



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

TEMA DE TESIS

**PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AEROSOLES  
PRESENTES EN LA ATMÓSFERA DEL SUR DE LA CIUDAD  
DE MÉXICO**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

**LILIANA QUETZALLI GARCÍA DOMÍNGUEZ**



MÉXICO, D.F., 2008.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

Jurado asignado:

Presidente	Prof. Adolfo García Osuna
Vocal	Prof. Víctor Manuel Luna Pabello
Secretario	Prof. Telma Castro Romero
1er. Suplente	Prof. Juan Manuel Martínez Núñez
2º. Suplente	Prof. José Agustín García Reynoso

Centro de Ciencias de la Atmósfera, U.N.A.M.  
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria. C.P. 04510 México, D.F.

---

Dra. Telma Gloria Castro Romero

---

Liliana Quetzalli García Domínguez

## ***DEDICATORIA***

Dedico este trabajo a las familias **García Domínguez y anexas**, especialmente a la **Sra. Dominga Domínguez Ortiz**, mi madre, por ser una mujer admirable e incansable a la cual amo profundamente y a la que le debo mucho más que la vida,

***íííGRACIAS POR TANTO AMOR!!!***

## **AGRADECIMIENTOS**

- A **Dios** porque todos los días desde que nací, me regala una nueva oportunidad para intentar ser una mejor, hija, hermana, amiga, mujer pero sobre todo un mejor ser humano.
- A mi madre, **Dominga Domínguez Ortiz**, un especial agradecimiento por todo el amor incondicional, confianza, apoyo y consejos que durante toda mi vida me ha proporcionado, pero sobre todo gracias por ser la única persona que me da la fuerza necesaria para levantarme todos los días y continuar esforzándome por conseguir lo que quiero, no tengo palabras para agradecerte lo que has hecho por mi, simplemente **¡muchísimas gracias mamita, te amo!**
- A mis hermanos, **Elvira, Ubaldo, Salvador, Ángel, Marie, Adolfo, Vicky, Irma, Dolores, Daniel, Marco Antonio, Hugo y Víctor**, ya que gracias a su amor, consejos y gran apoyo he podido concluir esta etapa tan importante de mi vida, estoy sumamente agradecida por todo ello, **¡muchas gracias, los amo a todos por igual!**
- A mis “hermanitos”, **David, Yólatl y Mitzi Rivera G.**, por todo lo que aprendimos creciendo juntos, **¡los quiero mucho, cuchurrumones!**, a mis demás sobrinos, **Sebastián, Mauricio, Diego, Sofía y Pao**, por recordarme lo que es volver a ser niña.
- A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, mi *alma mater*, a la **Facultad de Química**, por ser mi segundo hogar y por todo lo aprendido dentro y fuera de sus aulas y al **Centro de Ciencias de la Atmósfera**, por todas las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

- A **CONACYT** (Proyecto 2002-COO-0072) por la beca otorgada para la realización de este trabajo.
- A la **Dra. Telma Castro** por brindarme la oportunidad de trabajar con ella, por facilitarme su equipo de monitoreo para la realización de este trabajo y por todas las molestias ocasionadas, por la paciencia que siempre tuvo para conmigo, por su amistad, comprensión, interés e inconmensurable ayuda que siempre me brindó durante este camino tan largo. Porque simplemente es una mujer que admiro, respeto y aprecio.
- A mi amiga **Maribel Saavedra**, por brindarme su amistad, cariño, apoyo y comprensión en los momentos que más los necesité y por su valiosa colaboración en la revisión ortográfica de este trabajo.
- Al Grupo de **Aerosoles Atmosféricos** del Centro de Ciencias de la Atmósfera, Dra. Amparo Martínez, “Doctorcitor” Óscar Peralta, Norma Trejo, Manuel Mendoza, José García, Giovanni Carabalí y Harry Álvarez, por la amistad, ayuda y confianza que me brindaron desde que ingresé al grupo.
- A **José Mendoza**, por estar siempre al pendiente de mí, por su amistad, apoyo moral y por su colaboración en la instalación del equipo de monitoreo atmosférico.
- A **Carlitos Contreras**, por su amistad, por escucharme, por sus consejos y por tener siempre una sonrisa para mí. También le agradezco enormemente las molestias ocasionadas cada vez que tuve algún problema con el equipo de computo.
- A **José Manuel Hernández**, por su amistad y consejos, además de soportar mis cambiantes estados de ánimo.

- A **Eduardo Alvarado**, por todo el amor que me brindó, por ser antes que nada mi amigo incondicional, por todos los momentos tan hermosos que compartimos, por lo que aprendimos juntos y que nos hizo madurar, pero sobre todo por confiar plenamente en mí.
- A mis amigos de “toda la vida”, **César Fariñas, Mary Negrete, Rosa García, Rolando Rincón y Lupe de la Rosa**, quienes me han acompañado durante este largo y tortuoso camino, en los buenos pero sobre todo en los malos momentos. También a **mis amigos**, Nelly Velasco, Arturo Nava, Ernesto Fuentes, Toñito Ramírez, Yatenedin Velasco, Óscar Flores, Vicente Hernández, Omar Escalante, Roberto Huerta, Edgar Roque, Martín Membrillo, Abel García, César Hernández, Alejandro González, Cuauhtémoc Gutiérrez y Joaquín López, por brindarme su amistad, por no dejar de creer en mí y apoyarme en todo momento.
- A todos aquellos que no están presentes pero que siguen formando parte de mi vida, a aquellos que de una u otra forma me ayudaron para llegar hasta este momento tan importante en mi vida, que no es sino la culminación de una etapa más de mi vida, quizás la más difícil pero también la más gratificante.

***¡Muchísimas gracias a todos, hoy y siempre!***

***Liliana Quetzalli García Domínguez.***

## **CONTENIDO**

<b>RESUMEN</b>	1
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	2
<b>INTRODUCCIÓN</b>	3
<b>OBJETIVOS</b>	3
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO</b>	4
<b>1.1. ANTECEDENTES</b>	4
1.1.1. LAS CAMPAÑAS DE SANTA ANA Y ÁVILA CAMACHO	4
<b>1.2. LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO, ZMVM</b>	5
1.2.1. FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZMVM	6
1.2.2. FACTORES QUE MEJORAN LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZMVM	7
<b>1.3. PROCESOS DE INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR         CON LA MATERIA</b>	8
<b>1.4. LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS</b>	10
1.4.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZMVM	11
<b>1.5. LAS PARTÍCULAS DE AEROSOL</b>	11
1.5.1. DEFINICIÓN	11
1.5.2. IMPORTANCIA DE LOS AEROSOLES	12

1.5.3. CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE AEROSOL DE ACUERDO A SU DIÁMETRO	12
1.5.4. EFECTOS A LA SALUD POR PARTÍCULAS DE AEROSOL	14
<b>1.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES GASES PRESENTES EN ATMÓSFERAS URBANAS</b>	16
1.6.1. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO <sub>2</sub> )	12
1.6.2. DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO <sub>2</sub> )	17
1.6.3. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	17
1.6.4. OZONO (O <sub>3</sub> )	18
<b>1.7. EQUIPO DE MONITOREO ATMOSFÉRICO</b>	19
1.7.1. CONTADOR DE PARTÍCULAS (CONDENSATION PARTICLE COUNTER, CPC)	19
1.7.2. CONTADOR ÓPTICO DE PARTÍCULAS (LASAIR II)	21
1.7.3. NEFELÓMETRO	21
1.7.4. FOTÓMETRO DE ABSORCIÓN (PARTICLE SOOT/ABSORPTION PHOTOMETER, PSAP)	22
1.7.5. SISTEMA ADQUISIDOR DE DATOS (SAD)	23
<b>1.8. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS AEROSOLES</b>	24
1.8.1. COEFICIENTE DE EXTINCIÓN ( $\sigma_e$ )	24
1.8.2. VISIBILIDAD (V)	25
1.8.3. ALBEDO DE DISPERSIÓN SIMPLE ( $\omega$ )	26
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA</b>	28
<b>2.1. DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	28
2.1.1. SELECCIÓN DEL SITIO	28
2.1.2. ACERCA DEL ENTORNO	32

2.1.3. PERÍODO DE MUESTREO	32
2.1.4. EQUIPO DE MONITOREO ATMOSFÉRICO	33
2.1.5. DIAGRAMA DE SERIE DEL EQUIPO DE MONITOREO ATMOSFÉRICO	34
<b><i>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES</i></b>	<b>35</b>
<b>3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>35</b>
3.1.1. GASES	35
3.1.2. PARTÍCULAS	42
3.1.2.1. COEFICIENTES DE DISPERSIÓN ( $\sigma_s$ ) Y ABSORCIÓN ( $\sigma_a$ ) DE LUZ, VISIBILIDAD ( $v$ ) Y ALBEDO DE DISPERSIÓN SIMPLE ( $\omega$ ) DE LAS PARTÍCULAS	42
3.1.2.2. TAMAÑO DE PARTÍCULA	58
<b>3.2. CONCLUSIONES</b>	<b>60</b>
<b>3.3. RECOMENDACIONES</b>	<b>61</b>
<b><i>REFERENCIAS</i></b>	<b>62</b>
<b><i>APÉNDICE A. SERIES DE TIEMPO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AEROSOL</i></b>	<b>66</b>
<b><i>APÉNDICE B. INSTRUCTIVO DE PROCEDIMIENTOS PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PARTÍCULAS DE AEROSOL</i></b>	<b>73</b>

## **RESUMEN**

A la atmósfera de la Ciudad de México se liberan anualmente 3.6 millones de toneladas de contaminantes [Inventario de Emisiones de Contaminantes de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2004], que deterioran la calidad del aire, disminuyendo la visibilidad, afectando la salud de los seres vivos y provocando cambios en la meteorología del lugar.

Conocer las propiedades físicas de los aerosoles presentes en la atmósfera de la Ciudad de México fue el propósito de este trabajo, se estudió su variación a lo largo del día, del mes y por temporada estacional para conocer su comportamiento en la ciudad y su impacto en áreas vecinas. Se compararon los valores obtenidos en este trabajo experimental con los que ya se tenían de otras campañas de medición de partículas realizadas en dos sitios localizados en las inmediaciones de la Zona Metropolitana del Valle de México, ZMVM (Santa Ana, **S.A.**, y Ávila Camacho, **A.C.**).

Para lo cual se instaló el sitio de muestreo en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, CCA (sitio **CU**), situado en Ciudad Universitaria (19° 21' 00" N, 99° 09' 42" W y 2276 metros sobre el nivel del mar, msnm). En este estudio se midió la concentración de partículas totales por tamaño, coeficientes de absorción y dispersión de luz de las partículas de aerosol, para ello se realizó un muestreo de 5 a 6 días por mes, 24 horas al día, en las siguientes fechas, 17 al 21 de febrero, 17 al 21 de marzo, 27 de abril al 02 de mayo, 25 al 30 de mayo, 22 al 27 de junio, 20 al 25 de julio y 24 al 29 de agosto del 2005.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que los valores mínimos de las propiedades físicas de los aerosoles se registraron durante la temporada de lluvias, lo que indica que hay una dependencia directa entre la meteorología del lugar y las propiedades físicas de los aerosoles.

Al comparar los datos obtenidos en este estudio contra los de los otros dos sitios, se observa que los valores reportados en ellos son semejantes a los de **CU**, pese a que se trata de sitios semirurales y que están localizados en las inmediaciones de la ciudad, lo que implica que existe una transporte de los contaminantes generados en la ciudad hacia sus alrededores.

### ***JUSTIFICACIÓN***

La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes y contaminadas del mundo, diariamente se emiten a su atmósfera grandes cantidades de contaminantes que dañan no sólo su ambiente, sino también el de poblados cercanos, mediante la exportación de contaminantes. Estos contaminantes disminuyen la visibilidad y la calidad del aire además de que ocasionan enfermedades en los seres vivos y en general en el medio ambiente.

Por lo anterior es importante conocer cuáles son los contaminantes que se emiten a la atmósfera, en qué cantidades, de dónde provienen y cómo varían a lo largo de un período de tiempo (época de sequía y lluvia), lo que permitirá tomar medidas de prevención y así, aminorar el problema de contaminación de aire.

## **INTRODUCCION**

Este trabajo lleva por título, “**Propiedades Físicas de los Aerosoles Presentes en la Atmósfera del Sur de la Ciudad de México**”, es una investigación que forma parte del proyecto **Ventilación de Contaminantes de la Ciudad de México** (estudio sobre el impacto de la contaminación generada en la Ciudad de México y en las regiones vecinas a ella). Para entender el comportamiento de las partículas de aerosol presentes en la atmósfera del sur de la Ciudad de México se hicieron medidas de su concentración en diferentes épocas del año, por distribución de tamaño y además, de sus coeficientes de absorción y dispersión de luz.

## **OBJETIVOS**

1. Medir las propiedades físicas de los aerosoles presentes en la atmósfera del sur de la Ciudad de México en diferentes épocas del año (sequía y lluvia).
2. Conocer el comportamiento debido al cambio mensual y estacional de las propiedades físicas de las partículas presentes en la atmósfera del sur de la Ciudad de México.
3. Comparar los valores obtenidos en este trabajo experimental con los que ya se tienen de otras campañas de mediciones de partículas realizadas en dos sitios perimetrales de la ZMVM. Estos sitios fueron: Santa Ana (frontera Sur-Este de la ciudad, en la delegación Milpa Alta; abril del 2003) y Ávila Camacho (frontera Este de la ZMVM; marzo del 2004).

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1. ANTECEDENTES**

#### **1.1.1. LAS CAMPAÑAS DE SANTA ANA Y ÁVILA CAMACHO**

Uno de los objetivos de este trabajo es poder hacer una comparación entre los datos obtenidos en el sitio **CU**, y los de otras dos campañas de monitoreo atmosférico, reportadas en Castro y Salcido (2006). Este es un estudio hecho en dos sitios perimetrales a la ZMVM: Santa Ana y Ávila Camacho con el fin de medir gases y partículas que impactan estos sitios al ser transportados desde la ciudad hasta ellos.

La primer campaña se realizó en Santa Ana (**S.A.**), una población semirural de la delegación Milpa Alta, localizado en la frontera Sur-Este de la ciudad (19.17° N, 98.99° W y 2850 msnm). Esta campaña se llevó a cabo del 07 al 30 abril del 2003.

La segunda de ellas se efectuó en Ávila Camacho (**A.C.**), Municipio de Ixtapaluca, Estado de México. Se localiza en la frontera Este de la zona metropolitana de la Ciudad de México, (19° 19' 29" N, 98° 45' 32" W) y sobre un paso de montaña a 2,958 msnm, formando un canal de ventilación natural desde la ciudad hacia el Este. Este muestreo tuvo lugar del 15 al 26 de marzo del 2004.

En ambas campañas se midieron las mismas propiedades ópticas de las partículas que se midieron en **CU** (concentración, distribución de tamaño y coeficientes de dispersión y absorción de luz de las partículas), así como parámetros meteorológicos de velocidad y dirección de viento además de temperatura.

En la Figura 1.1 se muestra un mapa de la ZMVM, con la ubicación de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo atmosférico (RAMA) y la de los sitios **S.A.** y **A.C.**

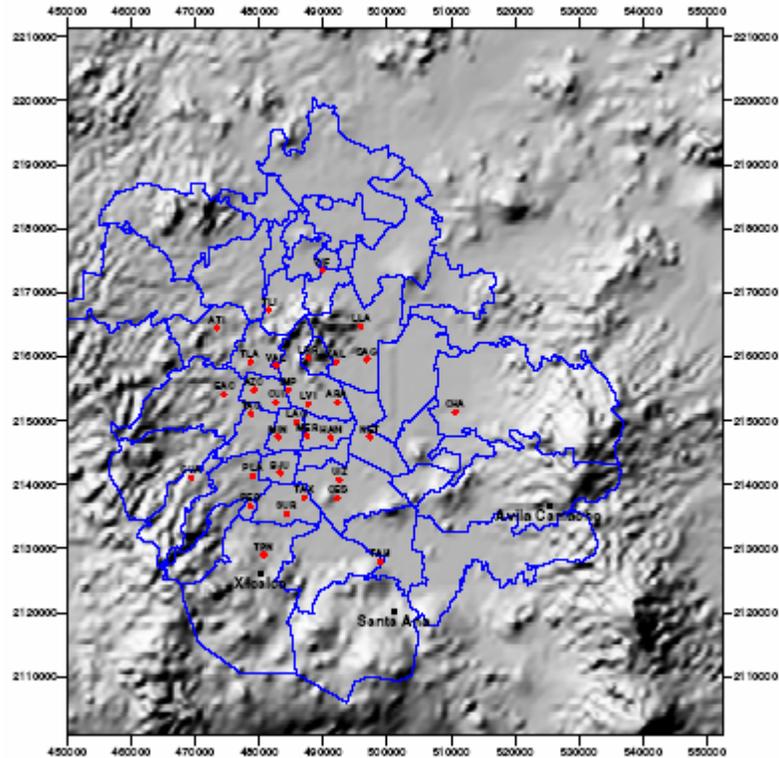


Figura 1.1. Ubicación geográfica de las estaciones de la RAMA y de los dos sitios de observación [Castro y Salcido, 2006].

## 1.2. LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO, ZMVM

La ZMVM se ubica a  $19^{\circ}20' N$  y  $99^{\circ}05' W$ , con una elevación promedio de 2,240 mnms (Figura 1.2); al encontrarse entre las diez ciudades más grandes del mundo, es considerada una megaciudad (población mayor a 10 millones de habitantes), cuenta con una extensión de  $3,540 \text{ km}^2$  (16 delegaciones y 18 municipios del Estado de México) y una población de 19.2 millones de habitantes [<http://www.inegi.com.mx>].

El continuo crecimiento demográfico e industrial ha obligado a la ZMVM a extender sus fronteras hasta los límites de las áreas ecológicas protegidas, lo que deteriora la calidad del aire y en general provoca un desequilibrio ecológico.

El crecimiento en dichos rubros, aunado a un parque vehicular de 3.8 millones [Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2004], conlleva a un consumo energético mayor, lo que provoca que las emisiones contaminantes liberadas a la atmósfera aumenten cada vez más, las cuales continuamente rebasan los límites establecidos por las normas de protección a la salud. Por tal motivo es importante estudiar el deterioro de la calidad del aire y sus repercusiones en el cambio climático.

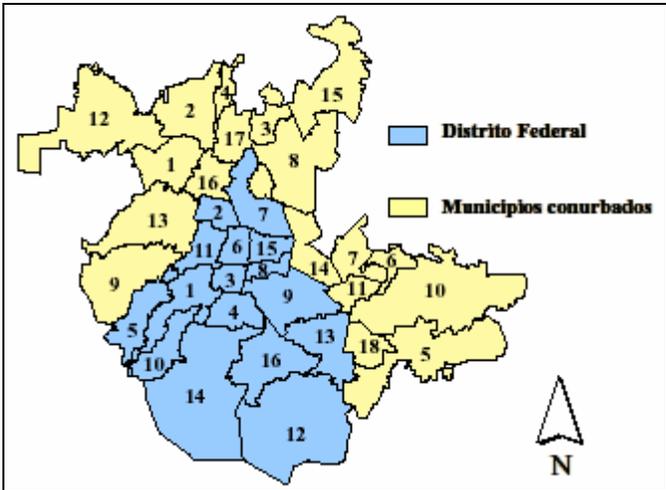


Figura 1.2. Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

1.2.1. FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZMVM

La geografía y topografía propia de la ZMVM ejercen una influencia determinante que afectan la calidad del aire existente en esta zona, ya que al estar rodeada por montañas, constituyen una barrera natural que impide la libre circulación del viento

y la dispersión de los contaminantes, favoreciendo la acumulación de éstos en la atmósfera.

Otro factor determinante que reduce la calidad del aire en la ZMVM es su situación geográfica, la cual favorece la presencia de radiación solar alta y con ello la formación de ozono, el cual es producto de complejas reacciones que se producen entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos emitidos a la atmósfera en presencia de radiación solar.

Y por último, la altura a la que se ubica la ZMVM (2,240 msnm), determina que el contenido de oxígeno sea 23% menor que a nivel del mar, lo cual tiende a hacer más contaminantes los procesos de combustión [Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002].

#### 1.2.2. FACTORES QUE MEJORAN LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZMVM

El aire de la atmósfera de la ZMVM continuamente es depurado porque en él ocurren procesos de limpieza, los cuales son el resultado de masas de aire frío que entran a la cuenca desde el noreste y el sureste de la ZMVM, produciendo una circulación que incrementa la altura de la capa límite permitiéndole a los contaminantes llegar a la troposfera libre y ser transportados a regiones fuera de la cuenca [Castro et al., 2006].

También el agua de lluvia ayuda a limpiar y mejorar la calidad del aire, estos beneficios pueden apreciarse con mayor claridad y frecuencia en los meses de la época de lluvias (junio-octubre).

### 1.3. PROCESOS DE INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR CON LA MATERIA

La visibilidad, la intensidad de la radiación ultravioleta (UV), y fenómenos ópticos se ven afectados por gases y partículas de aerosol que interactúan con la radiación solar cuando ésta pasa a través de la atmósfera de la tierra, ya sea atenuándola o redireccionándola, a través de varios procesos ópticos, tales como, dispersión, absorción, reflexión, refracción y difracción (Figura 1.3).

A continuación se explican brevemente tales procesos ópticos, con el fin de ayudar a entender la interacción entre los contaminantes atmosféricos y la radiación solar.

Previamente, se debe mencionar, que el espectro solar se divide para su estudio en UV (ultravioleta, 0.01 a 0.38  $\mu\text{m}$ ), visible (0.38 a 0.75  $\mu\text{m}$ ) e IR-cercano (Infrarrojo, 0.75 a 4.0  $\mu\text{m}$ ).

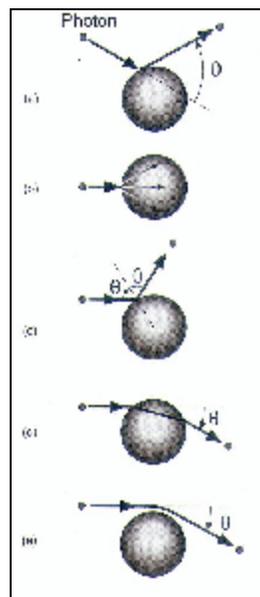


Figura 1.3. Principales interacciones de la luz con la materia: (a) dispersión; (b) absorción; (c) reflexión; (d) refracción y (e) difracción. [Turco, 1997].

- La *dispersión* es el cambio en la dirección de la energía incidente sin que se transfiera energía a la partícula (ver figura 1.3a). La dispersión por una partícula es la combinación de varios procesos, incluyendo reflexión, refracción y difracción.
- La *absorción* ocurre cuando la energía radiactiva (proveniente del sol o la tierra) penetra en un medio y es convertida en energía interna, aumentando la temperatura de la superficie. La absorción remueve radiación del haz incidente, reduciendo la cantidad de radiación una vez que sale del medio absorbente (ver Figura 1.3b). Todas las partículas de aerosol absorben radiación IR-térmica e IR-cercano, pero solamente algunas absorben radiación visible y UV. Las partículas de aerosol que absorben fuertemente luz visible son el carbón negro, la hematita (partículas de polvo) y el óxido de aluminio (partículas de polvo y de combustión).
- La *reflexión* tiene lugar cuando la radiación interactúa con un objeto en un ángulo igual al ángulo de incidencia. No hay pérdida de energía durante este proceso (ver Figura 1.3c). Las partículas de aerosol, gotas de nube y otras superficies son capaces de reflejar la radiación.
- La *refracción* ocurre cuando una onda o fotón sale de un medio con cierta densidad y entra a un medio de diferente densidad. La velocidad de la onda cambia, y la onda es desviada (reflejada) modificando el ángulo de la onda incidente hacia la normal de la superficie. El ángulo de refracción está relacionado al ángulo incidente por la ley de Snell:

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2}$$

donde,  $\eta$  es el índice de refracción,  $\theta$  es el ángulo de incidencia o refracción, y los subíndices 1 y 2 se refieren a los medios 1 y 2, respectivamente (ver Figura 1.2d).

- La *difracción* es un proceso que ocurre cuando la dirección de propagación de una onda cambia cuando ésta se encuentra con un obstáculo. En el aire, las ondas son difractadas cuando pasan por la superficie de una partícula de aerosol, una gota de nube y gotas de lluvia [Jacobson, 2002].

#### 1.4. LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

El aire está compuesto de gases y partículas, la masa total de gases está compuesta por nitrógeno ( $N_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) (99.03 %), el resto corresponde a argón (0.97%) aunque también podemos encontrar trazas de helio, neón, kriptón y xenón, a éstos, se les llama *gases fijos* por estar presentes en el aire en concentraciones prácticamente constantes en tiempo y espacio, por el contrario, aquellos gases cuyas concentraciones varían en tiempo y espacio se les conoce como *gases variables* y son éstos los más importantes en problemas de contaminación del aire, tal es el caso de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono, (CO), metano ( $CH_4$ ), ozono ( $O_3$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x = NO+NO_2$ ) ( [Jacobson, 2002]. Otro contaminante importante son las partículas suspendidas en el aire cuyo diámetro es menor a  $10\ \mu m$  y  $2.5\ \mu m$ , respectivamente, llamadas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

Los gases de invernadero son  $H_2O$ ,  $CO_2$  y  $CH_4$  que son los responsables del calentamiento global, debido a que absorben radiación solar IR-térmica (4-100  $\mu m$ ), en tanto que el resto de los gases arriba citados son gases contaminantes críticos del aire.

En la década los 90's en la ZMVM se redujeron las emisiones de plomo en más del 99% al reemplazar el tetra etilo de plomo (TEP), por un compuesto oxigenante llamado éter metil terbutílico (MTBE). [Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010)].

#### 1.4.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZMVM

El Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México del 2004 [<http://www.sma.df.gob.mx>] reporta que durante ese año se emitieron 3.6 millones de toneladas de contaminantes a la atmósfera. Entre los principales contaminantes, se encuentran el CO y NO<sub>x</sub> que son generados principalmente por fuentes móviles, liberándose ese año a la atmósfera cerca de 1.8 millones y casi 180 mil toneladas, respectivamente, al igual que el CO y el NO<sub>x</sub>, el SO<sub>2</sub> es generado por fuentes móviles, los cuales contribuyeron con el 50% del SO<sub>2</sub> al producirse 6,646 ton/año. Por otro lado, las PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, contribuyeron con 20,686 y 6,622 ton/año, respectivamente.

### 1.5. LAS PARTÍCULAS DE AEROSOL

#### 1.5.1. DEFINICIÓN

Las partículas de aerosol o simplemente *aerosoles* son partículas líquidas o sólidas suspendidas en un gas. Las emisiones de aerosoles que son liberadas a la atmósfera son de origen natural y antropogénico.

Los procesos que involucran emisiones de erupciones volcánicas, polvo, y brisa marina son emisiones de aerosoles naturales.

Las principales fuentes antropogénicas incluyen emisiones fugitivas de polvo (polvo de calles pavimentadas, de construcción y demolición de edificios, así como

de vehículos), quema de biomasa y combustibles fósiles, además de emisiones industriales (sulfato, amonio, nitrato, sodio, cloro, algunos metales y materiales carbonáceos) [Colín, 2001].

### 1.5.2. IMPORTANCIA DE LOS AEROSOLES

Las partículas de aerosoles en grandes áreas urbanas son importantes debido a que ellas son responsables de una gran variedad de problemas de salud pública (principalmente enfermedades respiratorias), daños al medio ambiente (disminuyen la visibilidad y afectan los ecosistemas) y cambios en el clima regional y global. Se relaciona la inhalación de aerosoles urbanos, particularmente aquellos que están compuestos de carbón, a problemas mutagénicos y carcinogénicos en los humanos.

Varios estudios han demostrado que las partículas de aerosol pueden cambiar significativamente las velocidades de producción fotoquímica de ozono, ya que su formación se ve aumentada como resultado de la dispersión de luz por los aerosoles, o inhibida si el flujo actínico disminuye por la presencia de capas de aerosoles que absorben la radiación.

Las partículas de aerosol que son exportadas de sus regiones de origen, se unen a los aerosoles naturales (regionales y globales) y juntos contribuyen a cambiar el clima regional y global alterando el flujo radiactivo o cambiando las propiedades físicas y ópticas de las nubes. [Baumgardner et al., 2000].

### 1.5.3. CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE AEROSOL DE ACUERDO A SU DIÁMETRO

A las partículas que son emitidas directamente de las fuentes (fijas o móviles) se les llama aerosoles primarios, éstas pueden ser transformadas por procesos de conversión (físicos o químicos) para producir aerosoles secundarios. Tal

transformación ocurre por reacciones químicas, nucleación, coagulación, condensación y disolución.

Algunos procesos por los que las partículas de aerosol son removidas del aire son sedimentación, deposición seca (sobre la superficie de la tierra) y lluvia.

Las partículas de acuerdo a su diámetro se clasifican en:

Clasificación de partículas de aerosol de acuerdo a su diámetro.	{	-Modo nucleación. -Modo acumulación. -Modo grueso.
--	---	--

Las partículas cuyo diámetro está dentro del intervalo de 0.01-0.1  $\mu\text{m}$ , pertenecen al modo nucleación, las cuales han sido emitidas o recientemente han formado núcleos (nucleación homogénea o heterogénea). Las partículas del modo nucleación aumentan de tamaño debido a que sufren algunos cambios físicos tales como la coagulación, la cual suele ocurrir por los choques que se llevan a cabo entre las partículas que se encuentran presentes en el aire.

Dentro del modo acumulación están las partículas con diámetros entre 0.1-1  $\mu\text{m}$ , las cuales evolucionan de las partículas del modo nucleación, las cuales aumentan de tamaño por coagulación o condensación [Baumgardner et. al., 2000].

El modo acumulación consiste de dos submodos cuyo diámetro promedio es aproximadamente de 0.2  $\mu\text{m}$  para partículas nuevas y de 0.5 a 0.7  $\mu\text{m}$  para partículas viejas. Las partículas del modo acumulación son importantes por dos razones, debido a que éstas afectan la salud penetrando en los pulmones y porque afectan la visibilidad del aire. Las partículas del modo nucleación y las partículas del modo acumulación constituyen las llamadas partículas finas.

El modo grueso consiste de partículas mayores de 1.0  $\mu\text{m}$  de diámetro, estas partículas se originan por el transporte de polvo, brisa marina, volcanes, plantas y otras fuentes [Jacobson, 2002].

#### 1.5.4. EFECTOS A LA SALUD POR PARTÍCULAS DE AEROSOL

Las partículas de aerosol contienen una variedad de sustancias peligrosas (orgánicas e inorgánicas), que causan daños a la salud de los seres vivos que habitan en las áreas urbanas.

Entre las sustancias orgánicas peligrosas se encuentran el benceno, los bifenilos policlorados y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's; por sus siglas en inglés). Metales y compuestos de azufre se refieren a las sustancias inorgánicas peligrosas; dichas sustancias generalmente atacan el sistema respiratorio.

Las partículas con diámetros menores a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) están vinculadas con problemas de asma y enfermedades de obstrucción pulmonar crónica. Especialmente las partículas ultrafinas (menores a 0.1  $\mu\text{m}$ ) son las más dañinas [Jacobson, 2002].

Las  $\text{PM}_{2.5}$  están compuestas de partículas primarias (emitidas directamente por las fuentes) y de aquellas que se forman en la atmósfera por transformaciones químicas (partículas secundarias). En México, al menos el 50% de la masa de las  $\text{PM}_{2.5}$  provienen de la quema de combustibles en vehículos. Sus principales fuentes son los incendios y polvo suspendido de las carreteras. Por su parte, las partículas de origen secundario están asociadas a las emisiones de  $\text{SO}_2$  y a los precursores de ozono (Compuestos Orgánicos Volátiles, COV; y  $\text{NO}_x$ ).

Concentraciones elevadas de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  están relacionadas a enfermedades respiratorias, tales como bronquitis aguda en niños, bronquitis crónica en adultos y muerte prematura, principalmente en menores de edad y personas de la tercera edad [Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010)].

Las partículas  $\text{PM}_{10}$  en el sistema respiratorio penetran directamente sin ser capturadas por sus mecanismos de limpieza. Una vez que éstas han entrado al

tracto respiratorio, dependiendo de su tamaño, pueden acumularse en diferentes sitios dentro del aparato respiratorio (Figura 1.4). Las  $PM_{10}$  penetran hasta la zona traqueobronquial, mientras que las  $PM_{2.5}$  pueden penetrar hasta los alvéolos pulmonares. Los riesgos a la salud asociados con las partículas en el área pulmonar son mucho mayores que el riesgo por las partículas que se quedan en la garganta [Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010)].

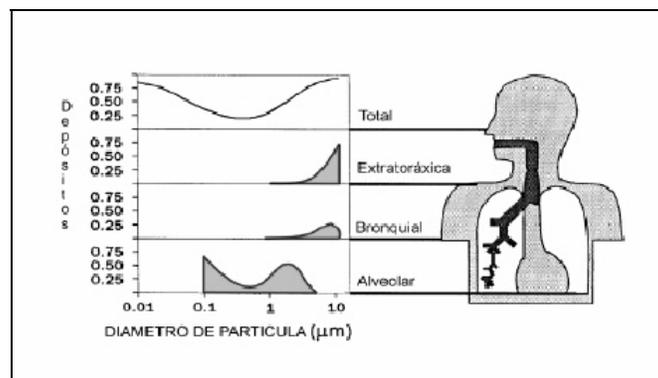


Figura 1.4. Acumulación de partículas de acuerdo a su tamaño en el sistema respiratorio. [Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010)].

El estudio realizado por Shendrikar y Steinmetz (2003), confirma que las partículas finas en la atmósfera ( $PM_{2.5}$ ) son responsables del deterioro de la visibilidad y efectos a la salud humana, tales como enfermedades respiratorias crónicas, cáncer y muerte prematura. La presencia de  $PM_{2.5}$  en el aire es debido principalmente a la combustión de combustibles fósiles, procesos industriales, quema de biomasa, procesos naturales y sobre todo por la transformación química de emisiones gaseosas como  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$  y COV.

## **1.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES GASES PRESENTES EN ATMÓSFERAS URBANAS**

A continuación se da una descripción de los gases contaminantes críticos del aire que deben regularse en las principales áreas urbanas.

### **1.6.1. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>)**

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es uno de los seis contaminantes críticos del aire que es regulado en muchos países. El SO<sub>2</sub> es un precursor del ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, un componente de la partícula de aerosol que afecta la deposición ácida, el clima global y la capa de ozono

Las principales fuentes de emisión del SO<sub>2</sub>, son la quema de carbón en plantas eléctricas, emisiones vehiculares y volcánicas. El dióxido de azufre también es producido químicamente en el aire por procesos biológicos de dimetilsulfuro (DMS) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S). El SO<sub>2</sub> es eliminado del aire por reacciones químicas, disolución en agua y transferencia de polvo a las capas de hielo.

El estudio realizado por Jiménez y colaboradores (2004), indica que una vez que el SO<sub>2</sub> es liberado en la atmósfera (por fuentes naturales o antropogénicas), éste rápidamente reacciona con otros gases, particularmente cuando agua en fase vapor está presente. Cuando la humedad relativa es mayor al 75%, tienen lugar reacciones muy rápidas, produciendo pequeñas gotas de ácido sulfúrico o sales sólidas, tal como sulfato de amonio, siempre que el amoniaco esté presente en el aire. Las emisiones del volcán Popocatepetl contribuyen significativamente a la concentración de sulfato presente en pequeñas partículas, dependiendo de las condiciones meteorológicas.

El dióxido de azufre es soluble y es absorbido por las membranas mucosas de la nariz y tracto respiratorio. El ácido sulfúrico también es soluble, pero su deposición

en los pulmones depende del tamaño de la partícula en que éste se disuelve. Altas concentraciones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pueden dañar los pulmones [Jacobson, 2002].

### 1.6.2. DIÓXIDO DE NITRÓGENO ( $\text{NO}_2$ )

EL dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) es un intermediario entre las emisiones del  $\text{NO}$  y la formación de  $\text{O}_3$ . También es un precursor del ácido nítrico, un componente de la deposición ácida. El  $\text{NO}_2$  reduce la concentración de ozono en la estratosfera superior, ya que es uno de los seis contaminantes críticos del aire. Su principal fuente de emisión es la oxidación del  $\text{NO}$ , además de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa.

El dióxido de nitrógeno se produce por reacción química (fotólisis), disolución en el agua de mar y por transferencia de polvo a las capas de hielo. Exposiciones a altas concentraciones de  $\text{NO}_2$ , pueden causar daños a los pulmones y aumento en las infecciones respiratorias [Jacobson, 2002].

### 1.6.3. MONÓXIDO DE CARBONO ( $\text{CO}$ )

El monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) es el gas más abundantemente emitido además del  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , éste es un precursor poco menor en la formación de ozono en áreas urbanas. Las emisiones de  $\text{CO}$  y su oxidación a  $\text{CO}_2$ , afectan el clima global, ya que es uno de los seis contaminantes críticos del aire.

La principal fuente de  $\text{CO}$  es la combustión incompleta en fuentes móviles, además de incendios, combustión de biomasa, algunos procesos industriales y procesos biológicos. El monóxido de carbono se elimina de la atmósfera por reacción química a  $\text{CO}_2$ , deposición de polvo en las capas de hielo y disolución en el agua de mar. Exposiciones a concentraciones elevadas de monóxido de

carbono provocan desde un dolor de cabeza (300 partes por millón, ppm) hasta la muerte (700 ppm) [Jacobson, 2002].

#### 1.6.4. OZONO (O<sub>3</sub>)

El ozono (O<sub>3</sub>) es uno de los seis contaminantes críticos del aire que requiere ser controlado. En la estratosfera, el O<sub>3</sub> absorbe radiación UV, proporcionando un escudo protector para la vida en la tierra. Aunque el ozono es considerado “bueno” en la estratosfera y “malo” en la capa límite (troposfera), las moléculas de ozono son las mismas en ambos casos.

El O<sub>3</sub> es un contaminante secundario, es decir, se forma en la atmósfera mediante procesos químicos en los que intervienen COV, NO<sub>x</sub> y radiación solar. Su impacto en la salud se debe a su capacidad de oxidación, por ello daña a las células en las vías respiratorias causando inflamación, además reduce la capacidad del aparato respiratorio para combatir las infecciones y remover las partículas externas y además afecta los mecanismos de defensa, por lo que puede provocar un aumento de las infecciones respiratorias.

Los efectos generalmente asociados con aumentos del ozono son: infecciones respiratorias agudas, tos, flemas, irritación de ojos y asma.

El ozono afecta a los animales, aumentando su susceptibilidad a infecciones bacteriales, también interfiere con el crecimiento de plantas y árboles así como deteriorando los materiales orgánicos [Jacobson, 2002].

## 1.7. EQUIPO DE MONITOREO ATMOSFÉRICO

A continuación se hace una descripción de las unidades que conforman al equipo de muestreo incluido el Sistema Adquisidor de Datos (SAD).

### 1.7.1. CONTADOR DE PARTÍCULAS (CONDENSATION PARTICLE COUNTER, CPC)

El CPC (por sus siglas en inglés) es un instrumento útil empleado para contar partículas (concentración, partículas/cm<sup>3</sup> y número de partículas) de 0.01-3 µm de diámetro, y ya que se trata de partículas pequeñas el instrumento por sí solo no puede detectarlas, por lo que es necesario hacer que aumenten de tamaño. Esto se consigue haciendo que condense el vapor del butanol en las partículas, las cuales crecen formando pequeñas gotas, esas partículas ya en forma de gotas son fácilmente contadas por un detector óptico de partículas. El CPC se conecta a una bomba de vacío que trabaja con un flujo de 1.0 lpm (0.035 ft<sup>3</sup>/min) la cual succiona la muestra de aire al interior del instrumento. Este método se lleva a cabo debido a que es más fácil detectar y contabilizar gotas de mayor tamaño que el de las partículas sin crecer.

El instrumento consiste de cuatro subsistemas principales, el depósito, el saturador, el condensador y el detector óptico (Figura 1.5).

El depósito almacena suficiente líquido para permitirle al detector trabajar continuamente durante siete días usando alcohol n-butílico (butanol). La muestra de aire ingresa al instrumento y es transportada a la sección de saturación donde pasa por un bloque de plástico poroso humedecido y precalentado, donde éste continuamente absorbe líquido del depósito. Dicho bloque está construido con un material eléctricamente conductor con el fin de evitar la acumulación de estática y minimiza la pérdida de partículas por efectos de pared. Esta sección se encuentra saturada con el butanol que se evapora y crea un ambiente de saturación.

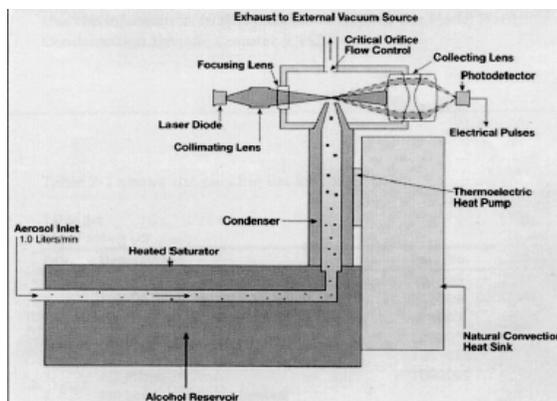


Figura 1.5. Funcionamiento interno del contador de partículas. [Condensation Particle Counter. Instruction Manual. Model 3010, TSI Inc.].

Posteriormente, la muestra de aire pasa al condensador donde es enfriada por un dispositivo termoeléctrico que se encuentra fuera del ducto del condensador. El vapor, al ser enfriado, condensará sobre las partículas formando gotas que crecen rápidamente. Estas gotas son transportadas del ducto de condensación a través de una boquilla al detector óptico. El sensor óptico consiste de un diodo láser, lentes colimados y lentes cilíndricos. Esta combinación forma una especie de cinta de luz láser sobre la boquilla de salida de la muestra. Los colectores ópticos están formados por un par de lentes esféricas que se encargan de colectar la luz que es dispersada hacia adelante. Esta luz es dirigida a un fotodetector que cuantifica su intensidad y emite una señal en forma de pulsos eléctricos hacia el microprocesador que a su vez transforma esta señal en un valor de concentración. El haz de luz principal es bloqueado en el centro de la primera lente esférica. El flujo de la muestra es mantenido por la bomba de vacío y por el tamaño del orificio de control de flujo. [Condensation Particle Counter. Instruction Manual. Model 3010, TSI Inc.].

### 1.7.2. CONTADOR ÓPTICO DE PARTÍCULAS (LASAIR II)

El LASAIR II (por el nombre del modelo) es un contador de partículas (concentración, partículas/m<sup>3</sup>), que registra seis umbrales de tamaño de canal que son 0.3, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 y 25.0 µm. Cuando el LASAIR II comienza a muestrear, la bomba interna crea un vacío que succiona la muestra de aire al interior. El flujo de la muestra está controlado para mantener el flujo de aire en 1 ft<sup>3</sup>/min (28.3 lpm) a través de todo el muestreo.

La muestra de aire se desplaza desde la entrada hasta la cámara de muestreo en la que un haz de láser es proyectado para que las partículas en la muestra de aire dispersen la luz. La energía de la luz dispersada es recolectada mediante colectores ópticos y convertida a pulsos de voltaje, donde la amplitud de un pulso de voltaje corresponde al tamaño de la partícula. El dato de la partícula es asignado de acuerdo al tamaño del canal correspondiente.

El aire continúa moviéndose más allá de la cámara de muestreo a través de la bomba y de la tubería principal, en donde pasa por un filtro que remueve 99.97% de partículas de 0.3 µm o mayores. Una vez que el aire ha pasado a través del filtro, éste viaja hasta la salida de la muestra en el instrumento [LASAIR II. Operators Manual. Model 310A, Particle Measuring Systems Inc.].

### 1.7.3. NEFELÓMETRO

Este instrumento mide el coeficiente de dispersión de luz ( $\sigma_s$ ) usando la geometría de un nefelómetro de integración estándar. La fuente de luz es una lámpara que cuenta con un filtro óptico, definido para emitir una longitud de onda de 530 nm.

El nefelómetro puede registrar medidas de coeficientes de dispersión en un intervalo que va desde  $1 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ , también cuenta con sensores de

humedad, presión y temperatura, los cuales corrigen las variaciones en la medición por efecto de la dispersión del aire.

El nefelómetro mide el coeficiente de dispersión directamente al medir la intensidad de luz dispersada por las partículas, restando a ese valor la luz dispersada por el aire, las paredes del instrumento y el ruido de fondo del detector [Nephelometer. Operation Procedures. M903, Radiance Research].

#### 1.7.4. FOTÓMETRO DE ABSORCIÓN (PARTICLE SOOT/ABSORPTION PHOTOMETER, PSAP)

El PSAP (por sus siglas en inglés) es usado para medir en tiempo real el coeficiente de absorción de luz ( $\sigma_a$ ) que puede ser usado para estimar la correspondiente concentración de partículas finas de hollín. El PSAP mide en forma continua las partículas que se depositan en el filtro.

El método de PSAP se basa en el cambio en la transmisión óptica de un filtro causado por la deposición de partículas que están relacionadas con el coeficiente óptico de absorción usado por la ley de Beer y un coeficiente de calibración. La medida de PSAP es continua, mientras se están depositando las partículas al mismo tiempo se compara con un blanco (Figura 1.6).

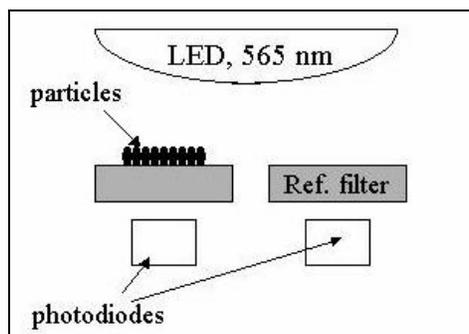


Figura 1.6. Diagrama de funcionamiento del PSAP.

El tiempo de medida puede ser tan corto como de algunos segundos hasta 5 minutos dependiendo de la concentración del hollín.

El instrumento cuenta con una entrada propia y requiere solamente de una fuente externa de vacío que proporcione un flujo de la muestra de 1 a 2 lpm y con una fuente de luz verde (LED) cuya longitud de onda es de 565 nm.

El PSAP puede determinar valores de coeficientes de absorción entre  $1 \times 10^{-7}$  a  $1 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ . Cuando las señales de la transmitancia indican valores inferiores a un 50%, las mediciones proporcionadas por el instrumento dejan de ser confiables, por lo que hay que cambiar el filtro por uno nuevo. [Particle Soot/Absorption Photometer. Operation Procedures. Radiance Research]

El coeficiente de absorción de luz se corrigió mediante la siguiente ecuación, debido a que el PSAP, interpreta cerca del 2% de la dispersión como absorción, una vez corregido este efecto, la absorción medida es 22% mayor que la absorción de referencia.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_m - 0.2 * \sigma_s}{1.2}$$

donde:  $\sigma_a$  es el coeficiente de absorción corregido,  $\sigma_m$  es el coeficiente de absorción medido por el instrumento y  $\sigma_s$  es el coeficiente de dispersión [Bond et al., 1999].

#### 1.7.5. SISTEMA ADQUISIDOR DE DATOS (SAD)

Nuestro sistema de muestreo (CPC, LASAIR II, Nefelómetro y PSAP) es operado por un Sistema Adquisidor de Datos (SAD) llamado SIRANDA 2004 (Sistema de Recuperación de Datos Atmosféricos).

SIRANDA 2004 <sup>1</sup> es un software diseñado especialmente para almacenar los datos registrados por el equipo de muestreo, además de controlar el encendido y apagado de los cuatro instrumentos antes mencionados. (Ver Apéndice B).

## 1.8. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS AEROSOL

A partir de valores de coeficientes de absorción ( $\sigma_a$ ) y dispersión de luz ( $\sigma_s$ ) de las partículas, proporcionados por el PSAP y nefelómetro respectivamente, fue posible calcular el coeficiente de extinción de luz ( $\sigma_e$ ), la visibilidad (V) y el albedo de dispersión simple ( $\omega$ ), valores que permiten cuantificar de manera sencilla el impacto que tienen los contaminantes en la calidad del aire local.

### 1.8.1. COEFICIENTE DE EXTINCIÓN ( $\sigma_e$ )

Las partículas de aerosol presentes en la atmósfera son capaces de dispersar y absorber la radiación solar, atenuando la intensidad de la radiación, a este proceso se le llama extinción. La atenuación de la energía radiante se expresa mediante el coeficiente de extinción ( $\sigma_e$ ), el cual se define por la suma de los coeficientes de dispersión ( $\sigma_s$ ) y absorción ( $\sigma_a$ ), [Hinds, 1999].

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a$$

donde,  $\sigma_e$ ,  $\sigma_s$  y  $\sigma_a$  tienen como unidad de medida  $m^{-1}$ .

Es importante medir la atenuación de la radiación debida a los aerosoles para poder evaluar el impacto que éstos tienen en la visibilidad.

---

<sup>1</sup> Este programa fue elaborado por el Dr. Alejandro Salcido, investigador del Instituto de Investigaciones Eléctricas

### 1.8.2. VISIBILIDAD (V)

La degradación de la visibilidad es probablemente el impacto más fácilmente perceptible de la contaminación del aire. La visibilidad está gobernada por la dispersión y absorción de luz por las partículas y gases presentes en la atmósfera. Principalmente, la presencia de partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) que dispersan la luz, degradan la visibilidad [Shendrikar y Steinmetz, 2003].

La visibilidad es una medida de cuan lejos podemos ver a través del aire y factores tales como las propiedades ópticas de la atmósfera, cantidad y distribución de luz, características del objeto observado y propiedades del ojo humano, determinan la distancia máxima a que podemos ver.

Nuestra habilidad para ver horizontalmente a través de un aire limpio, está limitada a unos cuantos cientos de kilómetros debido a la elevada concentración de gases y partículas presentes, contrario a lo que sucede en la vertical.

La visibilidad se calcula mediante la ecuación de Koschmieder:

$$V = \frac{3.912}{\sigma_e}$$

Es posible llegar a esta ecuación cuando un objeto negro es visto contra un fondo blanco, el contraste visual a una distancia  $x$  del objeto,  $C_v(x)$ , se calcula como la diferencia relativa entre la intensidad de la luz de fondo y el objeto;

$$C_v(x) = \frac{F_B(x) - F(x)}{F_B(x)}$$

donde,  $F_B(x)$  y  $F(x)$  son la intensidad del fondo y el objeto, respectivamente. Si se asume que el objeto es un objeto negro, entonces, la distancia  $x$  entre el objeto y el observador,  $F(x)$  puede ser afectada por dos fenómenos:

- (1) la absorción de luz por gases y partículas, y
- (2) la adición de luz por dispersión en la línea del observador.

Si  $\sigma' = \sigma_{\text{ext}} = \text{constante}$ , entonces el contraste  $C_v(x)$  obedece la ley de Lambert-Beer:

$$\frac{dC_v(x)}{dx} = -\sigma_e C_v(x)$$

y por ello el contraste disminuye exponencialmente con la distancia del objeto:

$$C_v(x) = \exp(-\sigma_e x)$$

Para días con las mejores condiciones de iluminación, un valor de 0.02 es comúnmente usado. Este valor implica que podemos ver un objeto negro contra el horizonte cuando el contraste se ha reducido un 2%,  $C_v=0.02$  es usualmente empleado para calcular el intervalo visual. Por lo tanto, la distancia a la que un objeto negro tiene un contraste estándar de 0.02 contra un fondo blanco es dada por la siguiente ecuación:

$$x_v = \frac{3.912}{\sigma_e}$$

donde  $x_v$  es la visibilidad,  $\sigma_e$  el coeficiente de extinción. Ambos tienen como unidad de medida m o Km. [Jacobson, 2002; Hinds, 1999; Seinfeld y Pandis, 1998].

### 1.8.3. ALBEDO DE DISPERSIÓN SIMPLE ( $\omega$ )

La presencia de partículas y gases contaminantes en la atmósfera afectan el albedo de dispersión simple ( $\omega$ ) o Single Scattering Albedo, SSA (por sus siglas en inglés). El albedo es la fracción de radiación solar que es reflejada hacia el espacio. Los aerosoles presentes en la atmósfera capaces de dispersar la luz, incrementan el albedo por lo que llega menos radiación a la superficie de la tierra y por ello disminuye su temperatura. Por el contrario, los aerosoles capaces de

absorber radiación (hollín) pueden disminuir el albedo y calentar la superficie. La presencia de estos contaminantes distribuidos tanto en la vertical como en la horizontal, afectan la radiación incidente por lo que contribuye a cambios en el clima local. [Castro et al., 2003].

El albedo de dispersión simple se calcula mediante la siguiente ecuación, que relaciona los coeficientes de dispersión y extinción de luz de las partículas:

$$\omega = \frac{\sigma_s}{\sigma_e}; \quad 1 \geq \omega \geq 0,$$
$$\sigma_s = \omega \sigma_e \quad \text{y} \quad \sigma_a = (1 - \omega)\sigma_e$$

$\omega$  es la fracción de luz que es dispersada por las partículas del aire, en tanto que la fracción absorbida es  $1 - \omega$ , si  $\omega=1$  entonces hay una conservación de la energía radiactiva. [Seinfeld y Pandis, 1998].

## ***CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA***

### **2. 1. DISEÑO EXPERIMENTAL**

#### **2.1.1. SELECCIÓN DEL SITIO**

Este trabajo de campo se realizó con el fin de determinar las propiedades físicas de las partículas de aerosol que se encuentran presentes en la atmósfera del sur de la Ciudad de México y su variación a lo largo del día, por mes y por estación. El trabajo experimental consistió en hacer pasar aire atmosférico a través del sistema de monitoreo, para ello se instaló el sitio de muestreo al sur de la Ciudad de México. El equipo de muestreo se colocó dentro de un cuarto de la terraza del Centro de Ciencias de la Atmósfera, CCA (sitio **CU**), situado en Ciudad Universitaria (19° 21' 00" N, 99° 09' 42" W y 2276 msnm) (Figura 2.1).

Para lograr nuestro propósito hicimos uso de un equipo de medición (Figura 2.2), que consta de cuatro instrumentos: un contador de partículas (CPC), un contador óptico de partículas (LASAIR II), un nefelómetro y un fotómetro (PSAP), todos ellos conectados a un sistema adquirente de datos (SAD), con los cuales obtuvimos valores de concentración de partículas, número de partículas totales, partículas por distribución de tamaño y coeficientes de absorción y dispersión de las partículas, respectivamente. El PSAP y el nefelómetro se interconectan para que la misma muestra sea detectada y registrada por separado en cada uno de ellos.

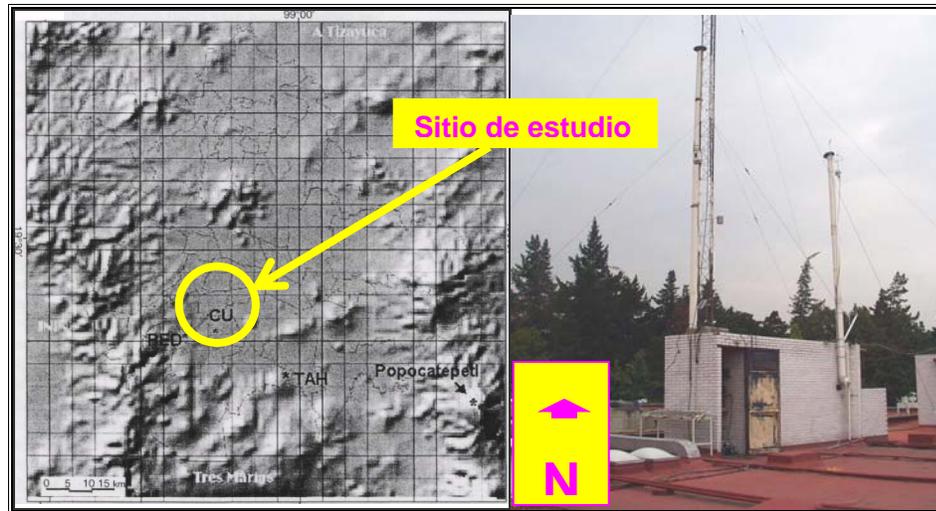


Figura 2.1. Ubicación del Sitio de muestreo, CCA (CU).

Tres de estos instrumentos (CPC, PSAP y nefelómetro), toman la muestra de aire a través de la chimenea que se ubica detrás del cuarto en que se colocó el equipo de muestreo, excepto el LASAIR II, la cual tiene un diámetro de 15 cm y que se encuentra a una altura de 8 m sobre el nivel del suelo. La chimenea cuenta con un ventilador situado en el extremo inferior que mantiene un flujo de  $90 \text{ L min}^{-1}$ , además estos equipos requieren de una bomba de vacío que sirve para descargar la muestra de aire a la atmósfera de cada uno de los instrumentos.

Los equipos de medición utilizan manguera de silicón conductivo que evita la acumulación de estática y minimiza la pérdida de partículas por efectos de pared.

El LASAIR II es el único que no se conecta a la chimenea debido a que la altura de la columna de aire es muy grande (menos de 8 m) para que sea soportado por su bomba interna, la cual opera con un flujo de  $28 \text{ L min}^{-1}$ , y aprovechando el hecho de que está provisto de su propia bomba, colocamos su toma de muestra de aire a aproximadamente 3 m sobre el nivel del suelo.

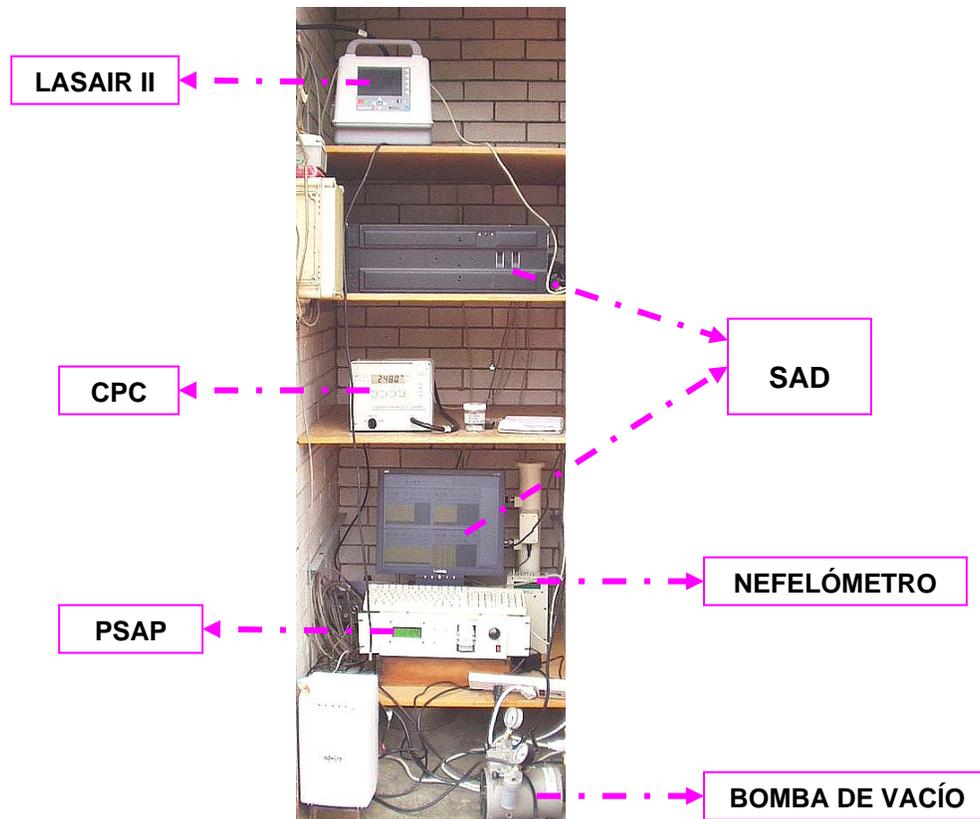


Figura 2.2. Sistema de muestreo, CCA.

Además de contar con datos de propiedades físicas de los aerosoles, también usamos los registros de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y de la Red Meteorológica (REDMET); que son dos subsistemas del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), pertenecientes a la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (Figura 2.3). De la RAMA usamos datos de concentraciones de gases como  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ , y de la REDMET, datos meteorológicos tales como temperatura, velocidad y dirección del viento, los cuales se obtuvieron de las estaciones de monitoreo ubicadas al suroeste de la ZMVM.

La estación de monitoreo **Pedregal; PED** ( $19^{\circ} 19' 29''$  N y  $99^{\circ} 12' 13''$  W) y la estación **Santa Úrsula; SUR** ( $19^{\circ} 18' 49''$  N y  $99^{\circ} 08' 59''$  W), son dos de las 31 estaciones con las que cuenta el SIMAT [<http://www.sma.df.gob.mx>] y se eligieron por su cercanía con Ciudad Universitaria. Esta información fue de gran utilidad para conocer el comportamiento de algunos contaminantes presentes en nuestra atmósfera, en qué cantidades se producen y si existe una exportación de contaminantes de la ZMVM.

De las estaciones **PED** y **SUR** se usó la base de datos de concentración de gases ( $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ , que corresponden a las Figuras 3.1-3.4), pero únicamente de la estación **PED** se usaron los datos meteorológicos (temperatura y dirección del viento, Figuras 3.5 y 3.6), por ser esta última estación la que cuenta con estos valores.

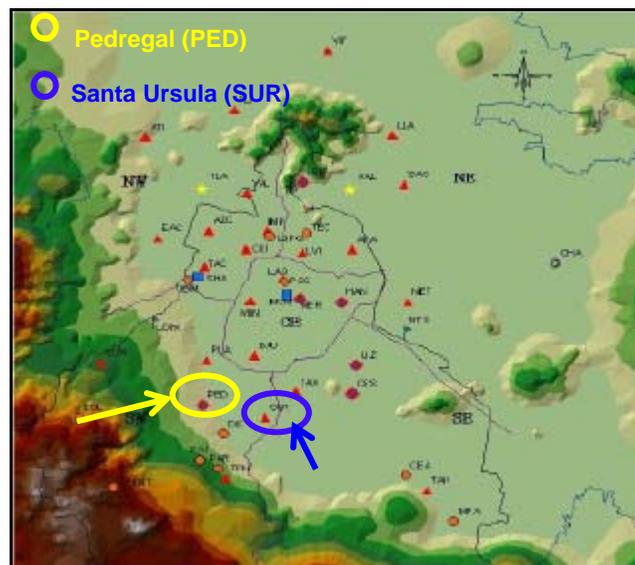


Figura 2.3. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) [<http://www.sma.df.gob.mx>].

### 2.1.2. ACERCA DEL ENTORNO

La Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, posee una reserva ecológica de flora y fauna, la cual es también conocida como Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) y se localiza al sureste de la ciudad de México, a una altitud de entre 2 200 y 2 277 metros, dentro del campus de Ciudad Universitaria, cuya extensión es de 2.37 Km<sup>2</sup>.

Aunque ciudad universitaria está rodeada de abundante vegetación endémica, también hay una gran diversidad de plantas que han sido introducidas en el ecosistema por el hombre, lo que convierte a la REPSA en uno de los pocos pulmones que aún permanecen y proveen de oxígeno a la ZMVM.

Debido al aumento del parque vehicular en los últimos años, dentro de CU se ha intensificado la carga vehicular en las principales vialidades que comunican las facultades e institutos y en las llamadas “horas pico” el paso de vehículos se ve entorpecido provocando la quema de mayores cantidades de combustible y al liberarse sus emisiones a la atmósfera aumentan los niveles de contaminación durante esos períodos de tiempo.

### 2.1.3. PERÍODO DE MUESTREO

El trabajo experimental consistió en tomar muestras de aire de febrero a agosto del 2005, con una duración de 5 a 6 días por mes, tomando muestras cada diez segundos y promediando cada minuto durante 24 horas al día. Las fechas de inicio y fin de cada muestreo son del 17 al 21 de febrero, 17 al 21 de marzo, 27 de abril al 02 de mayo, 25 al 30 de mayo, 22 al 27 de junio, 20 al 25 de julio y 24 al 29 de agosto.

Dado el período de tiempo (febrero a agosto) en que se realizaron las campañas de monitoreo de aerosoles, contamos con datos en los que se presentaron dos

cambios de estación (invierno a primavera y primavera a verano) y también dos temporadas importantes la de sequía y la de lluvia, las cuales nos dan información importante acerca de cambios en las propiedades físicas de los aerosoles debido a la presencia de cambios climáticos y estacionales.

#### 2.1.4. EQUIPO DE MONITOREO ATMOSFÉRICO

En la Tabla 2.1., se hace una breve descripción del equipo de muestreo que se uso en este trabajo experimental.

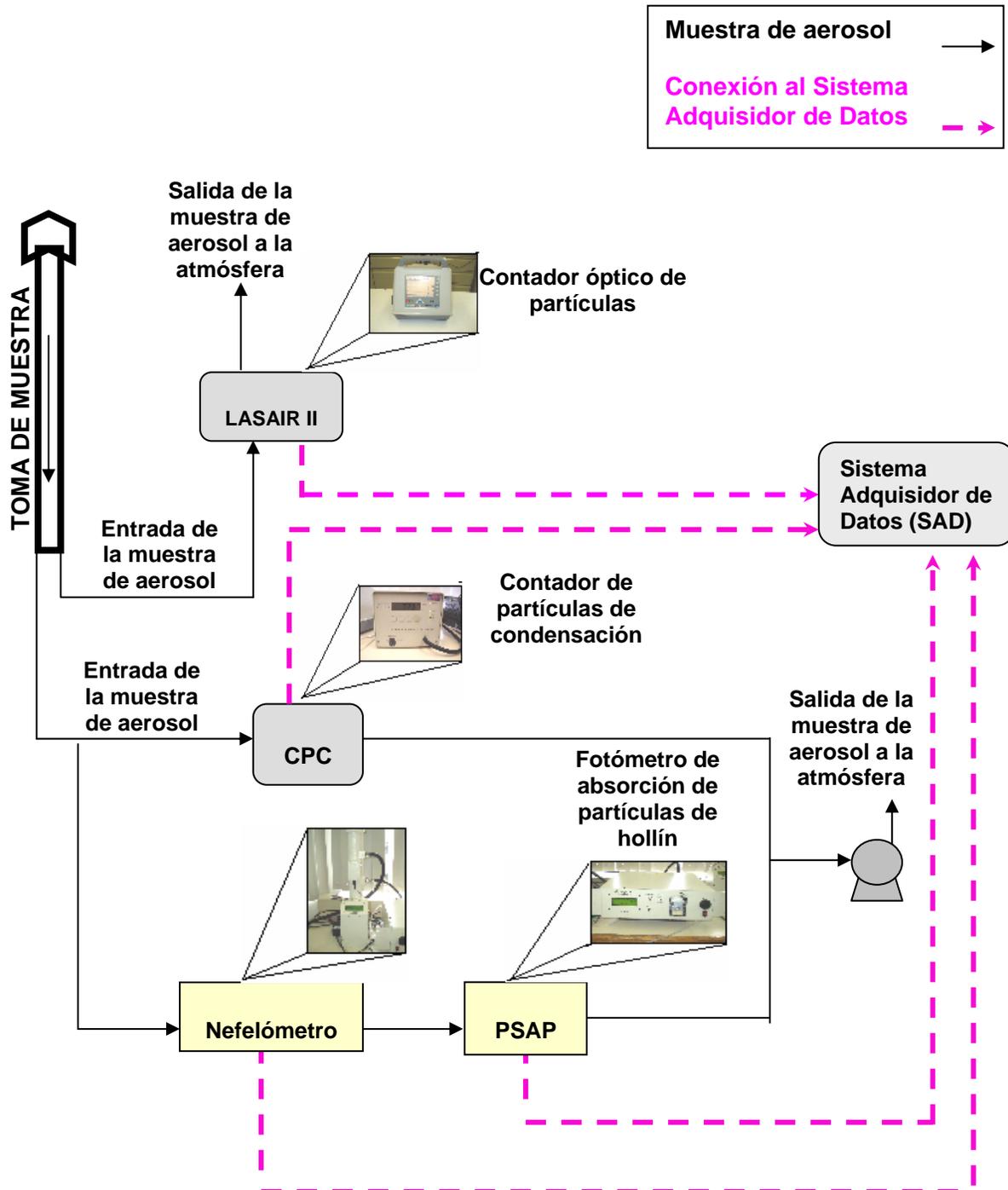
**Tabla 2.1. Equipo de muestreo.**

<b>Equipo</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Compañía</b>
Contador de partículas (CPC)	Concentración y número de partículas totales	0.01-3 $\mu$ m	Mod. 3010, TSI Inc.
Contador óptico de partículas	Número de partículas por distribución de tamaño	0.3, 0.5, 1, 5, 10 y 25 $\mu$ m	Mod. 310A, LASAIR II, PMS Inc.
Nefelómetro	Coefficiente de dispersión ( $\sigma_s$ )	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-3</sup> m <sup>-1</sup>	Mod.M903, Radiance Research
Fotómetro de absorción (PSAP)	Coefficiente de absorción ( $\sigma_a$ )	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup>	Radiance Research

Otro componente importante, es el SAD, que aunque no se incluyó en la Tabla 2.1, es de suma importancia en el equipo de monitoreo de las propiedades físicas de los aerosoles atmosféricos.

## 2.1.5. DIAGRAMA DE SERIE DEL EQUIPO DE MONITOREO ATMOSFÉRICO

A continuación se presenta el arreglo utilizado para conectar el sistema de medición atmosférico, empleado en este trabajo experimental.



## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

### **3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1.1. GASES**

En las Figuras 3.1 a 3.4 se muestran las series de tiempo horarias de los gases  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $CO$ , respectivamente, de las estaciones **PED** y **SUR**, en cuyas series de tiempo se observa que las concentraciones de tales gases, en ambas estaciones, presentan comportamiento similar (cada figura muestra la concentración de gases por los períodos de tiempo analizados, esto es, 17-21 febrero, 17-21 marzo, 27-abril al 02-mayo, 25-30 mayo, 22-27-junio, 20-25 julio y 24-29 agosto del año 2005).

En general observamos, que para las series de tiempo, los valores de concentración de gases y de las propiedades físicas de las partículas, durante la temporada de sequía son mayores que durante la época de lluvias, esto es debido a que la lluvia limpia de manera importante la atmósfera, minimizando la acumulación de contaminantes en el aire y reflejándose en una disminución de los parámetros medidos.

- Para el caso de la Figura 3.1, las concentraciones de  $O_3$  son máximas entre las 13-15 horas, esto debido a que el ozono es un contaminante secundario formado principalmente por la fotodisociación de  $NO_2$ .
- En las Figuras 3.2 a 3.4, los gases  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $CO$  son producidos por la combustión de combustibles fósiles en motores de fuentes móviles, especialmente vehículos particulares, donde las concentraciones máximas están directamente

relacionadas con las actividades de la población, es decir, entre las 06-12 horas y entre las 18-22 horas.

En la Figura 3.5, se presenta la serie de tiempo horaria de temperatura de la estación **PED**. En las series de tiempo que se muestran se observa la misma tendencia, es decir, las máximas temperaturas se presentan durante el día, esto es, entre las 13-15 horas, lo cual concuerda con el hecho que el máximo flujo de radiación solar hacia la atmósfera de la tierra se presenta durante este período de tiempo, y hacia las primeras horas del día la temperatura es mínima. Asimismo, se presentaron dos hechos importantes en el mes de marzo:

- 1.- La velocidad del viento fue mayor que el promedio en otros meses del año, lo que limpió el aire de la de ZMVM, provocando que las concentraciones de gases disminuyeran aún cuando marzo está dentro del período de sequía; la velocidad promedio del viento fue de 1.71 m/s (6 a.m. a 6 p.m.). Ver Tabla 3.1.

**Tabla 3.1. Promedio horario de velocidades del viento.**

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)-PED							
HORA	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO
06	0.87	0.67	0.84	0.82	0.98	1.01	0.80
07	0.72	0.88	0.62	0.72	1.00	0.88	0.80
08	0.74	0.93	0.51	0.47	1.28	0.91	0.56
09	0.39	1.19	0.71	1.10	1.32	1.11	0.92
10	0.96	1.46	1.27	1.35	1.46	1.20	0.99
11	1.01	1.47	1.59	1.26	1.48	1.22	1.09
12	1.26	1.01	1.72	1.40	1.13	1.23	1.05
13	1.54	2.12	1.20	1.34	1.05	1.23	1.05
14	1.29	2.01	1.06	1.61	1.12	1.68	1.26
15	1.53	2.31	1.46	1.60	1.97	1.55	1.50
16	1.27	2.63	1.79	1.18	2.04	1.35	1.65
17	0.87	2.82	2.22	1.74	1.44	1.70	1.63
18	1.06	2.77	1.85	1.48	1.19	2.27	0.98
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.04 ± 0.33</b>	<b>1.71 ± 0.77</b>	<b>1.30 ± 0.53</b>	<b>1.24 ± 0.37</b>	<b>1.34 ± 0.34</b>	<b>1.33 ± 0.38</b>	<b>1.10 ± 0.33</b>

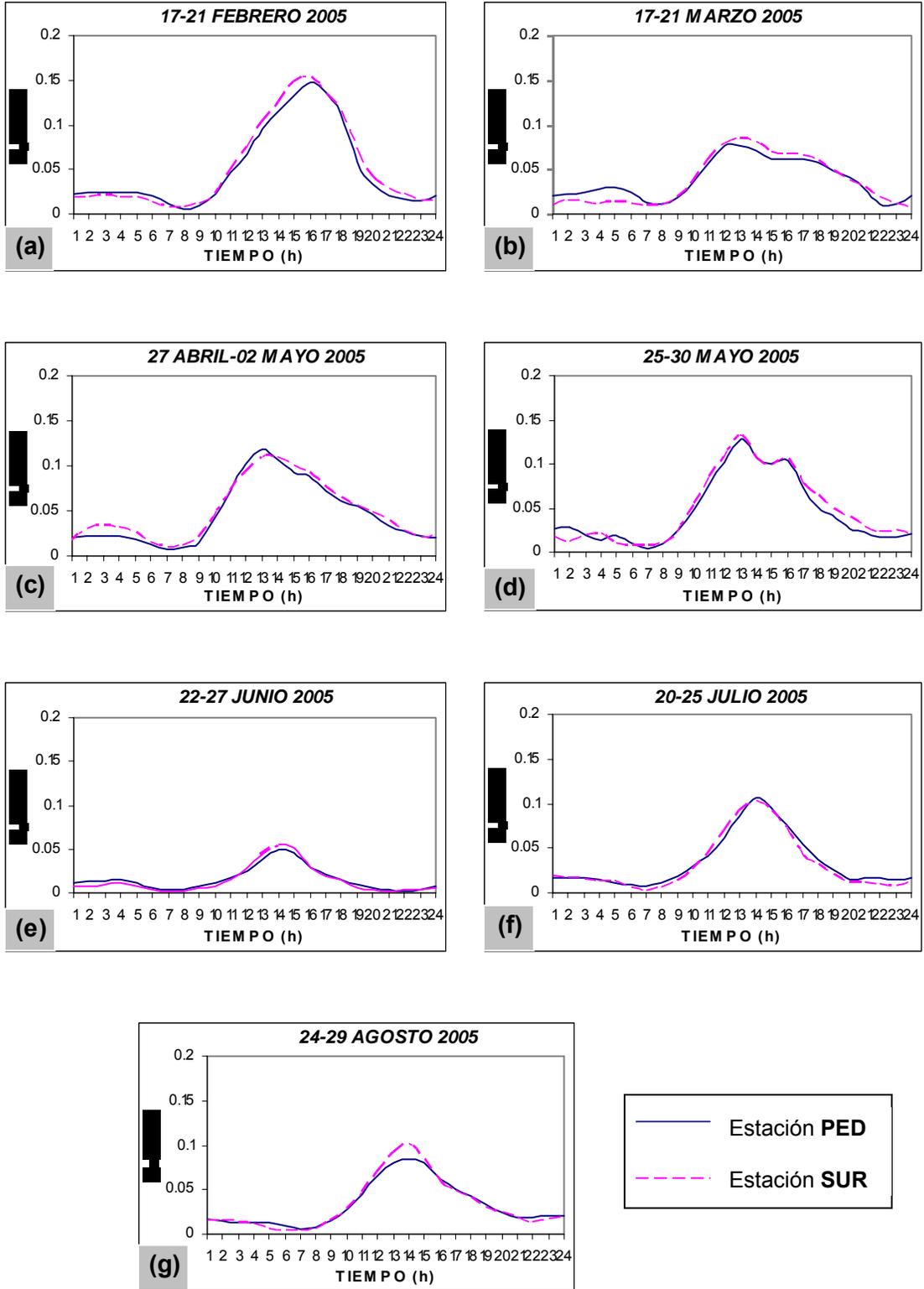


Figura 3.1. Serie de tiempo horaria de  $O_3$ .  
a)17-21 febrero, b)17-21 marzo, c)27 abril-02 mayo, d)25-30 mayo, e)22-27 junio, f)20-25 julio, g)24-29 agosto 2005.

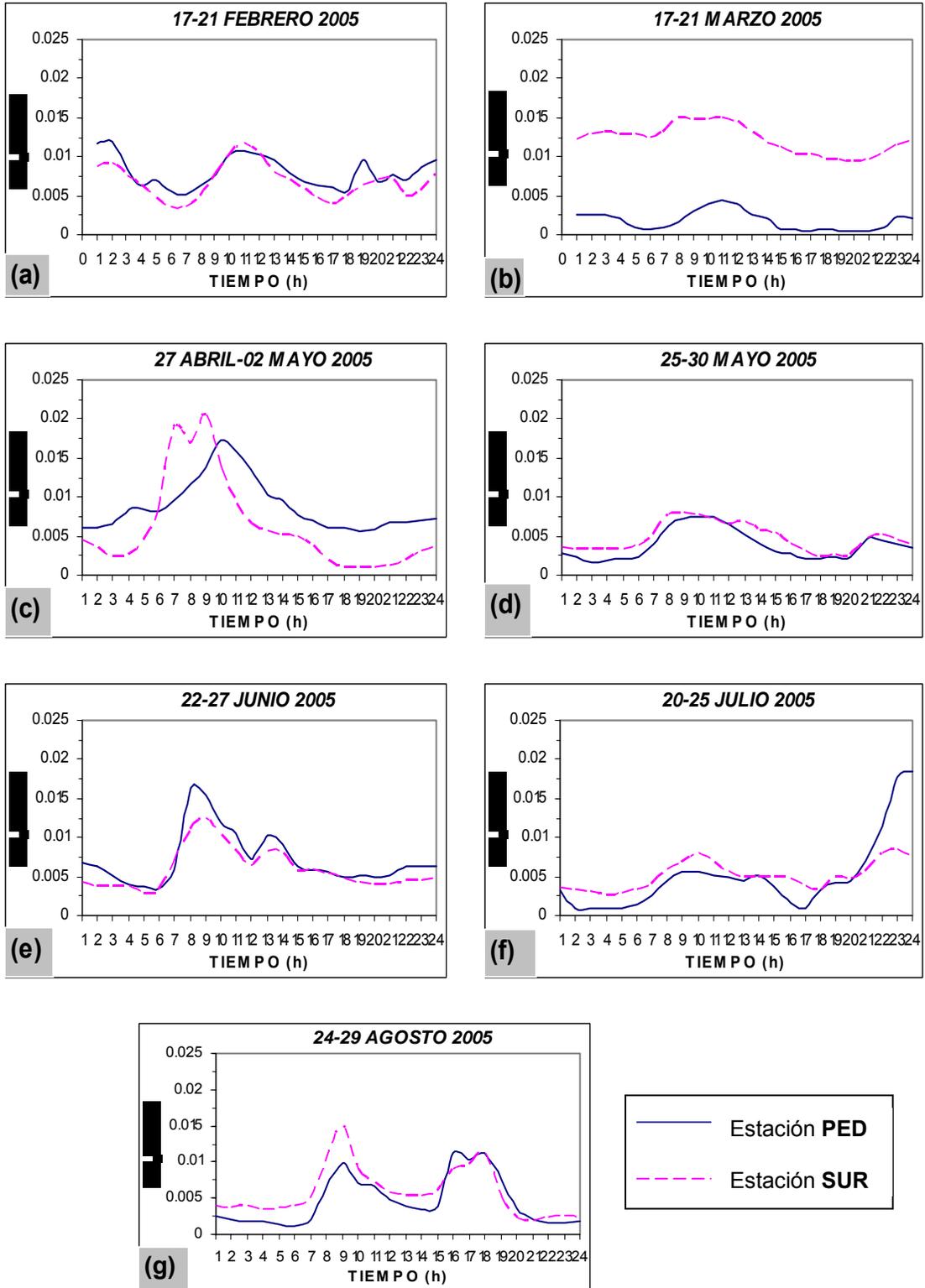


Figura 3.2. Serie de tiempo horaria de SO<sub>2</sub>.  
a)17-21 febrero, b)17-21 marzo, c)27 abril-02 mayo, d)25-30 mayo, e)22-27 junio, f)20-25 julio, g)24-29 agosto 2005.

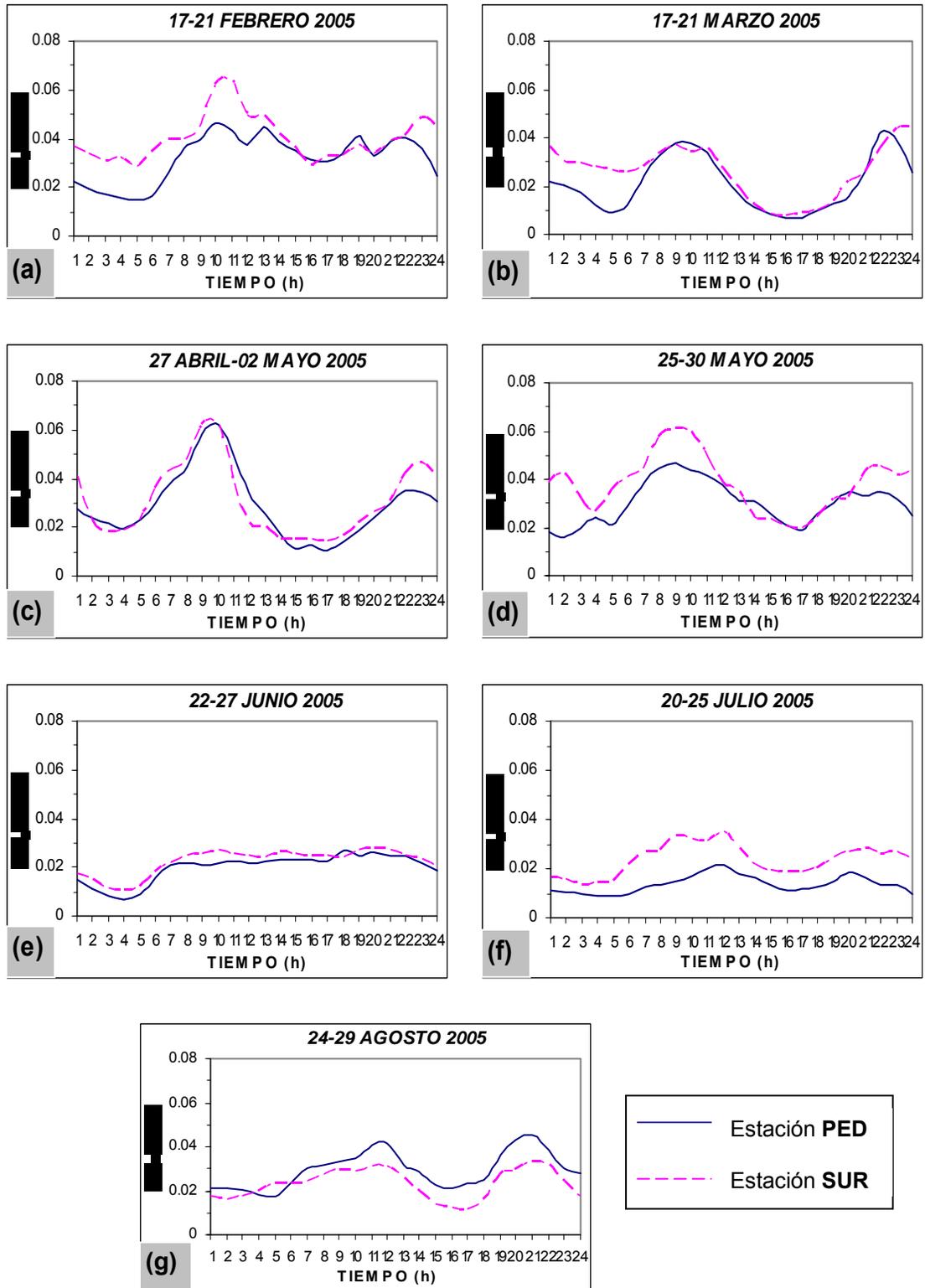


Figura 3.3. Serie de tiempo horaria de NO<sub>2</sub>.  
a)17-21 febrero, b)17-21 marzo, c)27 abril-02 mayo, d)25-30 mayo, e)22-27 junio, f)20-25 julio, g)24-29 agosto 2005.

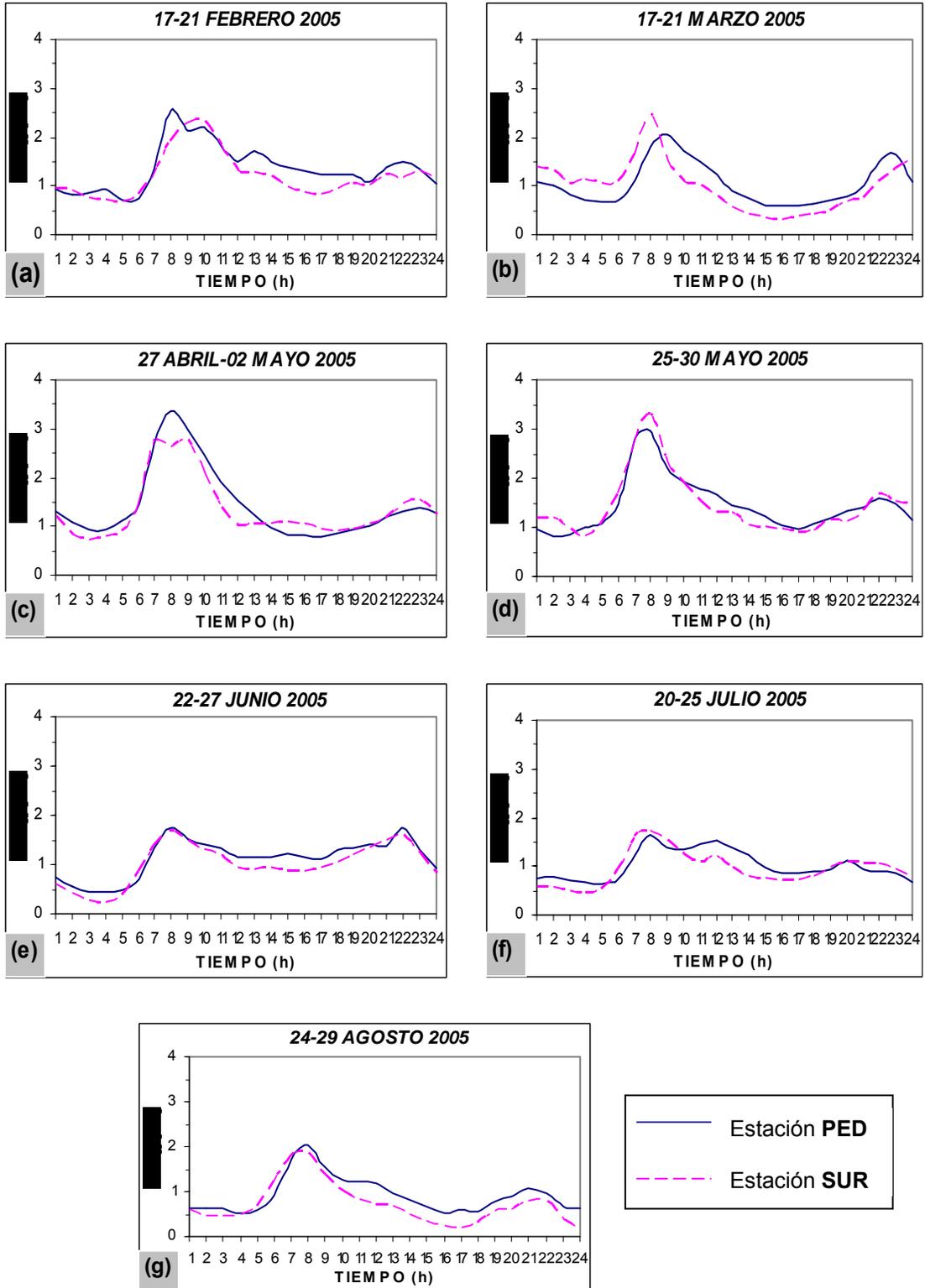


Figura 3.4. Serie de tiempo horaria de CO.  
a)17-21 febrero, b)17-21 marzo, c)27 abril-02 mayo, d)25-30 mayo, e)22-27 junio, f)20-25 julio, g)24-29 agosto 2005.

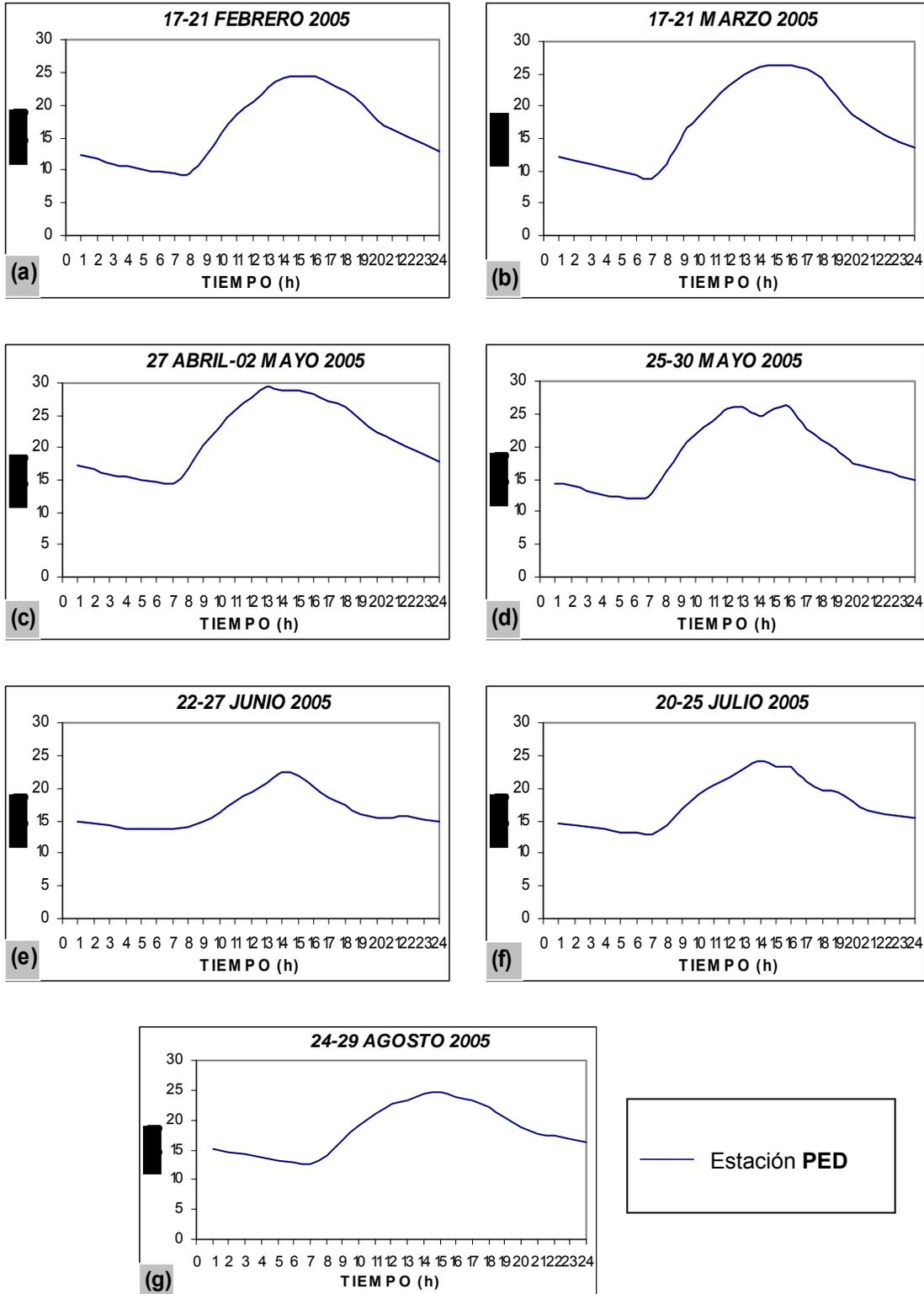


Figura 3.5. Serie de tiempo horaria de temperatura (PED).  
a)17-21 febrero, b)17-21 marzo, c)27 abril-02 mayo, d)25-30 mayo, e)22-27 junio, f)20-25 julio, g)24-29 agosto 2005.

2.- La concentración de SO<sub>2</sub> para la estación **SUR** fue elevada comparada con la de **PED**, esta diferencia posiblemente proviene del hecho de que la primera está más próxima al volcán Popocatépetl (19.02° N y 98.62° W). Debido a que no se contó con datos de velocidad y dirección del viento de la estación **SUR**, se recurrió a otra fuente, esto es, el Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED [<http://www.cenapred.gob.mx>], el cual reporta un número de emisiones importantes durante el período de muestreo realizado, así que, las concentraciones de SO<sub>2</sub> se incrementaron.

Como se ha visto, las variables meteorológicas juegan un papel importante en el transporte y limpieza de contaminantes. Por otro lado, la temperatura, humedad relativa y la radiación son causantes en muchos casos de la fotoquímica de la atmósfera. La Figura 3.6 muestra para el mes de febrero que el viento promedio dominante fue del NE y SO por ser un mes de transición; para los meses de marzo, abril y mayo fue del SO; en junio, julio y agosto se presentó con más frecuencia un viento proveniente de NO. Un análisis más detallado de esta variable podría ser útil además para ver la influencia de diferentes fuentes de emisión.

### 3.1.2. PARTÍCULAS

#### 3.1.2.1. COEFICIENTES DE DISPERSIÓN ( $\sigma_s$ ) Y ABSORCIÓN ( $\sigma_a$ ) DE LUZ, VISIBILIDAD ( $v$ ) Y ALBEDO DE DISPERSIÓN SIMPLE ( $\square$ ) DE LAS PARTÍCULAS

Conocer el comportamiento de las propiedades físicas de las partículas es de gran utilidad para entender (en una primera aproximación) aspectos de las fuentes emisoras. Así mismo, sirve para relacionar problemas de salud con presencia de partículas. El coeficiente de absorción indica fundamentalmente presencia de

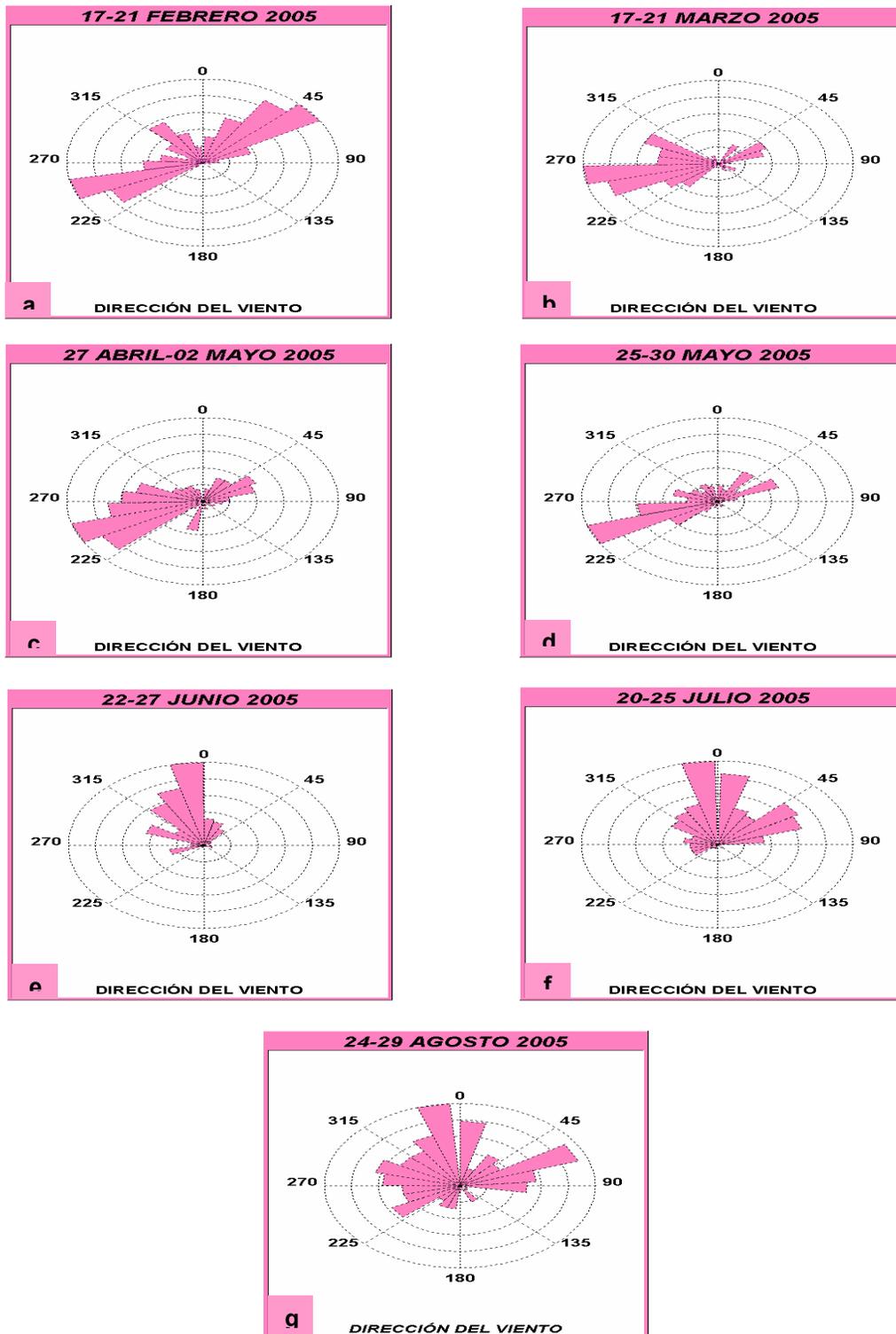


Figura 3.6. Distribución de la dirección del viento (**PED**).  
a)17-21 febrero, b)17-21 marzo, c)27 abril-02 mayo, d)25-30 mayo, e)22-27 junio,  
f)20-25 julio, g)24-29 agosto 2005.

hollín y el de dispersión, presencia de sulfatos. Las fuentes fijas no cambiaron en el tiempo que se realizó este estudio, específicamente en las inmediaciones del sitio de estudio; en cambio las fuentes móviles pueden cambiar (aunque no significativamente). En particular, durante el periodo de muestreo que en todos los casos fue de 5 a 6 días, no cambian. Al consultar los Inventarios de Emisiones de la ZMVM del 2002 y 2004 [<http://www.sma.df.gob.mx>], se reporta un parque vehicular de 3.6 y 3.7 millones de vehículos, respectivamente.

Por lo tanto, el comportamiento de las propiedades físicas estudiadas solo pueden cambiar de manera importante durante el día debido a las emisiones provenientes de las fuentes móviles, las cuales están relacionadas a los horarios de las actividades humanas, tal como se puede observar en el Apéndice A, donde las series de tiempo de las propiedades físicas medidas muestran ciclos diurnos, es decir, máximos durante el día y mínimos durante las primeras horas del día, esta tendencia se repite en todos los días del período de muestreo y en general en los siete meses de estudio.

Por otro lado, el análisis para las series de tiempo horaria donde se hace un promedio horario para todos los días (Figuras 3.7 a 3.13), proporciona una mejor información del comportamiento a lo largo del día de la concentración de partículas totales (partículas/cm<sup>3</sup>), coeficientes de dispersión y absorción de luz de las partículas ( $\sigma_s$  y  $\sigma_a$ ), en comparación con las series de tiempo por campaña (Apéndice A) ya que en ellas se pierde información relevante del comportamiento horario de las fuentes de emisión.

- Las series de tiempo horaria 3.7a - 3.13a y 3.7c-3.13c confirman la existencia de aerosoles primarios, lo cual se puede constatar con la presencia de dos máximos, el primero de ellos aparece entre las 07-10 horas y el segundo pico se registra por las noches entre las 20-22 horas, los cuales están relacionados con las actividades humanas, pues es aquí donde tienen lugar importantes emisiones

17-21 FEBRERO 2005

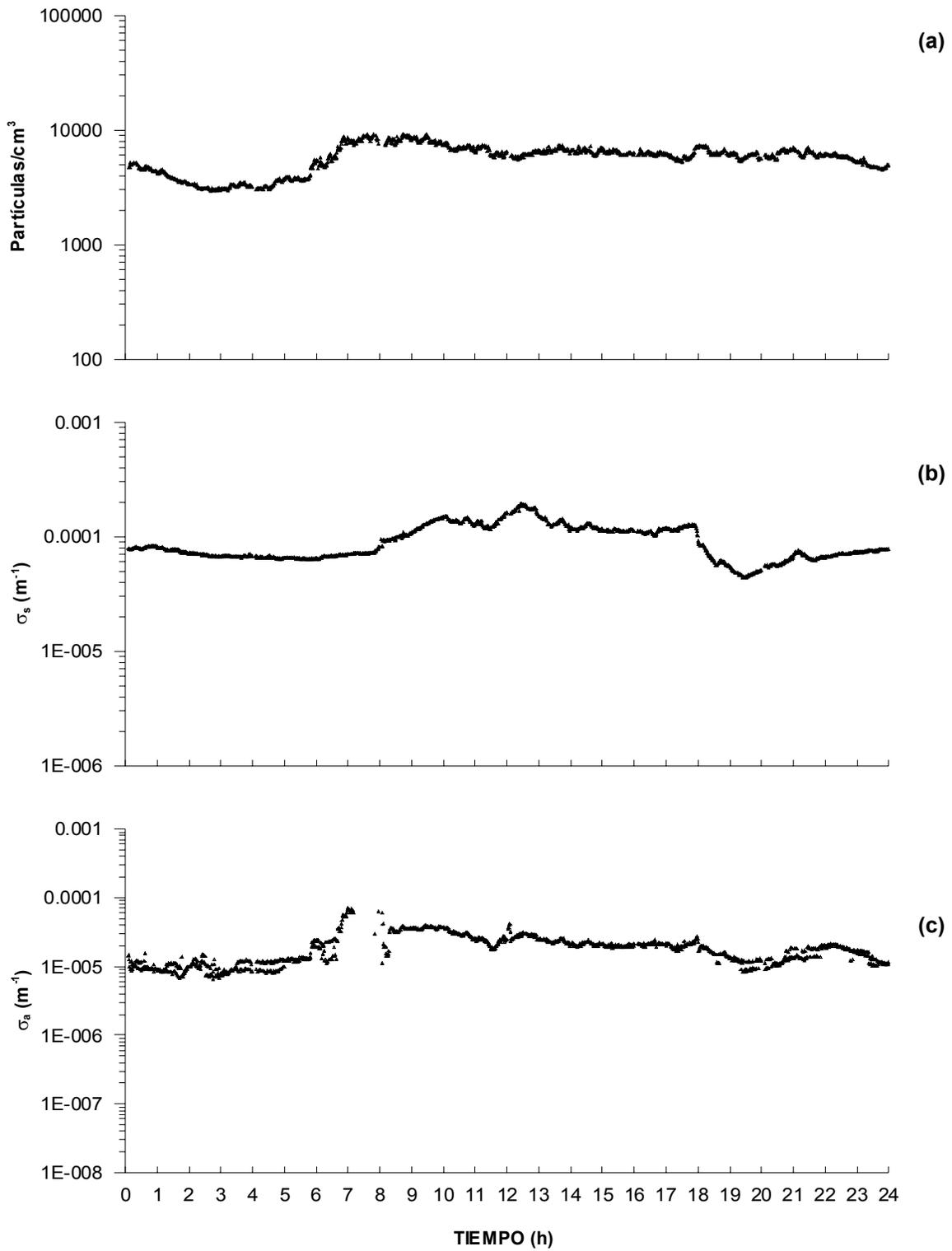


Figura 3.7. Serie de tiempo horaria de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

17-21 MARZO 2005

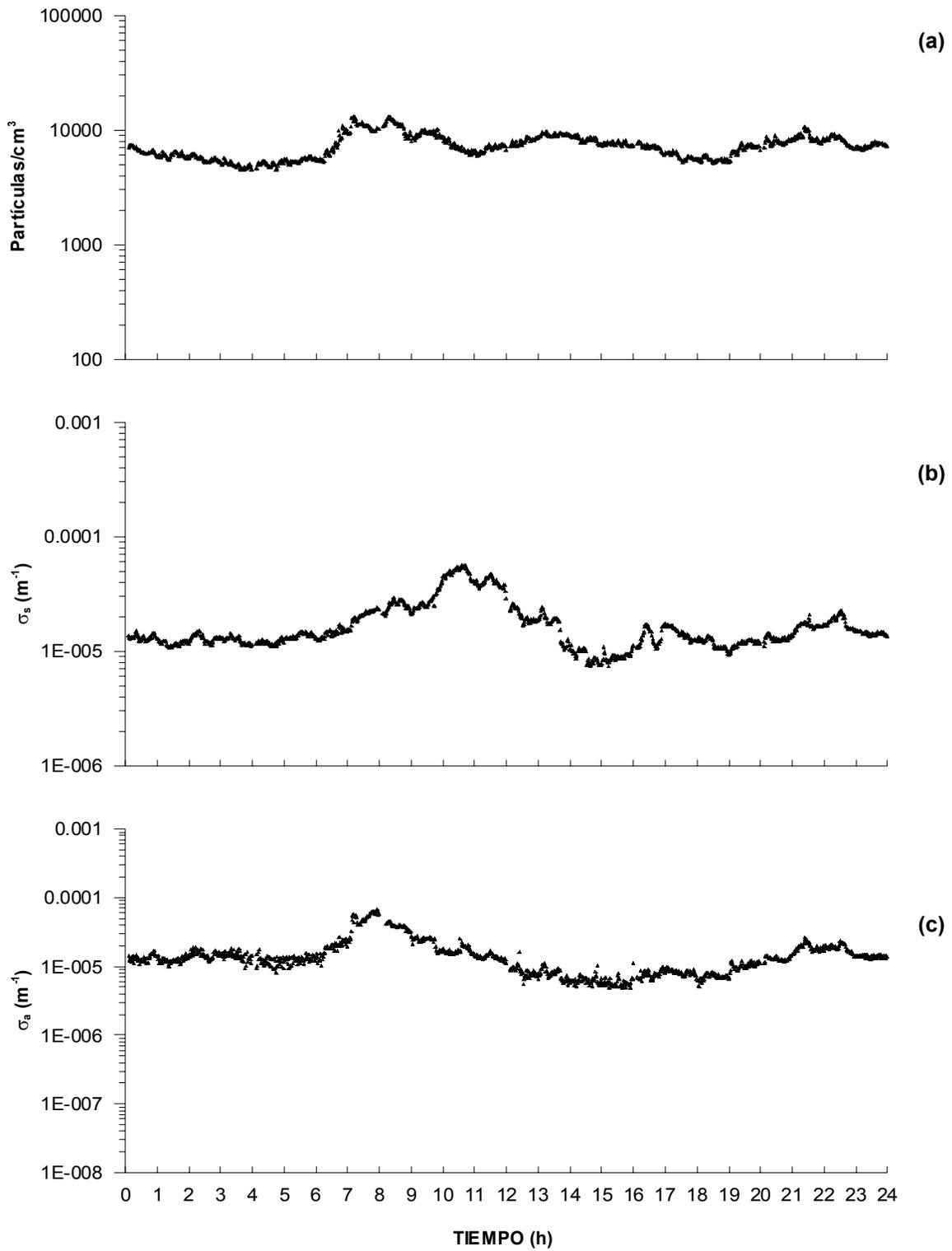


Figura 3.8. Serie de tiempo horaria de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

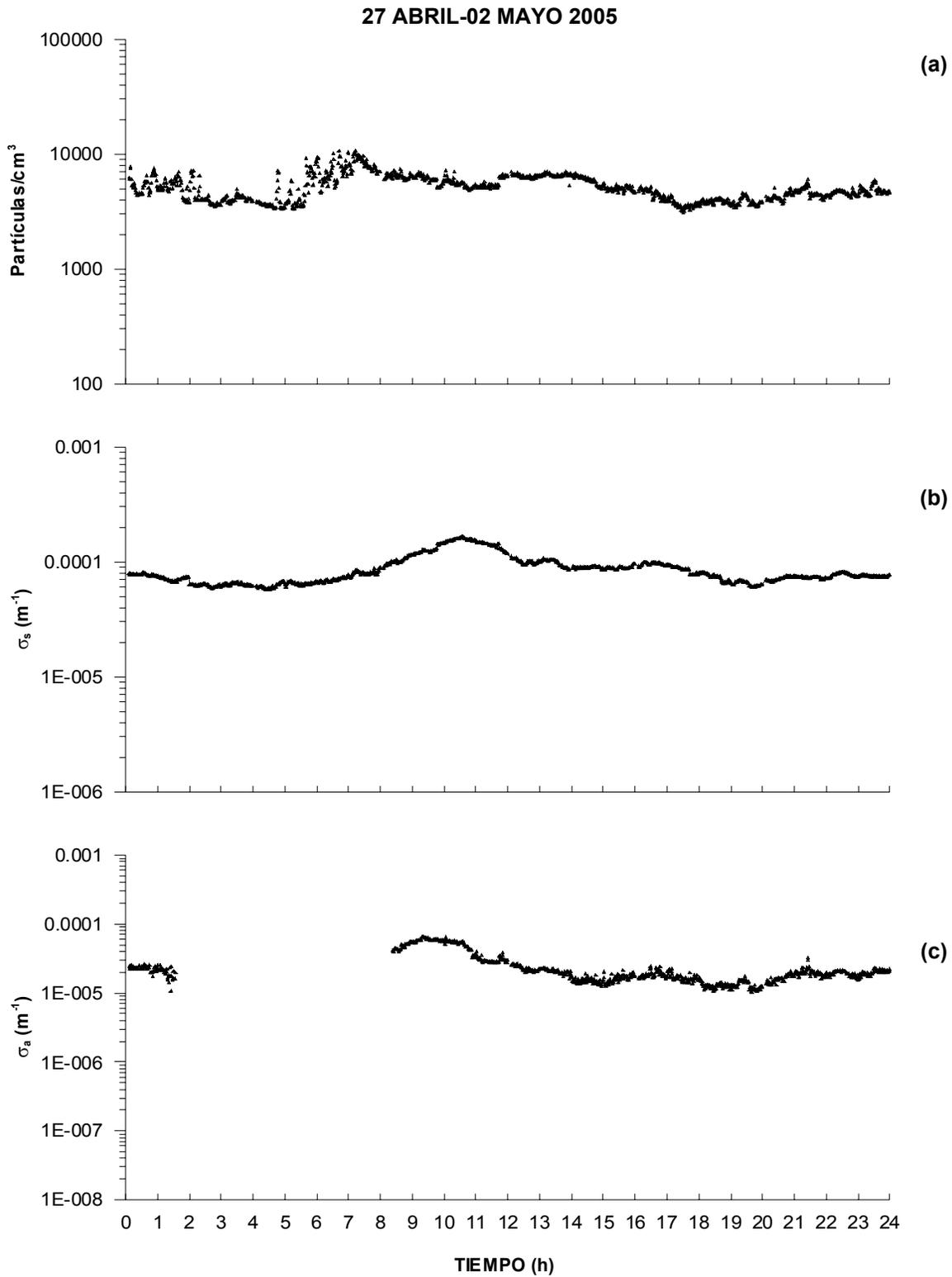


Figura 3.9. Serie de tiempo horaria de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

25-30 MAYO 2005

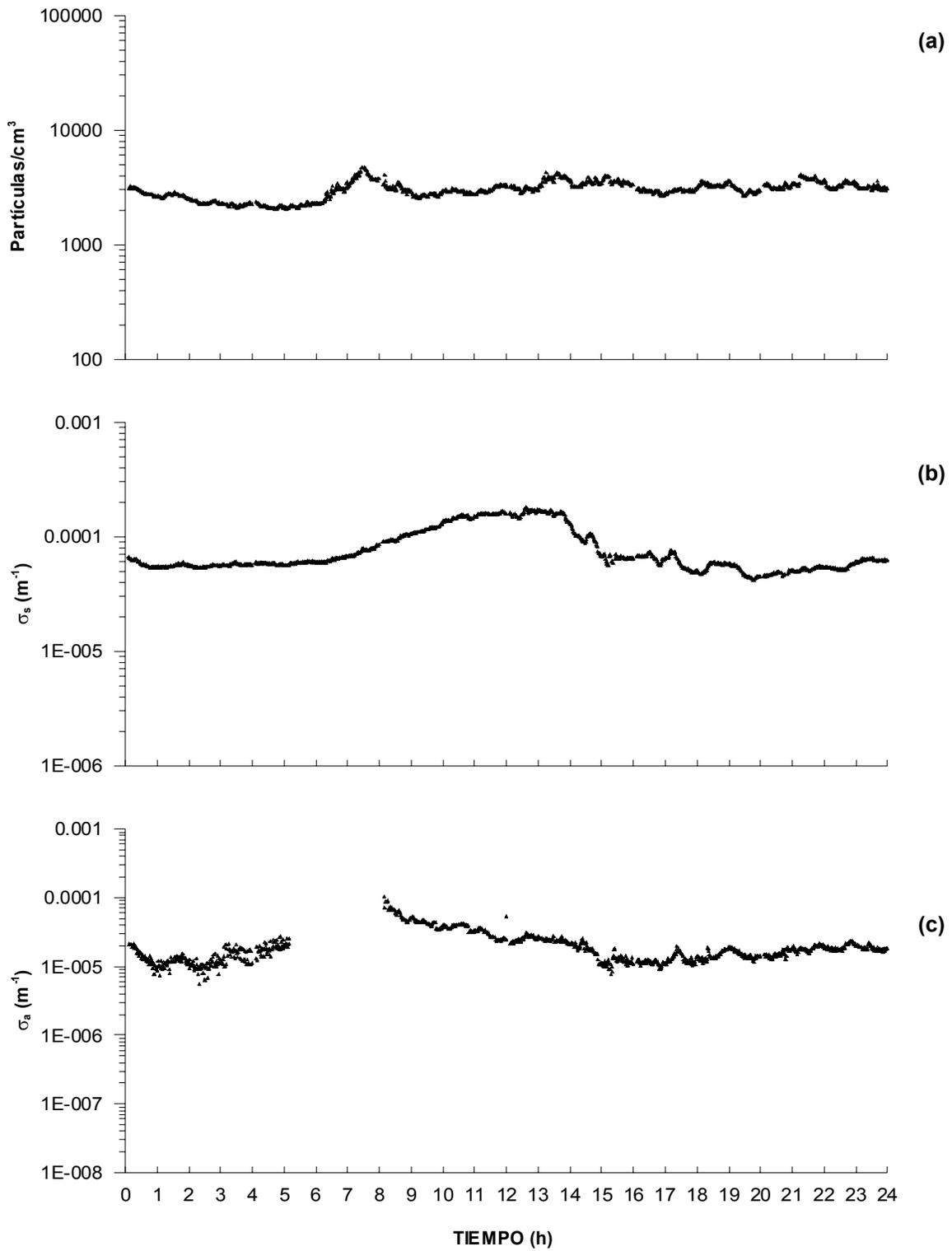


Figura 3.10. Serie de tiempo horaria de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

22-27 JUNIO 2005

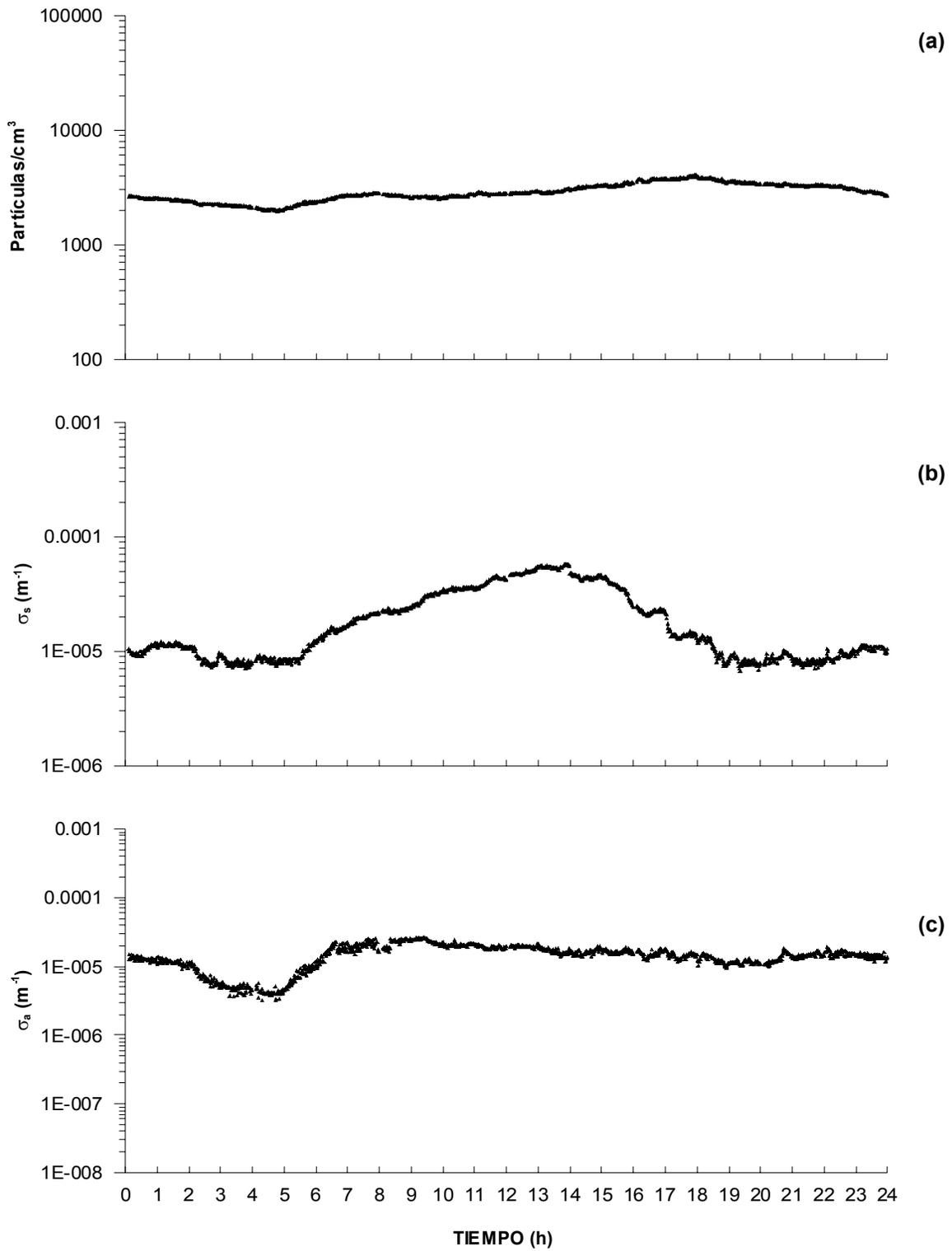


Figura 3.11. Serie de tiempo horaria de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

20-25 JULIO 2005

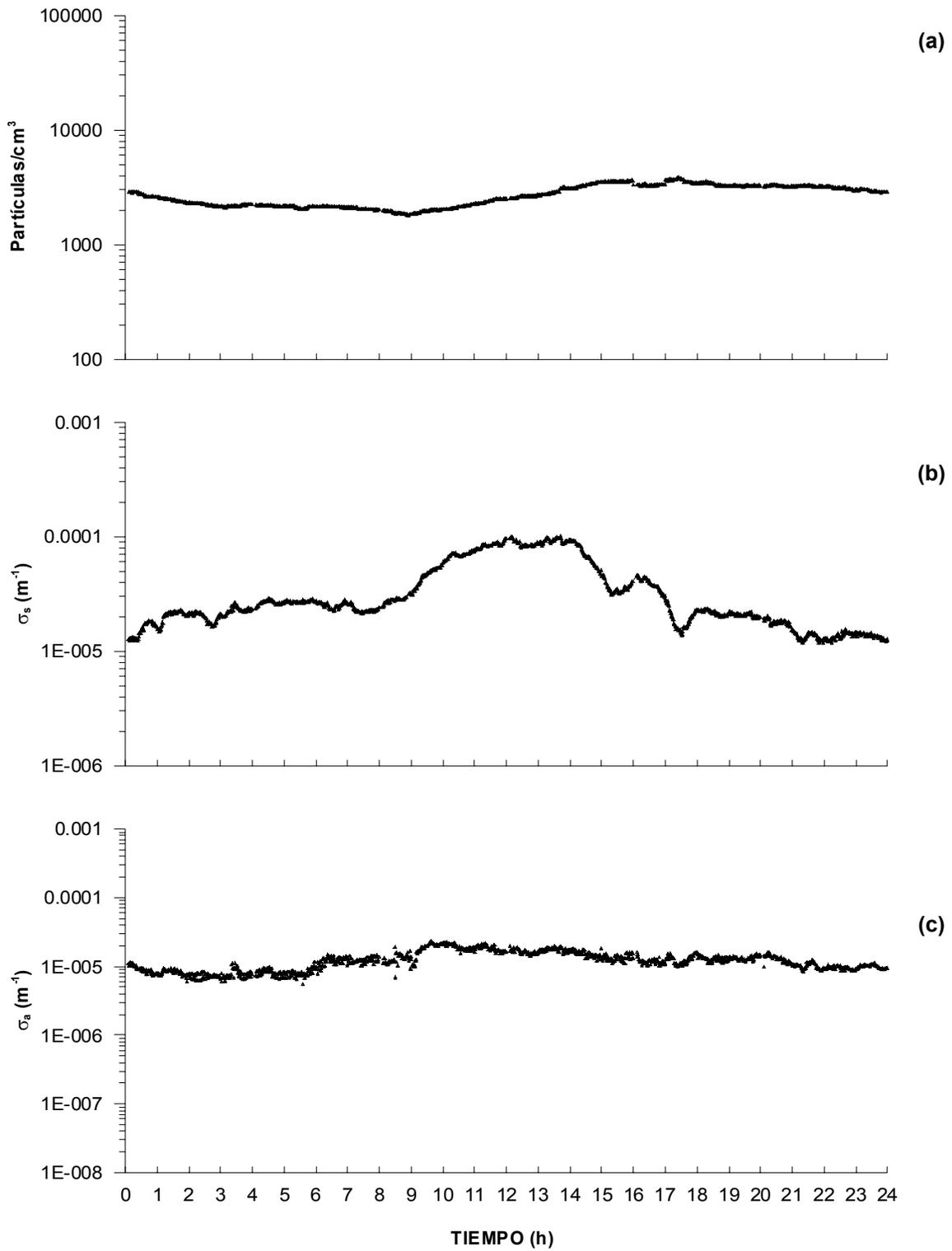


Figura 3.12. Serie de tiempo horaria de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

24-29 AGOSTO 2005

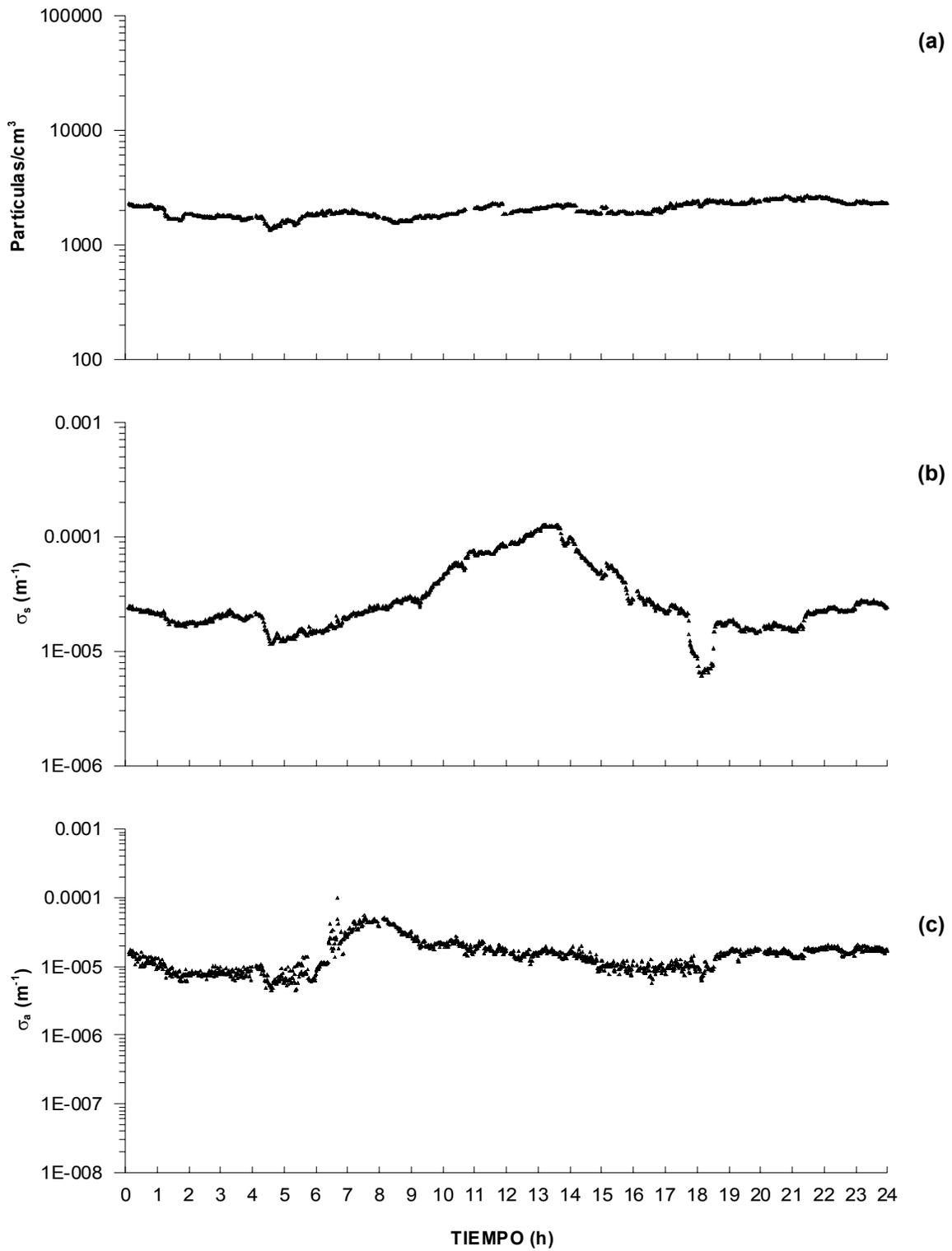


Figura 3.13. Serie de tiempo horaria de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

vehiculares, ya que la quema de combustibles fósiles genera aerosoles primarios como el hollín.

- Las Figuras 3.7b-3.13b indican la presencia de aerosoles secundarios, los cuales están generalmente constituidos por sulfatos y nitratos, estas partículas se forman al combinarse aerosoles primarios con partículas, gases o polvo presente en el aire (conversión de gas a partícula). En las series de tiempo correspondientes, se observa que los máximos valores se presentan entre las 12-14 horas, cuando tanto las concentraciones de gases y partículas como la cantidad de radiación solar son máximas.

- Es importante mencionar que en las Figuras 3.7c y 3.10c se presentan las series de tiempo horaria del coeficiente de absorción de las partículas ( $\sigma_a$ ), en ellas se observa una discontinuidad en los datos registrados entre las 06-09 horas, esto es debido a que los valores de transmitancia registrados por el PSAP son eliminados cuando éstos son menores a 0.5, ya que estos dejan de ser confiables (ver sección 1.7.4, página 23). En la Figura 3.9 sucedió lo mismo, solo que durante este período de muestreo (27 abril-02 mayo 2005) se presentó una interrupción del suministro eléctrico que provocó una pérdida de datos de las 02-09 horas, por lo que hubo una pérdida mayor de datos.

- En las Figuras A.1c-A.7c (ver Apéndice A) se presentan las series de tiempo por campaña, en las cuales sucede lo mismo que en el caso anterior, pero aquí se observa que la discontinuidad sucede en las primeras horas de los días de medición.

- La Figura 3.14 muestra los promedios de coeficientes de dispersión y absorción de luz de las partículas durante los siete meses de muestreo. Dichos coeficientes son mayores en los meses de sequía (febrero-mayo) que durante los meses de

lluvia (junio-agosto), aunque como se puede notar los valores de  $\sigma_a$  se mantienen prácticamente constantes en todos los meses porque las fuentes emisoras de aerosoles primarios son prácticamente las mismas durante este período de muestreo. Se observa en cambio, que en los valores de  $\sigma_s$  sí hay variación debido a la formación de aerosoles secundarios ( $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ ), formados principalmente a partir de partículas de combustión emitidas directamente por la fuente, formadas en la atmósfera por conversión de gas a partícula, por la presencia de polvo en el aire que se levanta desde la superficie de la tierra por los vientos, así como por emisiones naturales como las que provienen del volcán Popocatepetl y por la quema de biomasa.

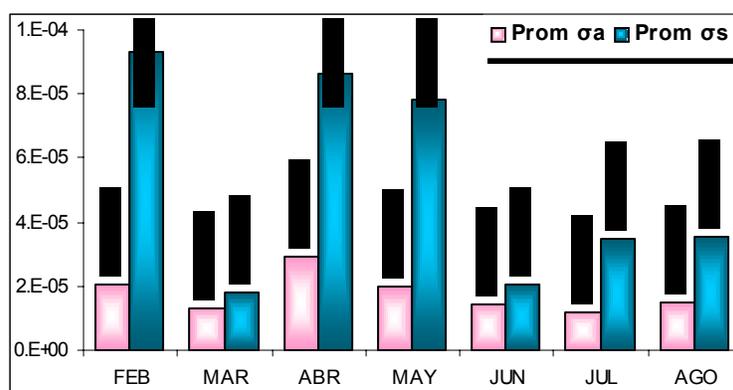


Figura 3.14. Promedio mensual de  $\sigma_s$  y  $\sigma_a$ .

- Debido a la presencia de vientos intensos registrados en el mes de marzo, ambos coeficientes se mantuvieron en sus niveles mínimos, comparado a los meses restantes, ya que el viento limpió el aire de la ZMVM, disminuyendo las concentraciones de partículas presentes en el aire capaces de absorber y dispersar luz, y con ello aumenta o disminuye la visibilidad, (la distancia a la cual un objeto es apenas discernible).

La visibilidad (V) está relacionada directamente con los coeficientes de absorción y dispersión de luz de las partículas presentes en la atmósfera. En la Tabla 3.2,

podemos notar que gracias a los vientos presentes en marzo, dichos coeficientes fueron mínimos lo que ayudó a que la visibilidad prevaleciente en este período fuera de 125.48 Km, que fue la máxima presentada durante los muestreos efectuados.

Seinfeld y Pandis (1998), reportan la media del rango visual para los Estados Unidos, donde los valores máximos se registran en los estados del oeste (Norte de Arizona, Colorado, Nevada, Oeste de Nvo. México, UTA y SO de Wyoming), en los cuales se alcanza una visibilidad de 150 Km. La media del rango visual es menor de 50 Km, a lo largo de la costa norte del pacífico, menos de 30 Km, en el valle central de California y menos de 15 Km, en la ciudad de Los Angeles. En general la región este de los Estados Unidos tiene un rango visual promedio de 30 Km (Figura 3.15). En la Tabla 3.2 el promedio de la visibilidad reportado (en el sitio de muestreo) es casi de 74 Km.

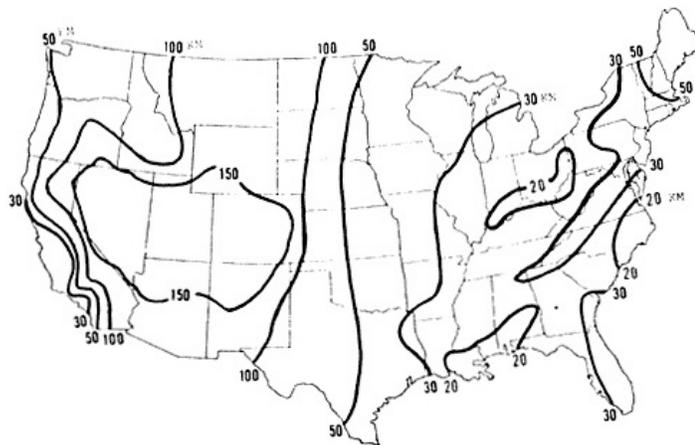


Figura 3.15. Rango visual promedio en los Estados Unidos. [Seinfeld y Pandis, 1998].

Por otro lado, Raga y colaboradores (2001), reportan que en la Ciudad de México el promedio de los coeficientes de dispersión y absorción de luz de las partículas fue de  $1.42 \times 10^{-4}$  y  $2.23 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , respectivamente, comparables con los obtenidos en este trabajo,  $\sigma_s = 5.24 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  y  $\sigma_a = 1.77 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ . Bryant y colaboradores

(2006) reportan valores promedio de coeficientes de dispersión y absorción, durante el verano, los cuales son  $4.42 \times 10^{-5}$  y  $6.34 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ , respectivamente. Molnár y Mészáros (2001) reportan que las partículas finas (0.1-1.0  $\mu\text{m}$ ) controlan la dispersión y absorción de luz causada por los aerosoles, ya que cerca del 90% de la extinción de luz es causada por partículas finas, mientras que la contribución de partículas gruesas (1-10  $\mu\text{m}$ ) es de 10%. El valor promedio del coeficiente de absorción en el intervalo fino fue de  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ .

El albedo de dispersión simple ( $\omega$ ), fracción de radiación solar que es dispersada hacia el espacio, es de utilidad para entender el impacto que tienen los aerosoles atmosféricos en el clima local y regional. Las partículas capaces de dispersar la luz incrementan el albedo, llegando menos radiación a la superficie de la tierra, y por ello disminuye la temperatura. Por el contrario, los aerosoles capaces de absorber radiación disminuyen el albedo, calientan la superficie terrestre y por lo tanto aumenta la temperatura. [Castro et al., 2003].

El valor del albedo de dispersión simple para áreas contaminadas está entre 0.8 y 0.9, y para áreas con poco efecto antropogénico se encuentra entre 0.9 y 0.95. La Tabla 3.2 reporta un promedio para el sitio CU del albedo de dispersión simple de 0.72, este valor es comparable con los reportados en otros estudios [Márquez et al., 2005; Raga et al., 2001], siendo estos de 0.7 y 0.8, respectivamente. Estos valores indican que las partículas presentes en la atmósfera tienen una fracción importante de material absorbente como el carbón negro.

En estudios recientes para la ZMVM [Castro et al., 2007] se reportan valores similares a los encontrados en este trabajo (Ver Tabla 3.3).

**Tabla 3.2 Propiedades físicas de los aerosoles en el sitio CU**

<b>Valor mensual de las propiedades físicas de los aerosoles atmosféricos</b>						
<b>Mes</b>	<b>partículas cm<sup>3</sup></b>	<b><math>\sigma_a</math> (m<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\sigma_s</math> (m<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\sigma_e</math> (m<sup>-1</sup>)</b>	<b>V (Km)</b>	<b><math>\omega</math></b>
Febrero	5828	2.04*10 <sup>-5</sup>	9.33*10 <sup>-5</sup>	1.14*10 <sup>-4</sup>	34.42	0.82
Marzo	7224	1.32*10 <sup>-5</sup>	1.80*10 <sup>-5</sup>	3.12*10 <sup>-5</sup>	125.48	0.58
Abril	5080	2.94*10 <sup>-5</sup>	8.64*10 <sup>-5</sup>	1.07*10 <sup>-4</sup>	42.03	0.83
Mayo	2966	2.00*10 <sup>-5</sup>	7.81*10 <sup>-5</sup>	9.81*10 <sup>-5</sup>	39.86	0.80
Junio	3098	1.41*10 <sup>-5</sup>	2.06*10 <sup>-5</sup>	3.47*10 <sup>-5</sup>	112.74	0.59
Julio	2662	1.20*10 <sup>-5</sup>	3.49*10 <sup>-5</sup>	4.69*10 <sup>-5</sup>	83.49	0.74
Agosto	2088	1.47*10 <sup>-5</sup>	3.55*10 <sup>-5</sup>	5.02*10 <sup>-5</sup>	77.87	0.71
<b>Promedio</b>	<b>4135±1919</b>	<b>1.77*10<sup>-5</sup>±6.12*10<sup>-6</sup></b>	<b>5.24*10<sup>-5</sup>±3.23*10<sup>-5</sup></b>	<b>6.88*10<sup>-5</sup>±3.59*10<sup>-5</sup></b>	<b>73.70±36.54</b>	<b>0.72±0.10</b>

**Tabla 3.3 Comparación de propiedades físicas de los aerosoles en otras campañas. Sitios Ávila Camacho y Santa Ana.**

<b>Valor promedio de las propiedades físicas de los aerosoles atmosféricos</b>						
<b>Sitio</b>	<b>partículas cm<sup>3</sup></b>	<b><math>\sigma_a</math> (m<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\sigma_s</math> (m<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\sigma_e</math> (m<sup>-1</sup>)</b>	<b>V (Km)</b>	<b><math>\omega</math></b>
<b>S.A.</b> 07-30 abril 2003	8853±5673	9.75x10 <sup>-5</sup> ±6.18x10 <sup>-5</sup>	5.45x10 <sup>-4</sup> ±2.80x10 <sup>-4</sup>	6.30x10 <sup>-4</sup> ±3.20x10 <sup>-4</sup>	8.04±5.15	0.84±0.13
<b>A.C.</b> 15-26 marzo 2004	5719±3773	4.45x10 <sup>-5</sup> ±2.63x10 <sup>-5</sup>	4.90x10 <sup>-5</sup> ±2.87x10 <sup>-5</sup>	9.35x10 <sup>-5</sup> ±5.11x10 <sup>-5</sup>	58.73±39.47	0.53±0.11
<b>CU</b> 27 abril-02 mayo 2005	5080±2618	2.94x10 <sup>-5</sup> ±1.62x10 <sup>-5</sup>	8.64x10 <sup>-5</sup> ±2.89x10 <sup>-5</sup>	1.07x10 <sup>-4</sup> ±4.21x10 <sup>-5</sup>	42.03±15.98	0.83±0.12

Aunque el sitio Santa Ana, **S.A.**, y Ávila Camacho, **A.C.**, están fuera de la ciudad (ver sección 1.1.1.), los valores reportados de las propiedades físicas en ambos sitios fueron semejantes a los obtenidos en **CU**. En el caso de **S.A.**, esto sucede debido a que los vientos predominantes durante esta época del año impactan en el SO de la ciudad, trayendo consigo contaminantes desde la ciudad, además de la contaminación producida localmente. Esto sugiere que los contaminantes producidos en la ciudad son exportados hacia los alrededores.

Mientras que en el caso de **A.C.**, el albedo de dispersión simple, al compararlo contra el reportado en **CU**, notamos que fue de 0.53, menor a lo esperado, ya que al estar el sitio **A.C.** más alejado de la ciudad, se espera tenga poca influencia antropogénica. Un valor de  $\omega=0.53$ , indica que la presencia de contaminantes no solo son transportados desde la ciudad, sino que también hay contaminación local, debido a la quema de biomasa. Una parte importante de la población utiliza leña como combustible para cocinar los alimentos por lo cual hay una emisión de partículas con un alto contenido de carbón lo que hace que el coeficiente de absorción sea grande.

Al ser **A.C.** y **S.A.** poblaciones semirurales, y dada la época del año en que fueron realizadas ambas campañas, también hay quema de biomasa cuando se prepara la tierra para actividades agrícolas (marzo-abril).

Por otro lado, el promedio del albedo de dispersión simple para una zona rural (estación de monitoreo húngara K-puszta, en el claro de un bosque mixto, Great Hungarian Plain) reportado por Molnár y Mészáros (2001) es de 0.92, el cual corresponde a un área con poca influencia antropogénica.

### 3.1.2.2. TAMAÑO DE PARTÍCULA

La Figura 3.16 muestra que hay una clara diferencia en la concentración total de partículas (diámetros en un intervalo de 0.01-3  $\mu\text{m}$ ) entre los meses de sequía y los de lluvia. Para los meses de febrero, marzo y abril las concentraciones totales fueron altas en comparación con los otros meses (mayo, junio, julio y agosto).

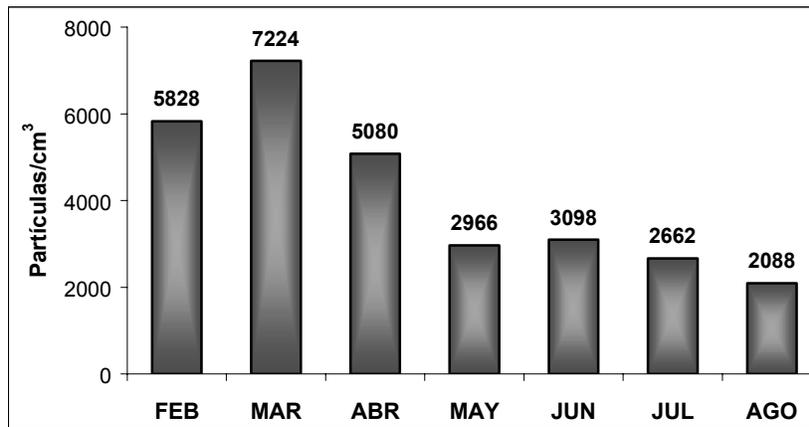


Figura 3.16. Concentración de partículas de 0.01-3  $\mu\text{m}$ .

La Figura 3.17 muestra la concentración de partículas por distribución de tamaño, esto es, partículas con diámetros de 0.3, 0.5, 1, 5, 10 y 25  $\mu\text{m}$  medidas por el contador óptico de partículas (LASAIR II). En marzo, aunque los vientos ayudaron a disminuir la concentración de gases y partículas, las mediciones de partículas pequeñas (0.01-3  $\mu\text{m}$ ) con el CPC fueron grandes, comparadas al resto de los meses, lo cual es contrario a lo que muestra la Figura 3.17, pues la concentración de partículas para el intervalo de tamaño de 0.3-25  $\mu\text{m}$ , fue menor en marzo que en los meses restantes. Lo que indica que probablemente los vientos limpiaron la atmósfera de partículas “viejas” y que el valor máximo registrado en marzo en la Figura 3.16 se debe a la liberación de emisiones “frescas” provenientes básicamente de procesos de combustión, ya que hay una constante emisión de contaminantes a lo largo del día, y para que los contaminantes puedan ser

transportados por los vientos fuera de la ciudad, deben logran llegar hasta la troposfera libre. [Castro et al., 2006]

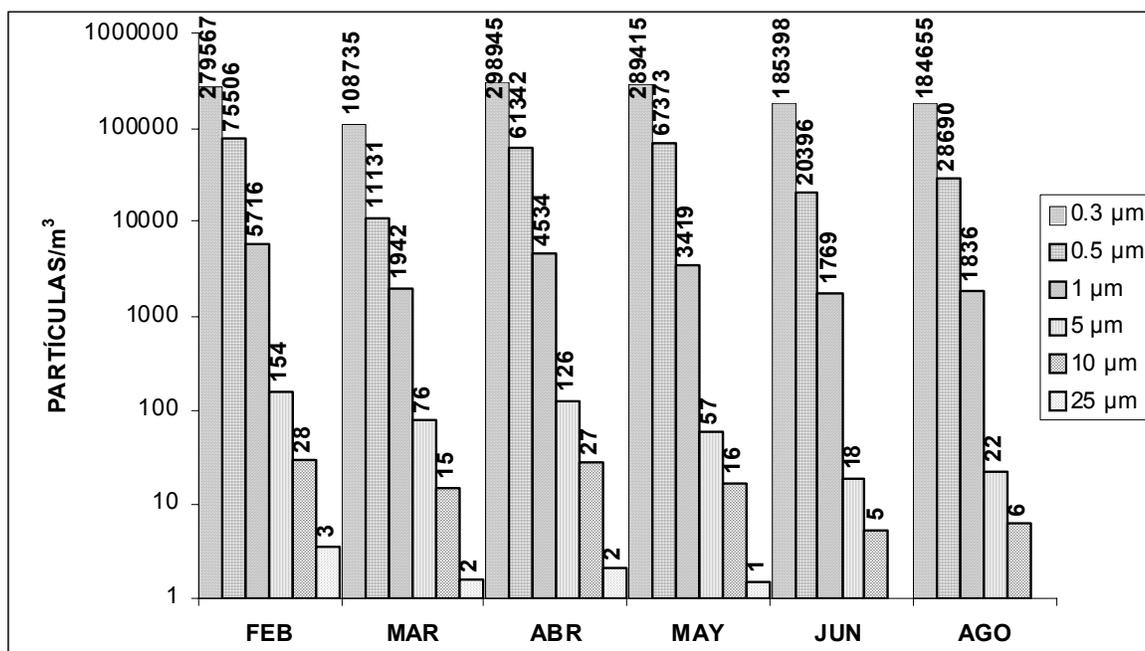


Figura 3.17. Concentración de partículas por distribución de tamaño.

La Figura 3.17 muestra que el valor de la concentración de las partículas grandes (5-25 μm) son poco importantes, todo lo contrario sucede con partículas pequeñas (0.3, 0.5 y 1 μm), las cuales tienen altas concentraciones, por lo que se hace importante el estudio de las PM<sub>1</sub> (partículas cuyo diámetro es menor de 1 μm), porque tienen un efecto importante en la salud de los seres vivos y en su entorno.

### 3.2. CONCLUSIONES

- Las propiedades físicas de los aerosoles varían notablemente al cambiar de la temporada de sequía a la de lluvias, lo que indica que dichas propiedades están fuertemente relacionadas con la temporada del año en que se realice el estudio.
- Existe una dependencia directa entre la meteorología del lugar y la concentración de los contaminantes, ya que tanto la temporada de lluvias como la velocidad del viento ayudaron a disminuir los niveles de éstos. Tales fenómenos meteorológicos ayudaron a registrar los valores máximos de visibilidad.
- Aunque las velocidades de viento grandes en general ayudaron a abatir la concentración de contaminantes (gases y partículas), la concentración de partículas pequeñas (0.01-3  $\mu\text{m}$ ) fue grande, contrario a lo esperado, sin embargo, en la ciudad existe una constante generación y emisión de contaminantes hacia la atmósfera.
- Al comparar los datos obtenidos en este estudio contra los de los otros dos sitios, se observa que los valores reportados en ellos son semejantes a los de **CU**, pese a que se trata de sitios semirurales y que están localizados en las inmediaciones de la ciudad, lo que implica que existe un transporte de los contaminantes generados en la ciudad hacia sus alrededores. En el caso de **A.C.** además hay una componente importante de quema de biomasa lo que trae como consecuencia que tengan un alto contenido de carbón y por ende el valor del coeficiente de absorción aumenta.
- Las partículas al dispersar o absorber parte de la energía luminosa que incide sobre ellas, tienen un impacto en el clima, ya sea disminuyendo o aumentando la temperatura del lugar y modificando el clima local y regional.

### **3.3. RECOMENDACIONES**

- Actualmente existen varios estudios que tratan de ver la influencia de los aerosoles en el clima local y regional. Realizar estudios como éste cubriendo la ZMVM podrían ser de gran utilidad para ver esta influencia.
- El muestreo se debe hacer durante los 12 meses del año para tener una mejor caracterización de los parámetros medidos y observar con más claridad si hay los cambios mensuales o estacionales, además de ver su impacto en la atmósfera.

## **REFERENCIAS**

- Baumgardner D, Raga G.B., Kok G., Ogren J., Rosas I., Báez A. y Novakov T. On the evolution of aerosol properties at a mountain site above México City. *Journal of Geophysical Research*, 105:22243-22253, 2000.
- Bond T.C., Anderson T.L. y Campbell D. Calibration and Intercomparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 30:582-600, 1999.
- Bryant C., Eletheriadis K., Smolik J., Zdimal V., Mihalopoulos N., Colbeck I. Optical properties of aerosols over the eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 40: 6229-6244, 2006.
- Castro T., Raga G.B., Baumgardner D. ¿Puede la contaminación atmosférica generada en la zona metropolitana de la ciudad de México afectar lugares más allá de sus fronteras?. *Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencia*, Vol. 54. No.1. 54-59, México, 2003.
- Castro T., Salcido A. Influencia de la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de la Ciudad de México. *Contaminación Atmosférica V*, García-Colín Scherer L. y Varela Ham J.R., compiladores. El Colegio Nacional. México, 2006.
- Castro T., Salcido A, Saavedra M.I, Celada A.T, Mamani-Paco R., Martínez-Arroyo M. A., Trejo N. Impact of pollutants from Mexico City Metropolitan Area on three neighboring boundary sites. *Congreso Internacional European Geosciences Union*, 24-29 Abril, Viena, Austria, 2007.
- Colín Baird. *Química Ambiental. REVERTÉ*. España, 2001.

- Condensation Particle Counter. Instruction Manual. Model 3010, TSI Inc., USA, 2000.
- Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, And Measurement of Airborne Particles. A Willey-Interscience Publication, John Wiley And Sons, Inc., U.S.A., 1999.
- <http://www.inegi.gob.mx>, II Censo de población y Vivienda, 2005. 20 febrero 2007.
- <http://www.sma.df.gob.mx>, Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002 y 2004 y Base de Datos del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). 20 febrero 2007.
- <http://www.cenapred.gob.mx>, 20 febrero 2007. Monitoreo Volcánico, Reporte del volcán Popocatepetl del mes de abril del 2005. 20 de febrero de 2007.
- Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. <http://www.sma.df.gob.mx>, 20 febrero 2007.
- Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2004. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal. <http://www.sma.df.gob.mx>, 20 febrero 2007.
- Jacobson M.Z. Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation. Cambridge University Press UK., 2002.

- Jiménez J.C., Raga G.B., Baumgardner D., Castro T., Rosas I., Báez A., Morton O. On the composition of airborne particles influenced by emissions of the volcano Popocatépetl in México. *Natural Hazards*, 31: 21-37, 2004.
- LASAIR II. Operators Manual. Model 310A, Particle Measuring Systems Inc., USA, 2002.
- Márquez C., Castro T., Muhlía A., Moya M., Martínez-Arroyo A., Báez A. Measurement of aerosol particles, gases and flux radiation in the Pico de Orizaba Park, and this relationship to air pollution transport. *Atmospheric Environment*, 39: 3877-3890, 2005.
- Molnár A., Mészáros E. The relation between the size and chemical composition of aerosol particles and their optical properties. *Atmospheric Environment*, 35: 5053-5058, 2001.
- Nephelometer. Operation Procedures. M903, Radiance Research, Seattle, WA, U.S.A.
- Particle Soot/Absorption Photometer. Operation Procedures. Radiance Research, Seattle, WA, U.S.A.
- Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010). Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. [www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx), 20 febrero 2007.
- Raga G.B., Castro T., Baumgardner D. The impact of megacity pollution on local climate and implications for the regional environment: Mexico City. *Atmospheric Environment*, 35:1805-1811, 2001.

- Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Ed. Wiley, New York, 1998.
- Shendrikar A.D., Steinmetz W.K. Integrating nephelometer measurements for the airborne fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) mass concentrations. Atmospheric Environment, 37: 1383-1392, 2003.
- Turco R.P. Earth Under Siege: From Air Pollution to Global Change. Oxford University Press. New York, 1997.

APÉNDICE A.

SERIES DE TIEMPO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AEROSOLES

7-21 FEBRERO 2005

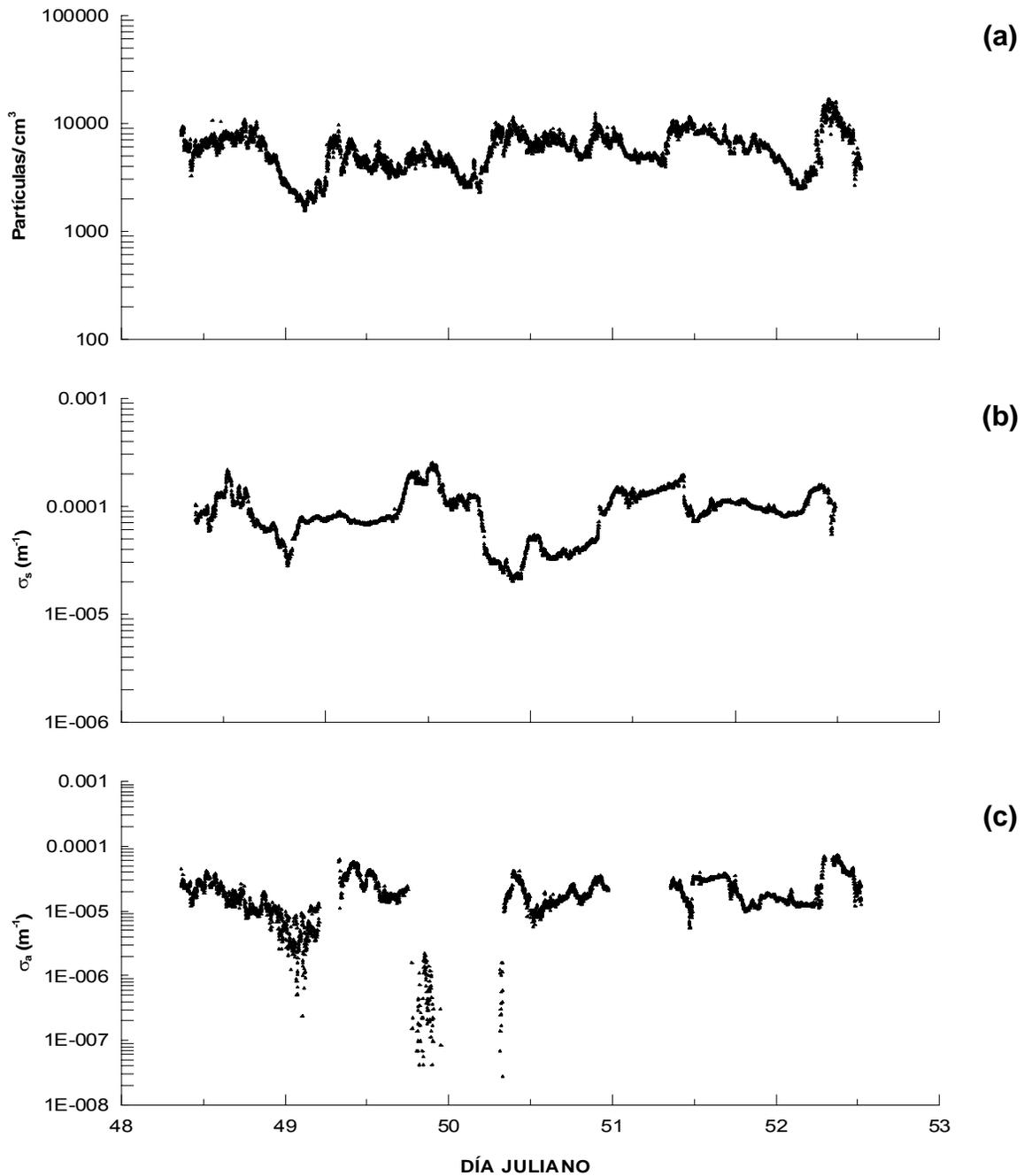


Figura A.1. Serie de tiempo de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

17-21 MARZO 2005

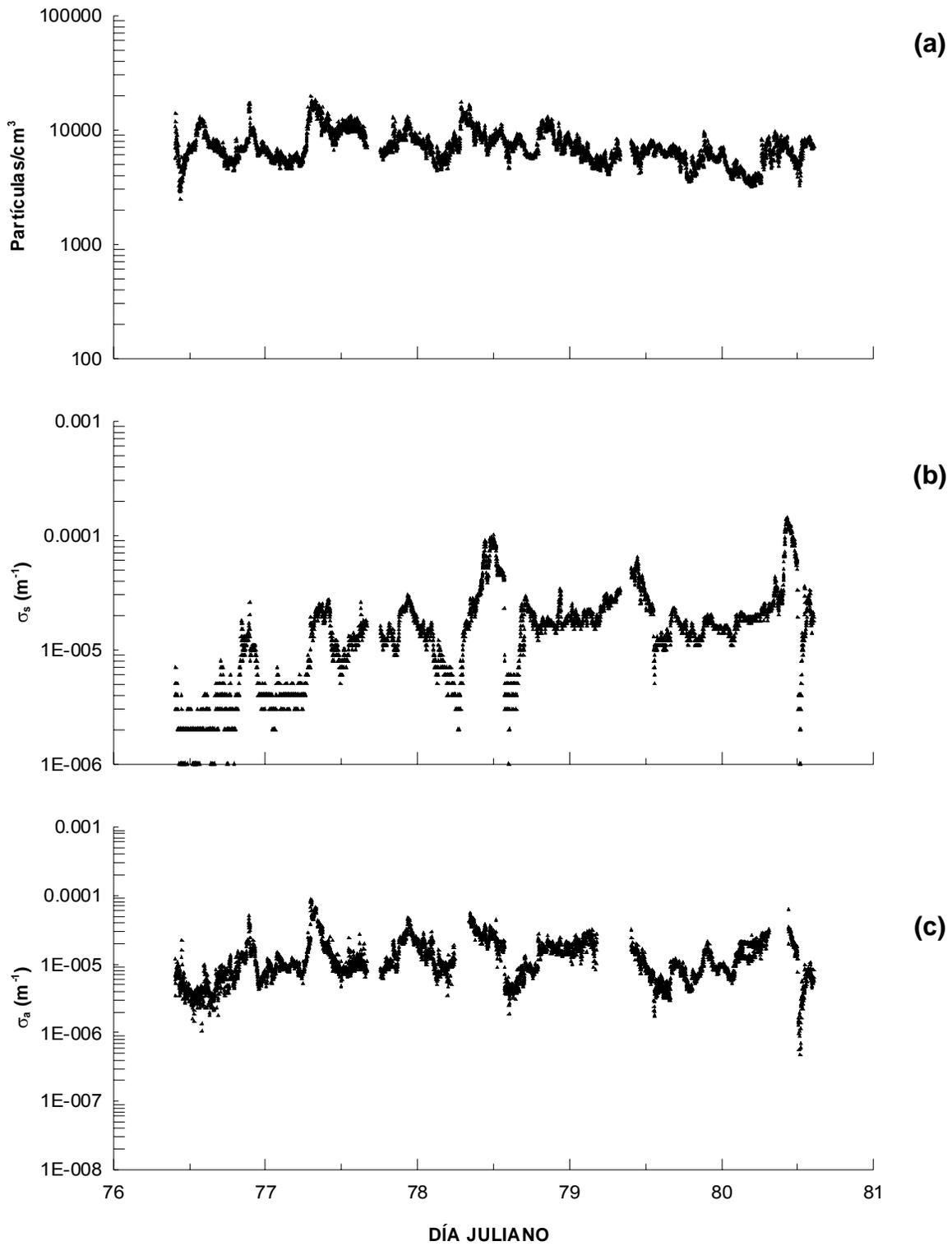


Figura A.2. Serie de tiempo de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

27 ABRIL-02 MAYO 2005

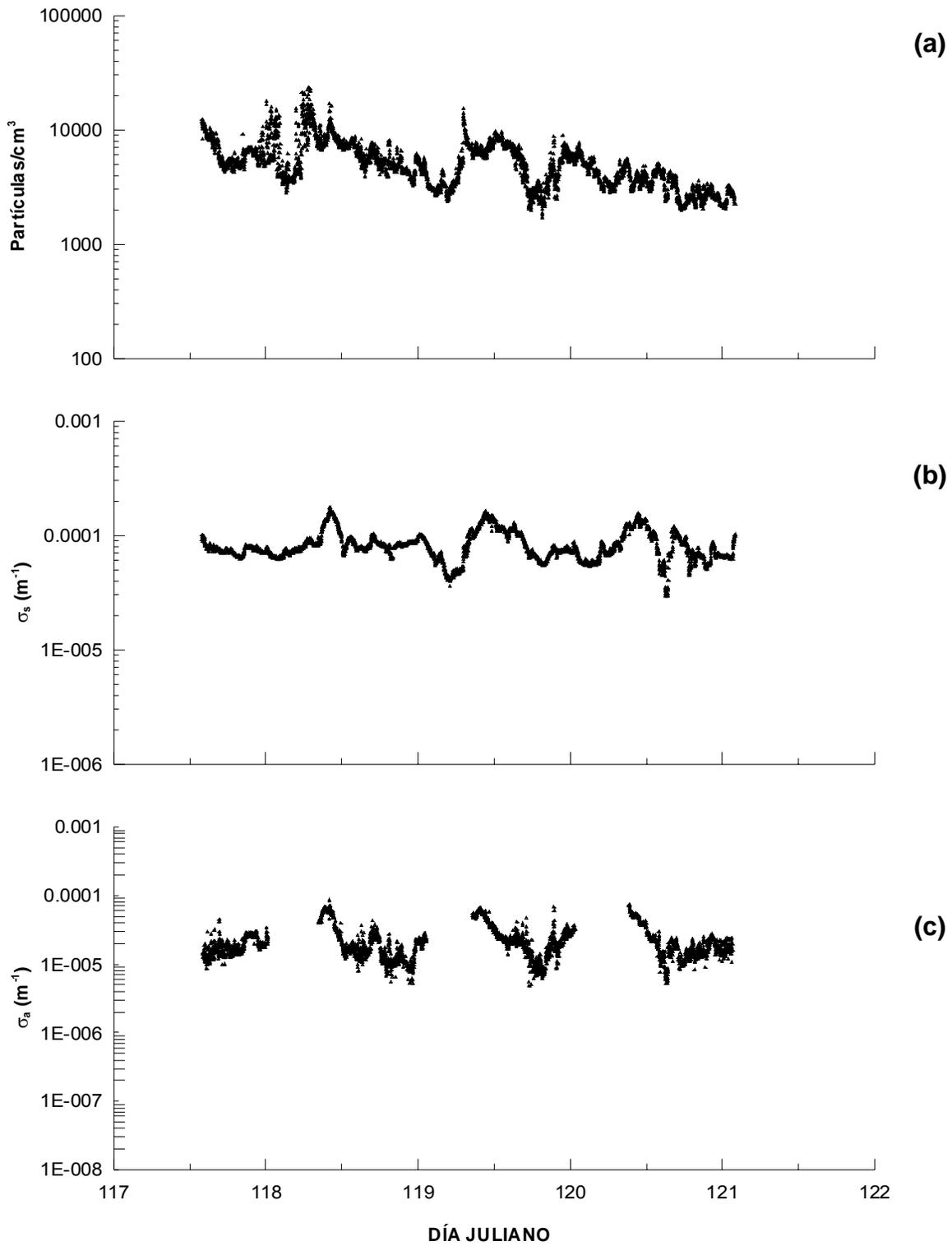


Figura A.3. Serie de tiempo de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

25-30 MAYO 2005

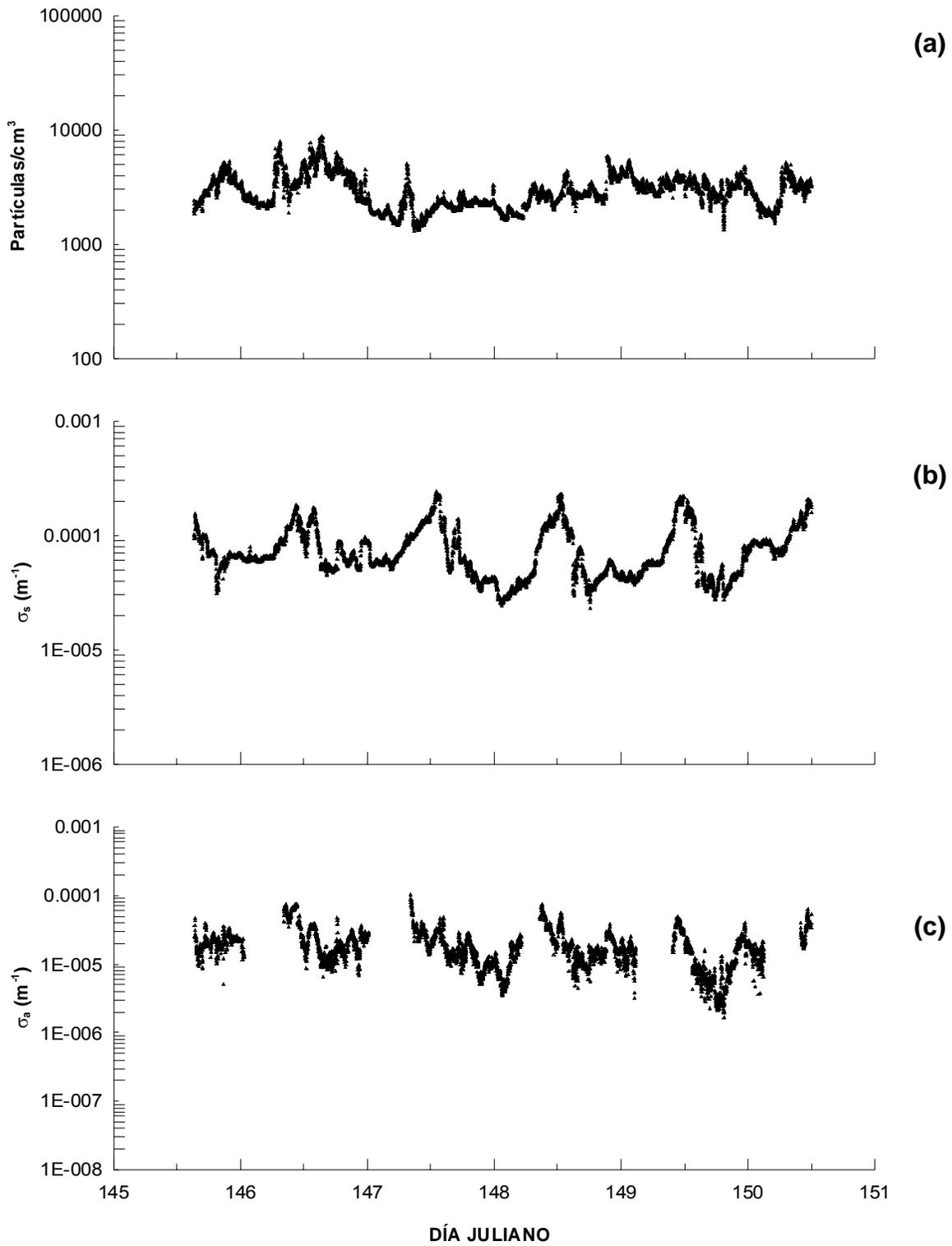


Figura A.4. Serie de tiempo de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

22-22 JUNIO 2005

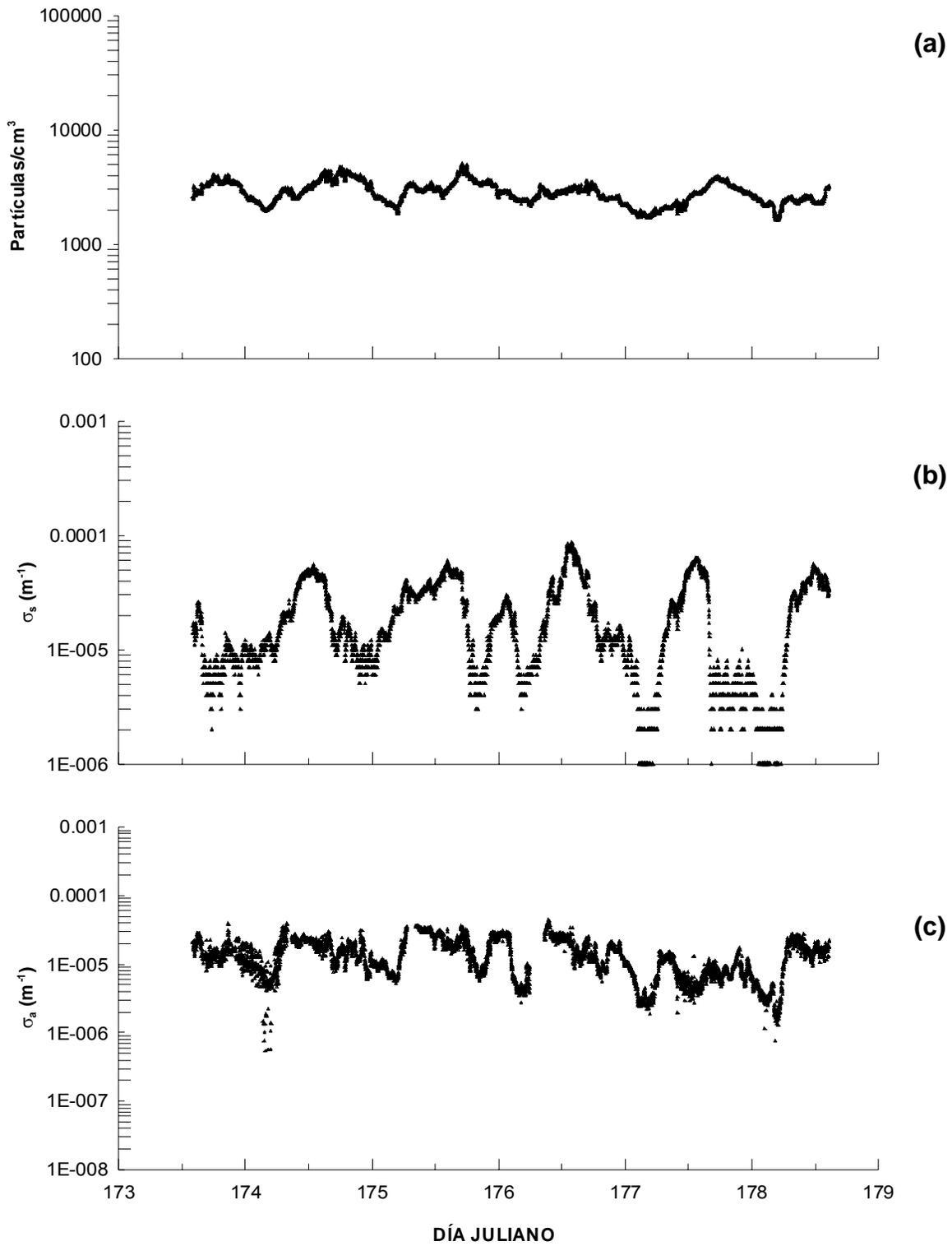


Figura A.5. Serie de tiempo de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

20-25 JULIO 2005

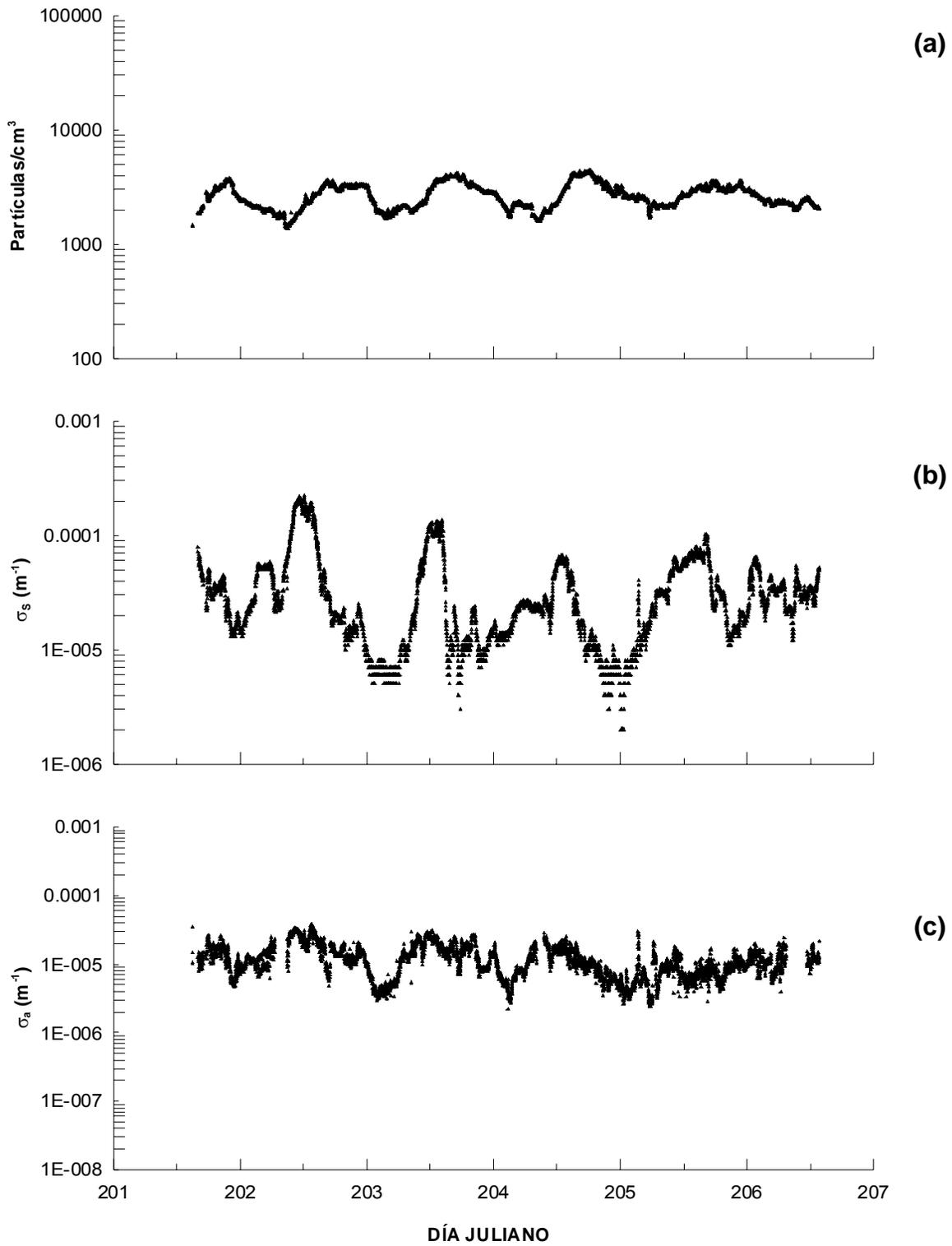


Figura A.6. Serie de tiempo de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

24-29 AGOSTO 2005

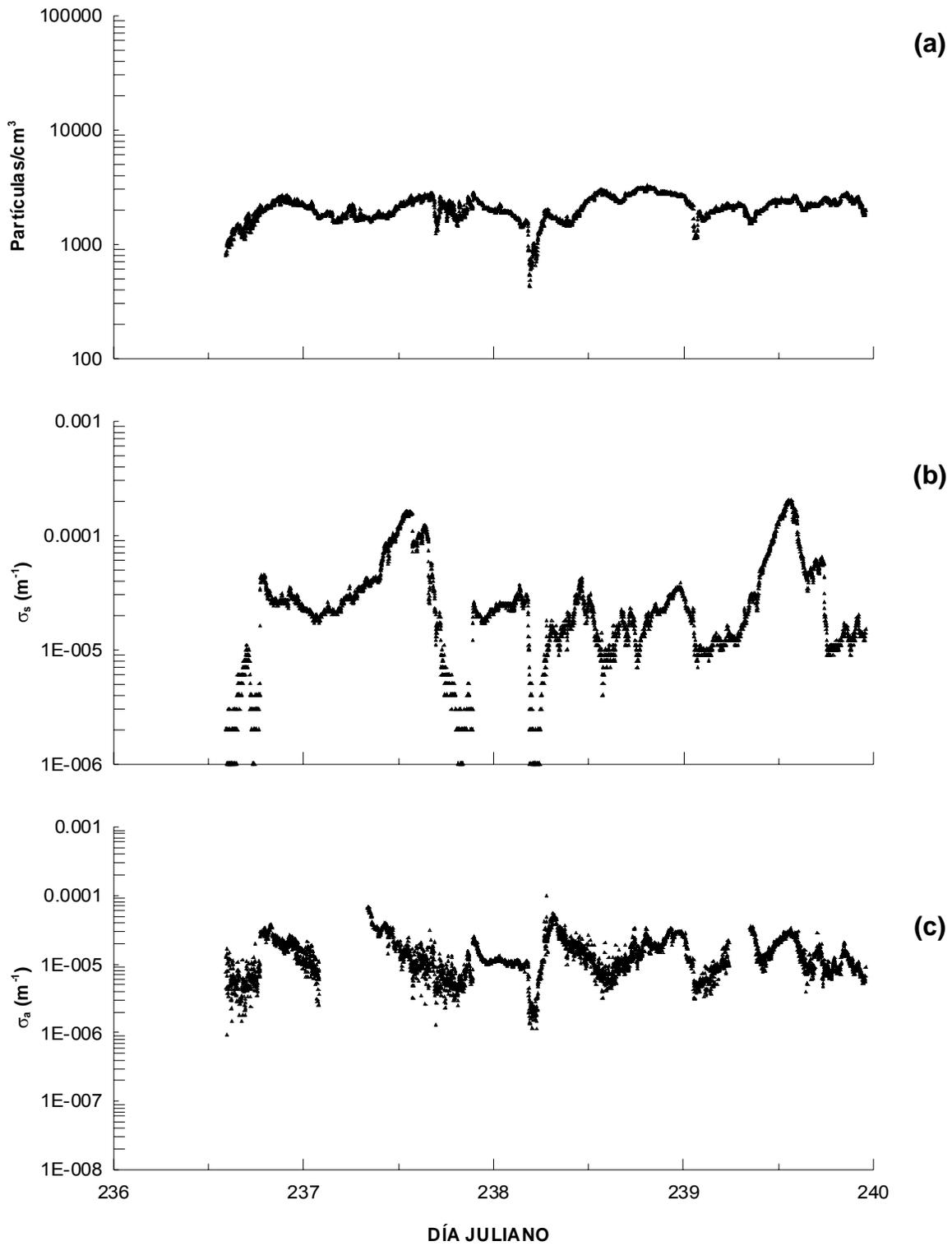


Figura A.7. Serie de tiempo de las propiedades físicas de las partículas: (a) concentración de partículas. (b) coeficiente de dispersión de luz,  $\sigma_s$ , (c) coeficiente de absorción de luz,  $\sigma_a$ .

## **APÉNDICE B.**

### **INSTRUCTIVO DE PROCEDIMIENTOS PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PARTÍCULAS DE AEROSOL.**

#### **I.- CONEXIÓN DE LOS INSTRUMENTOS.**

Los instrumentos a utilizar para el muestreo son CPC (**C**ondensation **P**article **C**ounter), LASAIR II (Contador de Partículas de aerosol), Nefelómetro y PSAP (**P**article **S**oot / **A**bsorption **P**hotometer), además de la computadora, la bomba, el no-break y las conexiones de los equipos. A continuación se muestran sus imágenes y partes más importantes.

Los instrumentos requieren de corriente eléctrica así que se conectan al no-break para que éste se la suministre.

Antes de comenzar a trabajar con el CPC debe llenarse con butanol hasta el nivel de líquido que se indica con 1 en la Figura 1.b.

Para llenar el depósito del CPC ver Figura 1.b, deberá hacerse por la parte identificada con 6.

Para drenar el butanol, ver Figura 1.b identificada con 7.

 El CPC se conecta a la chimenea por la entrada Inlet, ver Figura 1.a, señalada con 2, para obtener la muestra de aire.

También se conecta a la bomba de vacío mediante el conector identificado con 5 en la Figura 1.b.

✍ El LASAIR II toma la muestra de aire del medio ambiente por medio de una manguera, ver Figura 2.b, marcada con 8. **(Ojo: no se conecta a la chimenea).**

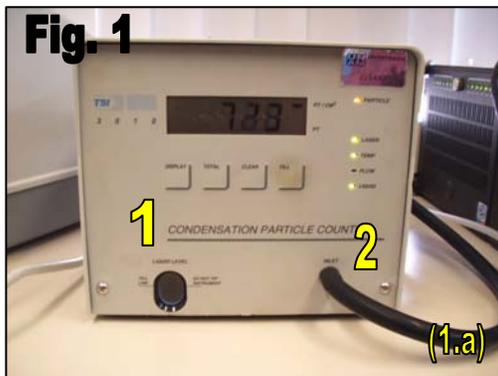
✍ El Nefelómetro se conecta a la chimenea por 14 aunque además se interconecta al PSAP por 13, como se observa en la Figura 3.a.

✍ El PSAP se conecta a Nefelómetro por 23 para que por ambos pase la misma muestra de aire, pero también se conecta a la bomba de vacío por 24, ver Figura 4.b.

A la bomba de vacío se conectan por medio de una “T” tanto CPC como PSAP, por 25 como lo demuestra la Figura 6.

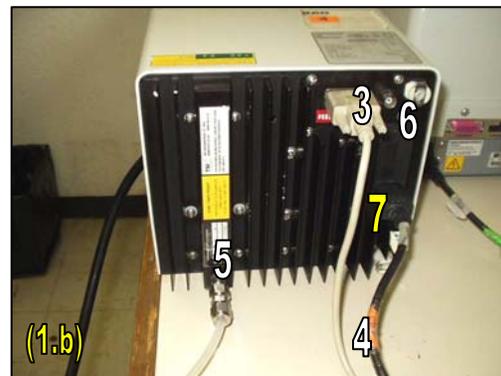
### ***CONDENSATION PARTICLE COUNTER(CPC)***

#### **VISTA FRONTAL**



- 1 Nivel de cámara del butanol.
- 2 Inlet, entrada de la muestra de aire.

#### **VISTA POSTERIOR**



- 3 Conexión de Puerto Serial.
- 4 Cable de corriente eléctrica.
- 5 Conector a bomba de vacío.
- 6 Conector de llenado de líquido.
- 7 Conector de drenado de líquido.

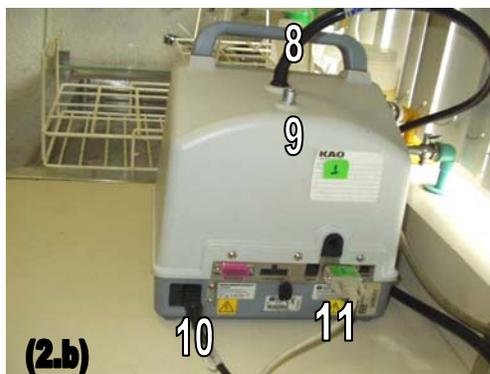
## LASAIR II

### VISTA FRONTAL



8 Entrada de muestra de aire.

### VISTA POSTERIOR



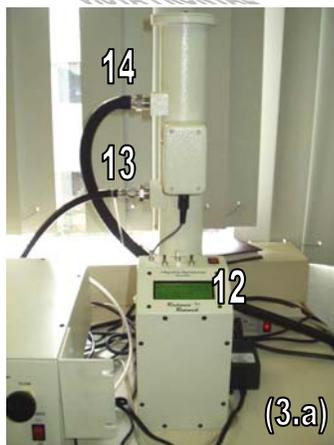
9 Salida de muestra de aire.

10 Cable de corriente eléctrica.

11 Conexión de Puerto Serial.

## NEFELÓMETRO

### VISTA FRONTAL

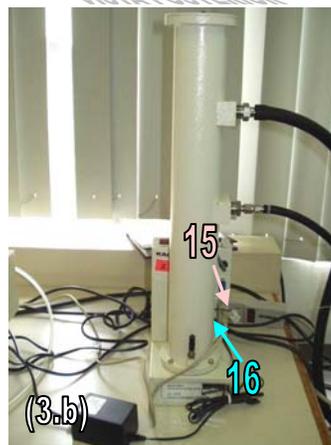


12 Pantalla.

13 Out, salida de muestra de aire.

14 Inlet, entrada de muestra de aire.

### VISTA POSTERIOR



15 Conexión de Puerto Serial.

16 Conector de corriente eléctrica.

## **Figura 3**

## PARTICLE SOOT ABSORPTION PHOTOMETER(PSAP)

### VISTA FRONTAL



- 17 Pantalla
- 18 Switch Reset.
- 19 Placa portadora de filtros.
- 20 Perilla reguladora de flujo de aire.

### VISTA POSTERIOR



- 21 Conexión de Puerto Serial.
- 22 Cable de corriente eléctrica.
- 23 Entrada de muestra de aire.
- 24 Conexión a bomba de vacío.

## BOMBA DE VACÍO



- 25 Conexión de la bomba de vacío a CPC y PSAP.

## **II.- CONEXIÓN A CPU**

Los instrumentos se conectan al CPU por medio de una entrada la cual tiene cuatro puertos seriales:

1. LASAIR II en puerto 1,
2. Nefelómetro en puerto 2,
3. PSAP en puerto 3,
4. CPC en puerto 4.

A continuación se muestra una imagen en la que se puede observar esto para un mejor entendimiento.



## **III.- ENCENDIDO DEL SISTEMA**

Pasos a seguir para muestreo de partículas:

1.- Antes de comenzar a trabajar será necesario crearse la trayectoria en la cual deberán guardarse los archivos de los datos obtenidos en el muestreo, de lo contrario podrán perderse esos datos.

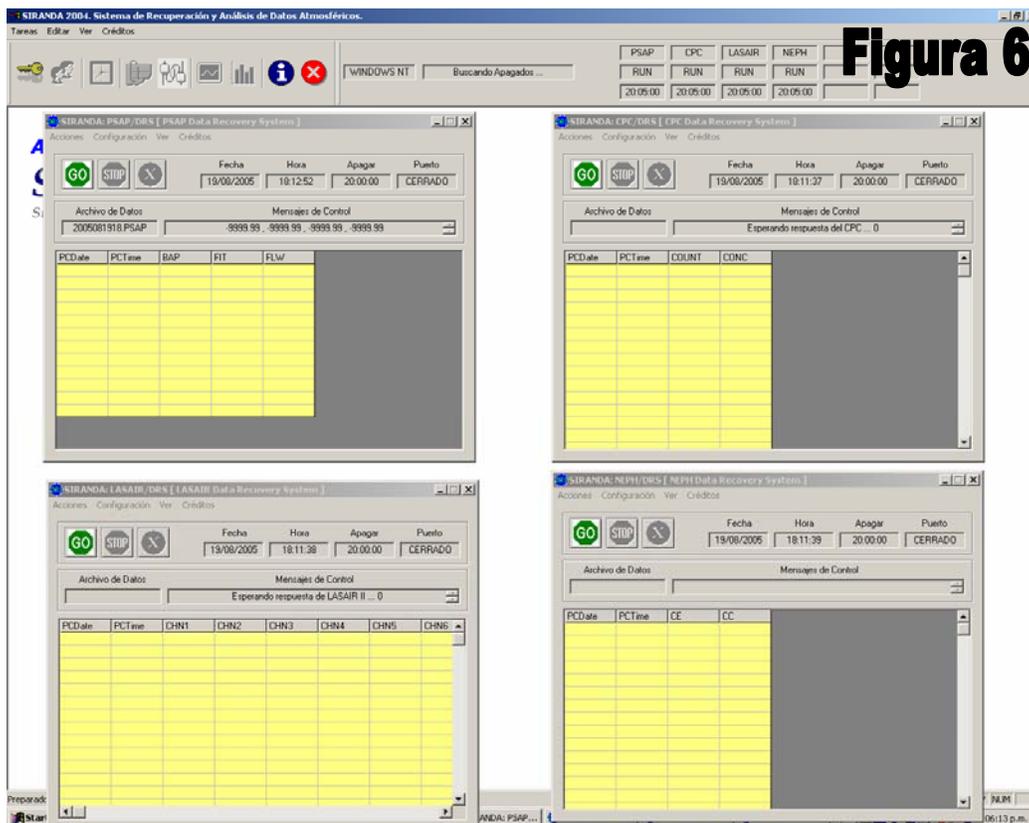
2.- Encender los instrumentos (debe tenerse cuidado de encender los instrumentos antes que la computadora).

3.- Encender bomba y ventilador de chimenea.

4.- Encender la computadora.

5.- Automáticamente la computadora comienza a cargar el antivirus seguido del programa SIRANDA 2004 (Sistema de Recuperación de Datos Atmosféricos), que es el adquirente de datos.

6.- El adquirente de datos despliega cuatro ventanas, que son las que controlan a los instrumentos, como se muestra en la Figura 6.



7.- Desplegadas las cuatro ventanas el programa sincroniza el tiempo entre el instrumento y la computadora. El tiempo de toma de datos es el de la computadora.

8.- Sincronizados los tiempos se comienzan a registrar (en cada una de las ventanas) los valores obtenidos por los instrumentos y posteriormente se almacenan en la computadora.

9.- Observar que los instrumentos trabajen sin ningún problema y que se registren en las ventanas los valores de los datos generados hasta ese momento.

10.- Tras haberse asegurado que no halla fallas en el sistema, lo que habrá que vigilar será el PSAP, ya que éste usa filtros que deberán ser reemplazados por uno nuevo cuando se ha saturado (Transmitancia,  $Tr$ ;  $Tr \leq 0.5$ ).

#### ***IV.- REEMPLAZO DE FILTRO DEL PSAP ( VER FIGURA 4.A)***

El procedimiento a seguir en el caso del reemplazo del filtro del PSAP es el siguiente:

1.- Verificar que el flujo de aire con la que trabaja la bomba sea entre 0.55-0.6 L/min.

2.- Deberá reemplazarse el filtro por uno nuevo cuando en la pantalla del PSAP el valor de  $Tr$  sea de aproximadamente de 0.55-0.5, pero no deberá ser menor a este intervalo.

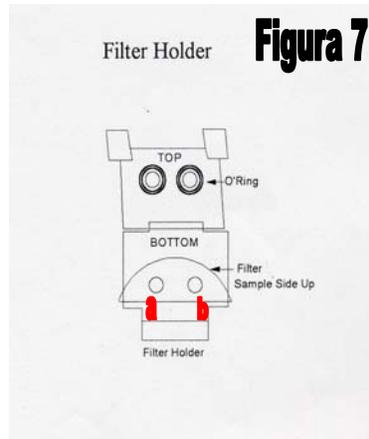
3.- Registrar en una bitácora fecha y hora de cambio de filtro, la hora que se toma en consideración es el tiempo de la computadora.

4.- Anotar valores de  $ba$ ,  $Tr$ , y flow los cuales se toman de la pantalla del PSAP ver **17**.

5.- Apuntar valor de  $bs$ , dato que se obtiene de la pantalla del Nefelómetro. (Figura 3.a, ver **12**).

6.- Se quita el tornillo que sujeta la placa ver **19**.

7.- Se levanta la placa y se saca el portador de filtros (el cual contiene dos filtros uno de referencia (Figura 7, ver b) y el otro es de la muestra (Figura 7 ver a).



8.- El filtro que deberá ser reemplazado por uno nuevo será el del lado izquierdo (marcado con **a**) que es el de la muestra.

9.- Para retirar el filtro deberán usarse unas pinzas las que impedirán un contacto directo con las manos.

10.- Se coloca el portador de filtros en su posición inicial (Figura 4.a, ver **19**).

11.- Se regresan a su posición original tanto la placa como el tornillo.

12.- Deberá moverse hacia arriba el botón **RESET** que hay en el panel de control (ver **18**) y sostenerse hasta que  $Tr = 1.000$ .

13.- Registrar en bitácora la hora (de la computadora) en que se terminó de hacer el cambio de filtro.

14.- Anotar valores de ba, Tr, flow y bs (citado en el punto 4 y 5 de esta sección).

15.- Escribir detrás del filtro que se cambió la fecha y hora de reemplazo.

16.- Guardar los filtros de las muestras obtenidos para su posterior análisis.

#### **V.- APAGADO DEL SISTEMA**

Al término del muestreo deben seguirse los siguientes pasos:

1.- Minimizar las ventanas superiores de la pantalla.

2.- Ir al menú principal del Programa SIRANDA 2004.

3.- Dar un clic en la función de **Tareas**.

4.- Elegir la opción **Contraseña**.

5.- Dar contraseña y elegir OK, ya que esto permitirá apagar los aparatos desde *SIRANDA 2004*.

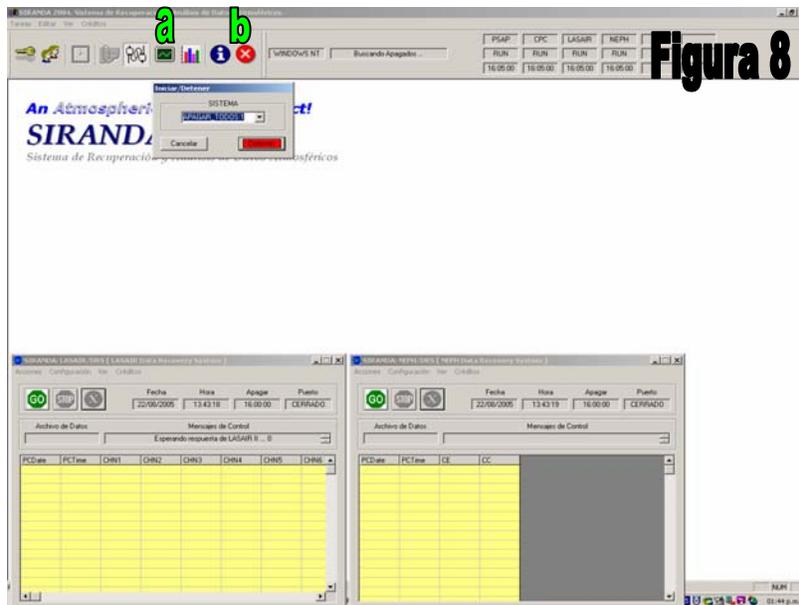
6.- Oprimir icono **Iniciar/Detener**, Figura 8 marcado con **a**.

7.- Seleccionar la opción **APAGAR\_TODOS: 1**.

8.-Dar un clic en **DETENER**.

9.- Automáticamente se cierran las cuatro ventanas.

10.- Cerrar SIRANDA 2004 y cerrar la sesión, aunque para cerrar el programa también puede hacerse usando del icono Figura 8 marcado con **b**.



**Figura 8**

11.- Apagar computadora.

12.- Parar la bomba y ventilador de chimenea.

13.- Apagar instrumentos.

14.- Desconectar cables de corriente eléctrica y no-break.

15.- Desconectar cables de sus respectivos puertos seriales.

16.- Desconectar mangueras de los instrumentos, bomba y chimenea.

17.- Drenar el butanol del CPC.

18.- Limpiar y guardar el equipo de muestreo.