente en el otro.

La figura 3.4 muestra los histogramas de CN, en donde se observa que de las 00:00 a las 09:00 h durante los tres periodos, los datos tienen una distribución truncada. De las 09:00 a las 17:45 h, los datos que corresponde a días sin nubes y a días con precipitación muestran una distribución truncada, mientras que durante días con nubes tiende a ser sesgada.

Durante la tarde y parte de la noche (17:45 a 24:00 h) se observa que en días sin nubes los datos tienen una pauta de comportamiento truncada. Durante días con precipitación los valores se concentraron en una sola barra, por lo que no se puede determinar con claridad una pauta de variación. Los valores más frecuentes de concentración durante estas horas oscilaron entre 2,000 y 4,000 CN/cm³.

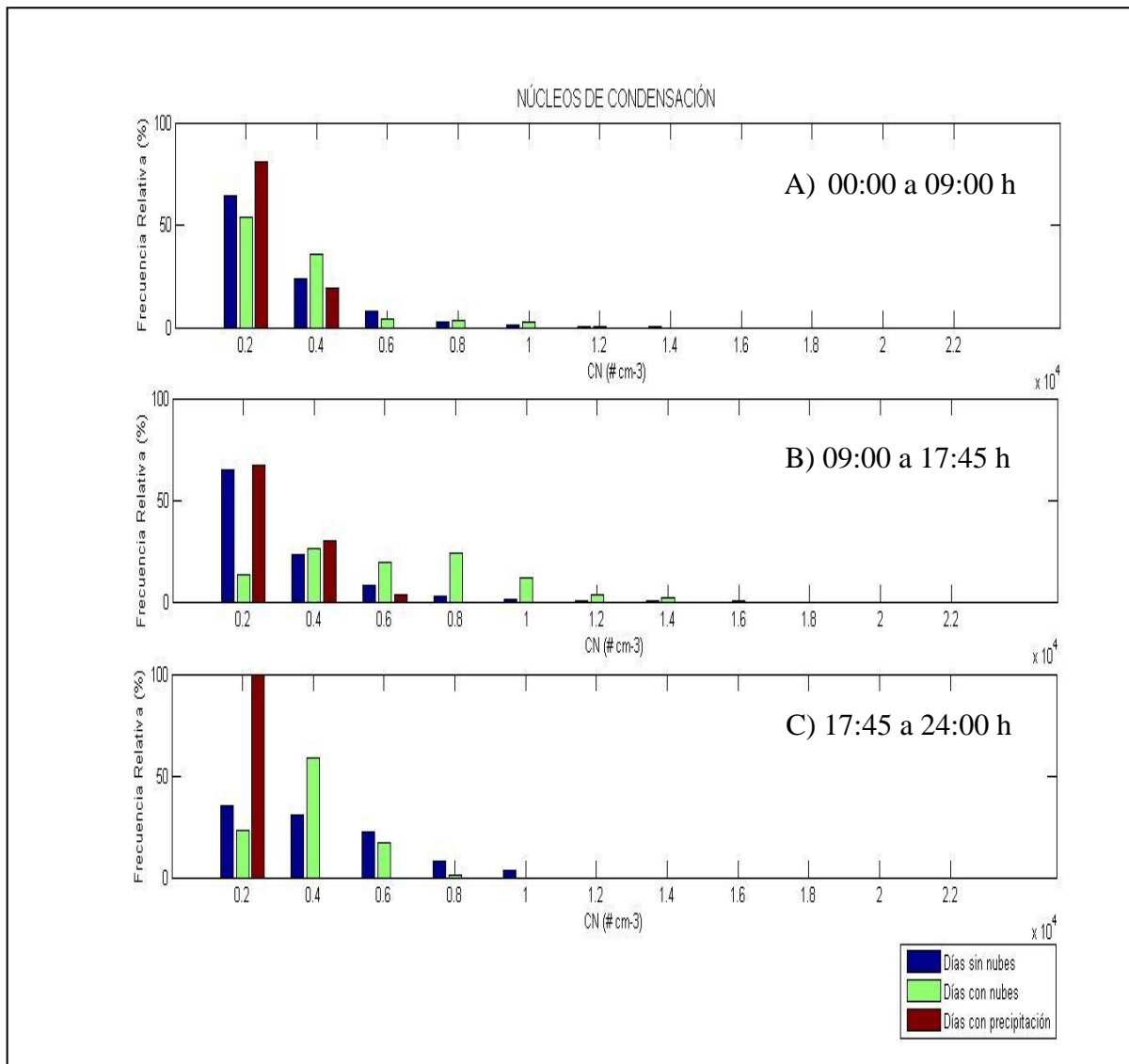


Figura 3.4 Histogramas de frecuencias de los CN para días sin nubes, días con nubes y días con precipitación separados por horas del día. A) de las 00:00-09:00 h, B) de las 09:00-17:45 h y C) de las 17:45-24:00 h.

El comportamiento de los datos obtenidos de la concentración de hollín en Alzomoni es sesgado para días sin nubes y durante días nublados, a diferencia de los días con precipitación cuyo comportamiento fue truncado. En los tres casos los valores más frecuentes se concentraron entre 0.2 y 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 3.5).

En el horario de las 09:00 a 17:45 h, los datos presentaron una distribución sesgada para los tres casos y los valores más frecuentes fueron de 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante la tarde, para días con nubes y días sin nubes los datos de carbono negro presentaron una distribución sesgada y el tamaño de las barras es similar. Esto no significa que la cantidad de datos colectada en cada periodo sea la misma, sino que de los datos colectados para cada periodo los valores de concentración presentaron una frecuencia relativa muy similar entre estos dos periodos.

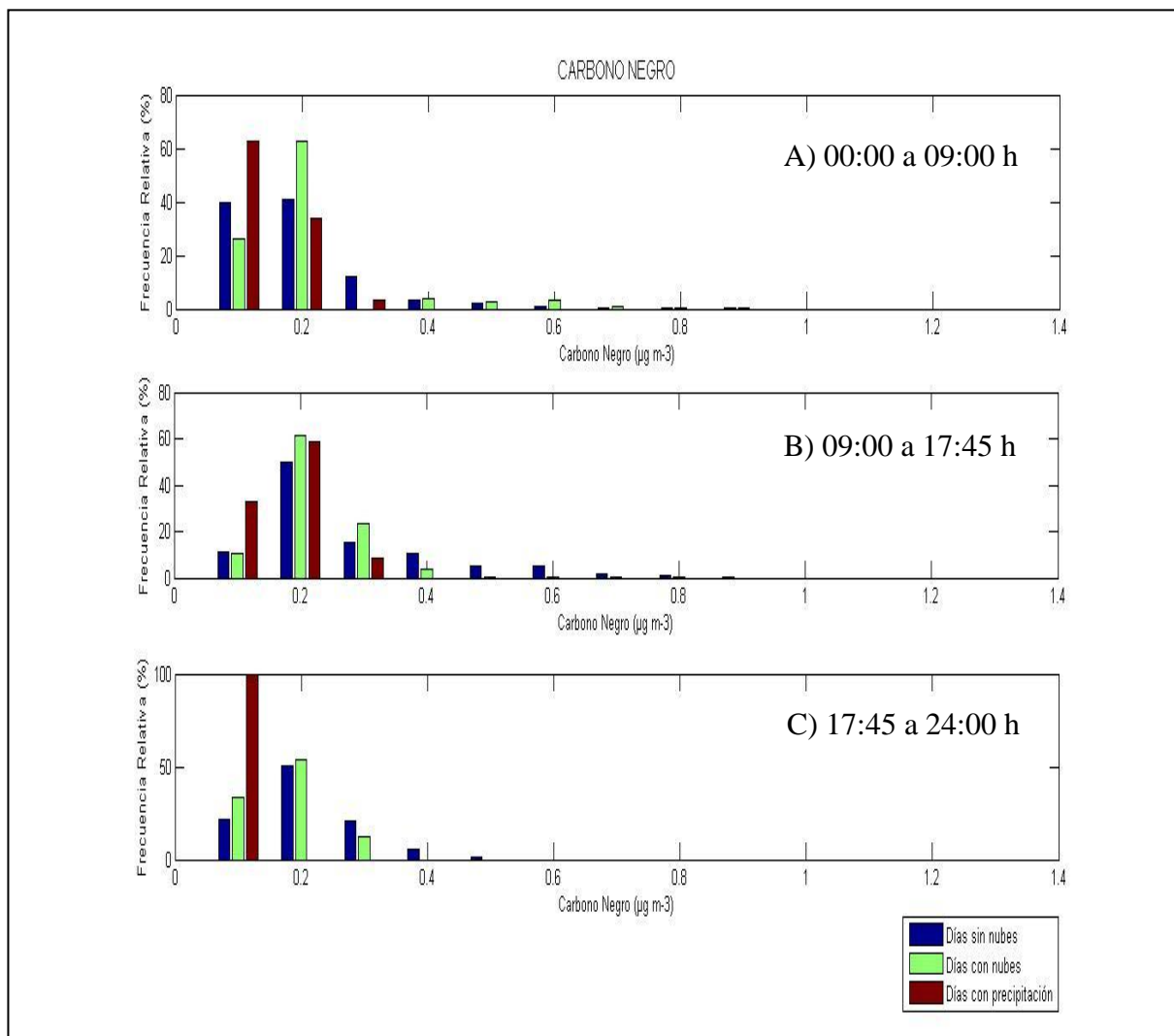


Figura 3.5 Como la figura 3.4, pero para carbono negro.

Los histogramas de frecuencia relativa del carbono orgánico se ilustran en la figura 3.6. Durante días sin nubes y durante días con precipitación, la distribución de los datos es truncada. Sin embargo, en días con nubes la pauta de comportamiento es sesgada y los valores más frecuentes se concentran en las primeras dos barras del histograma.

Durante el día, de las 09:00 a 17:45 h, la concentración más frecuente durante los tres periodos de medición en el sitio de Altzomoni fue de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los datos tienen una pauta de comportamiento sesgada vista, con mayor claridad durante días sin nubes.

Dado el poco nutrido registro de datos durante días con precipitación, se observa que por la tarde los valores correspondientes a este periodo se concentran en una sola barra del histograma, con valores de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los datos tienen un comportamiento sesgado. En días sin nubes el 70% de los datos varía entre los valores mencionados anteriormente y el 30% restante entre valores de 9 a $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

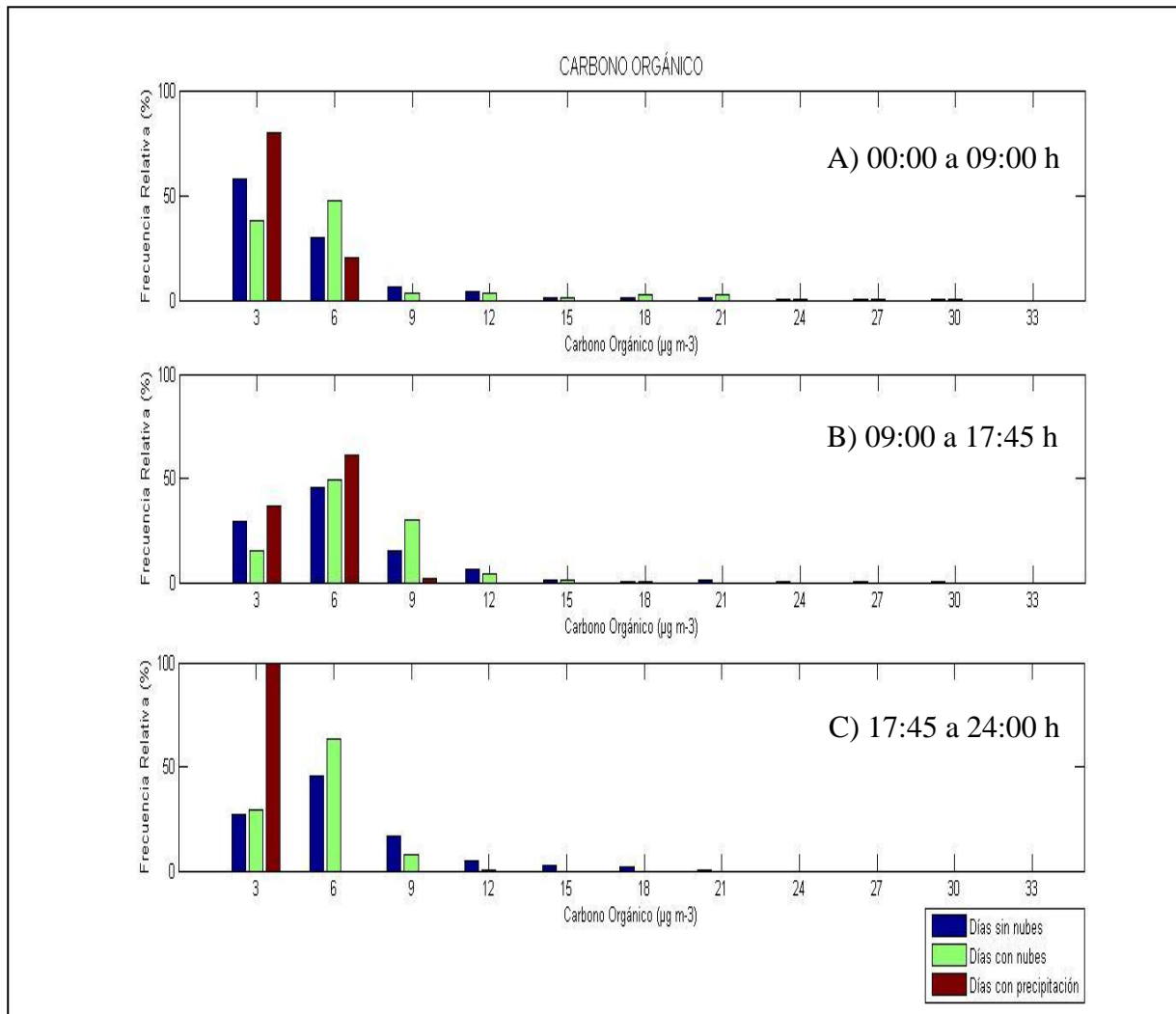


Figura 3.6 Como la figura 3.4 pero para carbono orgánico.

La figura 3.7 muestra los histogramas de frecuencia relativa de los datos del coeficiente de dispersión. En la primera gráfica se observa que durante los tres periodos de medición (en el horario de 00:00 a 09:00 h) los datos tienen una distribución sesgada.

En días con cielo despejado y en días con nubes los datos tienen una distribución sesgada. En el periodo de precipitación los datos presentan una aparente distribución en forma de campana, sin embargo únicamente se tienen tres barras por la ya mencionada escasez de datos, por lo que no se deduce una clara pauta de comportamiento.

Por la noche la distribución de los datos no es muy clara, ya que los histogramas durante días con nubes y precipitación se conforman por dos y tres barras, respectivamente, y no se tiene un claro comportamiento de los datos. En días sin nubes se tiene una distribución sesgada.

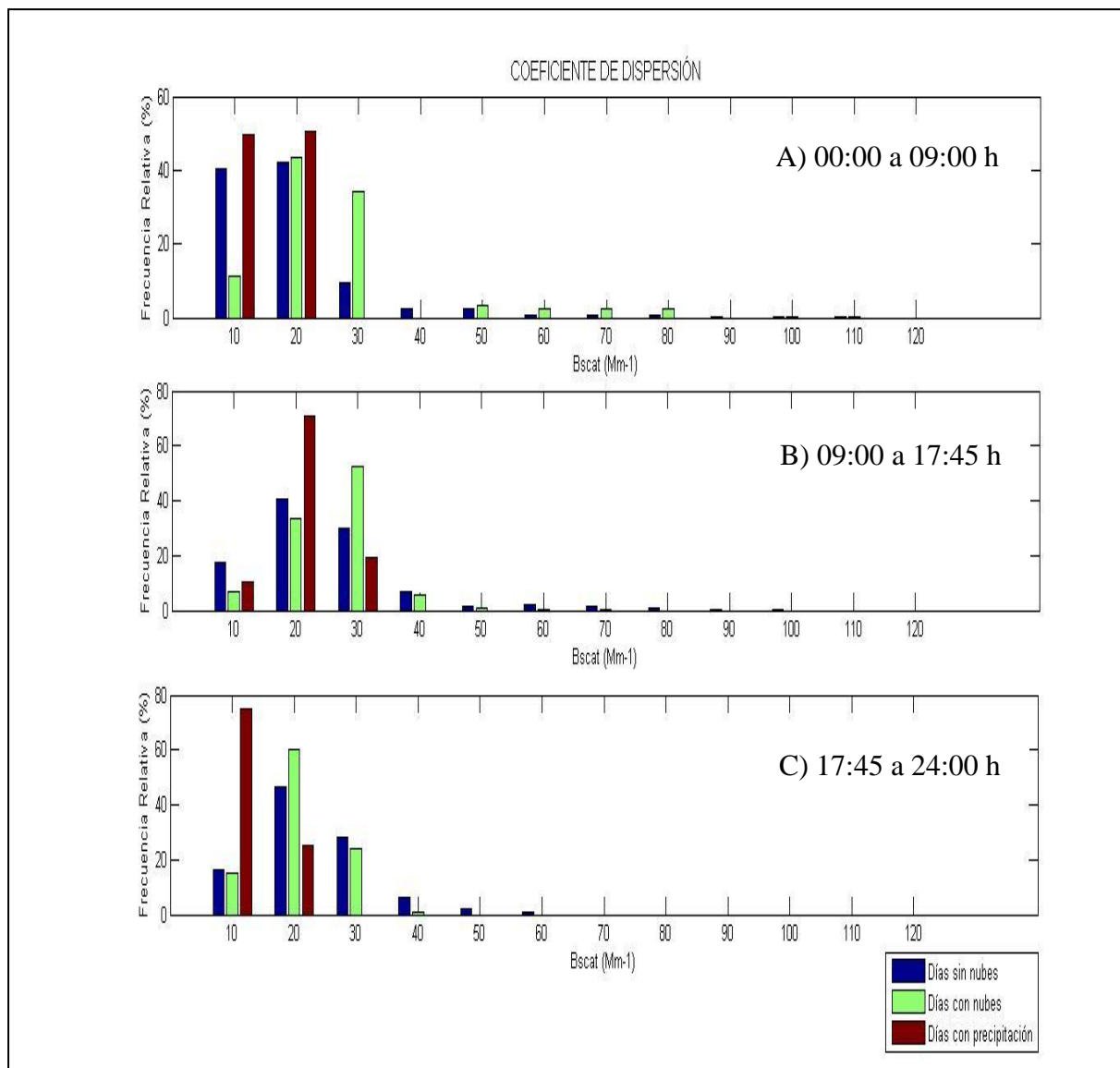


Figura 3.7 Como la figura 3.4 pero para el coeficiente de dispersión.

El comportamiento de los datos obtenidos de la concentración de sulfatos ilustra que, durante el horario de 00:00 a 09:00 h, la frecuencia de los valores fue casi uniforme, a diferencia de las variables anteriores. Bajo condiciones de cielo despejado y en días con precipitación, la distribución de los datos es sesgada y sus valores más frecuentes oscilan entre 0.5 y 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el periodo de días con nubes, el comportamiento de los datos se aproxima a una distribución en forma de campana (figura 3.8).

En el horario diurno durante días con nubes, se observa una distribución más clara en forma de campana, mientras que durante los periodos de días sin nubes y durante días con precipitación los datos tienen una pauta de variación con sesgo positivo, en el cual los datos se encuentran a la derecha de la media.

El tercer histograma de la figura 3.8, que presenta el comportamiento de los datos cuando el sitio se ve influenciado por una capa más estable en el horario de 17:45 a 24:00 h, se aprecia que durante días con precipitación los datos son muy pocos y se concentran en una sola barra del histograma. En días sin nubes los datos tienen una pauta de variación con sesgo negativo.

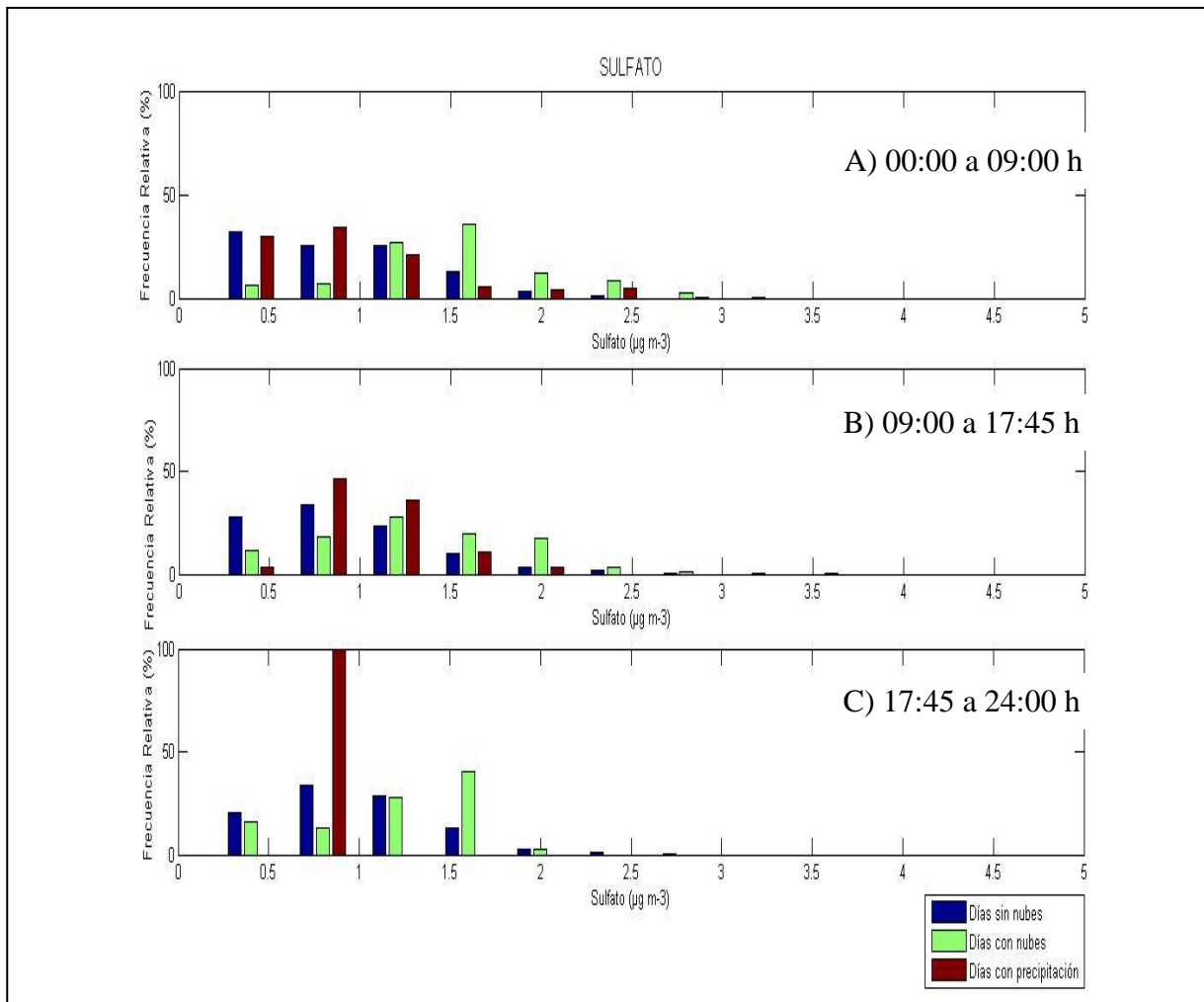


Figura 3.8 Como la figura 3.4 pero para la concentración de sulfato.

Capítulo IV

DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos del análisis de correlación lineal de las variables que fueron analizadas en esta investigación. El análisis y las gráficas asociadas se presentan de acuerdo a la hora del día, dirección del viento y las condiciones meteorológicas que dominaron en el sitio.

El análisis de las variables se realizó de acuerdo a la evolución de la capa límite, la cual muestra una variación diurna. La altura de la capa de mezcla depende de la actividad solar, de tal forma que su crecimiento y desarrollo están condicionados por la aportación energética del sol, presentando un carácter diurno y un carácter nocturno diferenciados claramente.

Durante la noche la capa límite normalmente está definida por el estrato estable representado por la inversión radiativa superficial, mientras que en el día la actividad turbulenta provoca el desarrollo de la capa de mezcla, misma que se ilustra en la figura 4.1.

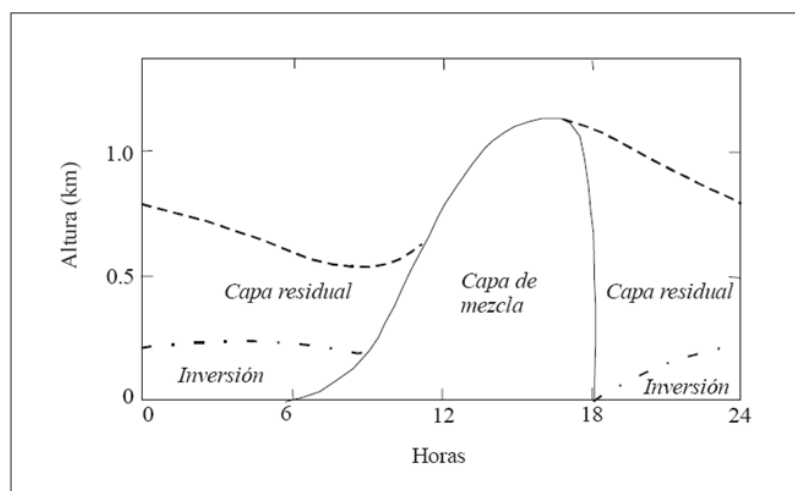


Figura 4.1 Variación diurna de la capa límite. La abcisa indica las horas del día mientras que la ordenada muestra la altura de la capa límite en km.

4.1 Análisis de correlación entre las variables de estudio

La correlación entre variables es una técnica para determinar la relación que existe entre dos o más variables. El coeficiente de correlación (r) da una idea de la relación que existe entre las variables. Entre más cercano a 1 o -1 sea el valor del coeficiente de correlación, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables; si el valor es cercano a cero existe una asociación débil entre ellas (Douglas, 2004; Hildebran, 1997).

Sabemos que las partículas representadas por el parámetro CN tienen diferente composición, por ejemplo: materia orgánica, inorgánica, polvo, etc. La mayoría de la masa se encuentra en partículas inorgánicas y orgánicas con diámetros mayores que $0.1\mu\text{m}$, para la mayoría de las partículas con diámetros menores que $0.1\mu\text{m}$ suponemos que son partículas nuevas formadas por procesos secundarios o son partículas de hollín, que es emitido a la atmósfera por procesos de combustión incompleta y cuyo origen es la quema de biomasa o actividades antropogénicas.

El sitio de Altzomoni, a pesar de estar aislado de emisiones locales de combustión, presenta una incursión diaria de partículas, cuya fuente de emisión son las ciudades que se encuentran a su alrededor.

El la figura 4.2 y la tabla 4.1 se observa que en días sin nubes (caso I) la correlación más alta entre CN y hollín se presentó durante la tarde y noche: se supone que en estas horas el sitio empieza a salir de la capa de mezcla regional y la mayoría de los CN presentes en el sitio son hollín. Durante el día existe mayor dispersión en los datos y el valor de la pendiente es menor, dado que a estas horas el sitio se encuentra dentro de la capa límite y existe gran actividad turbulenta, generando procesos secundarios que dan lugar a la formación de nuevas partículas.

En días con nubes (caso II) la concentración de partículas disminuye, ya que muchas actúan como Núcleos de Condensación de Nube durante la formación de estos hidrometeoros.

Se observa que la concentración más alta se presentó en el día y la tarde cuando el viento es del E y SE a diferencia de cuando la dirección es del NW y SW, donde se tiene un coeficiente de correlación más bajo. Este comportamiento se atribuye a que la mayoría de las partículas que son transportadas al sitio, cuyo origen es principalmente la ciudad de Puebla, son hollín y probablemente los procesos secundarios no fueron suficientes para generar nuevas partículas.

En la gráfica del caso III, que corresponde al periodo de lluvias, se observa que la correlación más alta se registró durante el día con un valor de la pendiente mayor con dirección del viento del SE. Sin embargo, cabe mencionar que no se cuenta con los datos suficientes para realizar un análisis de correlación debido a que muchas partículas ya habían sido depositadas y los instrumentos registraron muy pocos eventos.

Tabla 4.1 Comparación de las pendientes (P), número de muestras (N) y coeficiente de correlación (CC) entre la concentración de CN y BC

| Condición | 00:00 – 09:00 | | | 09:00 – 17:45 | | | 17:45 – 24:00 | | |
|-------------|----------------------|-----|------|----------------------|-----|------|----------------------|-----|------|
| | P | N | CC | P | N | CC | P | N | CC |
| Caso I NW | 2.3×10^{-5} | 191 | 0.79 | 2.2×10^{-5} | 270 | 0.69 | 2.4×10^{-5} | 150 | 0.81 |
| Caso I SE | 3.0×10^{-5} | 57 | 0.74 | 3.1×10^{-5} | 73 | 0.86 | 3.4×10^{-6} | 40 | 0.89 |
| Caso I SW | 2.6×10^{-5} | 30 | 0.70 | 3.0×10^{-5} | 52 | 0.71 | 9.0×10^{-5} | 22 | 0.42 |
| Caso II NW | 8.8×10^{-6} | 40 | 0.68 | 7.5×10^{-6} | 43 | 0.53 | 1.7×10^{-5} | 28 | 0.63 |
| Caso II SE | 1.0×10^{-4} | 25 | 0.63 | 2.9×10^{-5} | 29 | 0.92 | 2.7×10^{-5} | 17 | 0.85 |
| Caso II SW | 1.2×10^{-5} | 12 | 0.61 | 1.2×10^{-5} | 25 | 0.54 | 3.4×10^{-6} | 9 | 0.25 |
| Caso III NW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Caso III SE | 2.1×10^{-5} | 19 | 0.32 | 3.1×10^{-5} | 31 | 0.69 | ND | ND | ND |
| Caso III SW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

Núcleos de Condensación y Carbono Negro

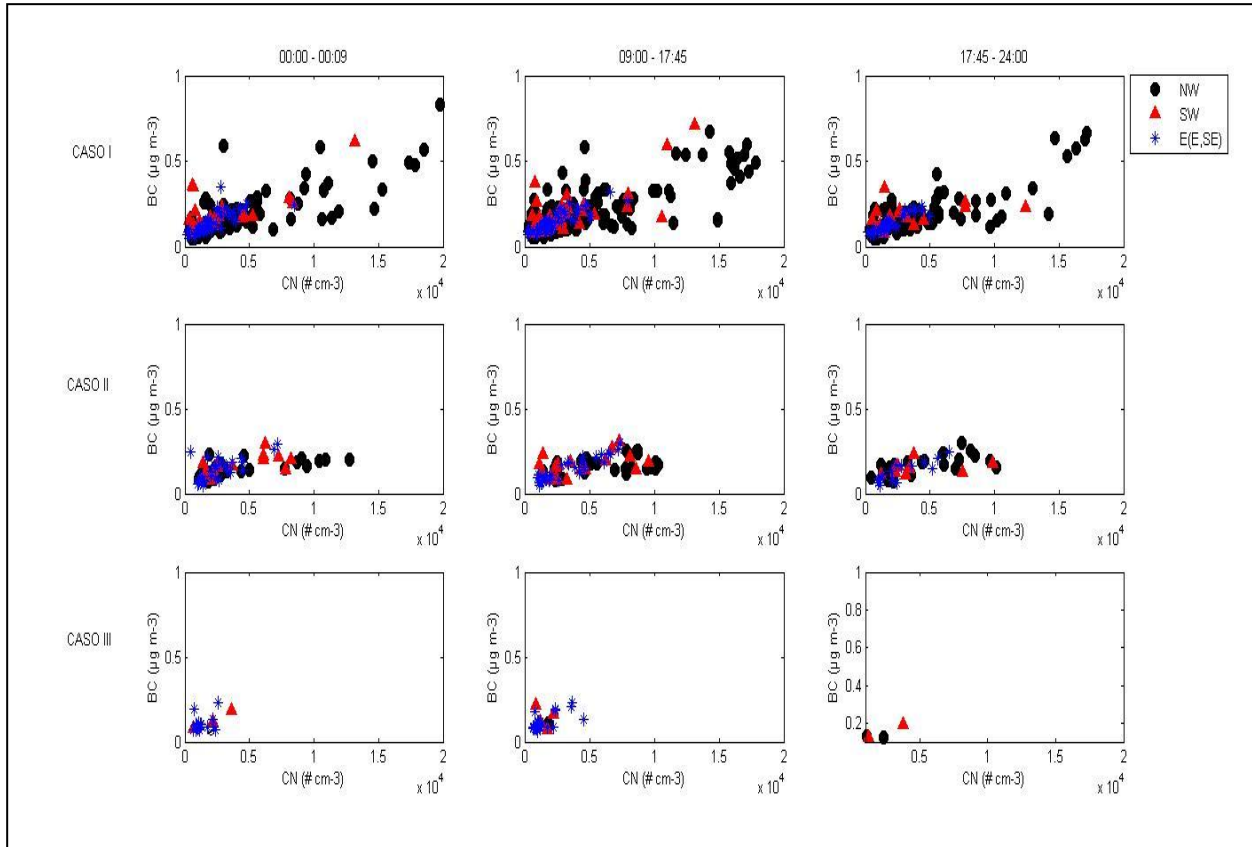


Figura 4.2 Gráficas de correlación entre el CN y BC para los tres periodos de estudio. El caso I días con capa de mezcla sin nubes, el caso II días con nubes y el caso III días con precipitación. El día se dividió en tres intervalos de tiempo: de 00:00 - 09:00 h, de 09:00 – 17:45 h y de 17:45 – 24:00 h. Los círculos indican dirección del viento del noroeste (NW), los asteriscos del sureste (E,SE) y los triángulos del suroeste (SW).

Los aerosoles orgánicos son una compleja mezcla de compuestos químicos producidos por la quema de biomasa y combustibles fósiles, además de emisiones biogénicas. Sabemos que en Altzomoni gran parte de los aerosoles orgánicos son secundarios (Volkamer et al., 2007; Baumgardner et al., 2009).

En días sin nubes los valores del coeficiente de correlación más altos entre el CN y el OC y los valores de la pendiente (figura 4.3 y tabla 2.2) se presentaron durante la madrugada y tarde, cuando el sitio está bajo la influencia de la capa residual. Este comportamiento se asocia a la emisión de partículas liberadas durante la noche por la vegetación que predomina en Altzomoni, ya que el OC es emitido tanto por fuentes naturales como antropogénicas, por lo que a estas horas la concentración de OC es mayor y no existen procesos secundarios que den lugar a nuevas partículas.

La presencia de nubes disminuye la cantidad de energía solar que llega al sitio comparado con la que llega durante días en los cuales no hay nubes, por lo que las condiciones de inestabilidad en la capa de mezcla son favorecidas por factores mecánicos, y las corrientes de aire cargadas de partículas que llegan a Altzomoni provienen de las ciudades.

Durante días nublados se observa una alta correlación entre CN y OC debido a que la aportación energética del sol no llega en su totalidad, ya que una parte es reflejada por las nubes, ocasionando que la capa de mezcla no alcance la altura que tendría durante días sin nubes. Por esta razón el espesor de la capa de mezcla durante la tarde disminuye más rápido, volviéndose más estable y, con esto, estancando las partículas que llegaron al sitio en horas anteriores. Este

comportamiento se ve reflejado en los valores de la tabla 4.2 y en el caso II de la figura 4.3, al mostrar alta correlación entre CN y OC cuando gran parte de las partículas presentes en el sitio son OC, presentando consigo valores de la pendiente más altos como el que se observa de las 00:00 a 09:00 h cuando la dirección del viento es del NW.

En días con precipitación muchas partículas son removidas de la atmósfera, quedando sólo algunas que pueden tener la misma composición química. El caso III de la figura 4.3 muestra una alta correlación durante el día, con un valor del coeficiente de correlación de 0.76 y una pendiente mayor cuando las partículas son transportadas de la ciudad de Puebla, probablemente por la poca intensidad de la lluvia y la resistencia de las partículas a ser depositadas.

Tabla 4.2 Como la tabla 4.1 pero para CN y OC.

| Condición | 00:00 – 09:00 | | | 09:00 – 17:45 | | | 17:45 – 24:00 | | |
|-------------|----------------------|----|------|----------------------|-----|------|----------------------|----|------|
| | P | N | CC | P | N | CC | P | N | CC |
| Caso I NW | 7.5×10^{-4} | 99 | 0.90 | 7.7×10^{-4} | 167 | 0.56 | 7.3×10^{-4} | 74 | 0.80 |
| Caso I SE | 1.2×10^{-3} | 32 | 0.81 | 1.2×10^{-3} | 50 | 0.79 | 4.5×10^{-4} | 23 | 0.61 |
| Caso I SW | 1.2×10^{-3} | 21 | 0.93 | 1.0×10^{-3} | 29 | 0.80 | 2.5×10^{-3} | 9 | 0.59 |
| Caso II NW | 7.3×10^{-4} | 28 | 0.92 | 6.8×10^{-4} | 38 | 0.86 | 1.8×10^{-3} | 12 | 0.89 |
| Caso II SE | 1.4×10^{-3} | 21 | 0.97 | 1.0×10^{-3} | 24 | 0.54 | 7.9×10^{-4} | 11 | 0.86 |
| Caso II SW | 1.9×10^{-4} | 9 | 0.93 | 6.7×10^{-4} | 19 | 0.81 | 5.6×10^{-4} | 5 | 0.70 |
| Caso III NW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Caso III SE | 9.0×10^{-4} | 17 | 0.70 | 1.0×10^{-3} | 31 | 0.76 | ND | ND | ND |
| Caso III SW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

Núcleos de Condensación y Carbono Orgánico

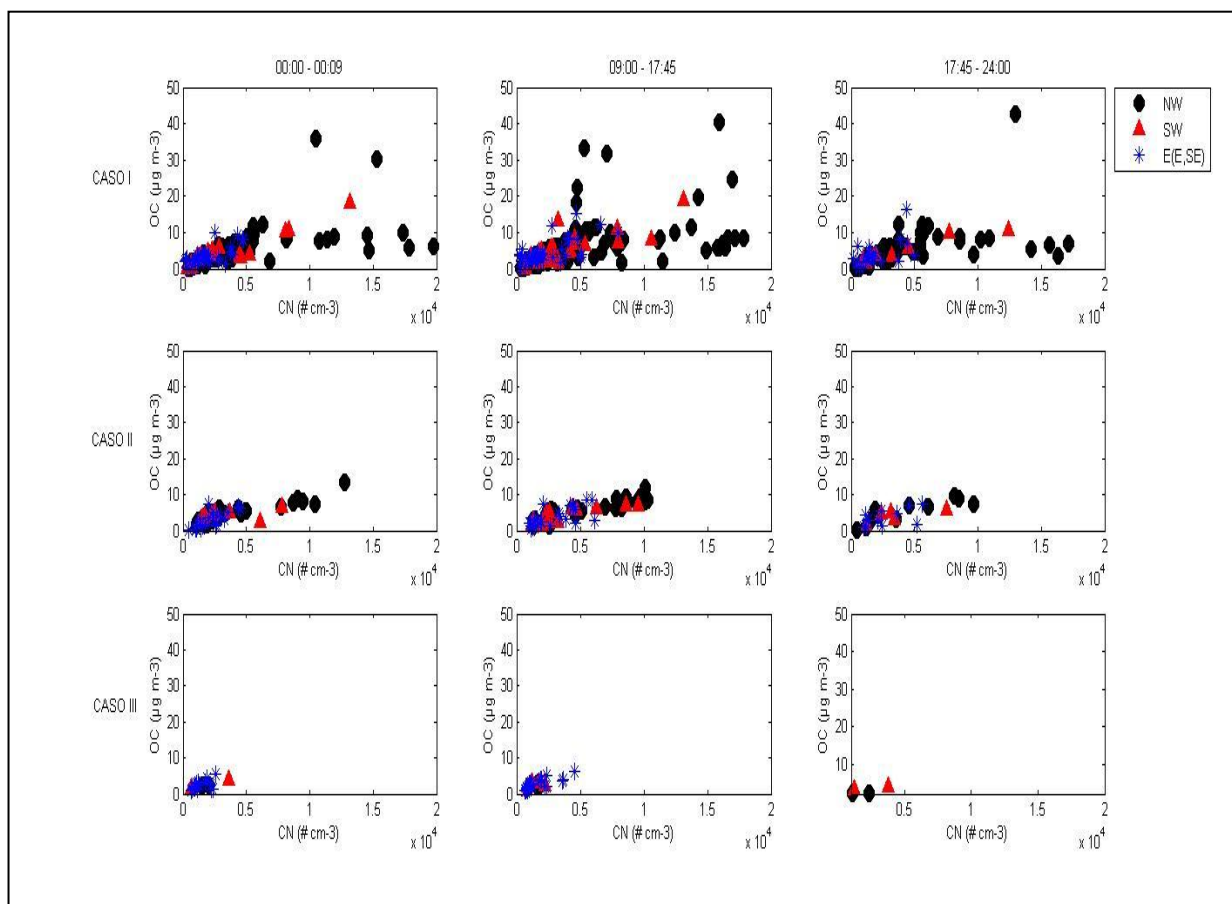


Figura 4.3 Como la figura 4.2 pero para CN vs OC.

Los aerosoles juegan un rol importante en el control de las propiedades ópticas del aire. Por lo tanto, las características físicas y químicas de las partículas determinan los coeficientes de absorción, de modo que los aerosoles regulan la transferencia de la radiación solar en la atmósfera (Mészáros y Ogren, 1998; Chylek et al., 1995).

Se sabe que el coeficiente de dispersión está en función de la eficiencia de dispersión (Q_{scat}) y el área transversal de las partículas:

$$B_{\text{scat}} \approx Q_{\text{scat}}(\lambda, \eta, D, X) D^2 N(D) dD \quad (4.1)$$

Q_{scat} es una función química a través del índice de refracción η , D es el diámetro, N la concentración y λ la longitud de onda. Los núcleos de condensación presentes en el sitio pueden tener diversa composición química, por lo que sus propiedades radiativas pueden ser distintas según el tipo de partícula que sea.

En la figura 4.4 y la tabla 4.3 se observa que existe una correlación relativamente alta entre los núcleos de condensación y el coeficiente de dispersión durante el periodo sin nubes (caso I); principalmente cuando los aerosoles llegan con dirección de la ciudad de Cuernavaca. Esto sucede durante las primeras horas de la mañana y durante la noche, debido a que durante estas horas la característica principal de los CN presentes en el sitio es dispersar la energía más que de absorber.

En el caso II los valores del coeficiente de correlación fueron relativamente altos, principalmente por la mañana, cuando el sitio de medición empieza a ser influenciado por la capa de mezcla regional y no es común la presencia de procesos secundarios que alteren la composición química de las partículas.

Lo anterior confirma que la composición química de las partículas influye en sus propiedades radiativas, ya que durante estas horas la mayoría de los CN presentes en el sitio fueron OC que, como se mencionó, dispersan eficazmente la luz.

Durante el periodo con precipitación la concentración fue aún menor debido a la remoción de partículas, por lo cual no se observa una buena correlación entre la concentración de núcleos de condensación y el coeficiente de dispersión; el valor más alto del coeficiente de dispersión fue de 0.31, cuando las partículas llegan de la ciudad de Puebla.

Tabla 4.3 Como en la tabla 4.1, pero para CN y el coeficiente de dispersión.

| Condición | 00:00 – 09:00 | | | 09:00 – 17:45 | | | 17:45 – 24:00 | | |
|-------------|----------------------|-----|------|----------------------|-----|------|----------------------|-----|------|
| | P | N | CC | P | N | CC | P | N | CC |
| Caso I NW | 1.9×10^{-3} | 138 | 0.67 | 1.9×10^{-3} | 182 | 0.69 | 1.7×10^{-3} | 115 | 0.68 |
| Caso I SE | 3.0×10^{-3} | 49 | 0.76 | 3.3×10^{-3} | 67 | 0.81 | 4.5×10^{-3} | 36 | 0.74 |
| Caso I SW | 3.2×10^{-3} | 27 | 0.91 | 3.6×10^{-3} | 41 | 0.83 | 2.1×10^{-3} | 18 | 0.86 |
| Caso II NW | 1.4×10^{-3} | 30 | 0.84 | 1.2×10^{-3} | 38 | 0.61 | 1.8×10^{-3} | 23 | 0.76 |
| Caso II SE | 3.6×10^{-3} | 27 | 0.73 | 2.8×10^{-3} | 29 | 0.76 | 2.4×10^{-3} | 15 | 0.61 |
| Caso II SW | 9.3×10^{-4} | 15 | 0.50 | 2.1×10^{-3} | 23 | 0.76 | 1.0×10^{-3} | 9 | 0.51 |
| Caso III NW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Caso III SE | 1.6×10^{-3} | 18 | 0.20 | 1.8×10^{-3} | 29 | 0.31 | ND | ND | ND |
| Caso III SW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

Núcleos de Condensación y Coeficiente de Dispersión

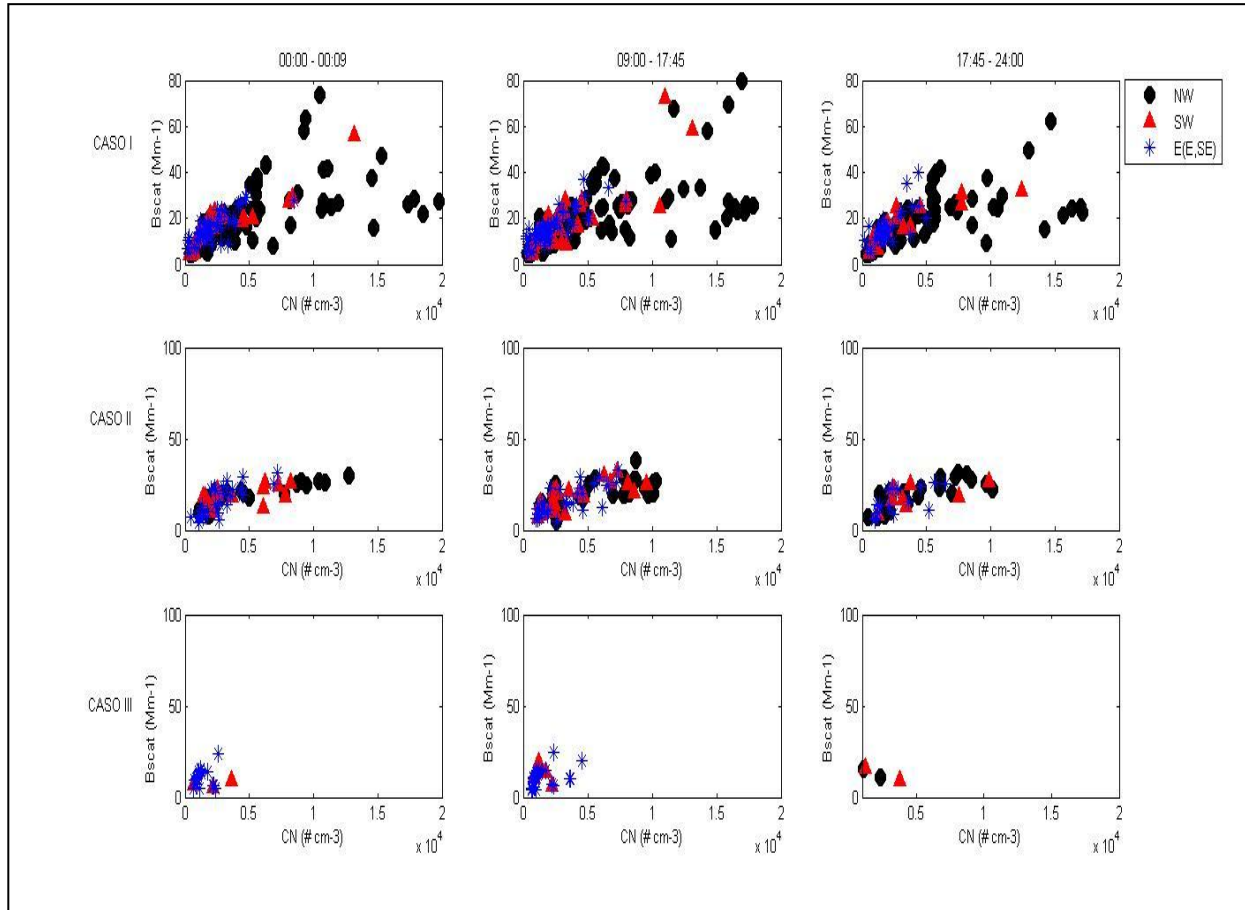


Figura 4.4 Como en la figura 4.2 pero para CN y el coeficiente de dispersión.

En la ecuación 4.1 se observa que B_{scat} es sensible al número y al diámetro al cuadrado. Por tanto, en la comparación entre B_{scat} y CN esperamos una buena correlación y además, dado que las partículas mayores que $0.1 \mu\text{m}$ son orgánicas e inorgánicas, se espera una alta correlación entre el CN y OC.

La figura 4.5 y la tabla 4.4 muestran que existe una alta correlación entre la concentración de OC y el coeficiente de dispersión bajo todas las condiciones y valores similares en las pendientes. Sin embargo, los valores más altos que se obtuvieron del coeficiente de correlación y de las pendientes fueron durante las primeras horas de la mañana, cuando el sitio está entrando a la capa de mezcla y la dirección del viento fue del este-sureste.

Como se observó en las gráficas anteriores, es durante la madrugada y antes de que el sitio entre a la capa de mezcla regional cuando la concentración de OC es más alta debido a las emisiones de la vegetación y, dado que por su composición química tienden a dispersar la luz, existe una alta correlación entre el OC y el coeficiente de dispersión durante estas horas.

Para días con nubes (caso II) las correlaciones más altas se observan principalmente durante la tarde. Se muestra en la tabla 4.4 que los valores del coeficiente de correlación alcanzan valores de 0.96, así como valores mayores de la pendiente durante el día cuando el viento es del sureste.

En las gráficas del caso III, se aprecia que existen menos datos que en los dos casos anteriores. Sin embargo, se encontraron valores del coeficiente de correlación de 0.91 por la mañana. Cabe mencionar que sólo se cuenta con 16 datos cuando la dirección del viento es del E-SE, mientras que para las otras direcciones no hay registros.

Tabla 4.4 Como en la tabla 4.1 pero para la concentración de OC y el coeficiente de dispersión.

| Condición | 00:00 – 09:00 | | | 09:00 – 17:45 | | | 17:45 – 24:00 | | |
|-------------|---------------|-----|------|---------------|-----|------|---------------|----|------|
| | P | N | CC | P | N | CC | P | N | CC |
| Caso I NW | 2 | 114 | 0.90 | 1.7 | 199 | 0.86 | 1.4 | 86 | 0.81 |
| Caso I SE | 2.4 | 31 | 0.92 | 2 | 50 | 0.93 | 2 | 23 | 0.92 |
| Caso I SW | 2.6 | 20 | 0.96 | 2.4 | 29 | 0.95 | 2.3 | 9 | 0.95 |
| Caso II NW | 2.1 | 27 | 0.93 | 1.6 | 36 | 0.73 | 2.6 | 11 | 0.96 |
| Caso II SE | 2.6 | 20 | 0.91 | 2.6 | 24 | 0.94 | 2.8 | 11 | 0.96 |
| Caso II SW | 1.3 | 9 | 0.51 | 2.9 | 19 | 0.91 | 2.4 | 5 | 0.81 |
| Caso III NW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Caso III SE | 4 | 16 | 0.91 | 3.7 | 29 | 0.82 | ND | ND | ND |
| Caso III SW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

Carbono Orgánico y Coeficiente de Dispersión

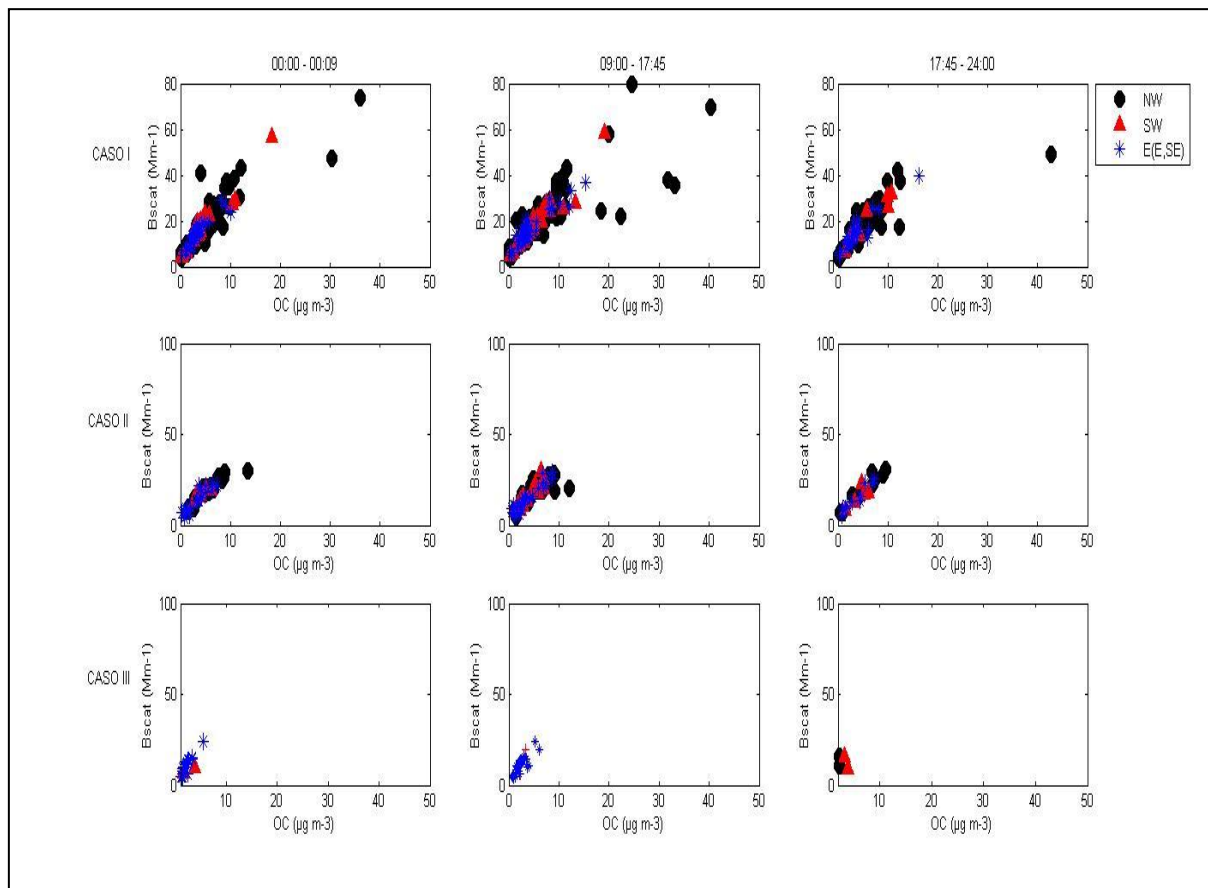


Figura 4.5 Como en la figura 4.2 pero para la concentración de OC y el coeficiente de dispersión

Aunque las partículas de BC en la atmósfera son las que absorben más radiación, éstas también dispersan la luz. Dado que el diámetro promedio de las partículas de BC es pequeño pero el número es grande, la relación entre BC y B_{scat} debe ser mayor que entre CN y B_{scat} .

En la figura 4.6 y la tabla 4.5 se observa que durante los periodos con nubes y sin nubes los valores del coeficiente de correlación entre el BC y el coeficiente de dispersión son más altos durante el día, es decir, cuando el sitio está dentro de la capa de mezcla regional, con valores de la pendiente más altos en días con nubes, lo cual probablemente se debe a la influencia de procesos secundarios que dan lugar a la formación de nuevas partículas.

Comparando los valores del coeficiente de correlación del OC con los del BC, se aprecia que existe una mejor correlación entre el coeficiente de dispersión y el OC, atribuido a que la composición química de las partículas es un factor determinante que afecta las propiedades ópticas.

En general, se estima que existe una mejor correlación entre el coeficiente de dispersión y OC que entre el B_{scat} y CN y el B_{scat} y BC. Esto es principalmente porque el coeficiente de dispersión es más sensible al tamaño y a la composición de las partículas que al número total de partículas presentes en el sitio.

Además, las condiciones meteorológicas juegan un papel muy importante, ya que bajo condiciones de capa de mezcla sin nubes la concentración de CN es mayor y, por lo tanto, hay más partículas que dispersan la radiación. Sin embargo, durante

días en los cuales hay nubes, muchas partículas son removidas de la atmósfera, principalmente cuando hay precipitación, lo que genera una menor dispersión de la radiación.

Tabla 4.5 Como en la tabla 4.1 pero para la concentración de BC y el coeficiente de dispersión.

| Condición | 00:00 – 09:00 | | | 09:00 – 17:45 | | | 17:45 – 24:00 | | |
|-------------|---------------|-----|------|---------------|-----|-------|---------------|-----|------|
| | P | N | CC | P | N | CC | P | N | CC |
| Caso I NW | 68.8 | 162 | 0.71 | 53.5 | 214 | 0.67 | 56.8 | 131 | 0.68 |
| Caso I SE | 71.7 | 50 | 0.70 | 91.6 | 68 | 0.80 | 120.1 | 37 | 0.75 |
| Caso I SW | 67.6 | 30 | 0.67 | 85.6 | 45 | 0.79 | 50.3 | 19 | 0.41 |
| Caso II NW | 97.9 | 35 | 0.72 | 120.5 | 42 | 0.87 | 102.1 | 25 | 0.80 |
| Caso II SE | 67.5 | 27 | 0.55 | 106.9 | 30 | 0.81 | 73.4 | 17 | 0.72 |
| Caso II SW | 64.4 | 15 | 0.72 | 81.9 | 25 | 0.70 | 113.5 | 9 | 0.74 |
| Caso III NW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Caso III SE | 68.3 | 19 | 0.59 | 30.7 | 27 | -0.31 | ND | ND | ND |
| Caso III SW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

Carbono Negro y Coeficiente de Dispersión

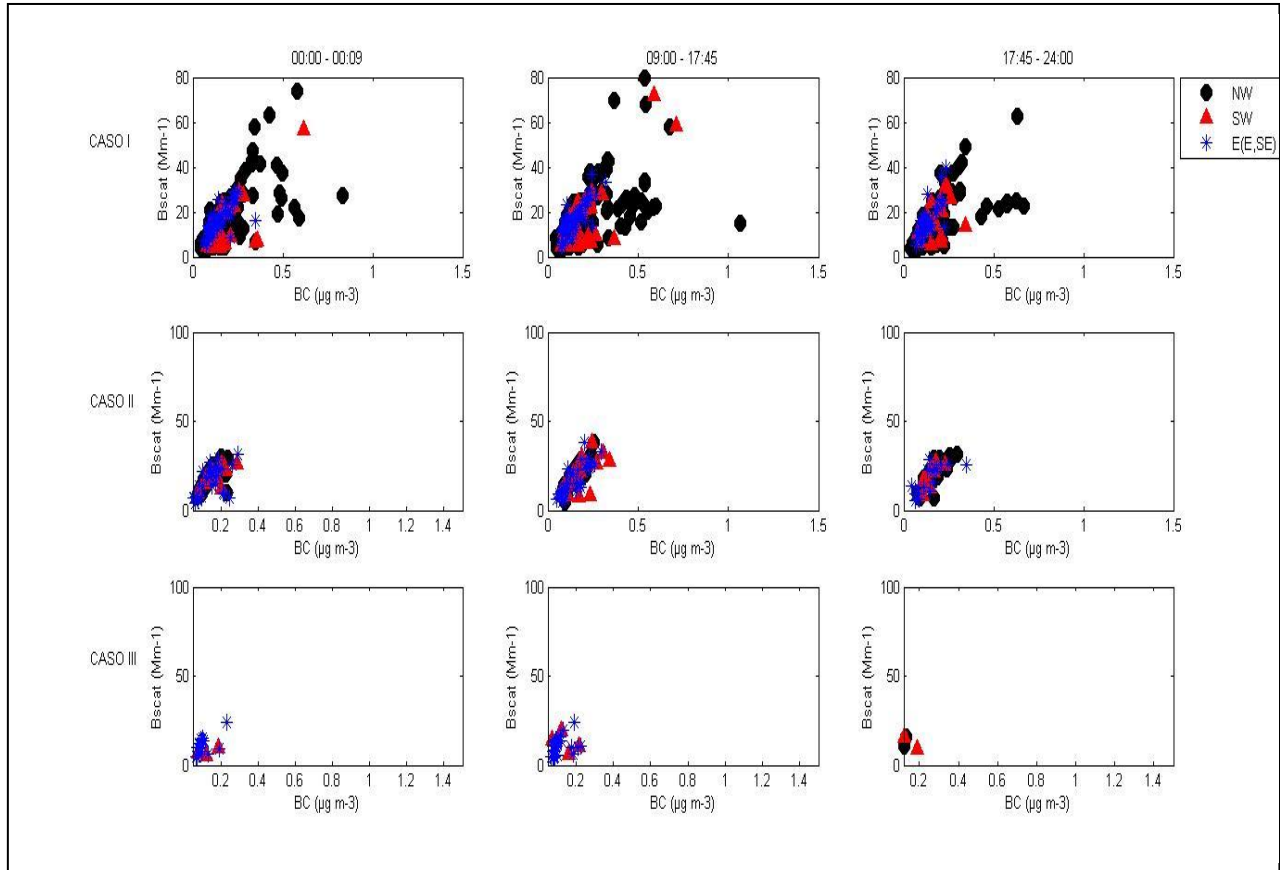


Figura 4.6 Como en la figura 4.2 pero para la concentración de BC y el coeficiente de dispersión.

El BC y los sulfatos son indicadores del grado de influencia antropogénica (Menon y Saxena, 1998). Se caracterizan porque tienen un mayor tiempo de residencia atmosférico, por lo que pueden influir en la cantidad y volumen de las nubes. Sin embargo, hay otras fuentes naturales de sulfatos, por ejemplo las emisiones del volcán Popocatepetl.

Cuando la fuente de sulfatos es antropogénica, esperamos una buena correlación con el BC estando muy cerca de la fuente emisora. Sin embargo, dado que hay procesos secundarios que producen sulfatos y también existen procesos que los remueven, esperamos una disminución de la correlación entre BC y sulfato en lugares lejanos a las fuentes de emisión.

En la figura 4.7 se presentan las gráficas de correlación de los sulfatos con la concentración de BC y en general encontramos una correlación baja. En días sin nubes se observa que existe mucha dispersión en los datos y los valores de la tabla 4.6 lo confirman. Cabe mencionar que el proceso de formación de las partículas es distinto, ya que los sulfatos se forman a través de la conversión de dióxido de azufre mientras que el carbono negro se forma principalmente por procesos primarios: esta es una de las razones por las cuales no se observa correlación alguna entre ellos.

Las nubes juegan un rol importante en la formación y remoción de sulfatos en la atmósfera. Una gran cantidad de sulfatos presentes en la atmósfera resultan de reacciones químicas que tienen lugar en las nubes (Seigneur, 1988). Debido a lo anterior, en las gráficas del caso II se empieza a notar que existe una débil correlación. Sin embargo, de acuerdo a los valores presentados en la tabla 4.6, se

observa que la correlación es baja y la pendiente en algunos casos es incluso negativa.

Cuando hay precipitación cerca del sitio o en éste, también se observa que existe gran dispersión en los datos y además no se cuenta con los valores del coeficiente de correlación, debido a que se tienen muy pocos datos.

Cuadro 4.6 Como en la tabla 4.1 pero para la concentración de sulfato y concentración de BC.

| Condición | 00:00 – 09:00 | | | 09:00 – 17:45 | | | 17:45 – 24:00 | | |
|-------------|---------------|-----|-------|---------------|-----|------|----------------------|----|-------|
| | P | N | CC | P | N | CC | P | N | CC |
| Caso I NW | 0.01 | 115 | 0.06 | 0.04 | 201 | 0.17 | 0.01 | 88 | 0.05 |
| Caso I SE | 0.02 | 30 | 0.17 | 0.02 | 49 | 0.19 | 7.1×10^{-3} | 22 | 0.08 |
| Caso I SW | 0.03 | 20 | 0.09 | 0.05 | 28 | 0.21 | 0.08 | 9 | 0.55 |
| Caso II NW | 0.04 | 27 | 0.43 | 0.05 | 36 | 0.64 | 0.03 | 11 | 0.49 |
| Caso II SE | 0.03 | 20 | 0.28 | 0.06 | 24 | 0.61 | 0.07 | 11 | 0.66 |
| Caso II SW | -0.04 | 9 | -0.60 | 0.01 | 19 | 0.13 | -0.001 | 5 | -0.03 |
| Caso III NW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Caso III SE | 0.08 | 16 | 0.49 | 0.04 | 29 | 0.32 | ND | ND | ND |
| Caso III SW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

Sulfatos y Carbono Negro

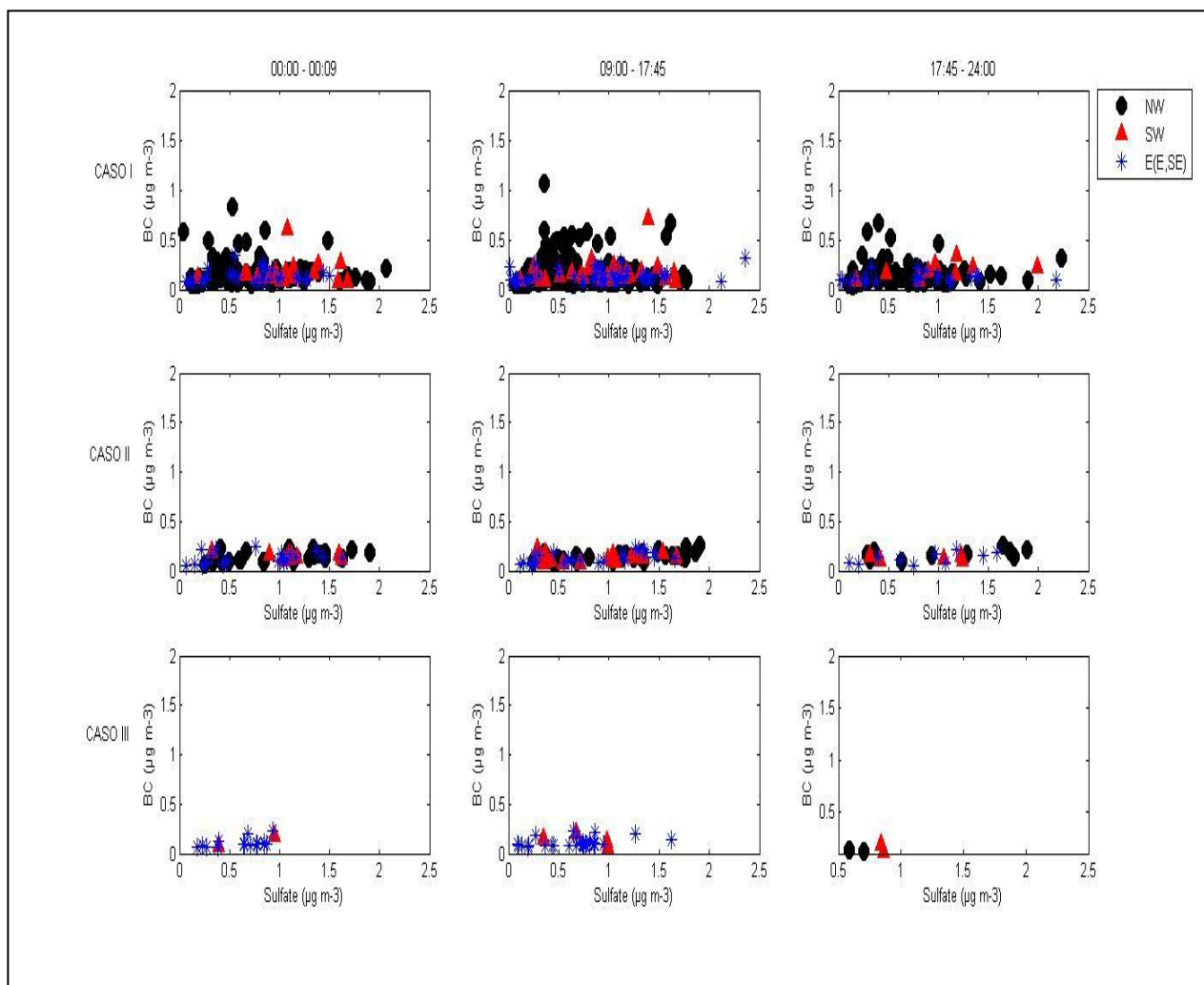


Figura 4.7 Como en la figura 4.2 pero para la concentración de sulfato y concentración de BC.

La correlación entre la concentración de OC y los sulfatos es muy baja en días sin nubes, dado que existen diferencias en los procesos químicos que afectan las masas de cada tipo de partículas. Por ejemplo, los procesos secundarios dominan en la formación de los dos componentes pero los procesos fotoquímicos son los más importantes para el OC, mientras que la producción de sulfatos es a través de procesos acuosos que dependen de la humedad relativa.

Se observa en la figura 4.8 y la tabla 4.7 que existe una ligera correlación entre el sulfato y el carbono orgánico, principalmente cuando la dirección del viento es del E-SE y hay nubes. Las series de tiempo presentadas en el capítulo III muestran que la concentración no disminuye considerablemente durante los tres periodos. Esto se debe a que los procesos químicos en fase acuosa dentro de las nubes son importantes para la formación de sulfatos pero, a pesar de que la concentración de éstos no disminuye con la presencia de nubes, la correlación no es buena dado que el OC y los sulfatos se forman por procesos distintos.

En el caso de días con precipitación se observa una ligera correlación entre los sulfatos y el OC, (tabla 4.7) y cuando la dirección del viento es del SE. Esto ocurre probablemente por un aumento en la concentración de sulfatos bajo condiciones de precipitación por reacciones en fase acuosa, de los cuales muchos son adheridos a las partículas de OC (organosulfatos). Sin embargo, no existen datos cuando la dirección del viento es del NW y SW, por lo que no se puede sacar una conclusión concreta.

Tabla 4.7 Como en la tabla 4.2 pero para la concentración de sulfato y concentración de carbono orgánico.

| Condición | 00:00 – 09:00 | | | 09:00 – 17:45 | | | 17:45 – 24:00 | | |
|-------------|---------------|-----|------|---------------|-----|------|---------------|----|-------|
| | P | N | CC | P | N | CC | P | N | CC |
| Caso I NW | 0.67 | 118 | 0.06 | 1.1 | 207 | 0.07 | 0.5 | 90 | 0.04 |
| Caso I SE | 2.4 | 35 | 0.51 | 0.9 | 55 | 0.18 | -0.07 | 25 | -0.17 |
| Caso I SW | 3.2 | 21 | 0.29 | 4.2 | 34 | 0.51 | 5.7 | 11 | 0.83 |
| Caso II NW | 2.7 | 29 | 0.42 | 1.3 | 39 | 0.31 | 1.7 | 12 | 0.44 |
| Caso II SE | 3.7 | 20 | 0.82 | 4.5 | 24 | 0.88 | 3.8 | 11 | 0.87 |
| Caso II SW | 1.7 | 9 | 0.52 | 3.2 | 19 | 0.75 | 3.2 | 5 | 0.81 |
| Caso III NW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Caso III SE | 1.7 | 17 | 0.69 | 1.8 | 31 | 0.77 | ND | ND | ND |
| Caso III SW | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

Sulfatos y Carbono Orgánico

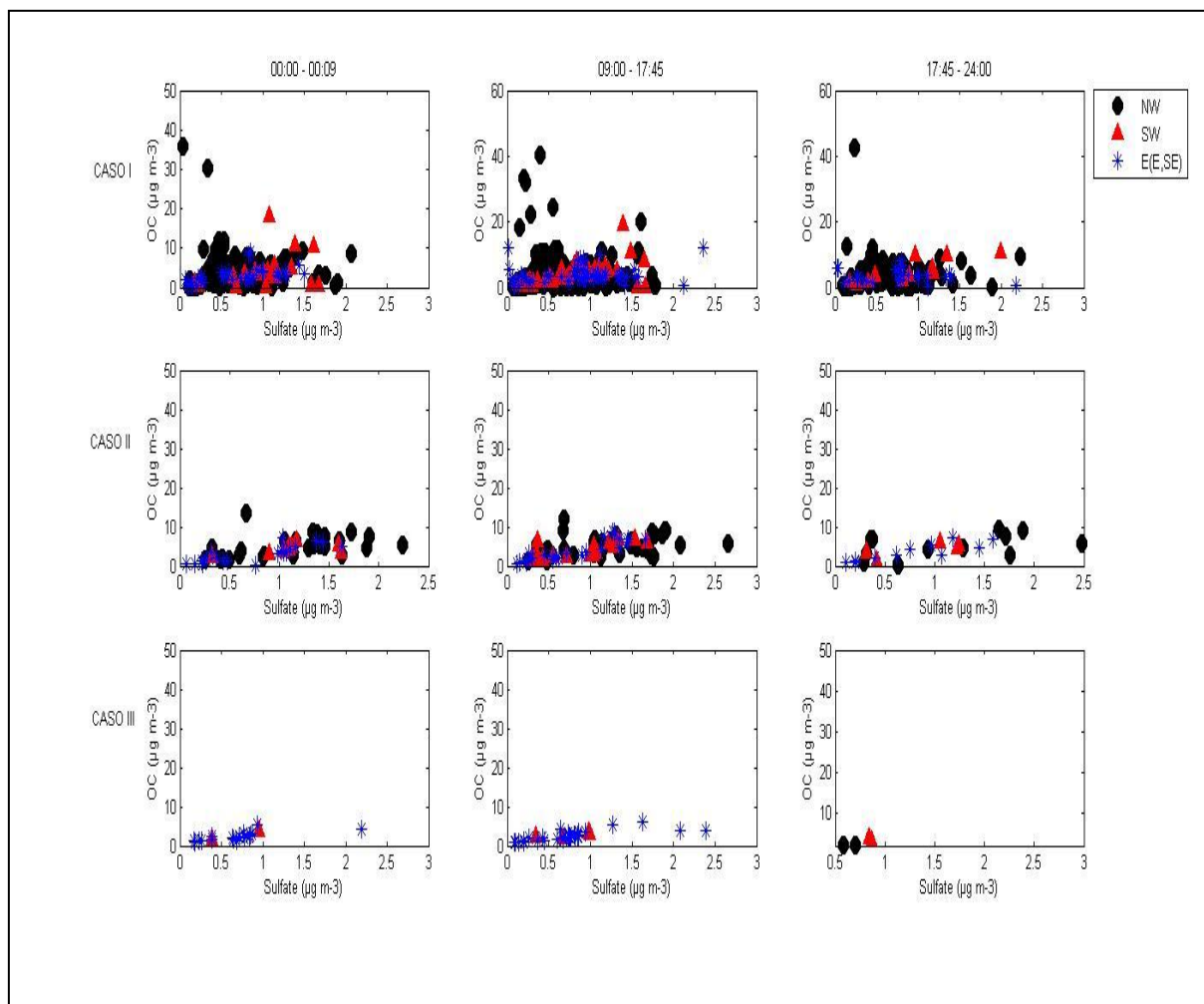


Figura 4.8 Como en la figura 4.2 pero para la concentración de sulfato y carbono orgánico.

4.2 Análisis de los espectros de tamaño

En las figuras 4.9 a 4.14 se muestran los espectros de concentración y volumen, es decir, el número o el volumen total de partículas de partículas por unidad de volumen de aire (cm^{-3}) como función del tamaño. Se consideró la evolución de la capa de mezcla dividiendo el día en los tres horarios antes mencionados: de 00:00 a 09:00 hrs, de 09:00 a 17:45 hrs, y de 17:45 a 24:00 hrs.

Las figuras 4.9 y 4.10 corresponden al periodo de capa de mezcla sin nubes. En la primera gráfica se puede observar que el número de partículas dominante corresponde a aerosoles grandes, los cuales tienen un diámetro de entre 0.8 y 1 μm . Durante el día se observa una estructura bimodal (moda de Aitken y aerosoles grandes) la cual corresponde a aerosoles que provienen de la ciudad principalmente. Aunque no se sabe del todo la composición química de estas partículas, se supone que este máximo que corresponde a la moda de Aitken es debido a la mezcla de partículas primarias, por ejemplo BC y secundarias que son aquellas que se forman por procesos fotoquímicos de compuestos orgánicos.

La figura 4.10 muestra que existe un incremento significativo en el volumen, principalmente cuando el sitio se encuentra dentro de la capa límite regional, causado por la advección de contaminantes de las áreas urbanas y emisiones locales y el crecimiento por condensación de los compuestos orgánicos secundarios. Por la tarde, cuando el sitio está saliendo de la capa de mezcla regional, se observa también un incremento en la concentración por volumen de partículas, producto de un crecimiento higroscópico debido a que por la tarde la temperatura tiende a disminuir y puede haber un incremento en la humedad relativa.

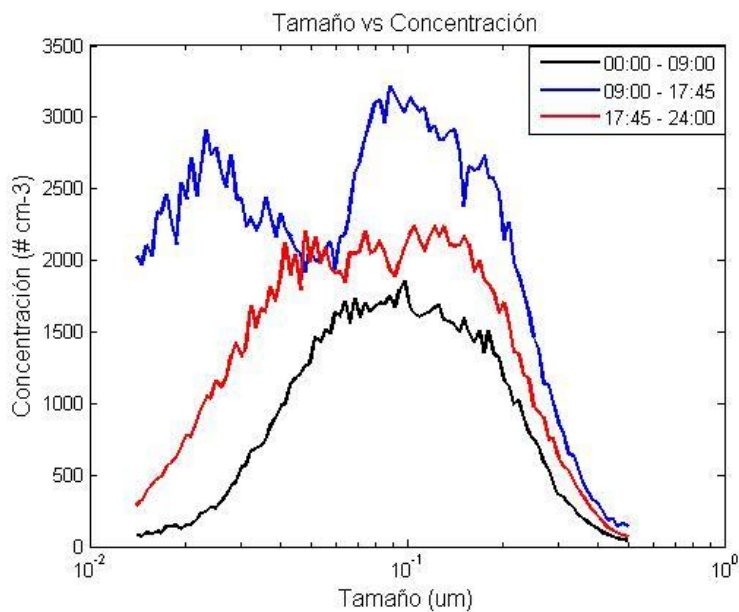


Figura 4.9 Espectro de tamaños con respecto a la concentración por número para días sin nubes.

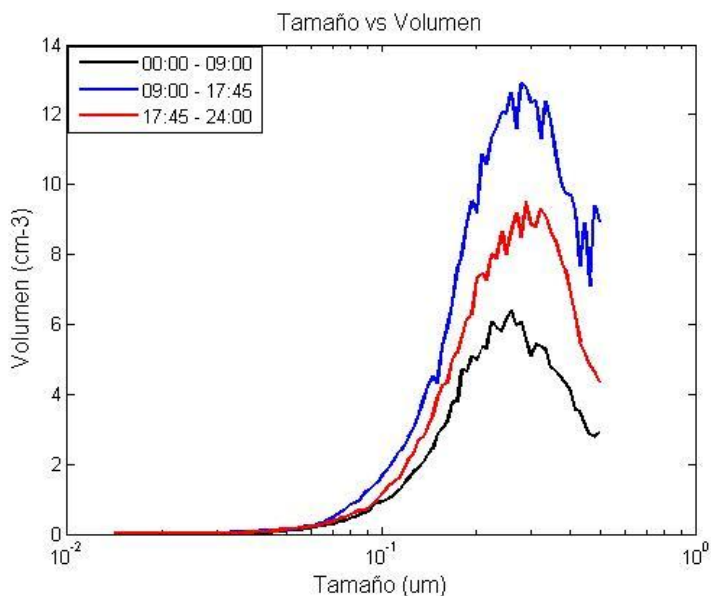


Figura 4.10 Espectro de tamaños con respecto a la concentración por volumen para días sin nubes.

Las figuras 4.11 y 4.12 corresponden al periodo en el cual hubo nubes, en la primera de ellas se observa que durante la mañana domina la concentración de partículas con diámetro mayor que $0.1 \mu\text{m}$, las cuales fueron transportadas al sitio en horas anteriores, ya que las partículas que se encuentran dentro de esta moda tienen un tiempo de residencia atmosférico de algunos días. Durante el día, cuando el sitio estaba dentro de la capa de mezcla regional, y durante la noche, las curvas presentaron un comportamiento bimodal, el cual puede deberse a la presencia de partículas de origen antropogénico.

En el día; como en el caso I, se observa que el primer máximo se alcanzó para partículas con diámetro menor que $1 \mu\text{m}$, las cuales muy probablemente son una mezcla de BC y las que se formaron por procesos secundarios; mientras que el segundo máximo se presentó para partículas con diámetro mayor igual que $1 \mu\text{m}$, las cuales son producto del crecimiento de partículas de la moda de Aitken a través de reacciones en fase líquida que tiene lugar principalmente en gotas de agua de las nubes. Comparando los casos I y II, se observa una distribución muy similar durante el día, sin embargo el segundo máximo del caso II es mayor que el del caso I.

La figura 4.12 muestra que la concentración por volumen incrementa para partículas gigantes. Este tipo de partículas son principalmente de polvo que está presente en el sitio, que pueden ser incorporadas a la atmósfera por corrientes de viento.

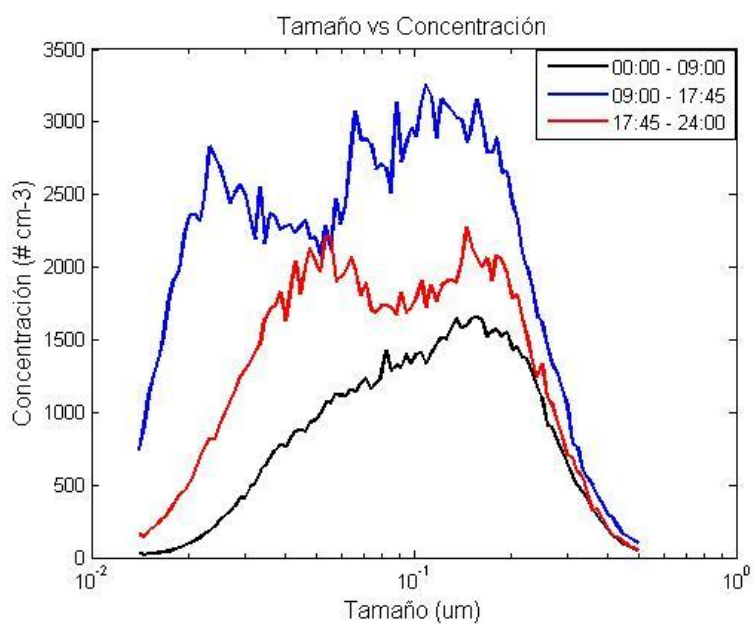


Figura 4.11. Espectro de tamaños con respecto a la concentración por número para días con nubes.

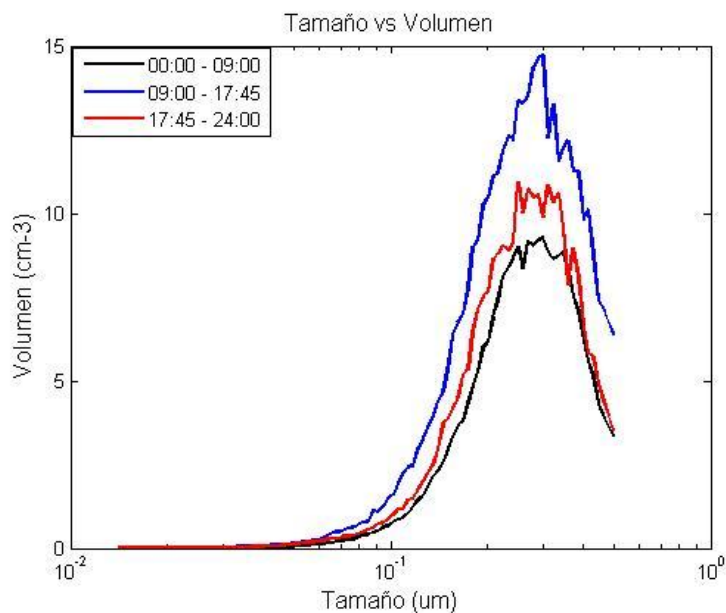


Figura 4.11. Espectro de tamaños con respecto a la concentración por volumen para días con nubes.

En la figura 4.13 se observa que las tres curvas presentan un comportamiento bimodal cuando el sitio está dentro de la capa de mezcla y cuando está saliendo de ella. Las partículas que se encuentran dentro de la moda de aerosoles grandes pueden ser de origen secundario, formadas por reacciones en fase líquida, ya que en la atmósfera existen reacciones por la presencia de lluvia que pueden favorecer el crecimiento de estas partículas. No se sabe con precisión la composición química de las partículas bajo estos rangos; sin embargo, debido a las gráficas anteriores, se puede presumir que la mayoría de ellas son sulfatos y carbonos.

En la figura 4.14 se muestra la concentración por volumen con respecto al tamaño para días con precipitación. La concentración por volumen aumentó durante el día para partículas grandes. Y cuando el sitio empezó a salir de la capa de mezcla regional, la concentración disminuyó.

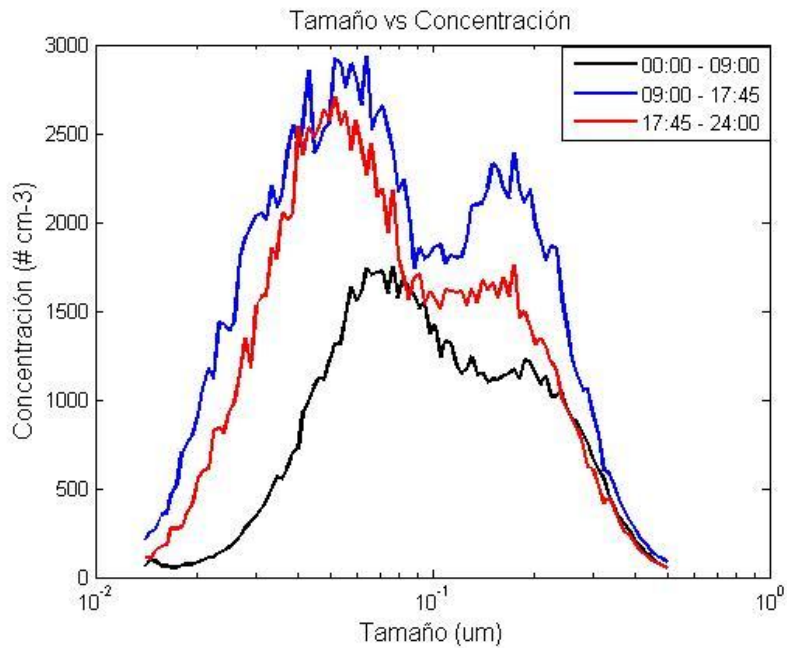


Figura 4.13 Espectro de tamaños con respecto a la concentración por número para días con precipitación.

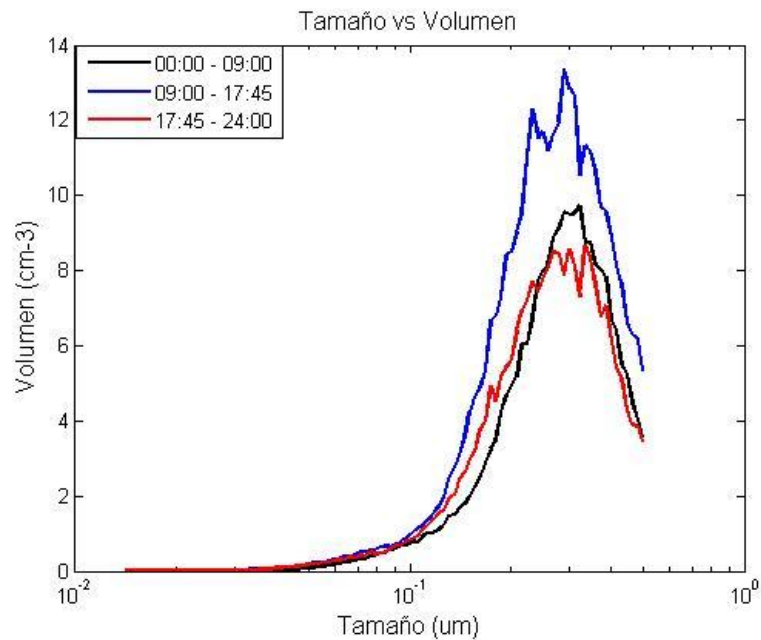


Figura 4.14 Espectro de tamaños con respecto a la concentración por volumen para días con precipitación.

Capítulo V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se encontró que en general las variables analizadas presentan un ciclo diurno durante los tres periodos de estudio. Sin embargo, la máxima concentración registrada en los tres casos y para todas las variables fue durante la tarde, cuando el sitio empezaba a salir de la capa de mezcla regional. Esto es debido a que durante el día muchas partículas son advectadas a Alzomoni excepto el OC, cuya concentración máxima durante el periodo de precipitación fue durante la madrugada debido a emisiones producidas por la vegetación.
- La presencia de nubes y la precipitación constituyen uno de los principales sumideros de partículas por procesos de remoción húmeda, ya que en estos periodos la concentración disminuyó para todas las especies del estudio.
- En general, el comportamiento de los datos durante días con capa de mezcla sin nubes y durante días con nubes tiende a ser lognormal, excepto para los sulfatos en días con presencia de nubes cuando se presenta una distribución que tiende a ser normal; mientras que, para días en los cuales hubo precipitación, la distribución de los datos no es muy clara debido a la dispersión y escasez con que éstos se presentan.
- Durante el periodo de capa de mezcla sin nubes, el BC se correlaciona mejor con los CN durante horas de la tarde-noche, ya que la mayoría de los CN presentes en el sitio son BC; mientras que durante el día, cuando el sitio se ve influenciado por la capa de mezcla, ocurren procesos secundarios que dan lugar a la formación de nuevas partículas.

- Las fuentes de emisión de partículas son muy importantes en la determinación de sus propiedades químicas. Tal es el caso de la vegetación que predomina en Alzomoni que emite OC, principalmente durante la noche cuando el sitio se encuentra fuera de la capa de mezcla regional, generando una buena correlación entre el OC y CN.
- Las propiedades físicas y químicas de las partículas influyen en las propiedades ópticas, ya que el coeficiente de dispersión está en función de la eficiencia de dispersión y el área transversal de las partículas. Sin embargo, se encontró que las propiedades ópticas de las partículas (en este caso el coeficiente de dispersión) son más sensibles a la composición química que a la concentración total de las mismas.
- Se observó que domina el efecto directo de las partículas sobre el clima en el sitio de Alzomoni, ya que existe una mayor dispersión de radiación durante días en los cuales no hubo nubes, lo que indica que las partículas dispersan directamente parte de la radiación que llega al sitio.
- Las partículas que se forman por procesos secundarios, como es el caso de los sulfatos, no se correlacionan con partículas formadas por carbono debido a que los primeros se forman a través de la conversión de dióxido de azufre, mientras que el carbono se forma principalmente por procesos fotoquímicos.
- Las propiedades físicas de las partículas se ven afectadas principalmente por los procesos de su formación en la atmósfera y las condiciones meteorológicas dominantes.

Recomendaciones

- Con la finalidad de tener una mejor clasificación de los periodos, se sugiere que se realicen observaciones de las condiciones del cielo durante las mediciones y compararlos con los datos registrados por el ceilómetro, la humedad relativa y las imágenes de la cámara web.
- Instalar pluviógrafos en el sitio para conocer la intensidad de la precipitación y elaborar un análisis más detallado durante días en los cuales hubo lluvia, correlacionando la intensidad de la precipitación con el tamaño de las partículas para analizar así la remoción de partículas por lluvia.
- Considerar otras variables tales como los coeficientes de absorción y extinción, para entender mejor las propiedades ópticas, además del albedo para entender mejor el efecto indirecto de los aerosoles en el clima.
- Contemplar una base de datos más completa, operando los instrumentos en las diversas estaciones del año para entender el comportamiento de las partículas antropogénicas bajo condiciones meteorológicas originadas por los diversos sistemas meteorológicos propios de cada estación.

Referencias

Ackerman, Kirkpatrick, Stevens, Toon. The impact of humidity above stratiform clouds on indirect aerosol climate forcing. *Nature*, 2004.

Albrecht. Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness. *Science*, 1989.

Allan, Jimenez, Williams, Alfarra, Bower, Jayne, Coe, Worsnop. Quantitative sampling using an Aerodyne aerosol mass spectrometer 1. Techniques of data interpretation and error analysis. *Journal of Geophysical Research*, 2003.

Baumgardner, Grutter, Allan, Ochoa, Rappenglueck, Russell and Arnott. Evolution of anthropogenic pollution at the top of the regional mixed layer in the central Mexico plateau. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009.

Bond, Anderson, Campbell. Calibration and Intercomparison of Filter-Based Measurements of Visible Light Absorption by Aerosols. *Aerosol Sci. Technology*, 1999.

Broekhuizen, Chang, Leaitch, Abbatt. Closure between measured and modeled cloud condensation nuclei (CCN) using size-resolved aerosol compositions in downtown Toronto. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006.

Carr and Burridge. The Operation of a Three Wavelength Nephelometer and some Measurements Made at Jabiru during 2002. Information Sciences Laboratory, 2004.

Cozic, Verheggen, Mertes, Connolly, Bower, Petzold, Baltensperger, and Weingartner. Scavenging of black carbon in mixed phase clouds at the high alpine site Jungfraujoch. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007.

Chýlek, Vidden, Ngo, Pinnick, Klett. Effect of black carbon on the optical properties and climate forcing of sulfates aerosols. *Journal of American Geophysical Union*, 1995.

Deshler, Hervig, Kröger, Hoffman, Rosen, Liley. Thirty years of in situ stratospheric aerosol size distribution measurements from Laramie, Wyoming (41°N), using balloonborne instruments. *Journal of Geophysical Research*, 2002.

Deshler, Johnson, Rozier. Balloonborne measurement of Pinatubo aerosol during 1991 and 1992 at 41°N, vertical profiles, size distribution and volatility. *Geophysics Research*, 1993.

- Douglas, Mason. Estadística para administración y economía”. Alfaomega, 2004.
- Drewnick, Hings, DeCarlo, Jayne, Gonin, Fuhrer, Weimer, Jimenez, Demerjian, Borrmann, Worsnop. A New Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (ToF-AMS) instrument description and first field deployment. Aerosol science and technology, 2005.
- Eresmaa, Karppinen, Joffre, Räsänen, Talvitie. Mixing height determination by ceilometer. Atmos. Chem. Phys., 2006.
- Gatari, Boman. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa. American Meteorological Society, 2003
- Heintzemberg, Chaelson. Desing and applications of the integrating Nephelometer: A review. American Meteorological Society, 1996.
- Hildebrand, Lyman. Estadística aplicada a la administración y a la economía. Adidison Weley Iberoamericana, 1997.
- Hitzenberger, Tonho. Comparison of black carbón (BC) aerosols in two urban areas – concentrations and sizes distributions. Atmospheric Environment, 2001.
- Huang, Chameides, Dickinson. Direct and Indirect Effects of Anthropogenic Aerosols on Regional Precipitation over East Asia. Journal of Geophysical Research, 2007.
- Jayne, Leard, Zhang, Davidovits, Smith, Kolb, Worsnop. Development of an Aerosol Mass Spectrometer for Size and Composition Analysis of Submicron Particles. Aerosol Science and Technology, 2000.
- Krüger, Wahl, Hadeff, Geigle, Stricker, Aigner. Comparison of laser-induced incandescence method with scanning mobility particle sizer technique: the influence of probe sampling and laser heating on soot particle size distribution. Meas. Sci. Technol, 2005.
- Loosmore, Richard, Cederwall. Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real-time data. Atmospheric Environment, 2004.
- Lunden, Douglas, Black, McKay, Revzan, Goldstein, Brown. Characteristics of Fine Particle Growth Events Observed Above a Forested Ecosystem in the Sierra Nevada Mountains of California. Aerosol Science and Technology, 2006.
- Marinoni, Cristofanelli, Calzolari, Roccató, Bonafe, Bonasoni. Continuous measurements of aerosol physical parameters at the Mt. Cimone Gaw Station (2165 m asl, Italy). Science of the total environment, 2008.

Matthew, Fewes, Keitch, Henshaw. Small-ion and nano-aerosol production during candle burning: size distribution and concentration profile with time. *Aerosol Science and Technology*, 2007.

McFiggans, Artaxo, Baltensperger, Coe, Facchini, Feingold, Fuzzi, Gysel, Laaksonen, Lohmann, Mentel, Murphy, Dowd, Snider, Weingartner. The effect of physical and chemical aerosol properties on warm cloud droplet activation". *Atmos. Chem. Phys.*, 2006.

Menon, V. K. Saxena, "Role of sulfates in regional cloud – climate interactions". *Atmospheric Research*, 47 – 48: 299 – 315, 1998.

Mészáros, Ogren. Scattering and absorption coefficients vs chemical composition of fine atmospheric aerosol particles under regional conditions in Hungary. *Journal Aerosol Research*, 1998.

Ober, Buttner, Maye, Butner, Ebert. Aerosol measurement in low pressure systems with standard scanning mobility particle sizers. *Particle and particle systems characterization*, 2002.

Penner, Quaas, Storelvmo, Takemura, Boucher, Guo, Kirkevåg, Kristjánsson, Seland. Model intercomparison of indirect aerosol effects. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006.

Rashid. Turbulent mixing condensation nucleus counter. *Atmospheric Research*, 2002.

Sehmel. Particle and gas dry deposition: A review. *Atmospheric Environment*, 1980.

Seigneur. A theoretical investigation of sulfate formation in clouds. *Atmospheric Environment*, 1988.

Snyder, Schauer. An Inter-Comparison of Two Black Carbon Aerosol Instruments and a Semi-Continuous Elemental Carbon Instrument in the Urban Environment. *Aerosol Science and Technology*, 2007.

Twohy, Petters, Snider, Stevens, Tahnk, Wetzal, Russell, Burnet. Evaluation of the aerosol indirect effect in marine stratocumulus clouds: Droplet number, size, liquid water path, and radiative impact. *Journal of Geophysical Research*, 2005.

VanReken, Trcey, Rissman. Toward aerosol condensation nuclei (CCN) closure during crystal – face. *Journal of Geophysical Research*, 2003.

Virkkula, Ahlquist, Covert, Arnott, Sheridan, Quinn, Coffman. Modification, Calibration and a Field Test of an Instrument for Measuring Light Absorption by Particles. *Aerosol Science and Technology*, 2005.

Volkamer, Martini, Molina, Salcedo, Jimenez. A missing sink for gas-phase glyoxal in Mexico City: Formation of secondary organic aerosol. *Journal of Geophysical Research*, 2007.