

Contaminación del aire: Partículas atmosféricas

Graciela B. Raga

raga.graciela@gmail.com

Centro de Ciencias de la Atmósfera

UNAM

26 de septiembre de 2015

Contenido:

1. Motivación: Partículas y Salud
2. Definición de aerosol atmosférico y características generales
3. Fuentes y Procesos de formación y evolución
4. Caracterización: Ejemplos en Ciudad de México
5. Efectos en el clima

Impacto de la Contaminación Atmosférica

--Salud:

Efectos crónicos y agudos

-- Visibilidad y daños a materiales

-- Ecosistemas: tóxicos y nutrientes

--Cambio climático



<http://strakul.blogspot.com/2013/05/smog-in-santiago.html>



<http://www.marketplace.org/topics/sustainability/we-used-be-china/what-would-your-city-look-beijings-air-smog-simulator>

Table 1: Ranking of selected risk factors: 10 leading risk factor causes of death by income group, 2004

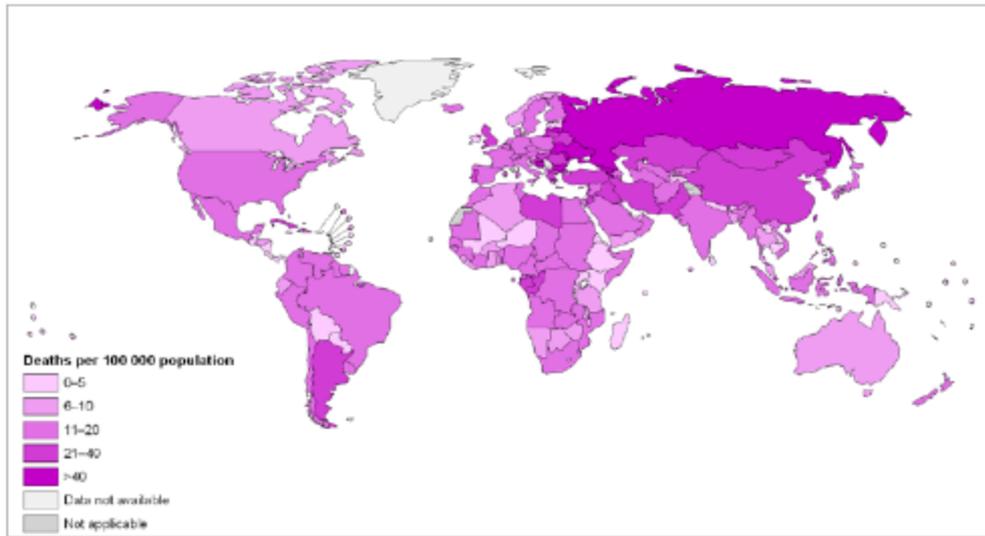
Risk factor		Deaths (millions)	Percentage of total	Risk factor		Deaths (millions)	Percentage of total
<i>World</i>				<i>Low-income countries^a</i>			
1	High blood pressure ★	7.5	12.8	1	Childhood underweight	2.0	7.8
2	Tobacco use	5.1	8.7	2	High blood pressure ★	2.0	7.5
3	High blood glucose	3.4	5.8	3	Unsafe sex	1.7	6.6
4	Physical inactivity	3.2	5.5	4	Unsafe water, sanitation, hygiene	1.6	6.1
5	Overweight and obesity ★	2.8	4.8	5	High blood glucose ★	1.3	4.9
6	High cholesterol ★	2.6	4.5	6	Indoor smoke from solid fuels	1.3	4.8
7	Unsafe sex	2.4	4.0	7	Tobacco use	1.0	3.9
8	Alcohol use	2.3	3.8	8	Physical inactivity	1.0	3.8
9	Childhood underweight	2.2	3.8	9	Suboptimal breastfeeding	1.0	3.7
10	Indoor smoke from solid fuels	2.0	3.3	10	High cholesterol ★	0.9	3.4
<i>Middle-income countries^a</i>				<i>High-income countries^a</i>			
1	High blood pressure ★	4.2	17.2	1	Tobacco use	1.5	17.9
2	Tobacco use	2.6	10.8	2	High blood pressure ★	1.4	16.8
3	Overweight and obesity ★	1.6	6.7	3	Overweight and obesity ★	0.7	8.4
4	Physical inactivity	1.6	6.6	4	Physical inactivity	0.6	7.7
5	Alcohol use	1.6	6.4	5	High blood glucose ★	0.6	7.0
6	High blood glucose ★	1.5	6.3	6	High cholesterol ★	0.5	5.8
7	High cholesterol ★	1.3	5.2	7	Low fruit and vegetable intake	0.2	2.5
8	Low fruit and vegetable intake	0.9	3.9	8	Urban outdoor air pollution	0.2	2.5
9	Indoor smoke from solid fuels	0.7	2.8	9	Alcohol use	0.1	1.6
10	Urban outdoor air pollution	0.7	2.8	10	Occupational risks	0.1	1.1

Contaminación del aire y Salud

Hay una evidencia clara basada en estudios epidemiológicos de :

- Envenenamiento por monóxido de carbono
- Exposición a partículas emitidas por combustión de diesel
- Exposición a humo de cigarro
- Exposición a partículas en general

Deaths attributable to outdoor air pollution, 2008



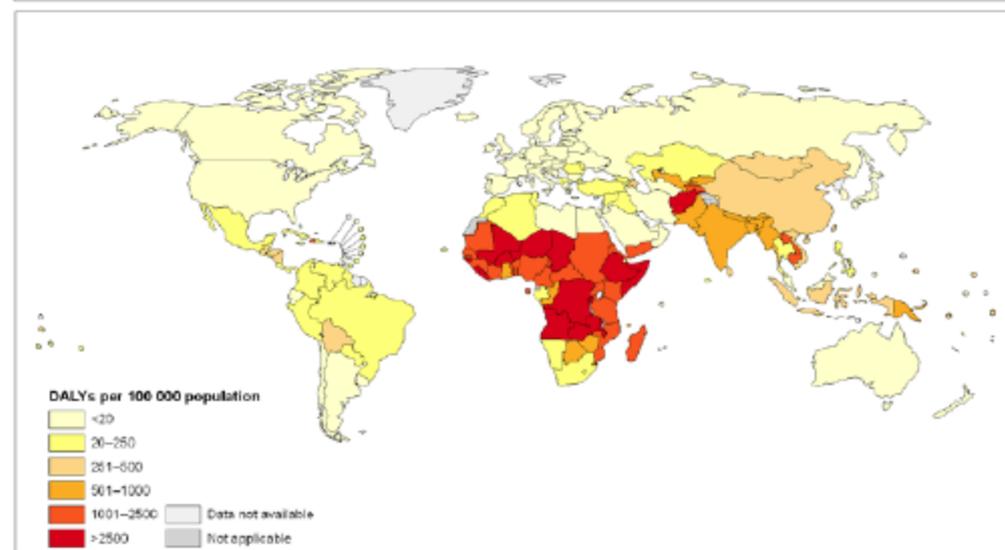
The boundaries and names shown and the designations used on this map do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its boundaries, or concerning the delimitation of its territory or boundaries. Dotted lines on maps represent approximate border lines for which there may not yet be full agreement.

Data Source: World Health Organization
Map Production: Public Health Information and Geographic Information Systems (PHGIS)
World Health Organization

World Health Organization
© WHO 2011. All rights reserved.



DALYs attributable to household air pollution, 2004



The boundaries and names shown and the designations used on this map do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its boundaries, or concerning the delimitation of its territory or boundaries. Dotted lines on maps represent approximate border lines for which there may not yet be full agreement.

Data Source: World Health Organization
Map Production: Public Health Information and Geographic Information Systems (PHGIS)
World Health Organization

World Health Organization
© WHO 2011. All rights reserved.



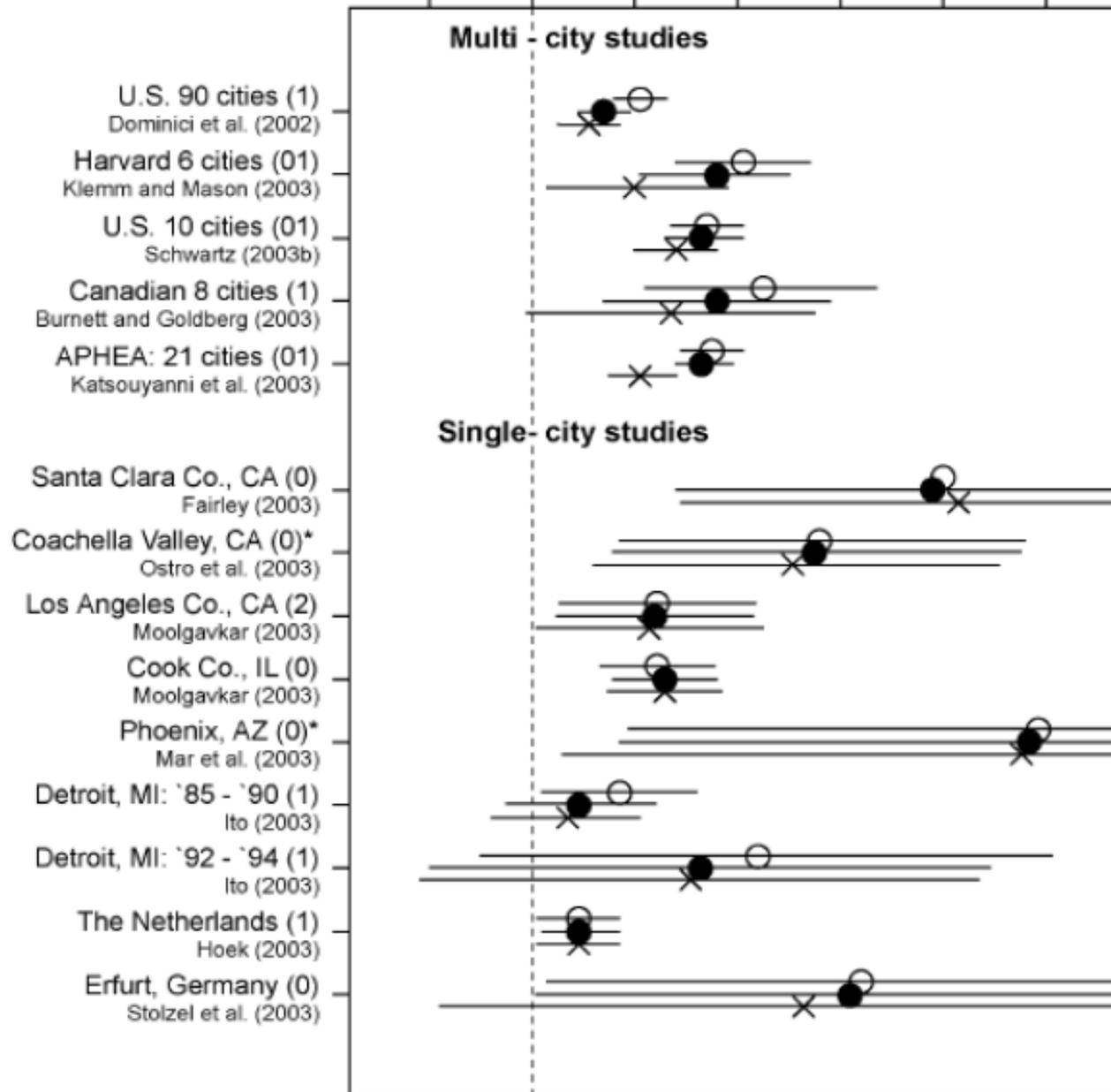
Caracterización: Tamaño de partículas para cuestiones regulatorias de salud

- PST: partículas suspendidas totales
- PM10 (fracción respirable): partículas con $d_a < 10 \mu\text{m}$
- PM2.5 (finas): partículas con $d_a < 2.5 \mu\text{m}$
- PM1 (ultrafinas): partículas con $d_a < 1 \mu\text{m}$

(d_a : diámetro aerodinámico)

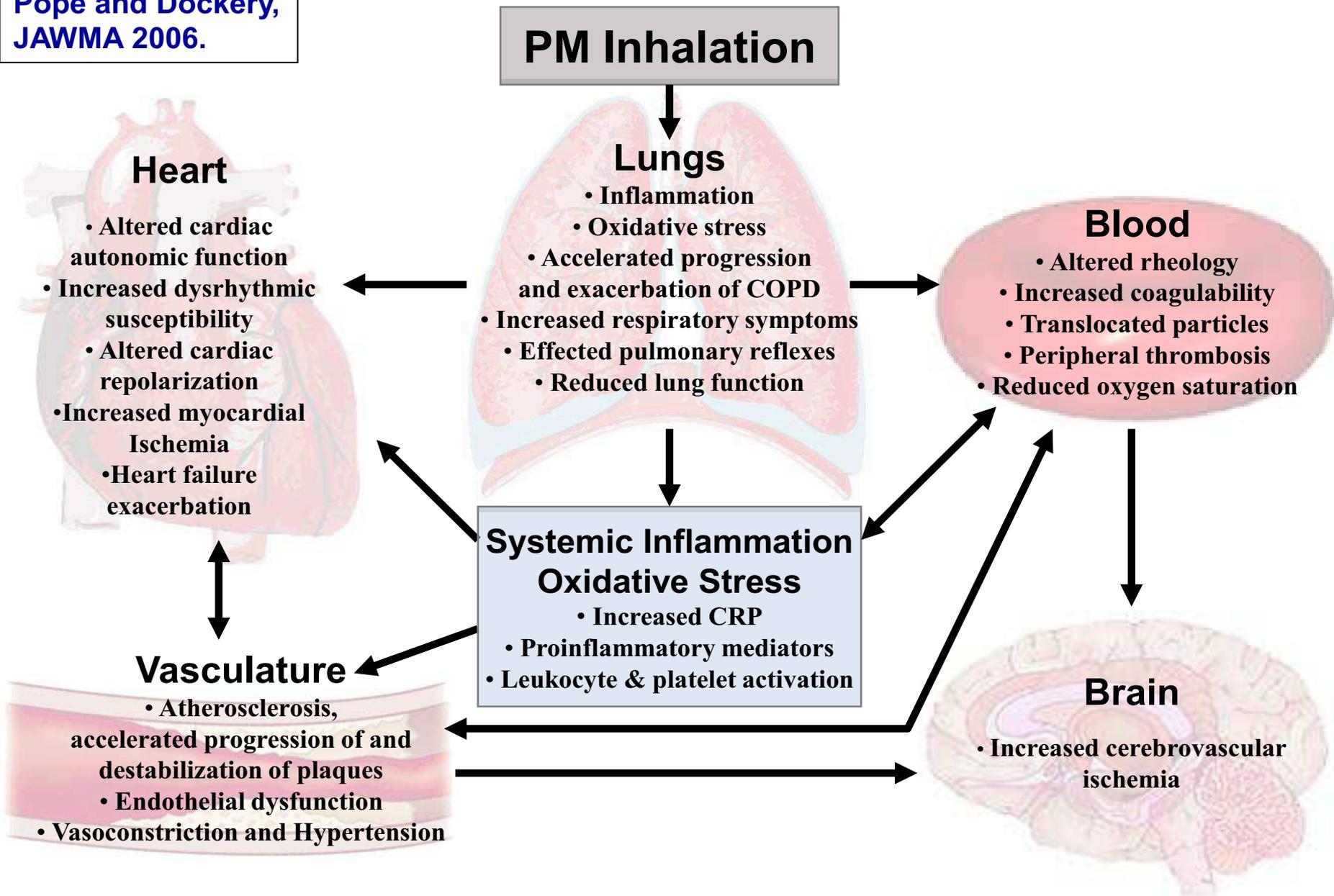
% excess deaths per 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase in PM_{10}

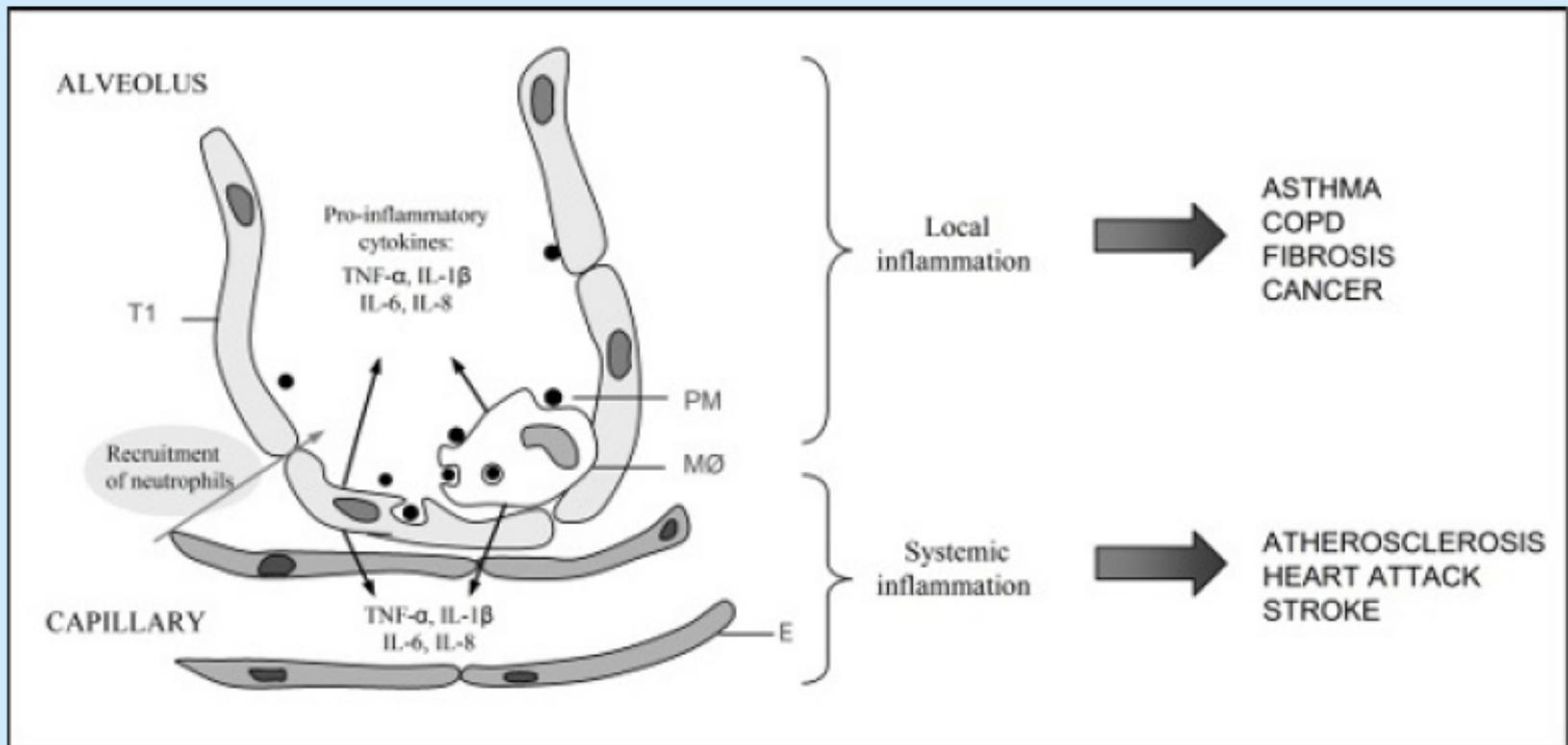
-2 0 2 4 6 8 10



Impacto demostrado en la salud

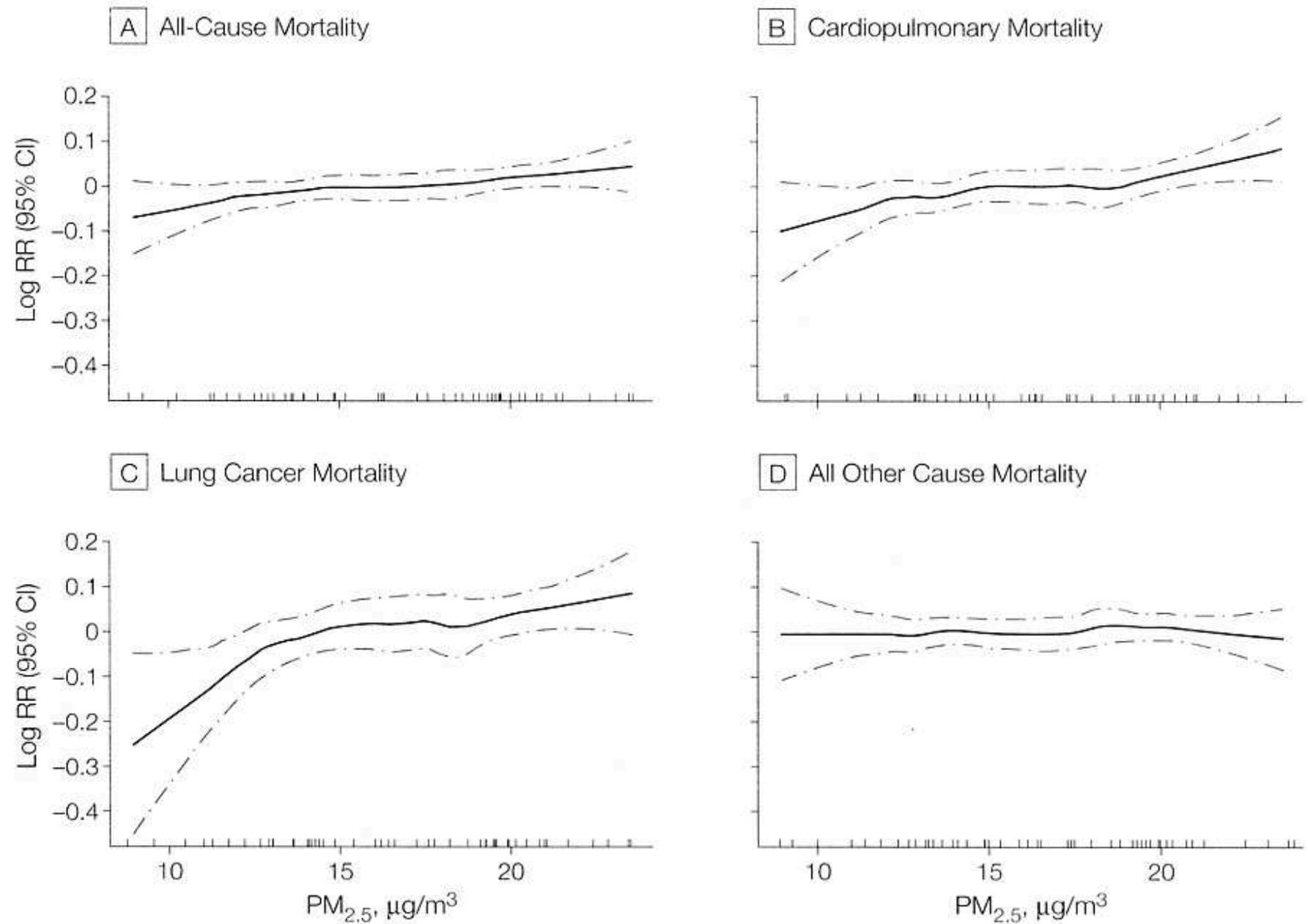
Pope and Dockery,
JAWMA 2006.





Importance of sources and components of particulate air pollution for cardio-pulmonary inflammatory responses
P. E. Schwarze¹, A. I. Totlandsdal¹, J. A. Holme¹, M. Låg¹, M. Refsnes¹, J. Øvrevik¹, W. J. Sandberg¹ and A. K. Bølling¹

Figure 2. Nonparametric Smoothed Exposure Response Relationship



Contaminación del aire y Salud Pública



Contaminación extramuros

Unas **90.000** muertes prematuras en la región de Latinoamérica y el Caribe



Contaminación intramuros

“Indoor air pollution from particulate matter continues to have major health impacts, particularly on women and children

Source: WHO statistics

Alrededor de **39.000** personas mueren por enfermedades atribuibles a contaminación intramuros en la region de Latinoamérica y el Caribe



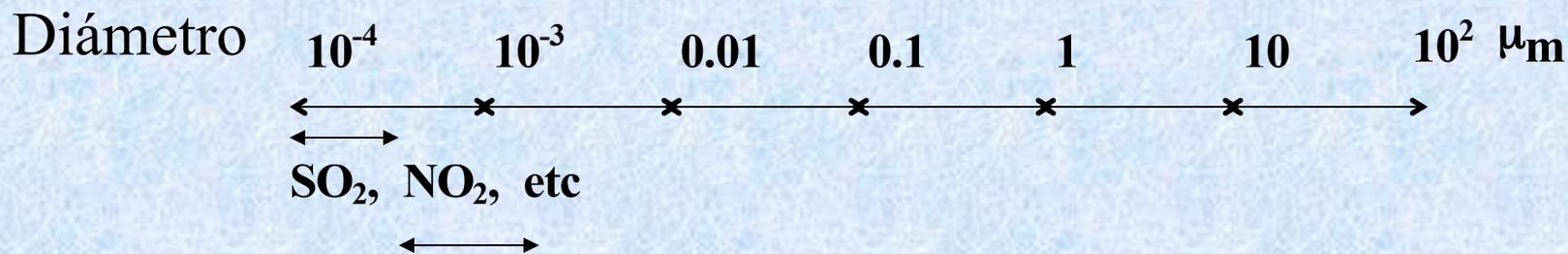
Definición de aerosol atmosférico

Suspension de partículas líquidas y/o sólidas
en un gas

El gas en nuestro caso es la atmósfera y las partículas pueden ser el resultado de:

- Emisiones primarias naturales
- Emisiones primarias antropogénicas
- Emisiones secundarias: naturales y/ o antropogénicas

1. Caracterización: Tamaño de partículas



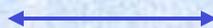
Polvo de silice



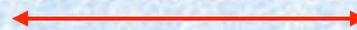
Pigmentos de titanio, humo de cigarro



Aerosoles medicinales



Partículas ambientales, moda fina



Partículas ambientales, moda gruesa

Las partículas intervienen en muchos procesos y fenómenos en la atmósfera, a diferentes escalas, tales como:

- ❖ Visibilidad (a escala urbana y regional)
- ❖ Formación de nubes (CCN, escala local, con cobertura global)
- ❖ Balance radiativo global (escala climática)

Las partículas intervienen en muchos procesos y fenómenos en la atmósfera, a diferentes escalas, tales como:

- ❖ Visibilidad (a escala urbana y regional)
- ❖ Formación de nubes (CCN, escala local, con cobertura global)
- ❖ Balance radiativo global (escala climática)

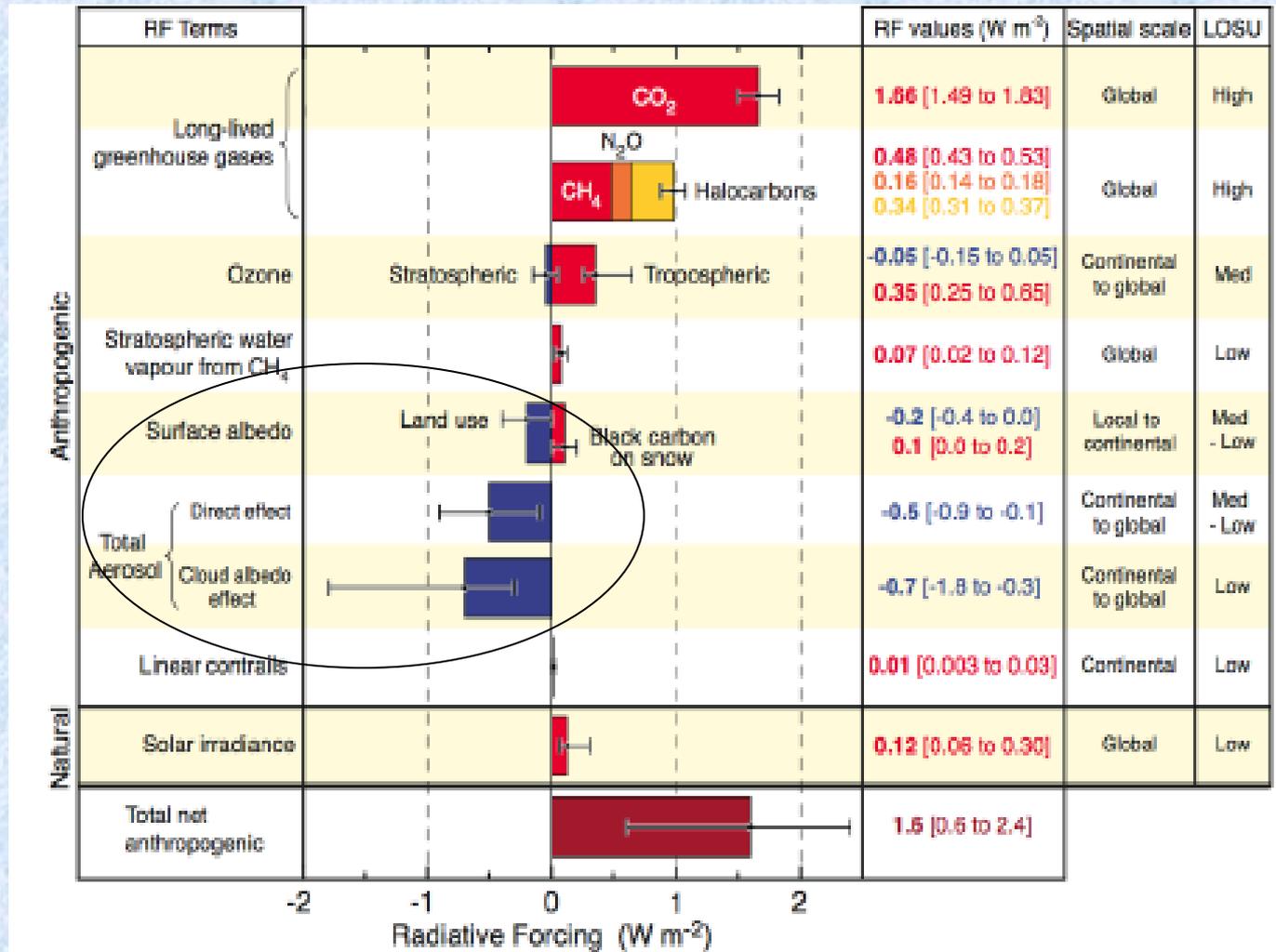
Forzamiento radiativo: Partículas

Positivo

 Calentamiento

Negativo

 Enfriamiento



©IPCC 2007: WG1-AR4

Procesos de formación

- Partículas primarias
 - Sobre océanos
 - Sobre continentes
 - Zonas urbanas
- Partículas secundarias
 - Sobre océanos
 - Zonas urbanas

Procesos:

- mecánicos -> vientos
- combustión interna
- quema de biomasa

Procesos:

- Nucleación:
Conversión gas-partícula
- Condensación
- Procesos en fase acuosa

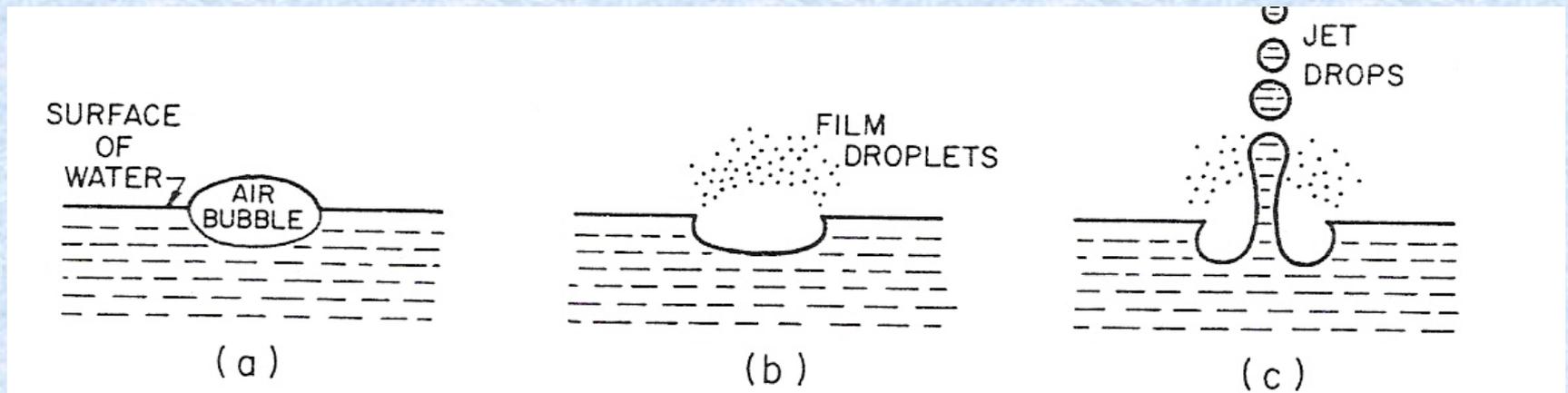
Caracterización: Tamaño de partículas

- Diámetros en rango de 1 nm a 100 μm (una variación de 5 órdenes de magnitud), siempre que sean partículas esféricas...
- Para partículas irregulares se define un diámetro equivalente: diámetro aerodinámico
- Generalmente se consideran 3 modas en la distribución de tamaños:

- moda de partículas gruesas: diámetro $d > 2 \mu\text{m}$
- moda de acumulación: $0.1 < d < 2 \mu\text{m}$
- moda de partículas ultrafinas: $d < 0.1 \mu\text{m}$

Fuentes primarias: Océanos

El principal mecanismo de producción de partículas es el rompimiento de gotitas de agua que se evaporan en la atmósfera y dejan como residuo una partículas sólida (*gotitas de spray*)



También se forman gotas más grandes cuando el viento hace volar la espuma de las crestas de las olas (*gotas de espuma*)

Dada la gran extensión cubierta por mares en el pasado se consideraba que las partículas generadas sobre los océanos constituían la fuente más importante a nivel global. Estudios recientes consideran que *esta fuente es 2 órdenes de magnitud menor que los desiertos*.

Fuentes primarias: Océanos

Por lo tanto, la composición de estas partículas es similar a la de agua de mar:

Componente	Masa (%)
------------	----------

Agua	96.78
------	-------

Sodio	1.05
-------	------

Cloro	1.88
-------	------

Magnesio	0.125
----------	-------

Azufre	0.0876
--------	--------

Calcio	0.0398
--------	--------

Potasio	0.0386
---------	--------

Carbono	0.0027
---------	--------

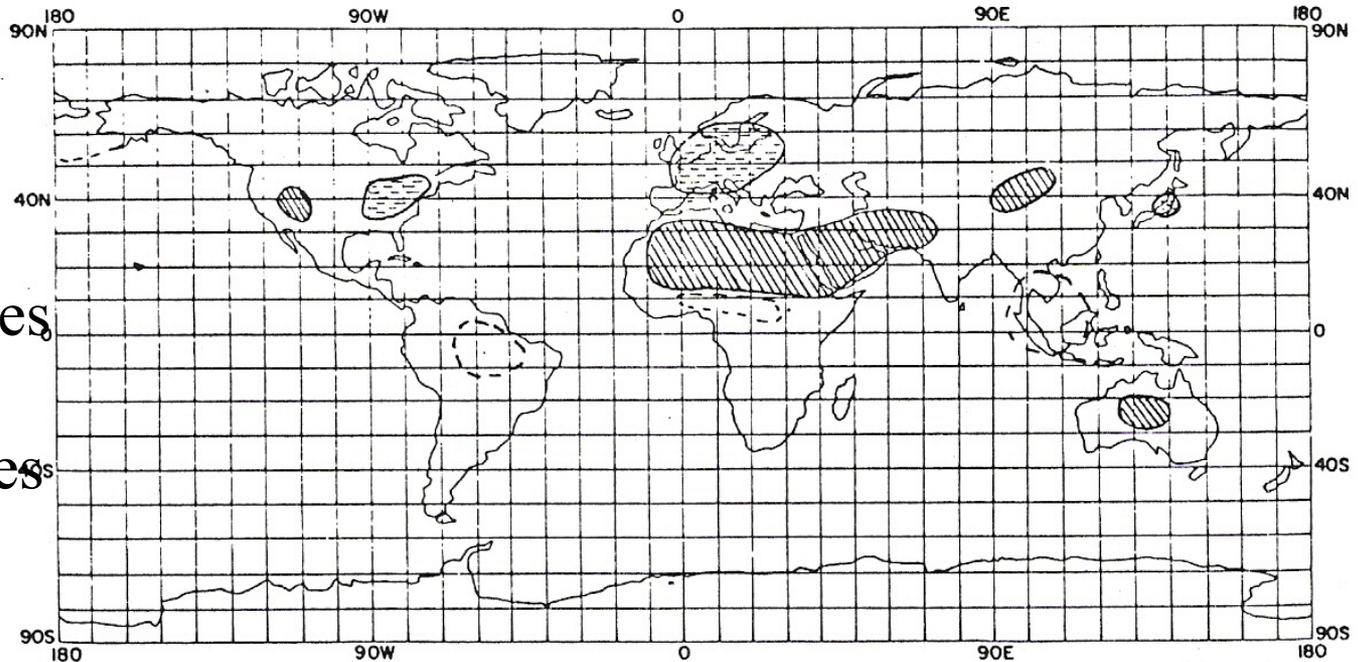
Sin embargo puede ocurrir que la composición cambie cuando el Cl en las gotitas es reemplazado por S o por N (en presencia de ácidos sulfúrico y/o nítrico). También puede haber deshidratación cuando la humedad es menor que el 70%

Fuentes primarias: Continentes

Los desiertos del planeta constituyen la principal fuente de partículas a nivel global, aunque solo cubren 1/3 de la superficie continental.

A diferencia de los océanos, los desiertos contienen partículas sólidas pre-formadas y de muy variada composición. Pero no todas las regiones en los desiertos generan partículas de igual forma. Las dunas son productoras “pobres” de partículas, comparadas a valles desérticos.

Las mediciones indican que se generan cantidades importantes de partículas menores que $0.1 \mu\text{m}$.



Fuentes primarias: Volcanes

Existen cientos de volcanes activos en el mundo.

El magma contiene 1-4% de gases por unidad de masa y el vapor de agua constituye entre 50 y 80% de la masa de gas.

Otros componentes gaseosos presentes son:

CO₂ SO₂

OCS N₂

CO H₂

S₂ HCl

Cl₂ F₂

Tambien en las erupciones se emiten particulas, principalmente silicatos, con rango de tamaños entre <0.1 hasta 100 mm

Fuentes primarias: Volcanes

Esta fuente puede ser *muy importante* al introducir grandes cantidades de partículas en la estratósfera, donde el tiempo de residencia es muy superior al de la tropósfera.

La presencia de partículas de origen volcánico en la estratósfera puede llevar a una reducción de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, ocasionando incluso una disminución en la T en superficie.



Volcan Puyehue, 2011

Fuentes biogénicas

En esta categoría debemos diferenciar al polen y las esporas, con tamaños típicos mayores que $1\mu\text{m}$, y las bacterias y virus que en su mayoría son sub-micrométricas. Esta fuente puede ser natural o antropogénica, como es el caso en zonas urbanas (principalmente en países en vías de desarrollo).

No hay actualmente una cuantificación adecuada de esta fuente a nivel global, aunque se reconocen ciertas características, tales como variaciones estacionales.

Los bosques tropicales (e.g. Amazonas) constituyen una fuente *muy importante*, tanto de partículas biogénicas como de gases que tienen el potencial de producir partículas una vez emitidos a la atmósfera (por el proceso de conversión de gas a partícula).

Fuentes primarias antropogenicas:

Quema de biomasa

Principalmente partículas de hollín son inyectadas a la atmósfera durante la quema, así como también numerosos gases precursores de partículas

La composición del hollín incluye carbono grafítico y compuestos orgánicos primarios. Estas partículas carbonáceas son muy importantes en el balance radiativo global, ya que absorben fuertemente la radiación solar.

¿Qué cosa es el hollín?

Son partículas sólidas de composición compleja que absorben la radiación solar visible (en inglés: soot)

Siempre incluye una componente insoluble de carbono negro (“black carbon”, BC) que es la que absorbe radiación.

Dependiendo de las fuentes, la composición puede incluir diversos metales y compuestos orgánicos pesados muy dañinos a la salud.

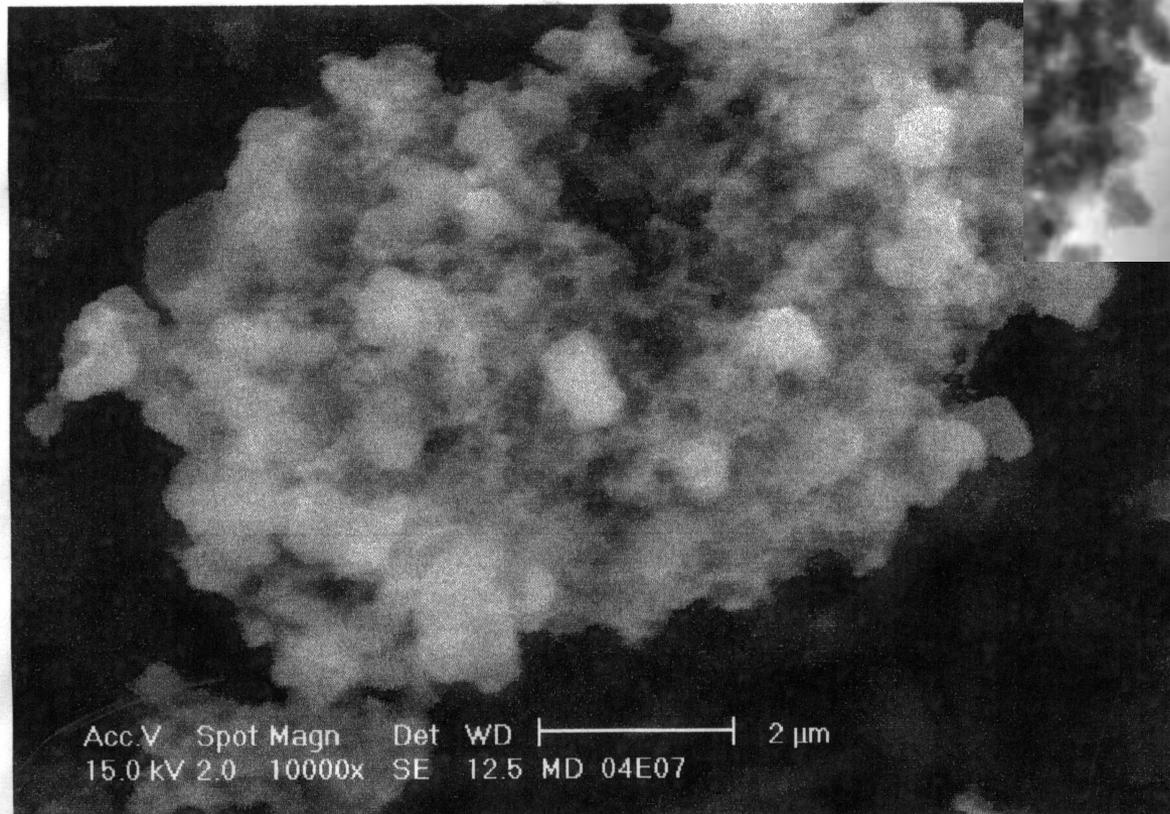
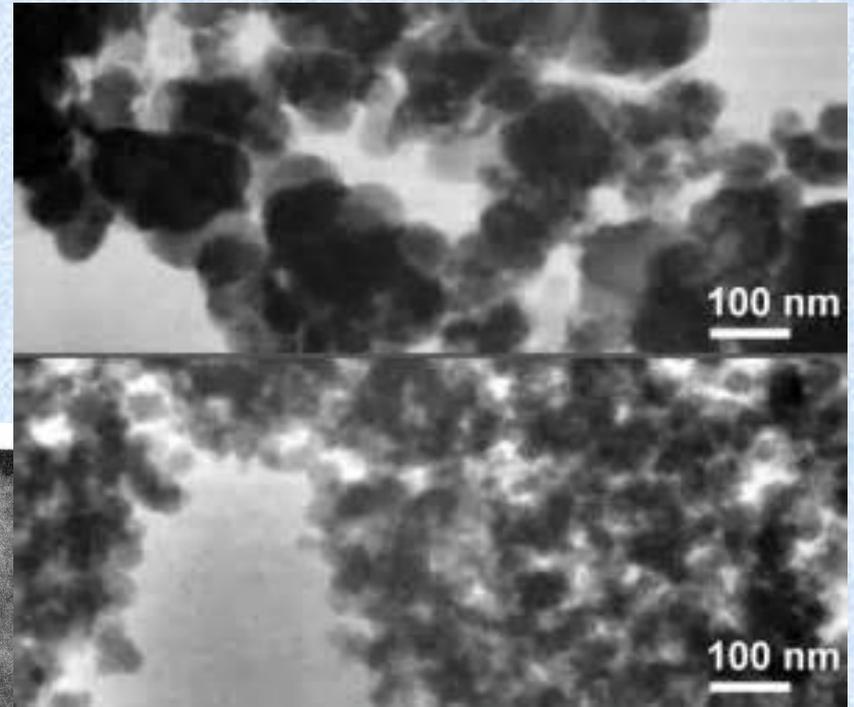
Fuentes principales:

- vehículos a diesel y biocombustibles (combustión incompleta)
- generación de electricidad (por carbón mineral o combustóleo)
- extracción de petróleo e industria petroquímica
- quema de biomasa
- quema doméstica (cocina y calefacción)



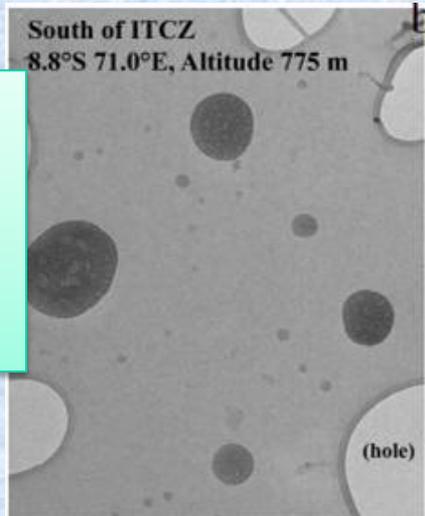
¿Cómo se ven las partículas de BC?

Agregados de esférulas

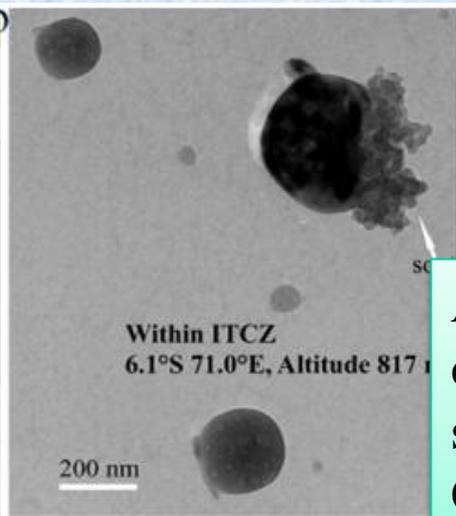


Crecen al combinarse entre sí y se hacen mas compactas a medida que pasa el tiempo y se alejan de las fuentes

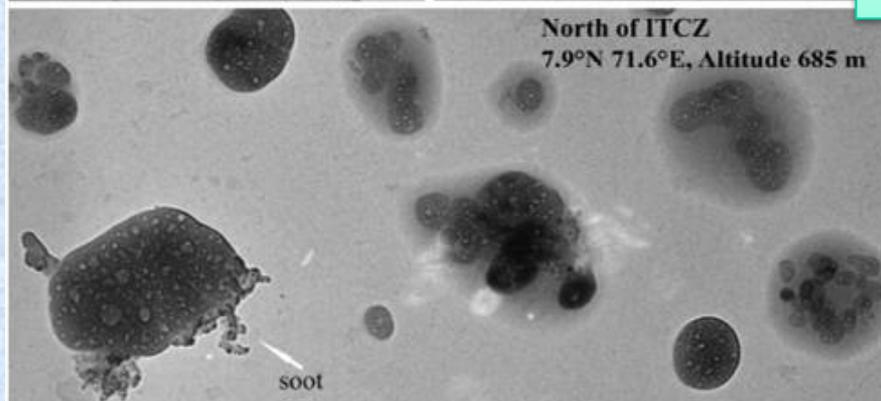
¿Cómo se ven las partículas de BC en zonas marinas?



Aire limpio
sobre el
Océano
Indico



Aire
contaminado
sobre el
Océano Indico



Fuentes primarias industriales

<u>Industria</u>	<u>Metales en las particulas</u>
Plantas electricas (combustoleo)	V, Ni, Fe
Plantas electricas (carbon)	Fe, Zn, Pb, V, Mn, Cr, Cu, Ni, As, Co, Cd, Sb, Hg
Incineradores municipales	Zn, Fe, Hg, Pb, Sn, As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Sb
Hornos acereros	Fe, Zn, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb

MUCHOS de estos metales son toxicos para los humanos

- Animacion de simulaciones globales

Fuentes secundarias: Conversión de gas a partícula

Nucleación homogénea:

homomolecular: 1 gas sin efectos de superficie

binaria: 2 gases sin efectos de superficie

ternaria: 3 gases sin efectos de superficie

Nucleación heterogénea:

homomolecular: 1 gas condensa sobre un nucleo pre-existente

binaria: 2 gases condensan sobre un nucleo pre-existente

Las partículas con mayor superficie por unidad de volumen son las preferidas energéticamente para que ocurra la nucleación heterogénea.

Los 3 principales compuestos en partículas provenientes de CGP son sulfatos, nitratos e hidrocarburos.

2. Fuentes secundarias: Conversión de gas a partícula

“Sulfatos”:

Principalmente los compuestos gaseosos que contienen azufre provienen de la biósfera y de volcanes. Compuestos tales como SO_2 , H_2S , CS_2 , COS , CH_3SCH (llamado **DMS**, emitido por fitoplancton) y CH_3SSCH son los principales. Las partículas con sulfatos se concentran en el rango de tamaños entre 0.1 y 1 μm . Pero partículas tan grandes no se forman por CGP homogénea. Lo que sucede es que las partículas recién formadas coagulan rápidamente y crecen hasta quedar en el rango mencionado.

“Nitratos”:

Sobre los continentes y en la atmósfera baja, se observan en partículas $d > 1 \mu\text{m}$, pero no pueden formarse directamente por CGP a esos tamaños. Dichas partículas pueden ser sólo el resultado de gotas de nube que se han evaporado. En la estratósfera el N_2O se descompone en N_2 y NO y este último reacciona con O_3 para producir NO_2 , que al reaccionar con el radical OH forma ácido nítrico en forma gaseosa y dar lugar a partículas que se conocen como **nubes estratosféricas polares**.

2. Fuentes secundarias: Conversión de gas a partícula

Compuestos orgánicos con carbono:

Se producen a partir de gases precursores emitidos principalmente por la biósfera, tanto como parte del metabolismo mismo de plantas y árboles como por la quema de biomasa.

Asimismo, existe un componente de emisiones de petróleo, a través de la superficie terrestre.

Compuestos *orgánicos volátiles* existen en forma simultánea en fase gaseosa y condensada a temp . Y presiones ambientales. Sólo compuestos orgánicos con *mayor número de carbonos* son candidatos a estar presentes como partículas. Los tamaños son generalmente $< 0.25 \mu\text{m}$, formadas por CGP.

Caracterización: Distribución de Tamaño

- Distribución de número
- Distribución de superficie
- Distribución de masa/volumen

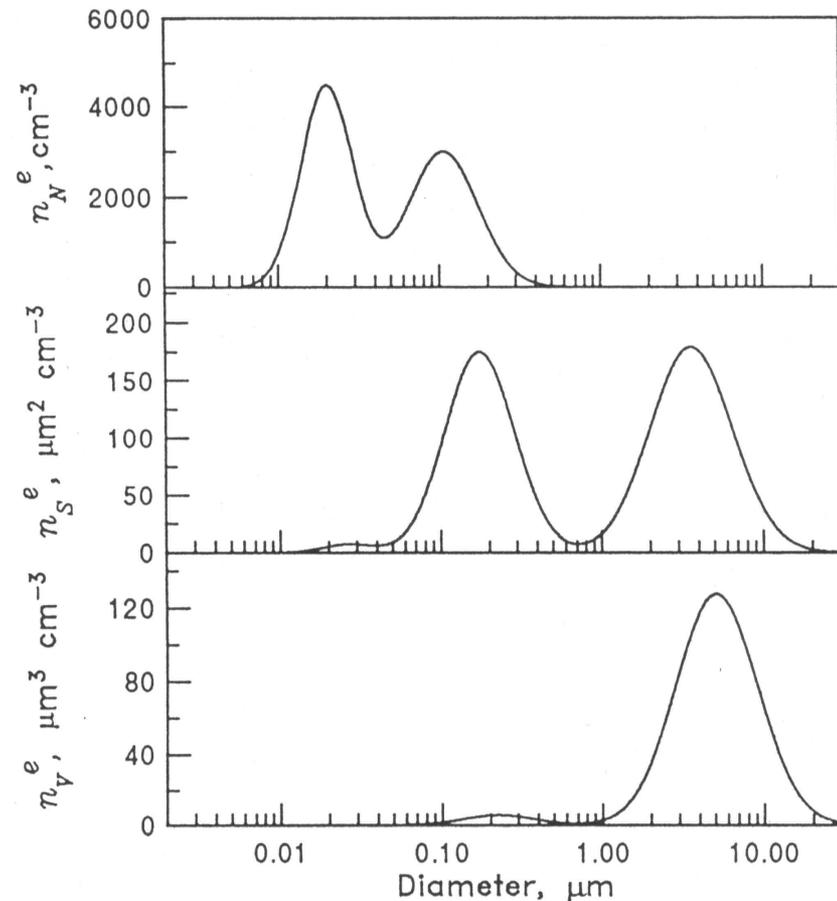


FIGURE 7.6 The same aerosol distribution as in Figures 7.4 and 7.5 expressed as a function of $\log D_p$ and plotted versus $\log D_p$. Also shown are the surface and volume distributions. The areas below the three curves correspond to the total aerosol number, surface, and volume, respectively.

Caracterización: Distribución de Tamaño

Momentos de la distribución:

- Orden cero: Concentración total
- Primer orden
 - » Primer orden/ orden cero: radio promedio
- Segundo orden: proporcional a la superficie total de las partículas
- Tercer orden: proporcional al volumen total de las partículas

$$M_0 = \int_0^{\infty} n(r) \cdot dr$$

$$M_1 = \int_0^{\infty} r \cdot n(r) \cdot dr$$

$$\bar{r} = M_1 / M_0$$

$$M_2 = \int_0^{\infty} r^2 \cdot n(r) \cdot dr$$

$$M_3 = \int_0^{\infty} r^3 \cdot n(r) \cdot dr$$

Caracterización: Composición en función del tamaño (zona urbana)

- Sulfato, nitrato, amonio, cloruro, sodio, potasio, carbono orgánico, carbono negro, material crustal, material biológico
- Dependiente del tamaño, diferente origen

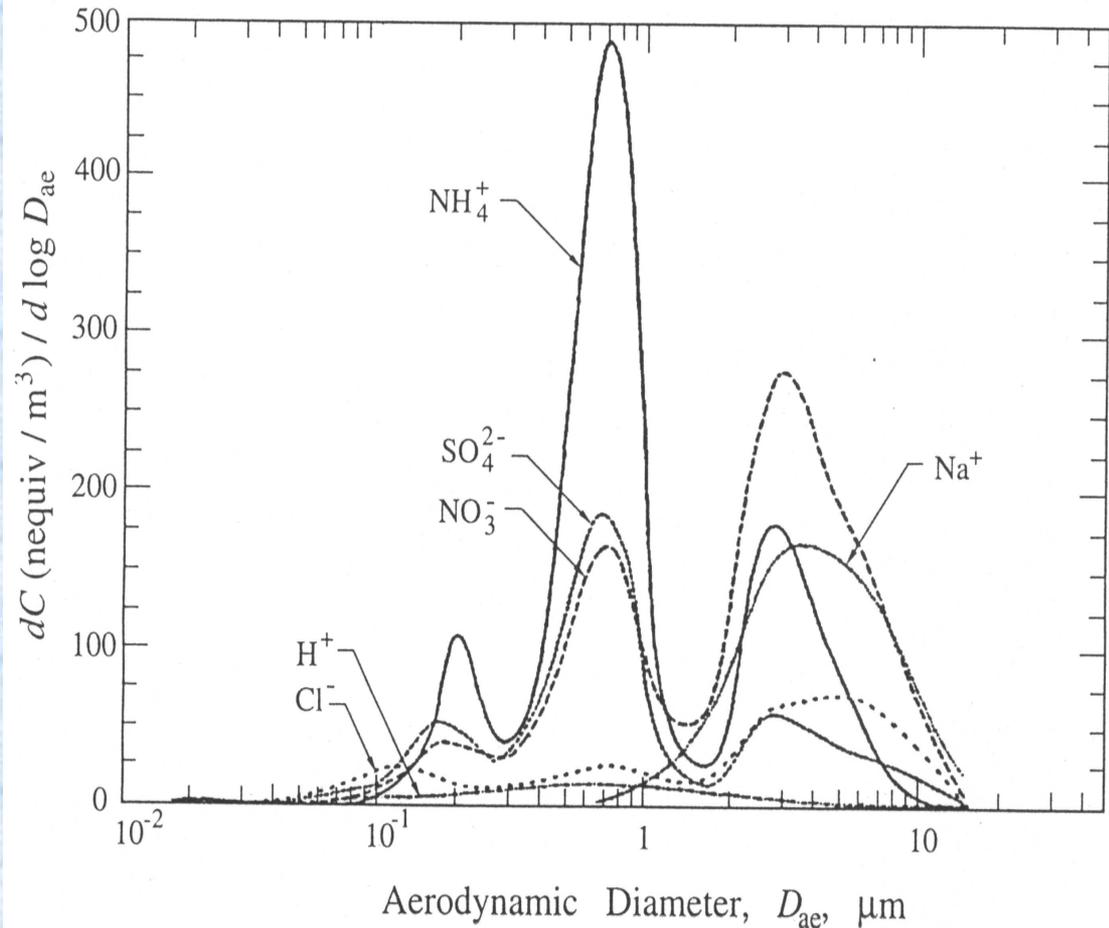


FIGURE 7.23 Measured size distributions of aerosol sulfate, nitrate, ammonium, chloride, sodium, and hydrogen ion in Claremont, CA (Wall et al., 1988).

Caracterización: Composición en función del tamaño (zona urbana)

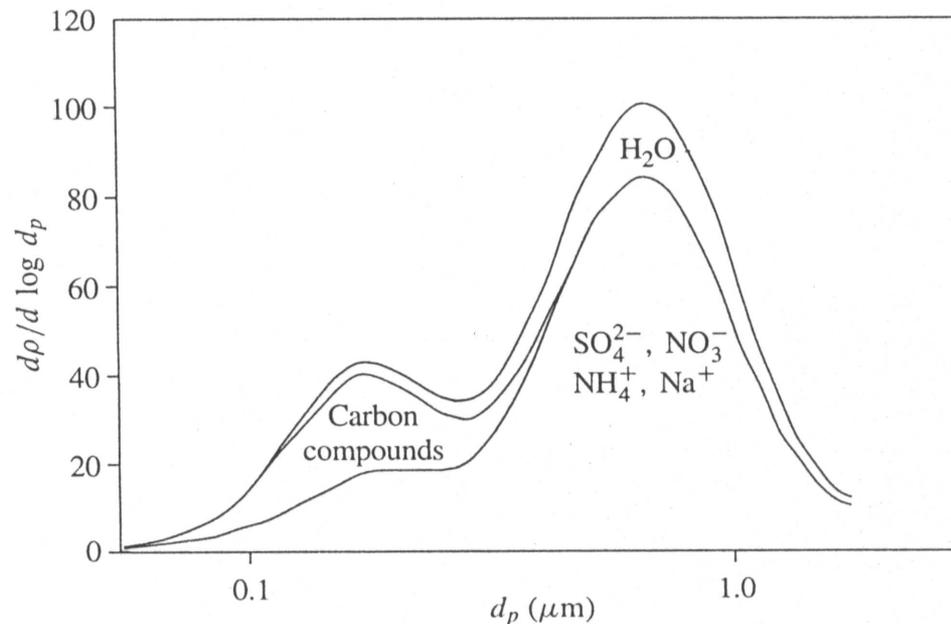


Figure 13.10 Aerosol water content as a function of particle size at a relative humidity of 46% for the hygroscopic component of the aerosol at Claremont, California during the summer of 1987. (After Zhang et al., 1993.)

Caracterización: Composición en función del tamaño (planta termoelectrica)

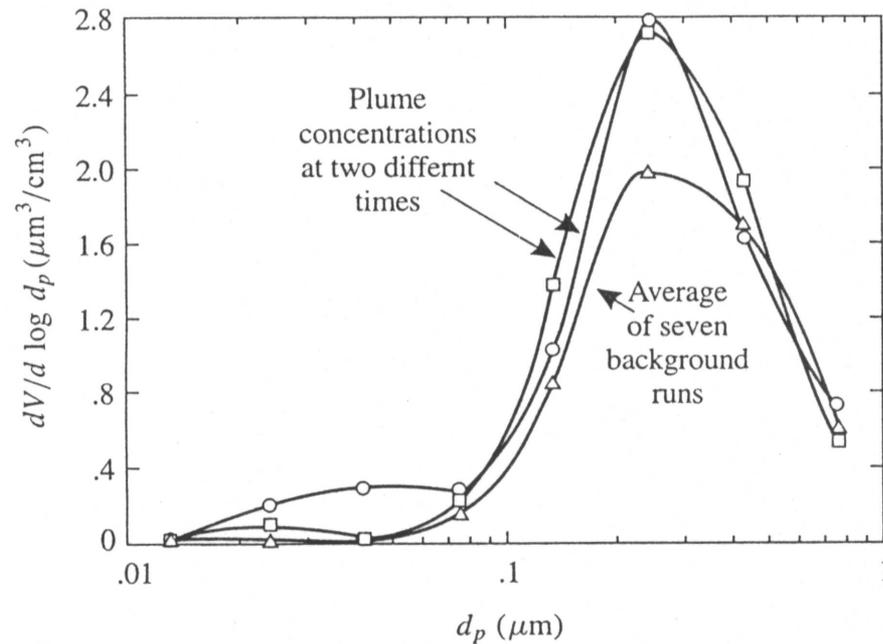


Figure 13.5 Aerosol volume distributions for the Navajo (Page, AZ) power plant plume on 7/10/79. This is an example of a low-humidity (5 to 20% RH) high-solar-radiation environment. The aerosol volume excess over background is associated primarily with particles smaller than 0.3 μm . This is best explained by homogeneous gas-phase reactions that form a condensable product and not by aerosol-phase reactions. (After Wilson and McMurry, 1981.)

Caracterización: Composición elemental (zona urbana)

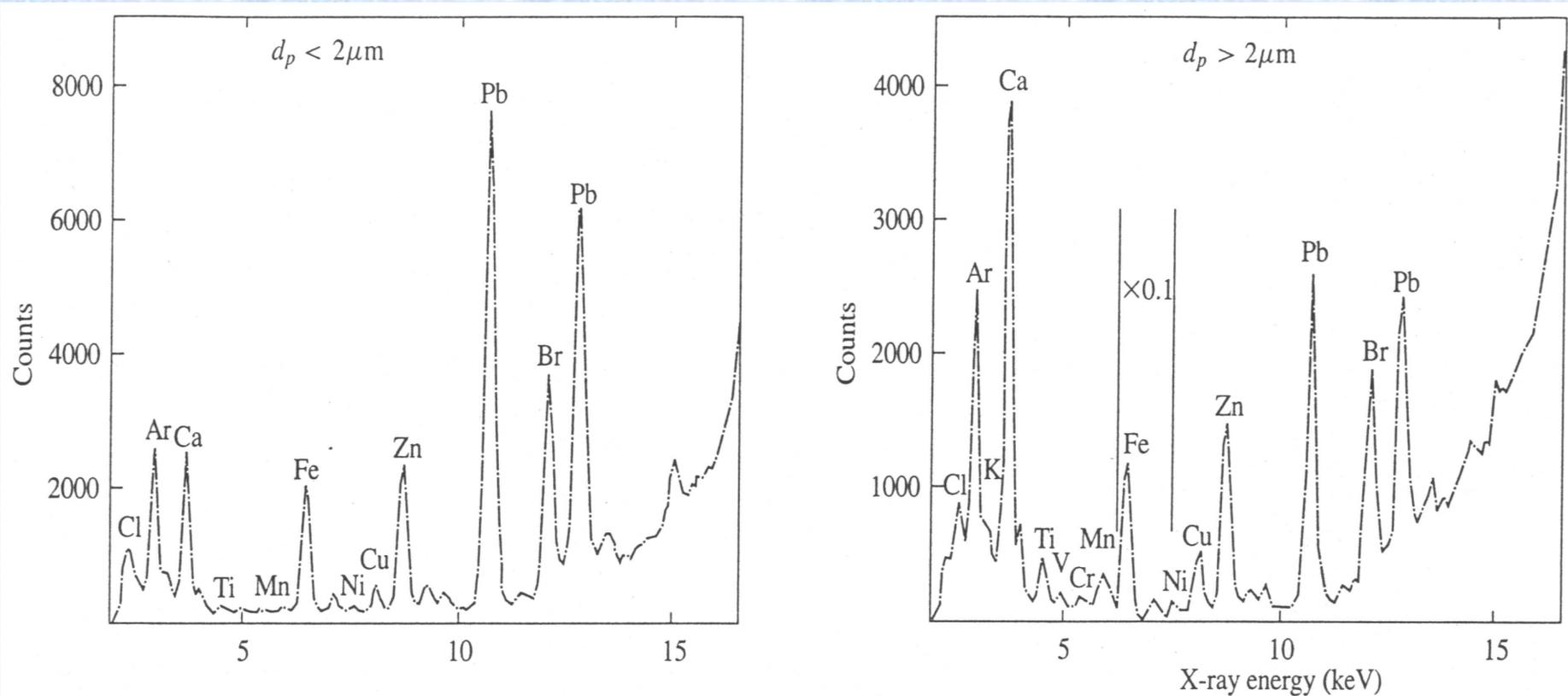
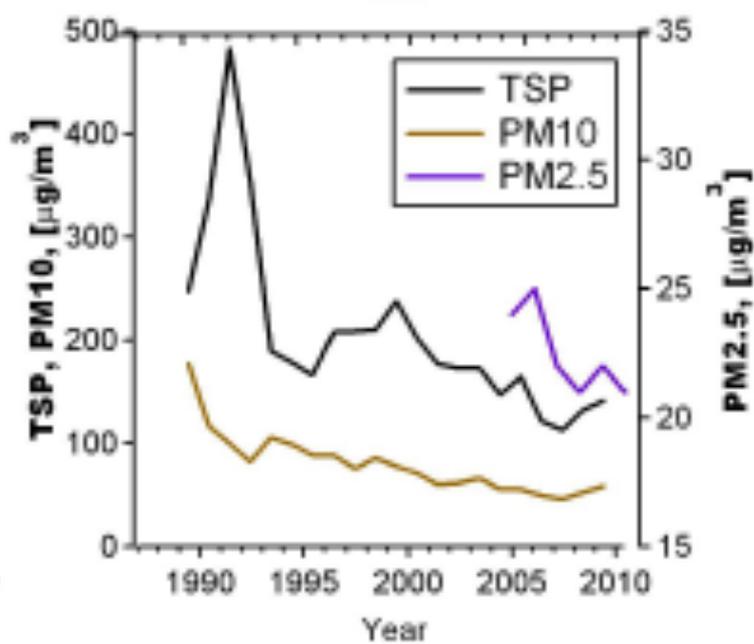
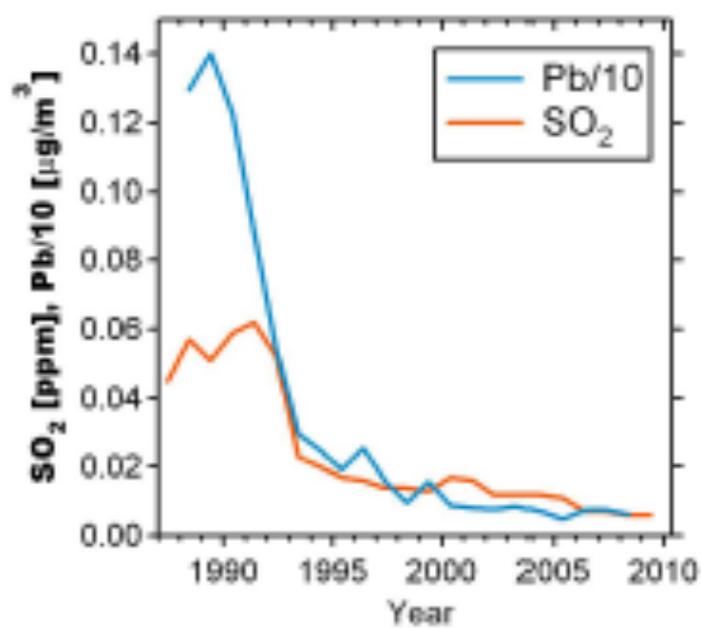
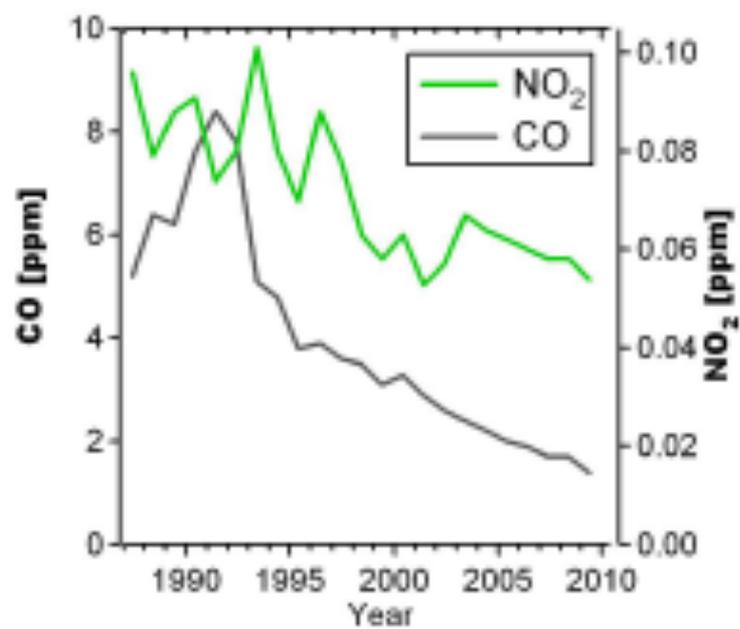
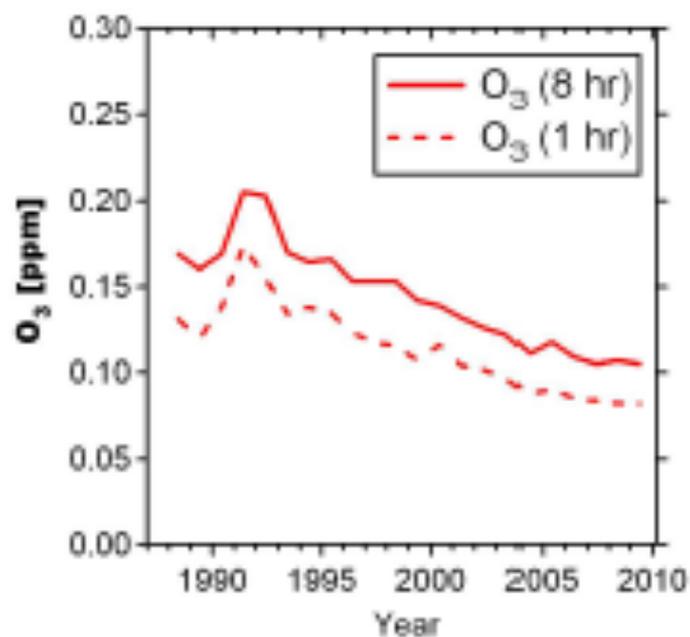


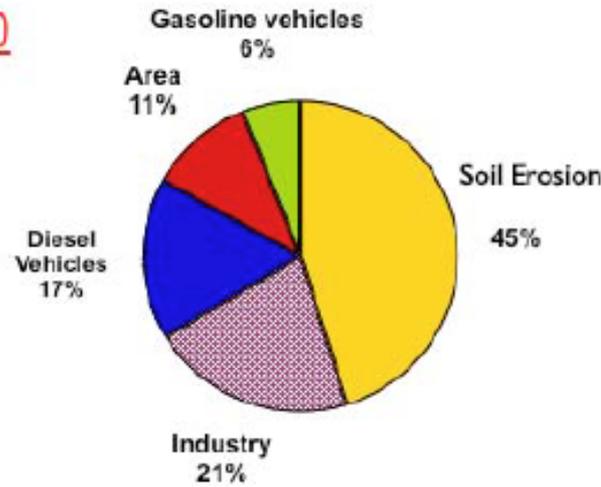
Figure 6.10 X-ray fluorescence spectra for atmospheric particles collected on a pair of membrane filters. The fine particles (**top**) are strongly enriched in Pb and Br, while Ca and Fe are found mostly in the coarse particles (**bottom**) (Jaklevic et al., 1977).

An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation

L. T. Molina¹, S. Madronich², J. S. Gaffney³, E. Apel², B. de Foy⁴, J. Fast⁵, R. Ferrare⁶, S. Herndon⁷, J. L. Jimenez⁸, B. Lamb⁹, A. R. Osornio-Vargas¹⁰, P. Russell¹¹, J. J. Schauer¹², P. S. Stevens¹³, R. Volkamer⁸, and M. Zavala¹

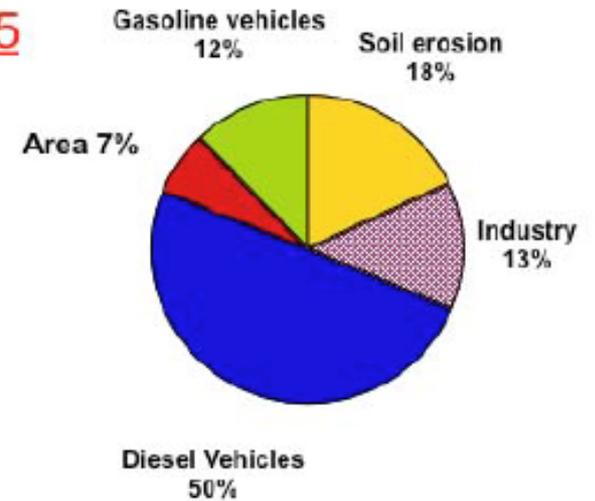


PM10



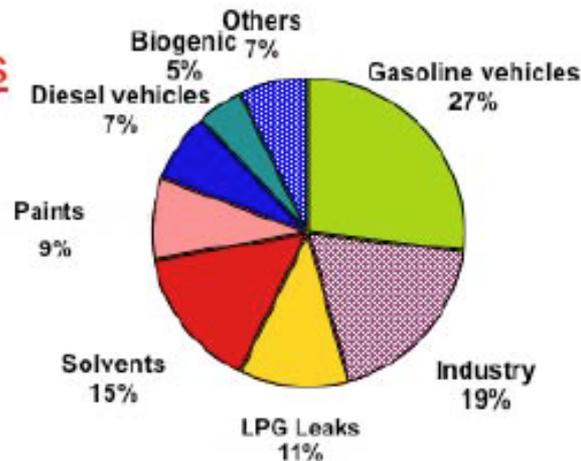
Total: 23,000 tons/yr

PM2.5



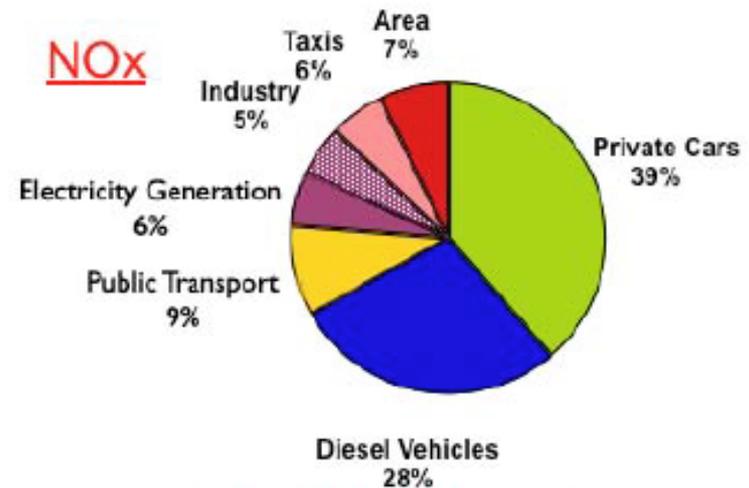
Total: 6,200 tons/yr

VOCs



Total: 566,000 tons/yr

NOx



Total: 195,000 tons/yr

Fig. 6. Emissions Inventory of the MCMA for the year 2006 (Source: www.sma.df.gob.mx/simat).

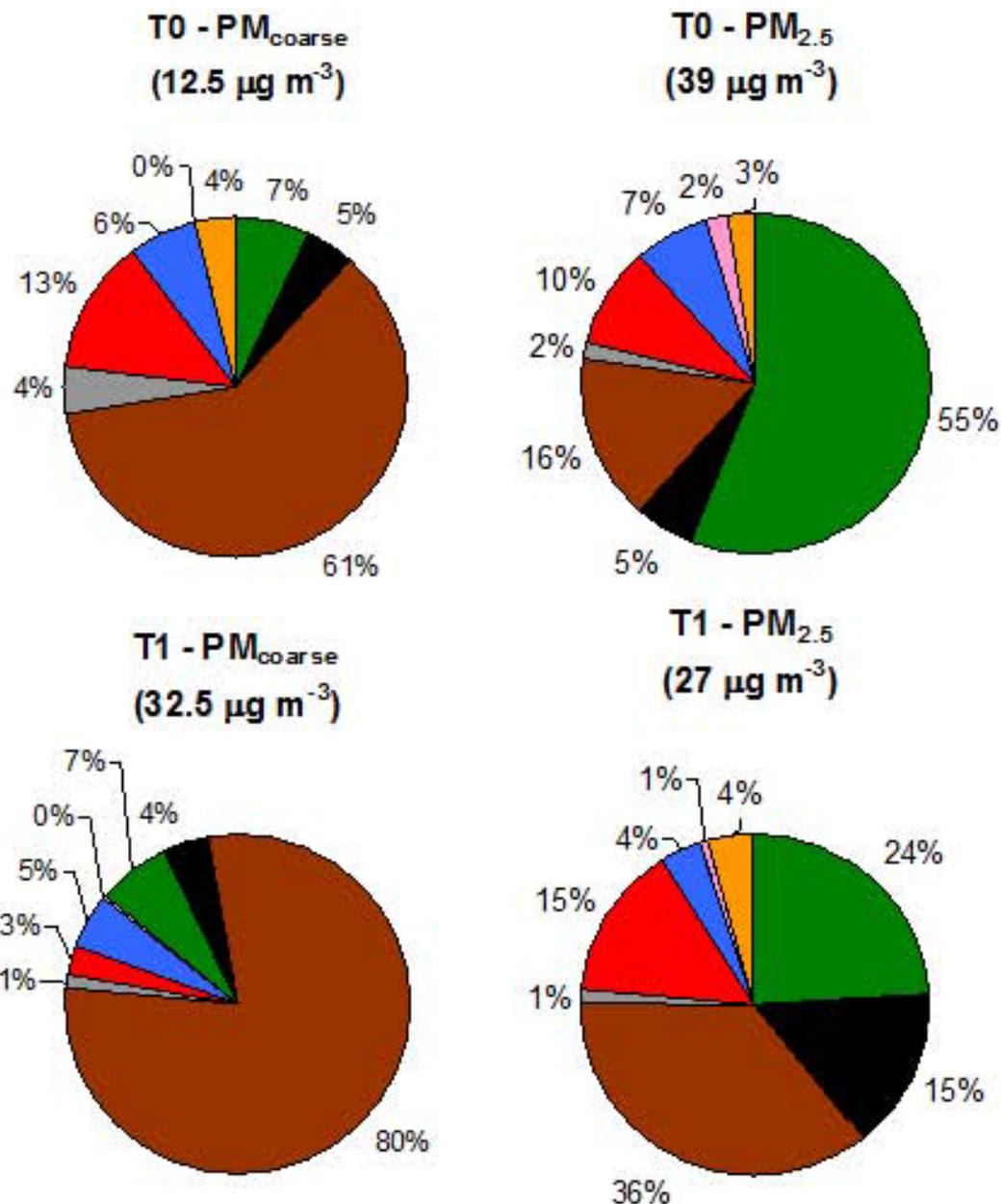
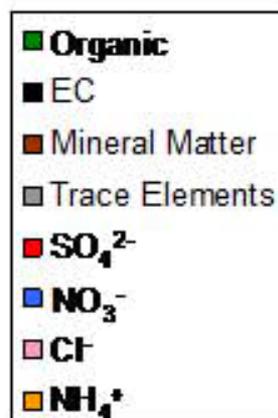


Fig. 12. Average composition of $\text{PM}_{\text{coarse}}$ (PM_{10} – $\text{PM}_{2.5}$) and $\text{PM}_{2.5}$ at the T0 and T1 supersites, based on the results of Querol et al. (2008). OA was calculated from the measured OC based on the average measured OA/OC ratio of 1.75 at T0 (Aiken et al., 2008). The T1 site was affected by local resuspension of dust, which explains the unusually large contribution of mineral matter at this site.

Morfología y composición

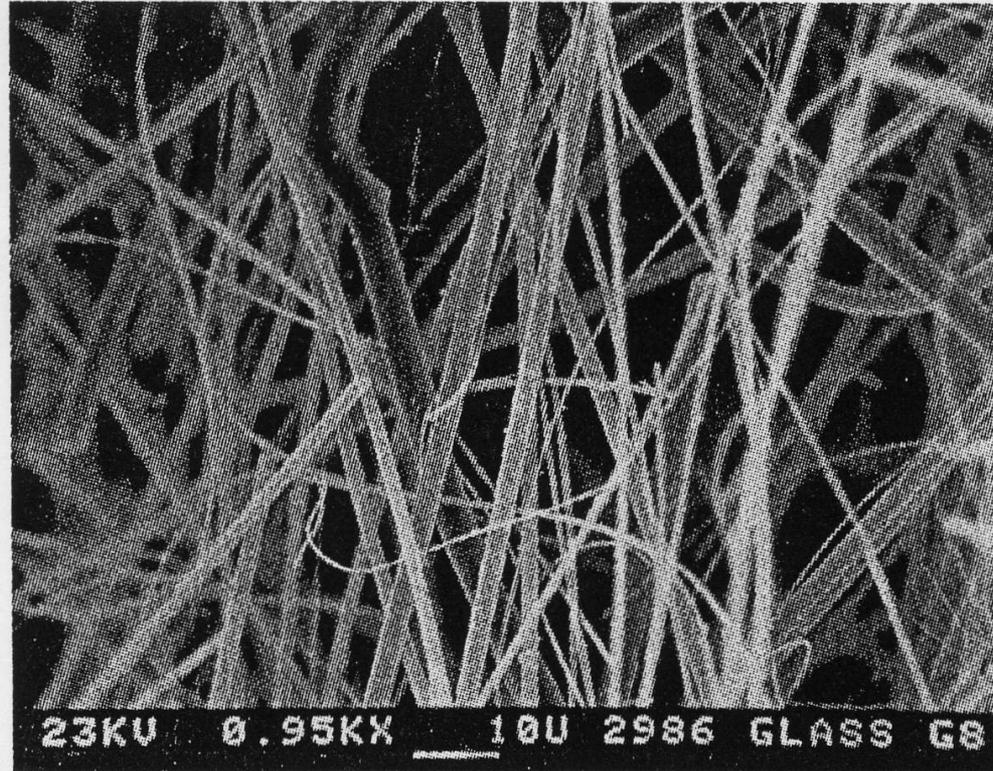


Fig. 9-3. Electron micrograph showing the typical microstructure of a glass fiber filter (*GEL* Type A/E). Scale bar shown on micrograph.

4. Morfología y composición

- Microscopio electrónico de barrido

Dra. Klaudia Olescheko

Instituto de Geología

UNAM

Filtros de aluminio de etapa con partículas con diámetro aerodinámico 0.5um.

VISTA GENERAL DEL FILTRO



Agregado

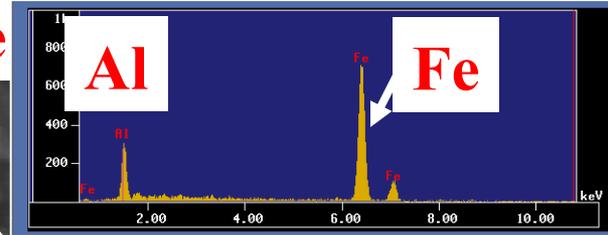
Orgánica (a, b, c)

Zn con mucha cera (d)

Orgánica

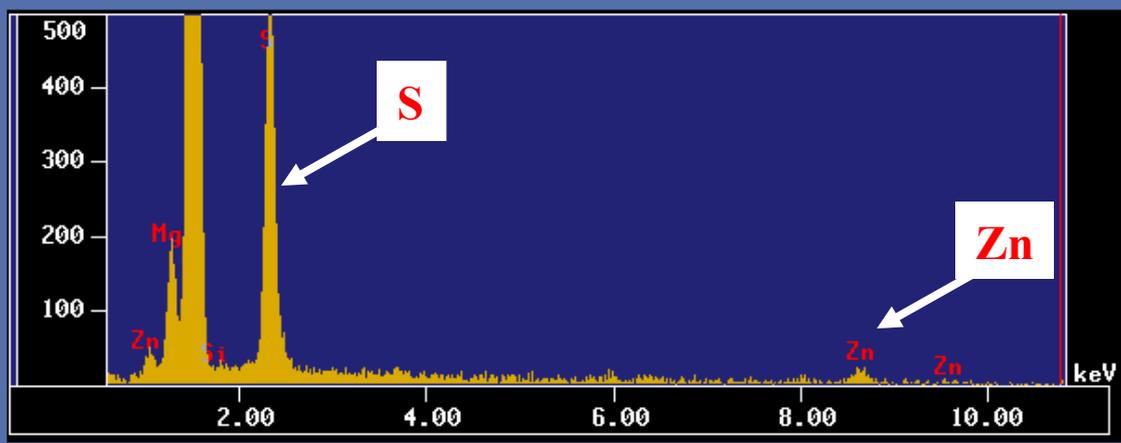
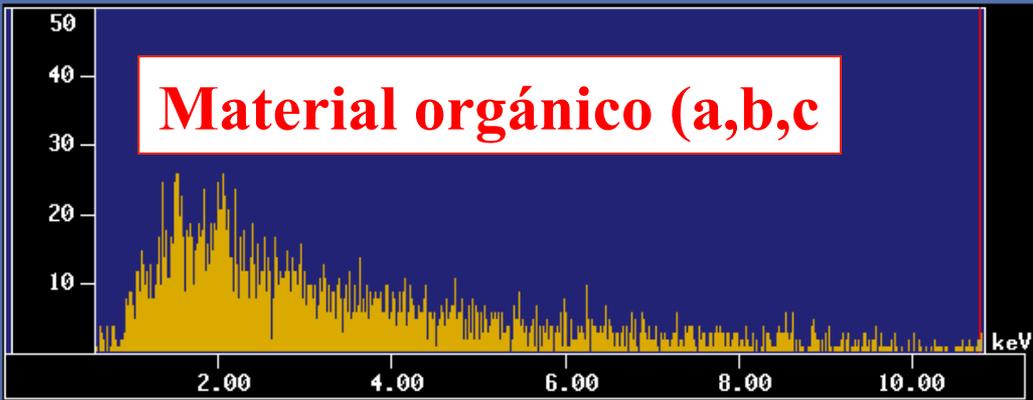
20 μm

SL	Lv
1835	
1758	
1682	
1606	
1530	
1454	
1377	
1301	
1225	
1149	
1073	
996	
920	
844	

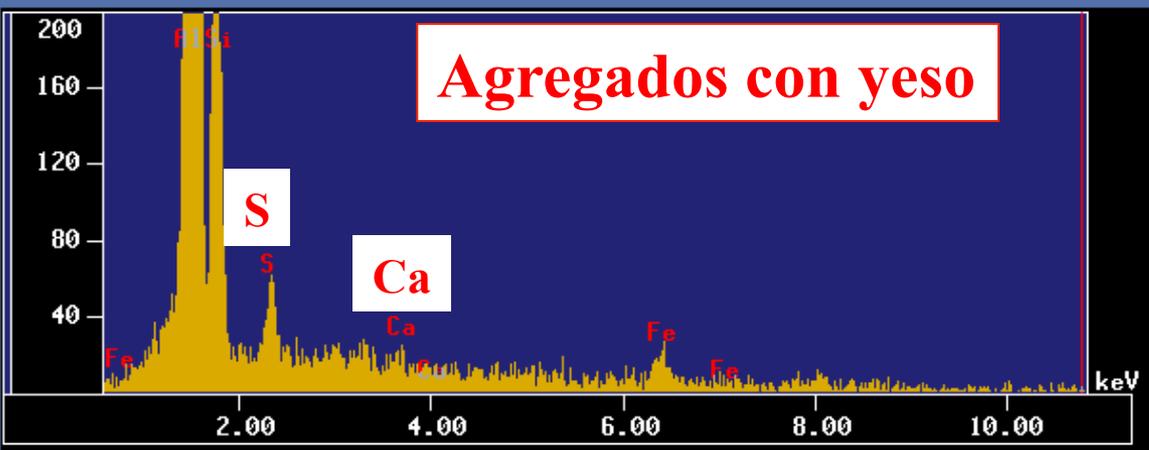


Jan 9 17:15 2003
Beam Scan
Acc. V 20.0 kV
Prob C 2.001e-08A
2.7 10.3740 nm
Points 1024*1024
Size (um) X:0.1818
Y:0.1818
SL IMS 6ch SEI
Accum. 1
Max 1835
Min 816
Ave 918
A, B value 0.0000, 0.0000

Material orgánico (a,b,c)



Agregados con yeso



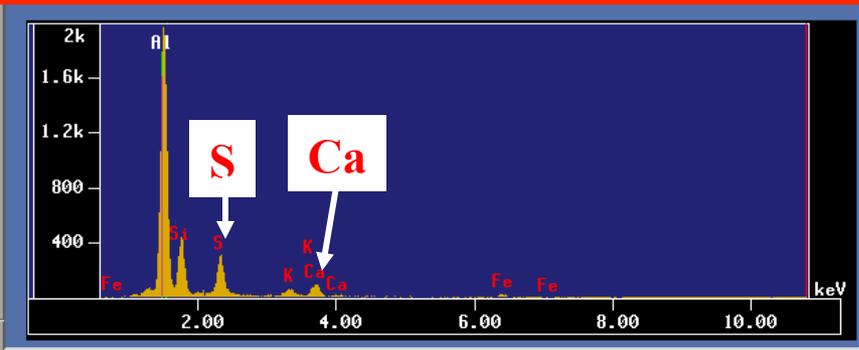
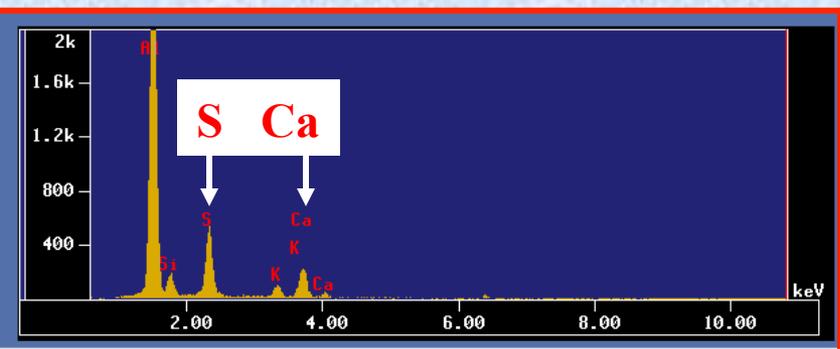
Agregados con yeso



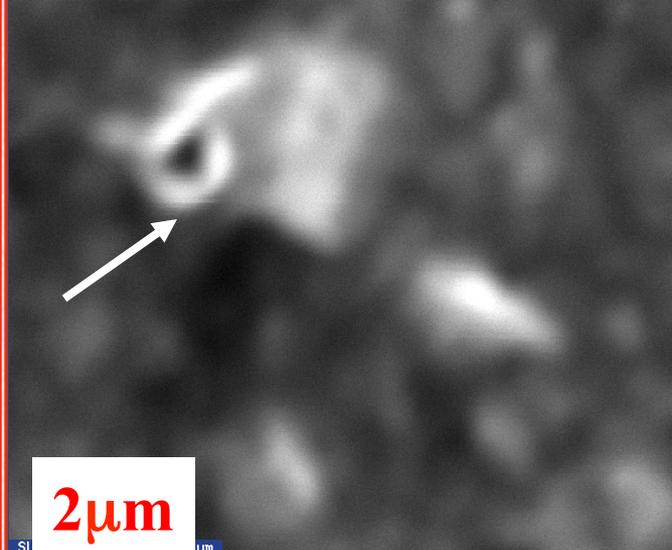
SL	Lv
2040	
1950	
1880	
1800	
1720	
1640	
1560	
1480	
1400	
1320	
1240	
1160	
1080	
1000	
920	
840	
760	
680	
600	
520	
440	
360	
280	
200	
120	
40	
Ave 1145	

```

Group : Filtrcs
Sample : 0067-2
Jan 9 16:49 2003
Beam Scan
Proc W 20.0 kV
Scan W 1000.000
Scan H 1000.000
Proc Dia 10.000
Qualify 0.000
Stage H 0.000
Z 11.0000 mm
Points 1024*1024
Size (um) 738.0143
Y38.0143
SL IHS ECh SEI
Accum 1 zone
Min 1168
Max 2040
R, B value 0.0000, 0.0000
    
```



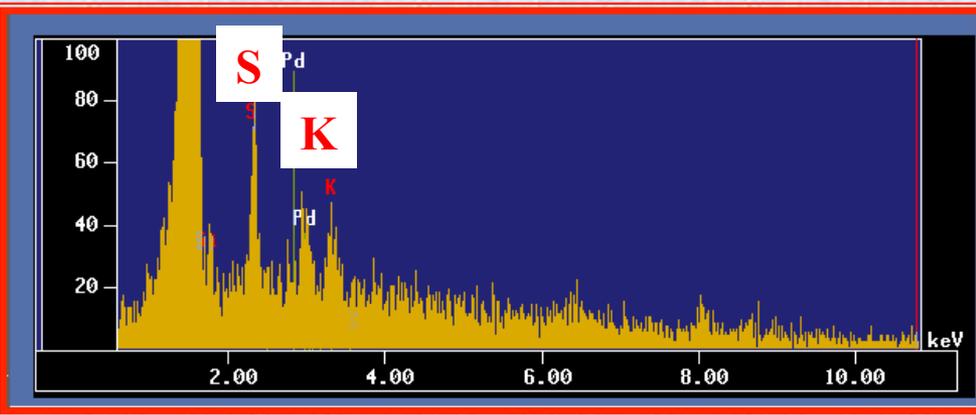
Agregado con azufre

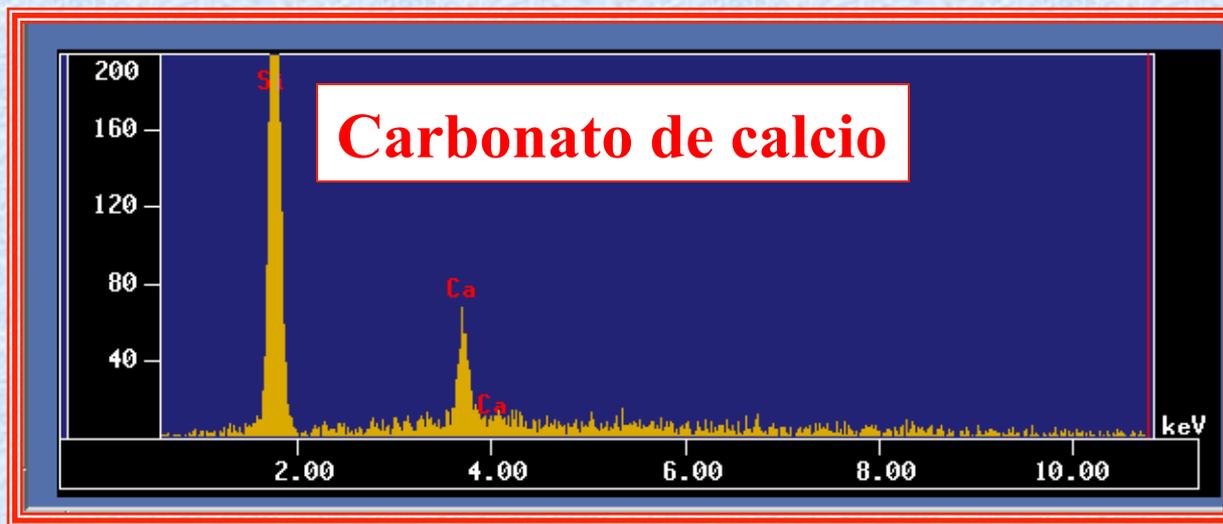
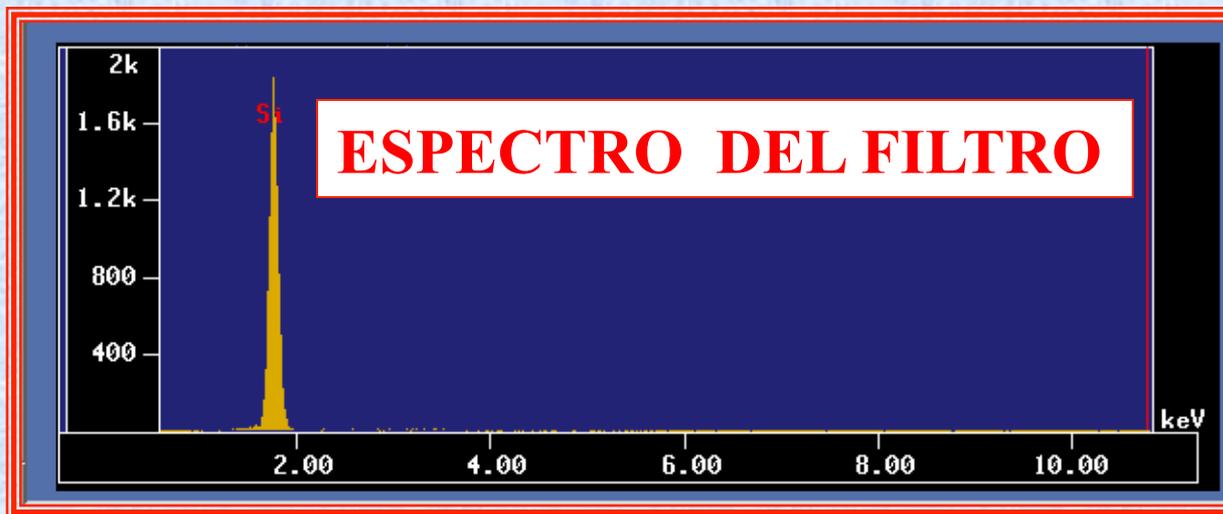


SL	Lv	AreaZ
2040		0.0
1947		0.5
1854		0.5
1761		1.1
1669		1.6
1576		1.7
1483		1.8
1391		2.2
1298		2.6
1205		4.4
1113		7.6
1020		14.8
927		27.0
835		23.6
742		0.0
649		2.0
557		0.3
464		0.0
Ave 1044		0.0

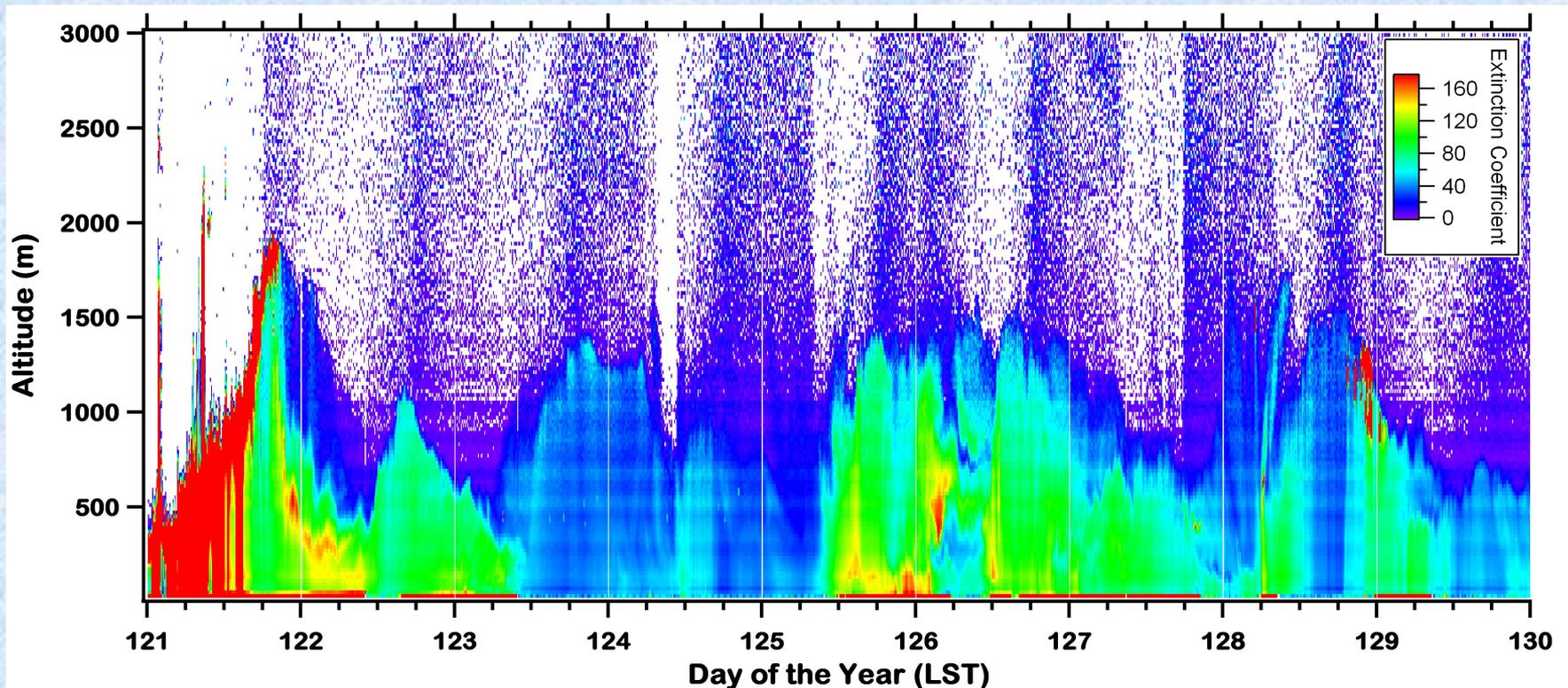
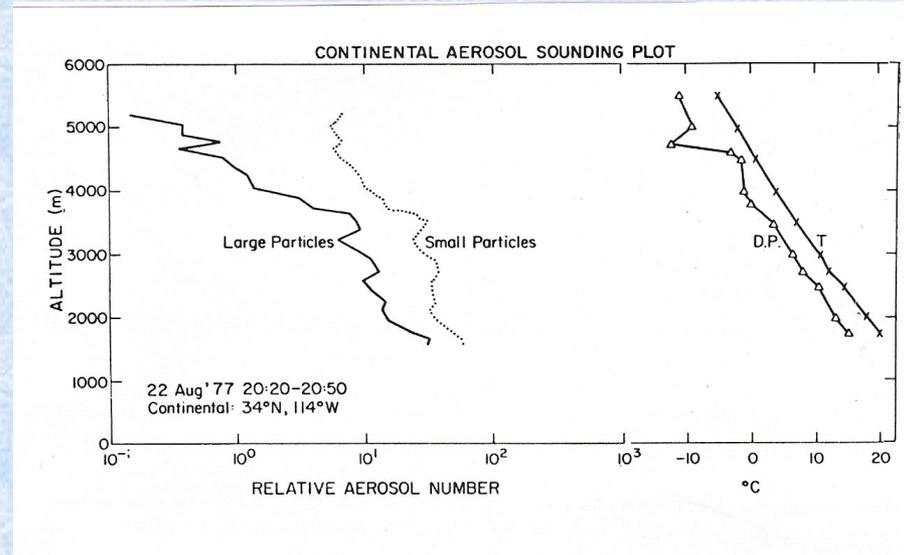
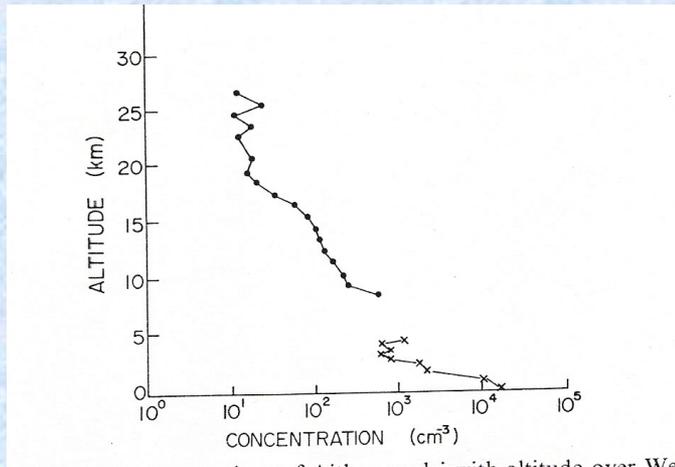
```

Group : Filtrcs
Sample : 0067-30-4
Jan 9 17:06 2003
Beam Scan
Proc W 20.0 kV
Scan W 1000.000
Scan H 1000.000
Proc Dia 10.000
Qualify 0.000
Stage H 0.000
Z 11.0000 mm
Points 1024*1024
Size (um) 738.0111
Y38.0111
SL IHS ECh SEI
Accum 1
Min 2040
Max 2040
R, B value 0.0000, 0.0000
    
```



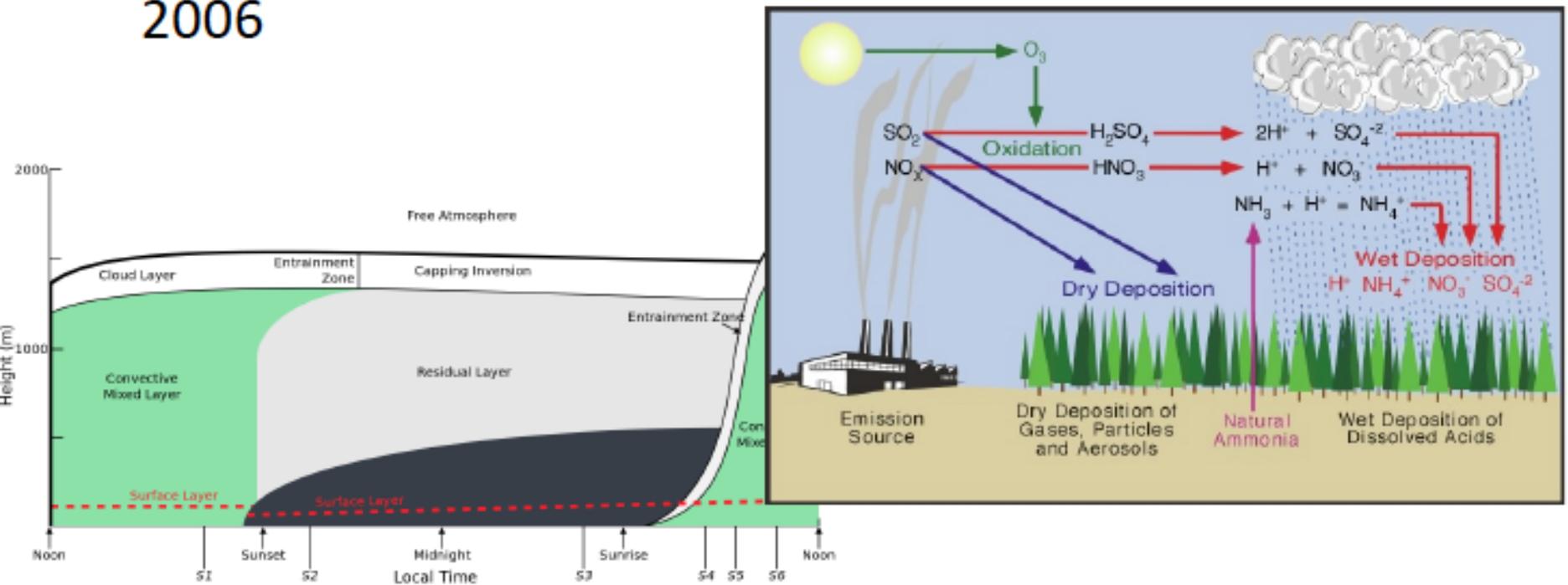


Variación en altura



Importancia de los procesos meteorológicos en la contaminación

- Seinfeld and Pandis, 2006



Procesos de evolución

Transformación

- Coagulación
- Colisión/coalescencia

Sumideros

- Deposición seca
- Deposición húmeda
- Difusión turbulenta
- Remoción por nubes y lluvia

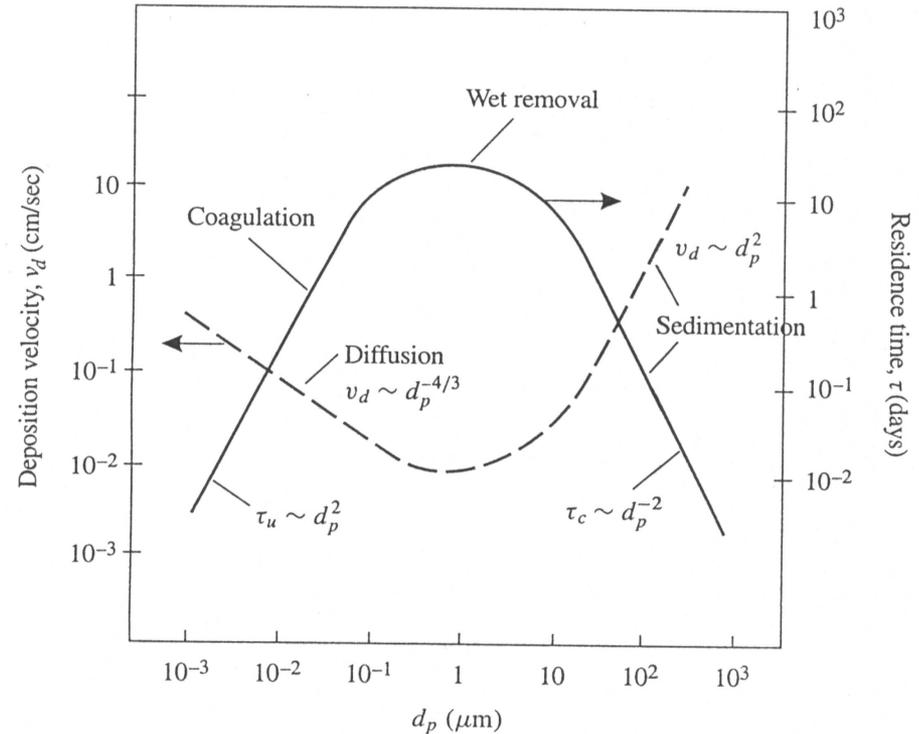


Figure 13.4 The atmospheric aerosol residence time goes through a maximum in the size range corresponding to the accumulation mode $0.1 < d_p < 2.5 \mu\text{m}$. Smaller (ultrafine) particles rapidly attach to the accumulation mode by Brownian motion. Larger particles are lost by sedimentation. The estimated residence times are for a continental aerosol with $N_\infty = 1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ and height of the mixed layer 1.5 km (After Jaenicke, 1980.) Also shown is a dry deposition velocity curve with the settling velocity for large particles, and settling controls their residence time. Diffusion and interception dominate deposition for submicron particles (Chapter 3) but do not usually have a significant effect on their residence times as explained in the text.

Rol de la humedad ambiente y del tiempo de vida en la atmósfera, que afectan la distribución de tamaños

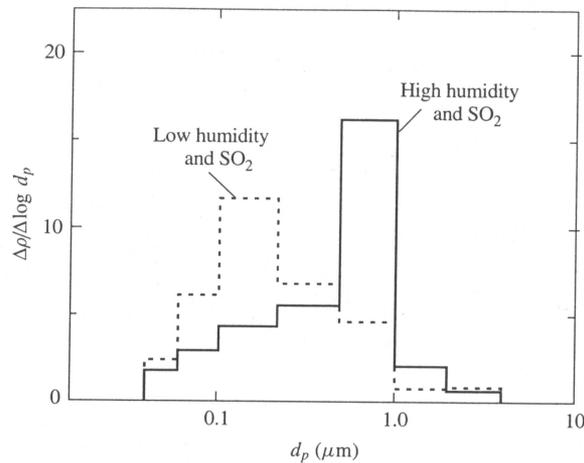


Figure 13.7 Normalized sulfate size distributions measured in Los Angeles. The smaller mode ($d_p \approx 0.2 \mu\text{m}$) was observed during periods of low relative humidity, in the absence of morning fog. The larger mode ($d_p \approx 0.5 \mu\text{m}$) occurred on high-humidity days and was observed more frequently. (After Hering and Friedlander, 1982.)

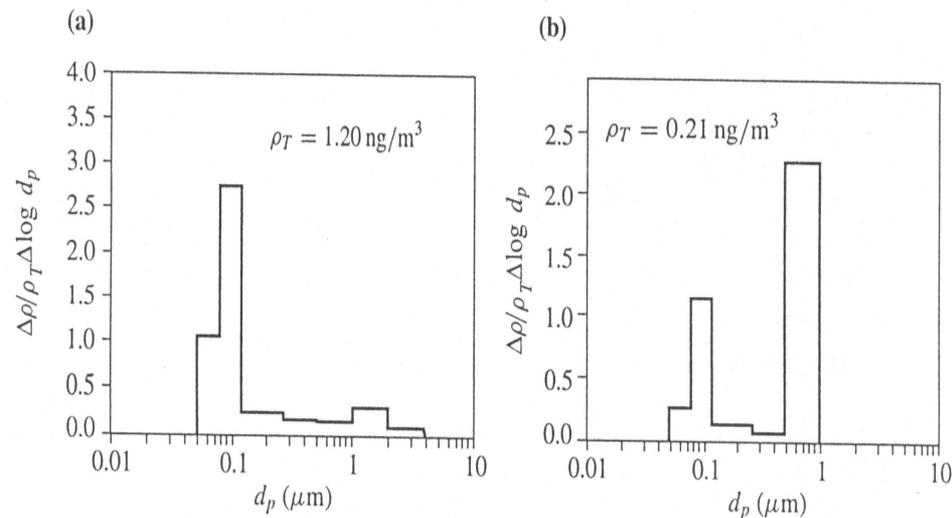


Figure 13.9 (a) Benzo(a)pyrene (BAP) size distribution measured in the air of a Los Angeles traffic tunnel representative of direct vehicular emissions. Sharp peaks are observed for BAP (and many other PAHs) in the size range around $0.1 \mu\text{m}$ (Venkataraman et al., 1994). (b) A bimodal BAP distribution is observed for measurements made away from strong (vehicular) sources. The large-particle mode probably originates from growth of the original $0.1\text{-}\mu\text{m}$ emissions by condensation of secondary aerosol components, especially sulfates and nitrates. (After Venkataraman and Friedlander, 1994.)

Sumideros

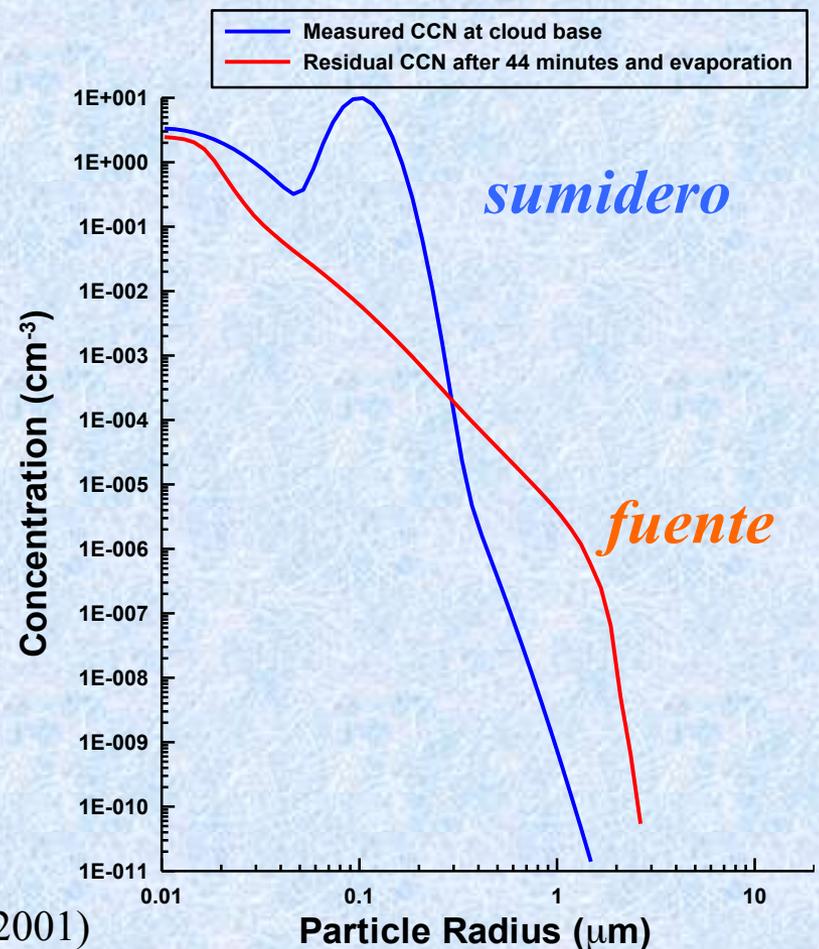
- Depositación seca
- Depositación húmeda
- Procesamiento por nubes

2. Fuentes secundarias: Nubes como fuente de partículas

Estudios recientes indican que nubes pueden ser también una *fuentes* de partículas y no sólo un sumidero como se habían considerado en el pasado.

Debido a la gran superficie de la tierra cubierta por nubes, la magnitud de esta fuente puede ser muy importante.

En promedio una nube se forma y se evapora unas 5 veces y recién en la sexta vez desarrolla precipitación.



(Raga et al, 2001)

Interacción de partículas con radiación:

- **Dispersión:** la energía radiante se re-irradia con diferente intensidad y en diferente dirección
- **Absorción:** se transforma la energía radiante en otro tipo de energía, tal como calor.

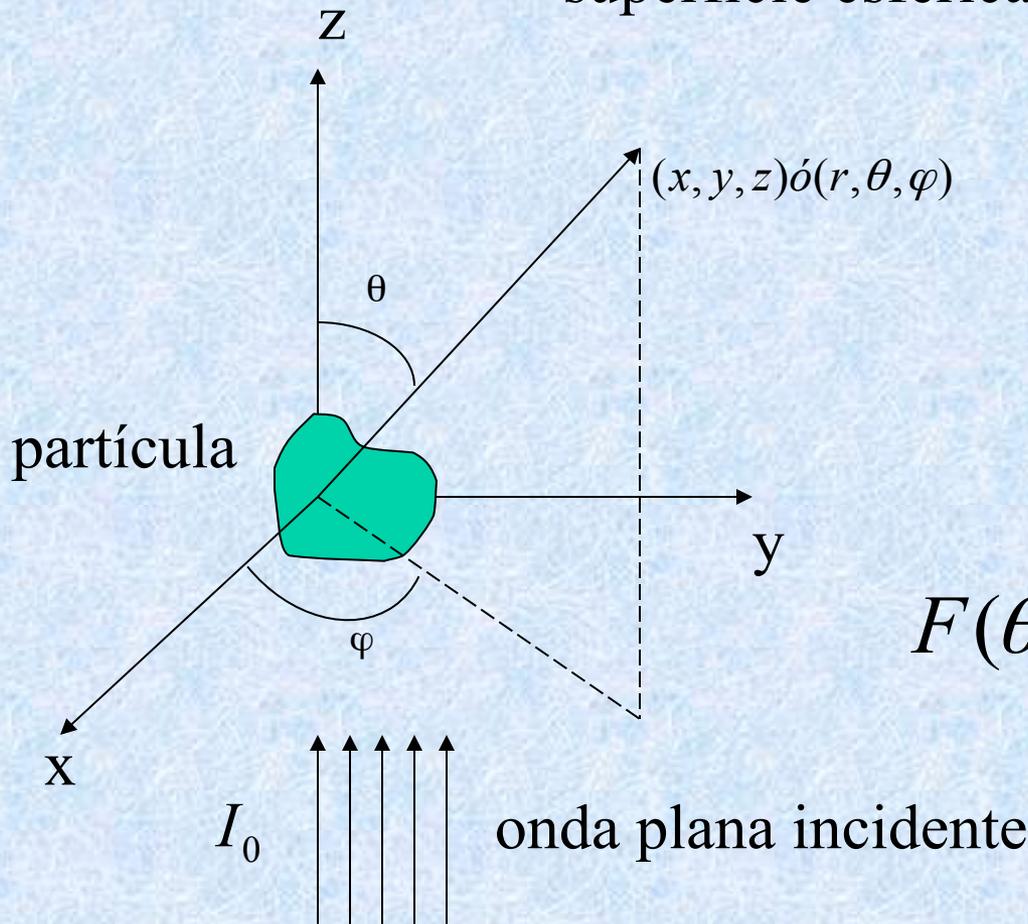
Interacción con radiación

La energía que pasa por un elemento de superficie esférica se escribe como:

$$I \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

$$I = \frac{I_0 \cdot F(\theta, \varphi, \lambda)}{(2\pi r / \lambda)^2}$$

$F(\theta, \varphi, \lambda)$ es la función de dispersión



Interacción con radiación

La energía total dispersada por la partícula en todas las direcciones se puede expresar en función de una sección transversal:

$$C_{scat} = \frac{1}{I_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$
$$= \frac{1}{(2\pi r / \lambda)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \varphi, \lambda) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

y una eficiencia de dispersión:

$$Q_{scat} = C_{scat} / Area$$

Interacción con radiación

Similarmente, la eficiencia de absorción se define como la fracción de la energía incidente que es absorbida por unidad de area transversal de la partícula.

Por lo tanto, la eficiencia de extinción es la suma de las eficiencias de dispersión y de absorción:

$$Q_{ext} = Q_{scat} + Q_{abs}$$

Interacción con radiación

- Partículas pequeñas comparadas con longitud de onda
 - $m = n - in'$: índice de refracción
 - $\epsilon = n^2 + n'^2$: constante dieléctrica
 - $n n' = \lambda \sigma / c$, σ conductividad

$$Q_{scat} = \frac{8}{3} x^4 \cdot \operatorname{Re} \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right\}^2 \quad Q_{abs} = -4x \cdot \operatorname{Im} \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right\}$$

$$x = \pi \cdot d_p / \lambda \quad : \text{parámetro de tamaño}$$

Interacción con radiación

Para partículas pequeñas comparadas con la longitud de onda, el coeficiente de dispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda

Este fenómeno se denomina dispersión de Rayleigh y es la razón por la cual se observa el cielo azul; en este caso las moléculas son las “partículas” y como $\lambda_{azul} \approx 400nm$, $\lambda_{rojo} \approx 700nm$

resulta:

$$Q_{scat\ azul} \approx 10 \cdot Q_{scat\ rojo}$$

Interacción con radiación

- Partículas grandes comparadas con la longitud de onda
- Se da una paradoja en la cual la eficiencia de dispersión es 2. ¿Por qué?
- Debido al tamaño de las partículas, que actúan como un obstáculo, se produce no sólo dispersión sino también difracción de la onda incidente

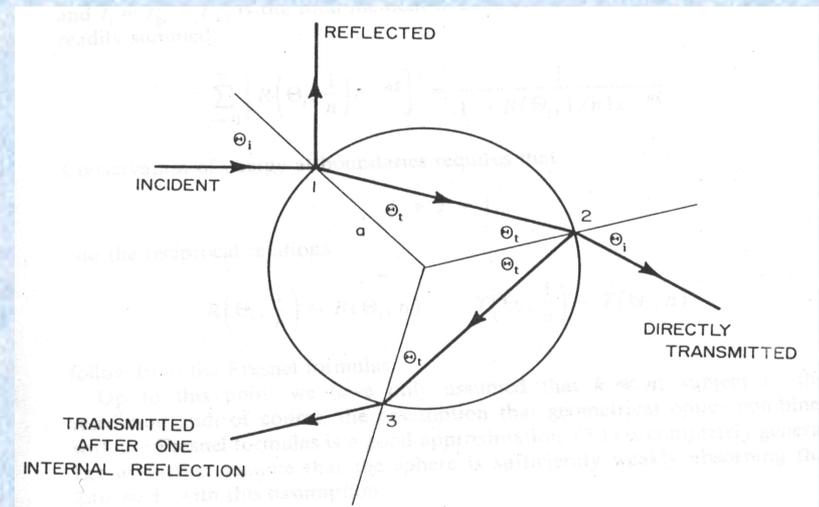
$$x = \pi \cdot d_p / \lambda \gg 1 \implies Q_{scat} \rightarrow 2$$

Interacción con radiación

- Partículas con tamaño comparable con la longitud de onda ($x \sim 1$)
- Teoría de Mie (1908), las expresiones para la intensidad dispersada y absorbida se obtienen resolviendo las ecuaciones de Maxwell de electromagnética, tanto para fuera como para dentro de la partícula

Interacción con radiación

- Partículas con tamaño comparable con la longitud de onda ($x \sim 1$)
- Teoría de Mie (1908) para partículas esféricas
- Las expresiones para la intensidad dispersada y absorbida se obtienen resolviendo las ecuaciones de Maxwell dentro y fuera de la esfera



Interacción con radiación

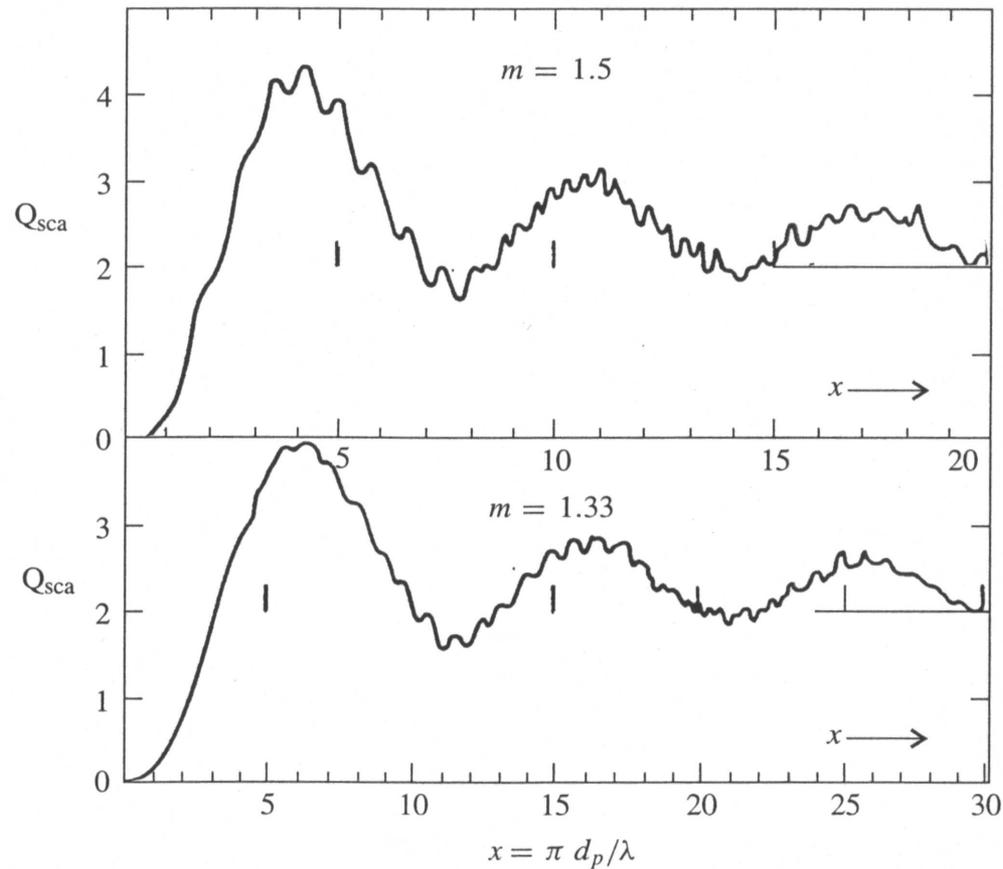


Figure 5.2 Extinction curves calculated from the theory of Mie for $m = 1.5$ and $m = 1.33$ (van de Hulst, 1957). The curves show a sequence of maxima and minima of diminishing amplitude, typical of nonabsorbing spheres with $1 < m < 2$. Indeed, by taking the abscissa of the curve for $m = 1.5$ to be $2x(m - 1)$, all extinction curves for the range $1 < m < 2$ are reduced to approximately the same curve.

Interacción con radiación

- Dispersión por una nube de partículas
--> dispersión múltiple
- La atenuación de la radiación sobre una distancia dz , considerando dN partículas en el rango $(d_p, d_p + d(d_p))$ es:

$$-dI = I \left[\int_0^{\infty} (\pi d_p^2 / 4) \cdot Q_{ext}(x, m) \cdot n_d(d_p) \cdot d(d_p) \right] dz$$

$$dN = n_d(d_p) \cdot d(d_p)$$

Interacción con radiación

- Se define el coeficiente de extinción, también llamado turbidez, como:

$$b = -\frac{dI}{I \cdot dz} = \int_0^{\infty} (\pi d_p^2 / 4) \cdot Q_{ext}(x, m) \cdot n_d(d_p) \cdot d(d_p)$$

donde: $b(\lambda) = b_{scat}(\lambda) + b_{abs}(\lambda)$

Integrando la ecuación resulta:

$$I_2 = I_1 e^{-\tau}$$

τ : espesor óptico

Interacción con radiación

- El coeficiente de extinción se relaciona con la visibilidad atmosférica y en la práctica se puede usar la expresión:

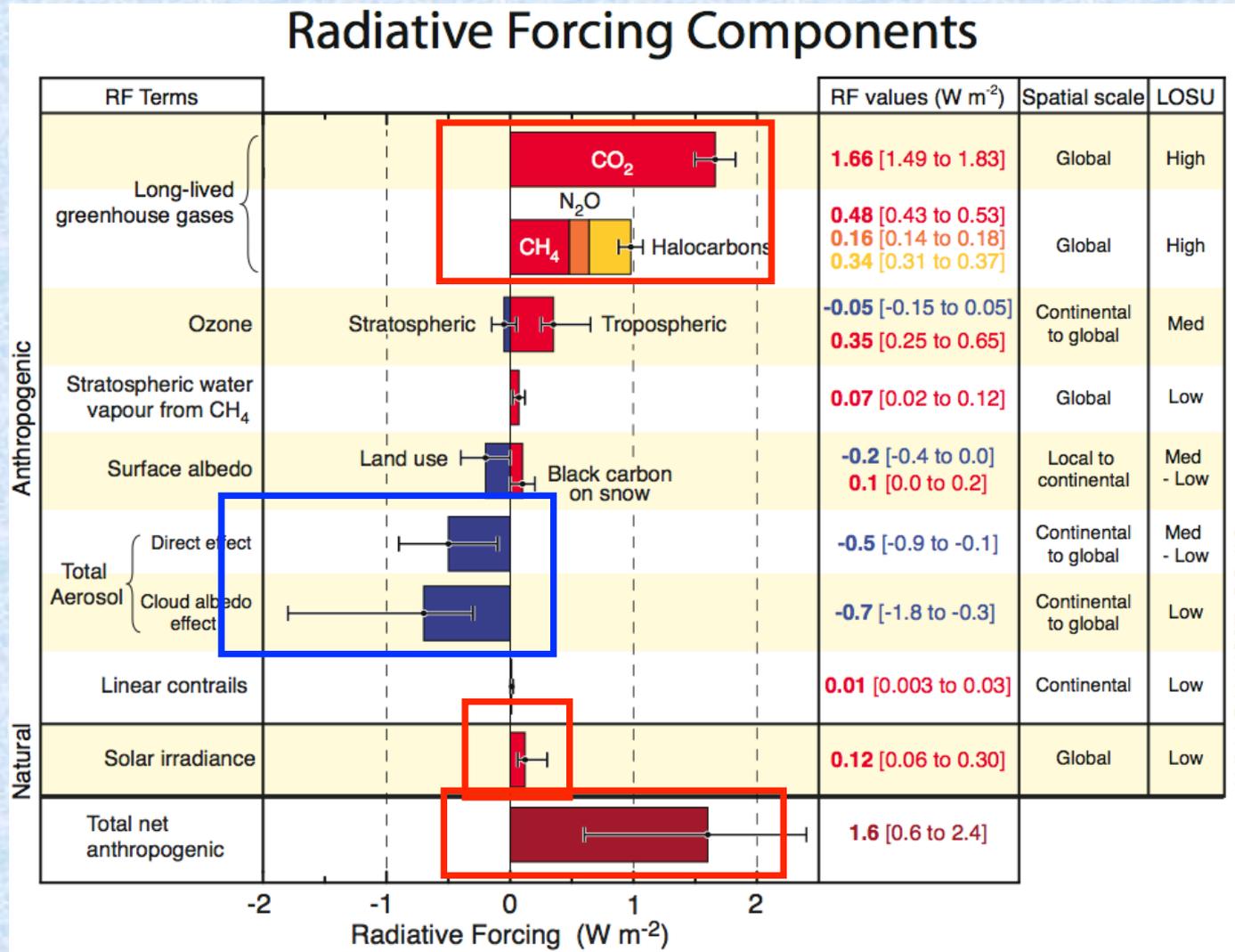
$$s = -\frac{1}{b} \ln(C) \approx \frac{3.912}{b}$$

donde C se relaciona con el contraste de un objeto con el horizonte, pero depende de la percepción humana, y toma el valor 0.02

Forzantes Naturales y Humanos del Cambio Climatico

El bióxido de carbono es el principal forzante.

Tiene una vida promedio de cientos de años en la atmósfera y por lo tanto afecta al clima por periodos de tiempo muy largos.



Forzamiento: Efecto directo

- El forzamiento *directo* se refiere a la interacción de radiación tanto solar como infrarroja con las partículas.
- La interacción de radiación con las partículas, puede dar como resultado la dispersión y la absorción de dicha radiación.
- La interacción depende de la concentración, del tamaño y de la composición de las partículas.

Forzamiento: Efecto directo

- Desde el punto de vista de modelación del efecto directo es necesario conocer las propiedades ópticas de los aerosoles:
 - concentración
 - distribución de tamaños
 - coeficiente de dispersión
 - coeficiente de absorción (o albedo de dispersión simple y factor de asimetría)

pero hay problemas en la predicción....

Forzamiento: Efecto directo

- Hay retroalimentación entre cambios en la temperatura debido a la presencia de aerosoles que tienden a aumentar y desplazar geográficamente el efecto directo de partículas.
- La retroalimentación positiva parece dominar en el clima de la Tierra, e.g.: una respuesta del sistema que cause calentamiento a su vez resultaría en aumento de vapor de agua en la atmósfera y mayor calentamiento

Forzamiento: Efecto directo

- La retroalimentación positiva depende de la latitud, con las regiones polares mostrando la mayor sensibilidad climática.
- La evolución de la respuesta climática está modulada por la gran capacidad calorífica de los océanos y por las interacciones océano-atmósfera
- Además hay que considerar la variabilidad natural del sistema dinámico que limita las predicciones...

Forzamiento: Efecto directo

- Los aerosoles atmosféricos relevantes para el forzamiento climático tienen tamaños de alrededor de 1 μm y tienen poca absorción en longitud de onda visible.
- Por lo tanto, el efecto esperado es el de un enfriamiento del sistema tierra-atmósfera, debido a la retrodispersión de radiación solar de vuelta al espacio (un incremento *neto* del albedo planetario)

Forzamiento: Efecto directo

- Partículas que absorben radiación visible (tales como el hollín y las partículas de polvo del desierto) pueden resultar en un calentamiento.
- Asimismo, para realizar una estimación adecuada del efecto directo, es necesario considerar absorción y emisión en longitudes de onda infrarrojas, que tienen una contribución menor al efecto invernadero pero que no puede ser despreciada.

Forzamiento: Distribución espacial

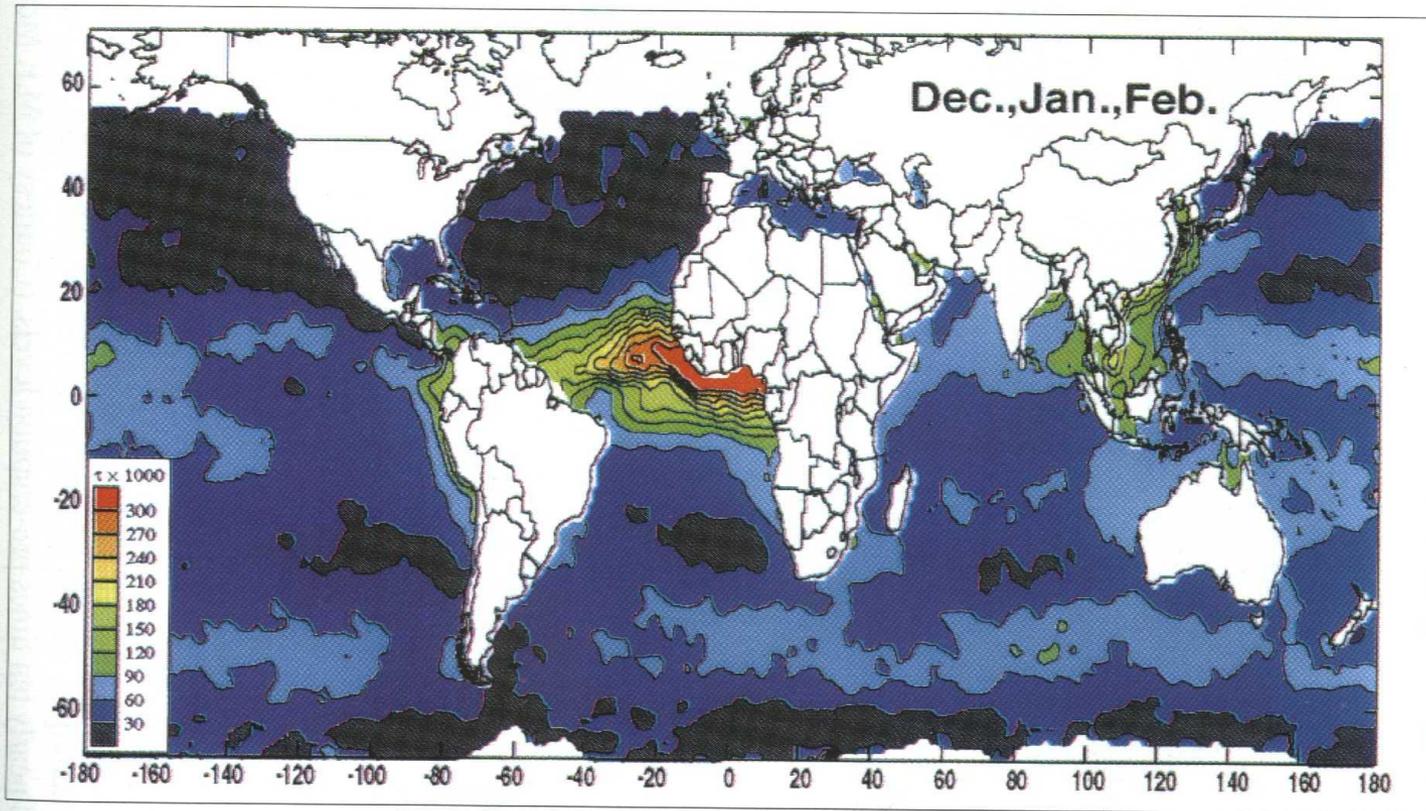
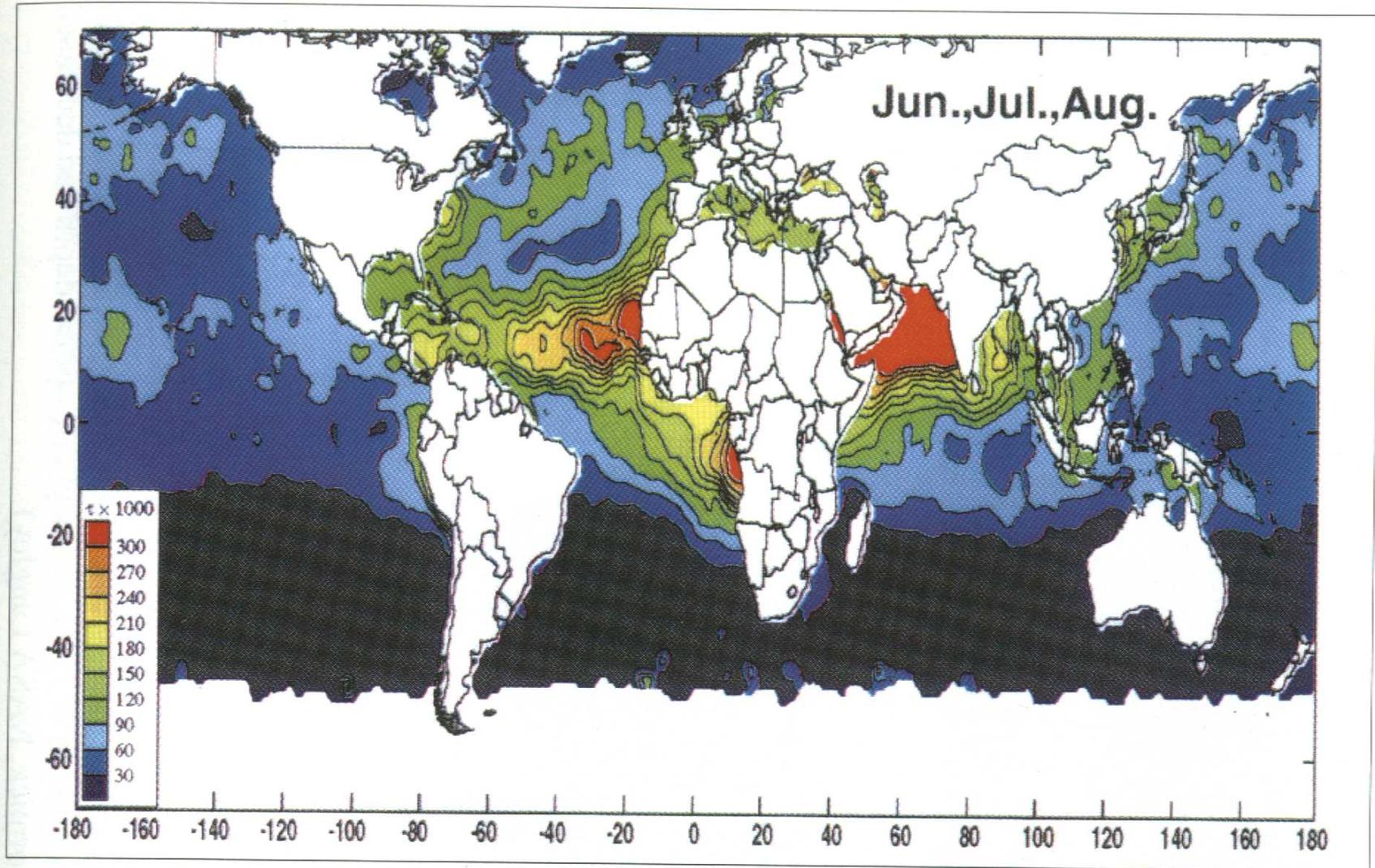
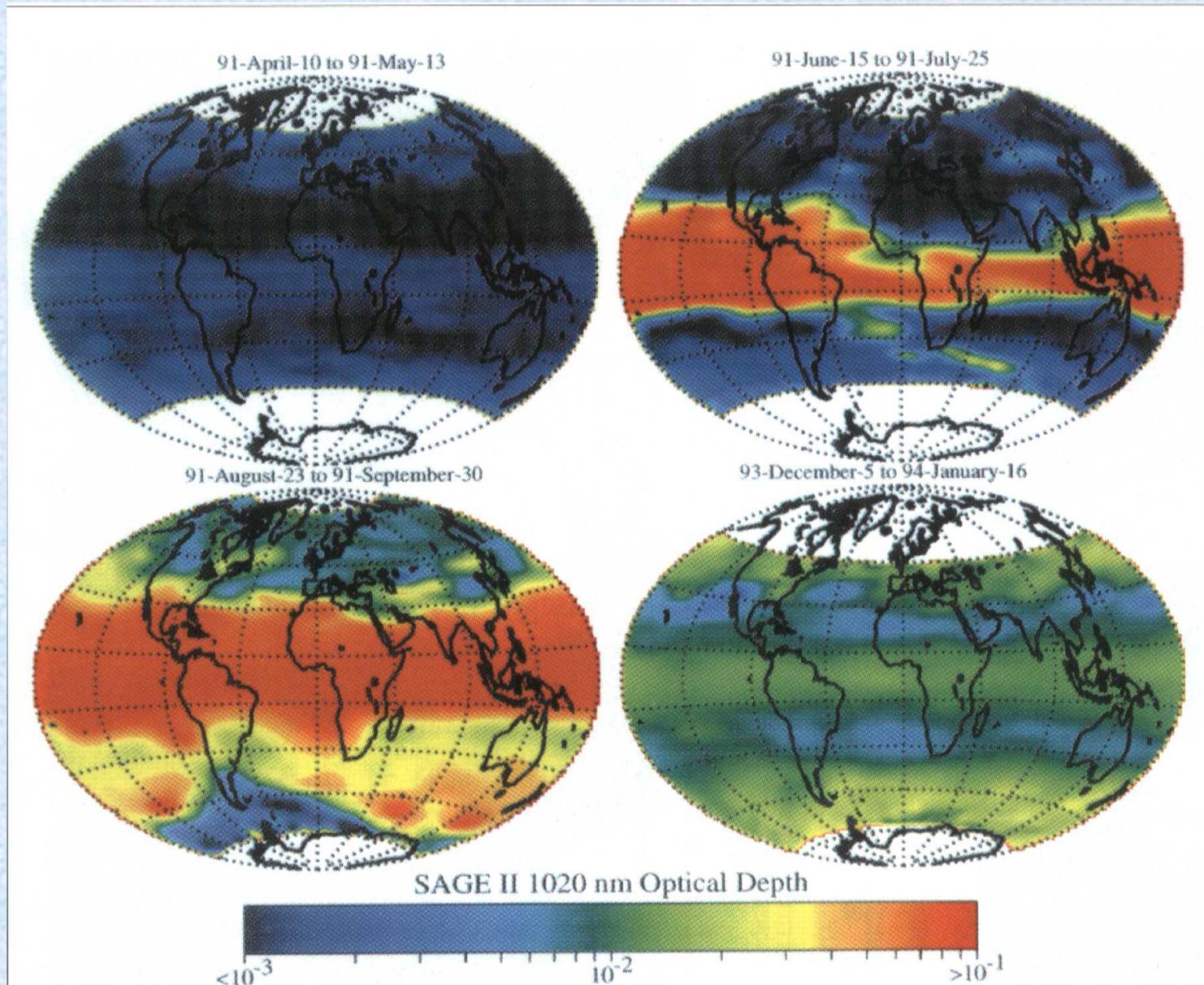


Plate 1.1 Seasonal maps of aerosol backscattering detected by polar orbiting satellites over the oceans. The units are in “equivalent optical depth” × 1000. A quantification of the backscattering aerosol signal will require detailed, regional measurements. Major aerosol plumes originate from West Africa, Southwest Africa, Indonesia, East Asia, Central America, and eastern North America. Regions of enhanced aerosol in the Austral summer over the southern and equatorial Pacific ocean probably originate from natural marine sources. The summer and spring hemispheres show generally higher aerosol backscattering than during the winter and fall. (Courtesy of Rudolf Husar, Washington University, St. Louis)

Forzamiento: Distribución espacial



Forzamiento: Distribución espacial



Espesor óptico del satélite SAGE-II de la erupción de Mt. Pinatubo

Forzamiento: Efecto directo

- ¿Qué se requiere para poder estimar el efecto directo de partículas con certeza?
 - Las constantes ópticas (índice de refracción complejo) en función de la longitud de onda
 - La composición química, forma de partículas y distribución de tamaños y su distribución espacial
 - Un modelo adecuado (e.g. Mie) para estimar los parámetros radiativos en función de la longitud de onda
 - Un modelo de circulación general de la atmósfera con océanos acoplado, con transferencia radiativa detallada

Forzamiento: Efecto directo

- La información de índice de refracción de diferentes compuestos existe, pero en realidad pocas veces las partículas son de composición uniforme...
- Hay pocos puntos en el planeta donde existen bases de datos confiables de las distribuciones de tamaños y se observan grandes variaciones en el espacio y en el tiempo. Son necesarias observaciones a mayor resolución espacial

Forzamiento: Efecto directo

- En caso de tenerse la información adecuada de las partículas, se podrían estimar los parámetros radiativos. Pero eso implica hacer suposiciones porque la teoría de Mie se aplica a partículas esféricas de composición uniforme...
- Hay extensiones de la teoría de Mie en la actualidad que permiten evaluar los parámetros para partículas no esféricas y de composición variable

Forzamiento: Efecto directo

Parámetros radiativos dependen de longitud de onda

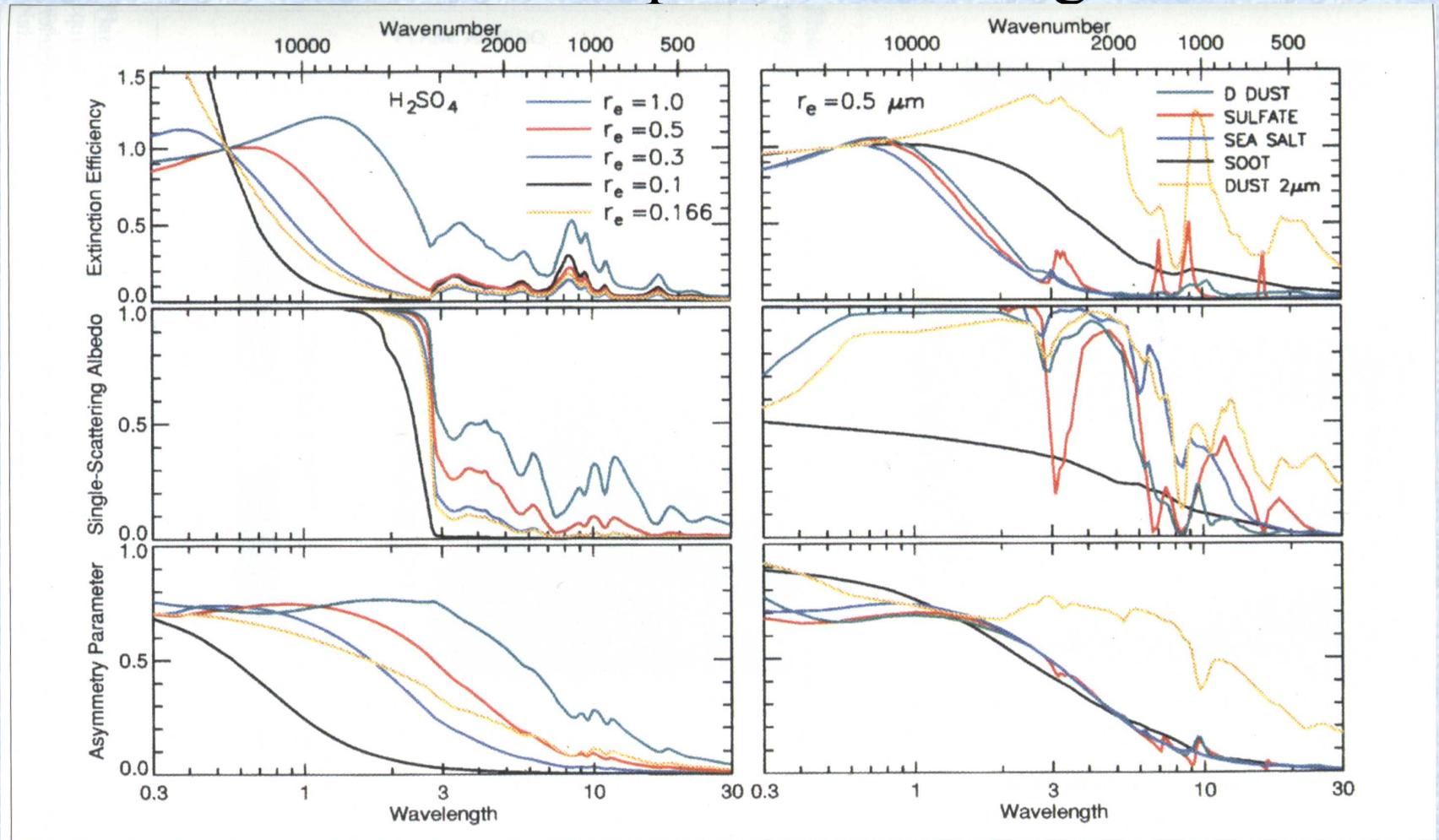


Plate 2.1 Mie-scattering calculated radiative parameters for H_2SO_4 (left) and representative tropospheric aerosols (right).

Forzamiento: Efecto directo

Ejemplo de coeficiente de extinción para 550nm



r_{eff}	Q_{ext}
1.0	2.522
0.5	3.014
0.3	2.716
0.166	1.162
0.1	0.409

$r_{\text{eff}} = 0.5\mu\text{m}$	Q_{ext}
Polvo desierto	2.931
Sulfato	2.969
Sal marina	3.016
Hollín	2.523
Polvo 2 μm	2.280

r_{eff} : radio efectivo

Forzamiento: Efecto directo

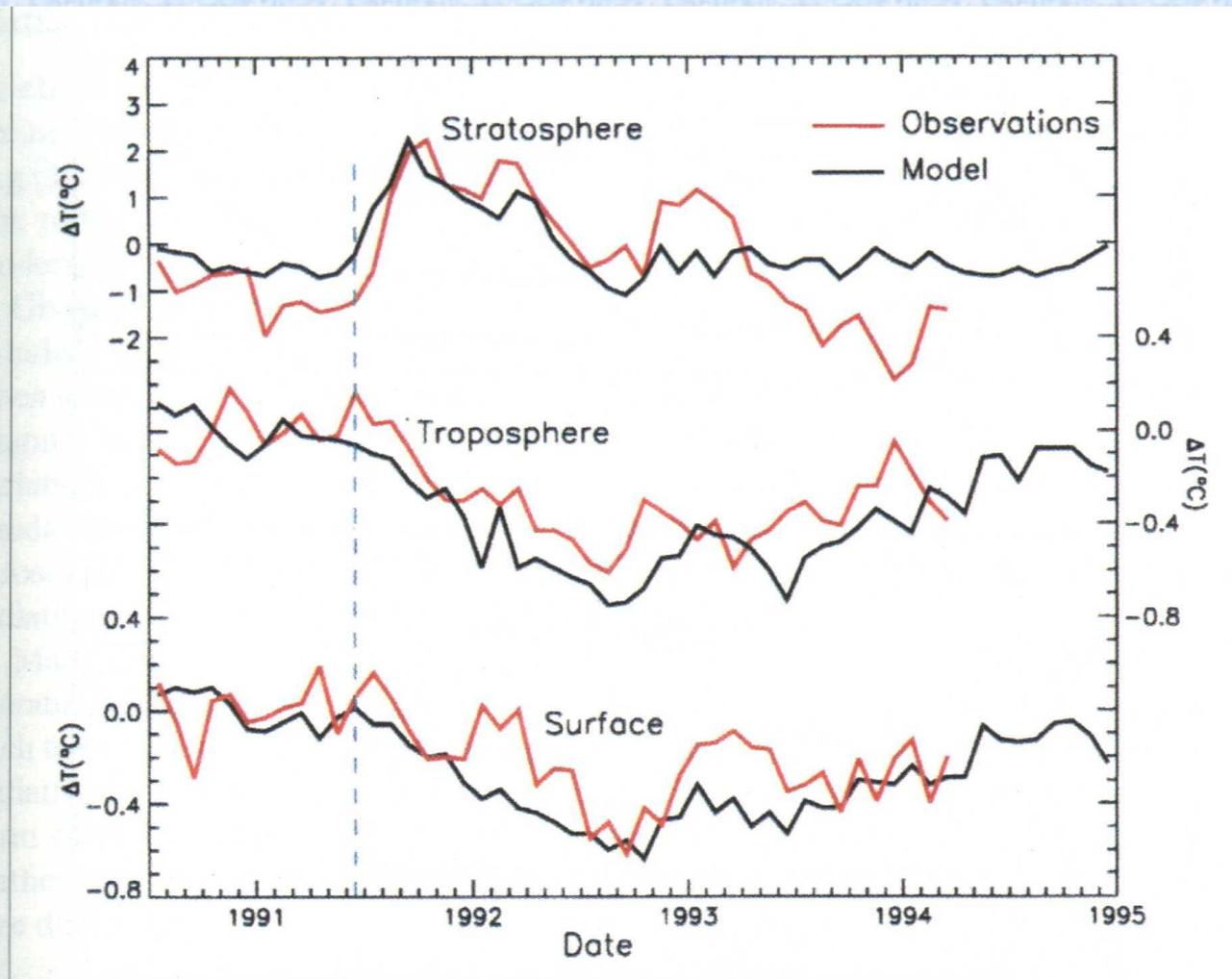


Plate 2.6 The observed and modeled changes in monthly stratospheric, tropospheric, and surface temperatures. Stratospheric observations are the 30-mb zonal mean temperatures at 10°S . Model results are for the 10 to 70 mb layer at 8°S to 16°S . Other results are essentially global. The Pinatubo eruption occurred on June 15, 1991. (Updated after Hansen, Lacis et al. 1993).

Forzamiento: Efecto directo

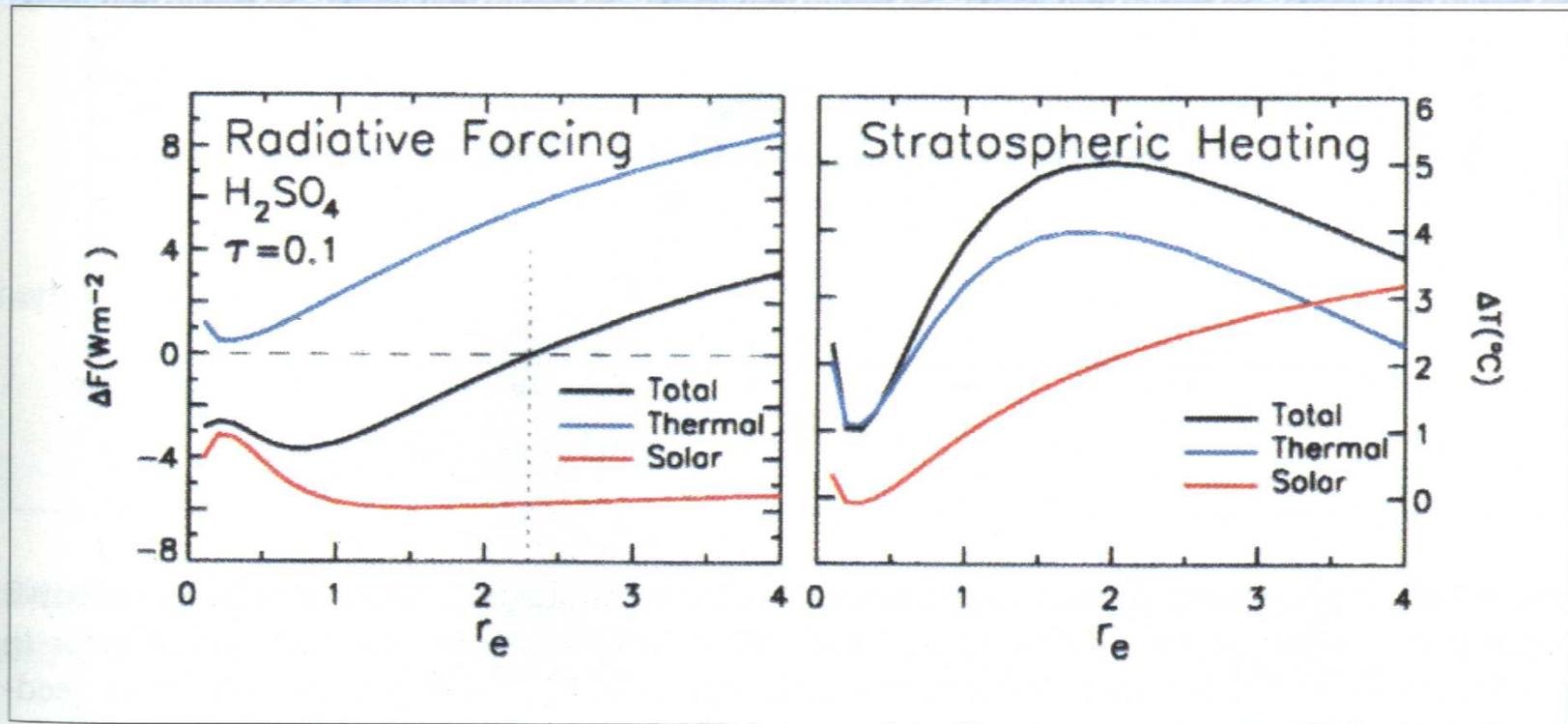


Plate 2.7 Radiative forcing at TOA by stratospheric H₂SO₄ aerosol with optical depth $\delta = 0.1$ as a function of effective radius (left), with corresponding stratospheric heating (right). The dotted line at $r_e = 2.2$ μm delineates particle size ranges that cool and warm the climate.

Efecto indirecto de aerosoles atmosféricos

- La concentración de gotas en nubes estratiformes depende directamente de los CCN presentes y de la sobresaturación (menor que 1%) que es función de la velocidad vertical.
- Tanto partículas naturales como aquellas producidas por el hombre afectan la formación y evolución de la microfísica y también de las propiedades radiativas de las nubes.

Efecto indirecto de aerosoles

- Un aumento en las fuentes antropogénicas de CCN puede llevar a un incremento en el albedo de las nubes, dado que aumenta la concentración de gotas pero se reduce el tamaño promedio de las mismas
- Este efecto se denomina el *efecto indirecto* de aerosoles y fue Twomey quien primero lo trajo a discusión (en 1974)

Efecto indirecto de aerosoles

- Una mayor concentración de gotas de menor tamaño también implica una reducción en la eficiencia de precipitación y por ende, una vida media más larga, afectando el ciclo hidrológico
- Pero es el impacto en el albedo lo que se considera como dominante al hablar del efecto indirecto de aerosoles

Efecto indirecto de aerosoles

- Para evaluar si se observa el efecto indirecto es necesario definir qué parámetros se usarán como indicadores.
- Consideremos el caso de luz visible y condiciones constantes de contenido de agua líquida
- Por lo tanto, el espesor óptico será proporcional a la raíz cúbica de la concentración de gotas:

Efecto indirecto de aerosoles

- El albedo en función del factor de asimetría (g) y de la concentración de gotas (N) será:

$$A = \frac{(1-g)\tau_c}{a + (1-g)\tau_c} = \frac{(1-g)N^{173}}{c + (1-g)N^{1/3}}$$

- Un cambio en la concentración N dará un cambio en el albedo:

$$\Delta A = \frac{A(1-A)\left[\left(1 + \frac{\Delta N}{N}\right)^{1/3} - 1\right]}{A\left[\left(1 + \frac{\Delta N}{N}\right)^{1/3} - 1\right] + 1}$$

Efecto indirecto de aerosoles

- Se define la *susceptibilidad de las nubes* como:

$$\frac{dA(\tau_c, \omega_o, g)}{dN} = \frac{\partial A}{\partial \tau_c} \cdot \frac{\partial \tau_c}{dN} + \frac{\partial A}{\partial \omega_o} \cdot \frac{\partial \omega_o}{dN} + \frac{\partial A}{\partial g} \cdot \frac{\partial g}{dN}$$

considerando constante el contenido de agua líquida

Efecto indirecto de aerosoles

- Dado que hay una linealidad entre N y CCN , podemos calcular $dA/dCCN$ como la susceptibilidad
- El forzamiento al clima es proporcional a la susceptibilidad, dado que el albedo se expresa como: $A=F/F_0$, donde F_0 es el flujo solar incidente y F es flujo radiante reflejado.

Efecto indirecto de aerosoles

- Considerando luz visible, albedo de dispersión simple= 1 y coeficiente de asimetría constante con el radio, podemos reescribir la susceptibilidad como:

$$\frac{dA(\tau_c, \omega_o, g)}{dN} \cong \frac{\partial A}{\partial \tau_c} \cdot \frac{\tau_c}{3N} \cong \frac{4\pi\rho_w}{9W} \cdot \tau_c \cdot \frac{\partial A}{\partial \tau_c} \cdot r^3$$

donde W es el contenido de agua líquida y r es el radio de las gotas

Efecto indirecto de aerosoles

- En realidad el radio es un promedio del radio volumétrico:

$$r_v = (\overline{r^3})^{1/3}$$

- y podemos definir el radio efectivo como:

$$r_{eff} = (\overline{r^3}) / (\overline{r^2})$$

Efecto indirecto de aerosoles

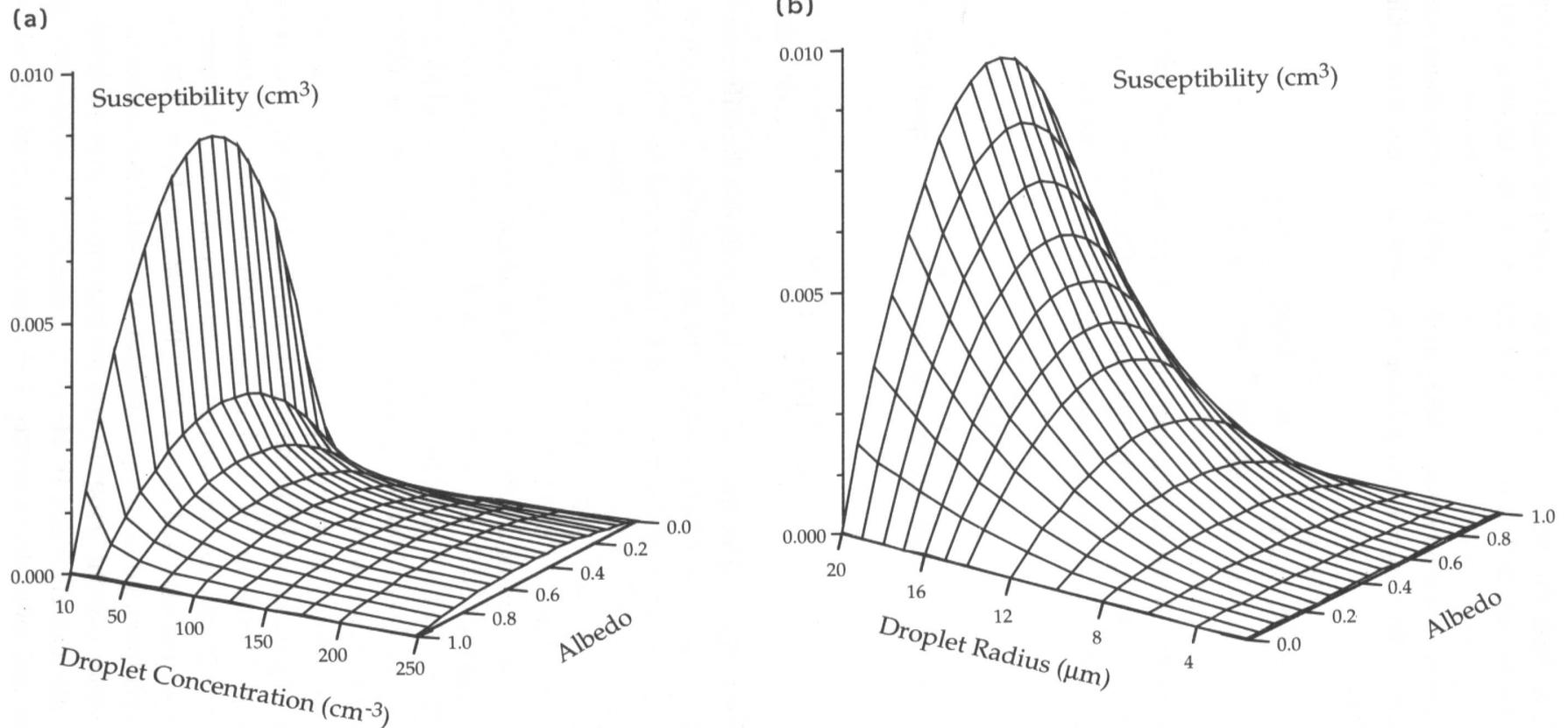


Figure 13.1 Cloud susceptibility as a function of cloud albedo and (a) droplet concentration and (b) effective radius with liquid water content equal to 0.3 g m^{-3} . These calculations are based on a two-stream approximation (see text for details).

Efecto indirecto de aerosoles

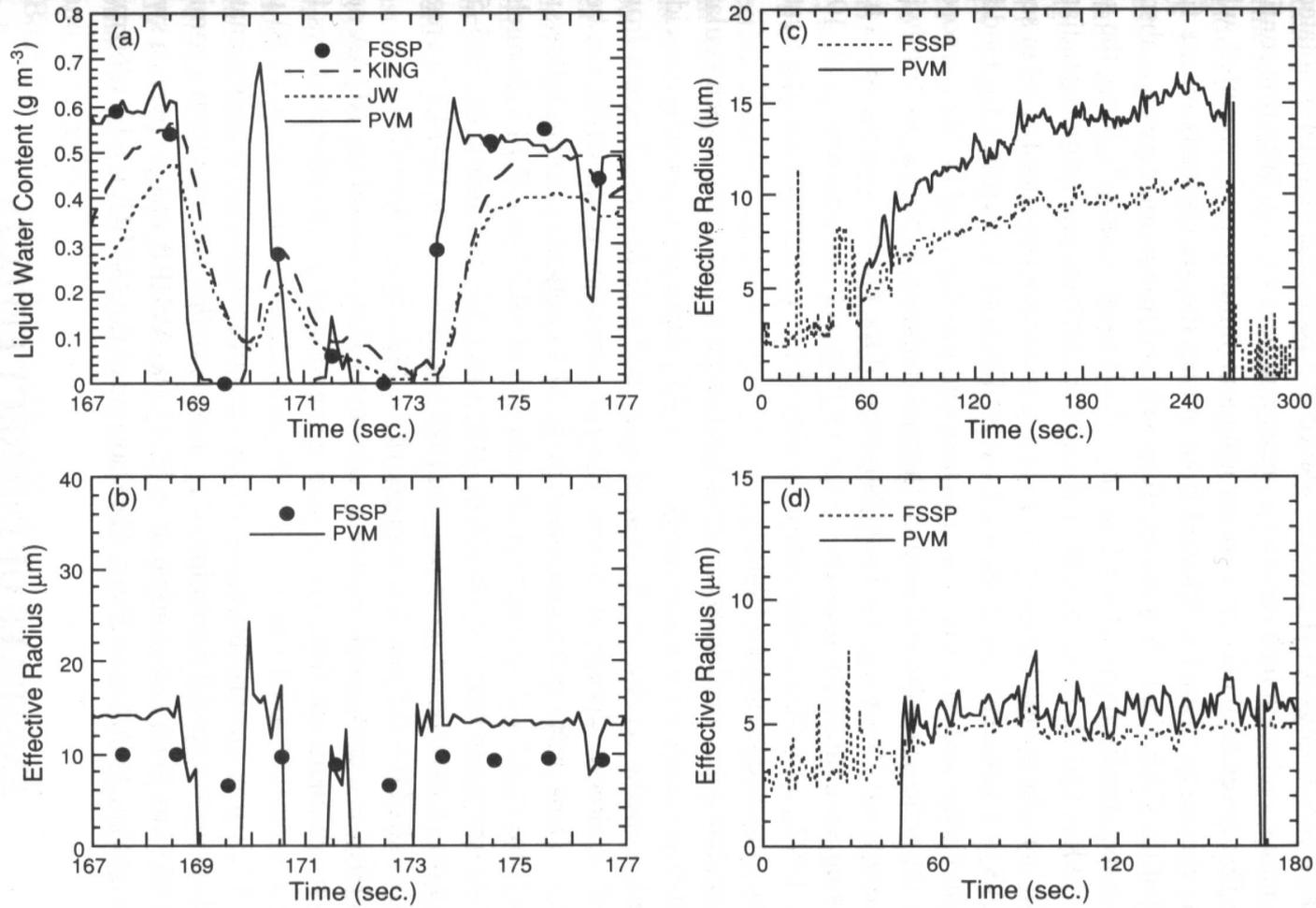


Figure 13.2 Intercomparison between the PVM-100A, FSSP-100, Johnson-Williams hot wire, and King hot wire probes for (a) liquid water content and (b) effective radius as a function of time over a broken cloud field, and (c) measurements near cloud top for 5 min of data and (d) near cloud base for 3 min of data.

**Evidencia del
efecto indirecto:**

**Traectorias de buques
sobre el océano en
presencia de nubes
stratocumulus**

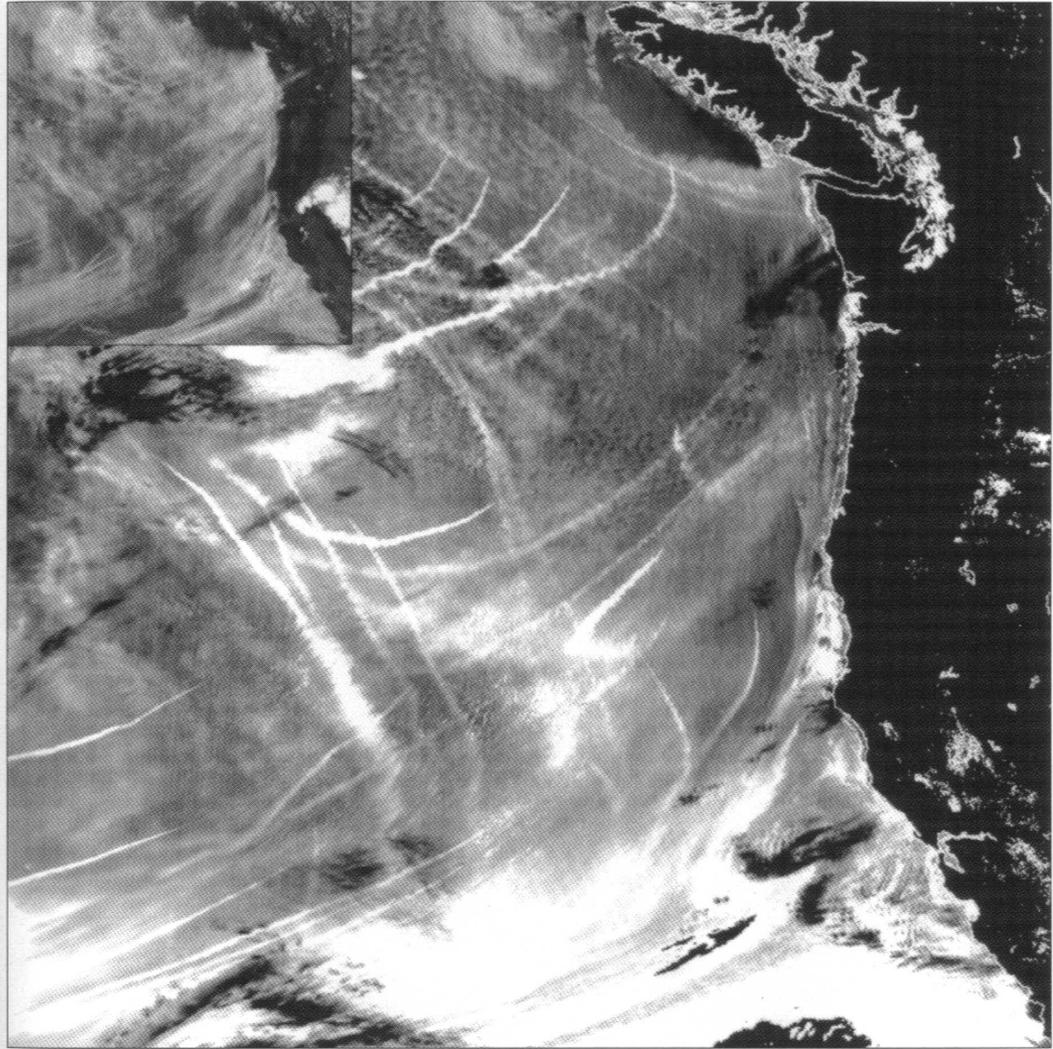
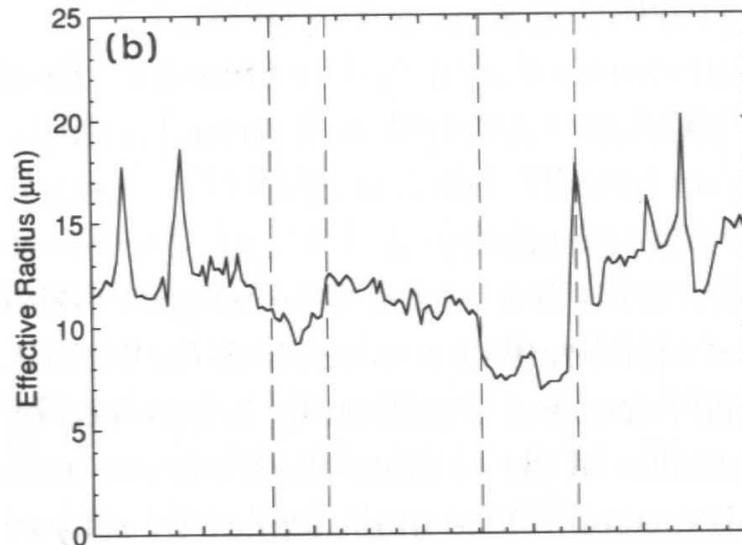
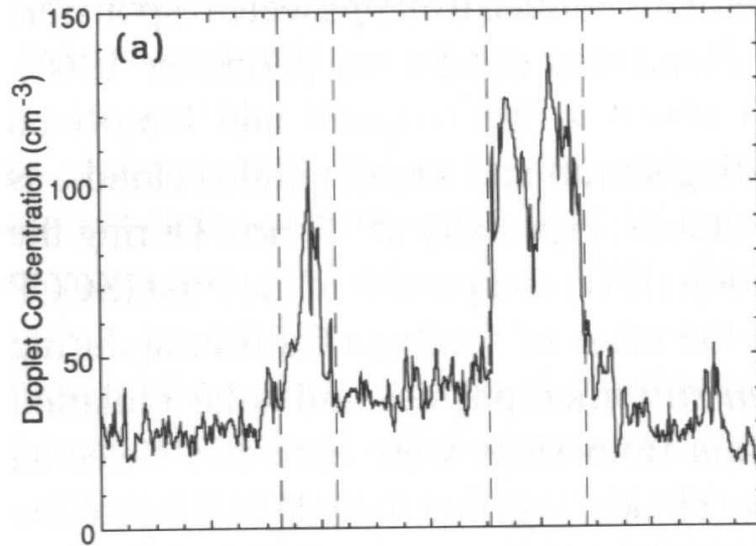


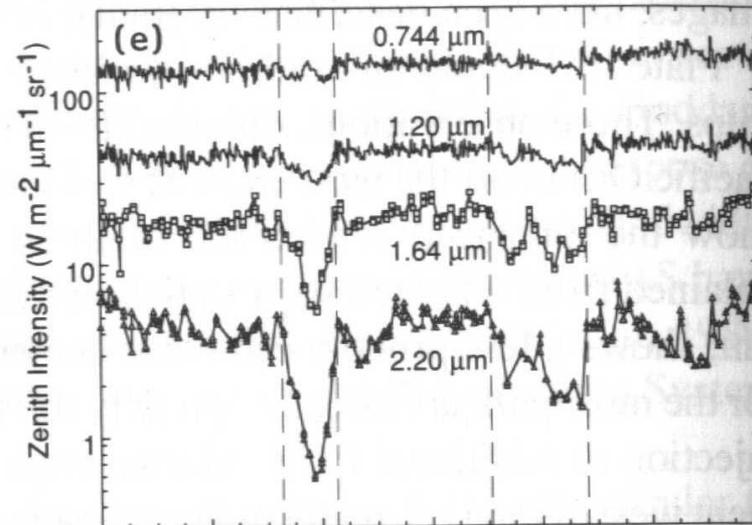
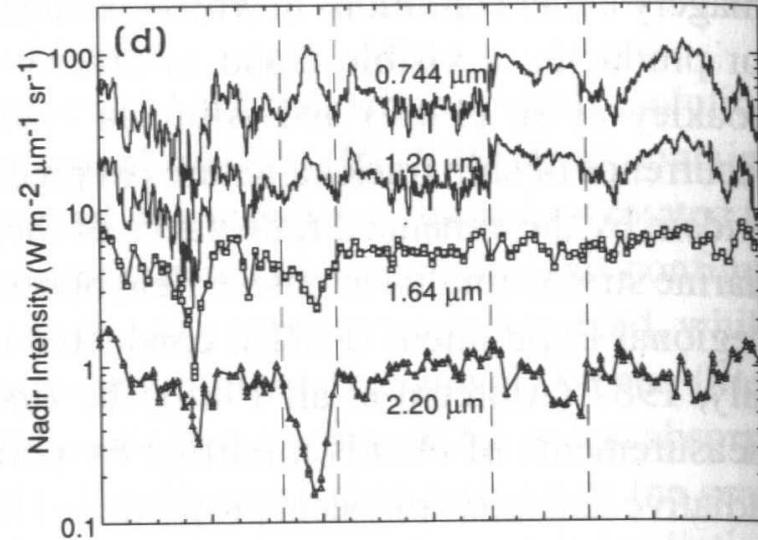
Plate 13.1 Satellite images showing an extensive stratocumulus cloud system off the West Coast of the U.S. The large image was constructed from NOAA-9 AVHRR data on June 27, 1987, at a shortwave infrared ($3.7 \mu\text{m}$) wavelength, whereas the inset was constructed from reflected solar radiation measurements at a visible ($0.63 \mu\text{m}$) wavelength. The streaks revealed at $3.7 \mu\text{m}$ are due to a reduced droplet size in clouds contaminated by the exhausts of ships.

Efecto indirecto: Evidencia 1

Microphysics



Radiation



Efecto indirecto: Evidencia 1

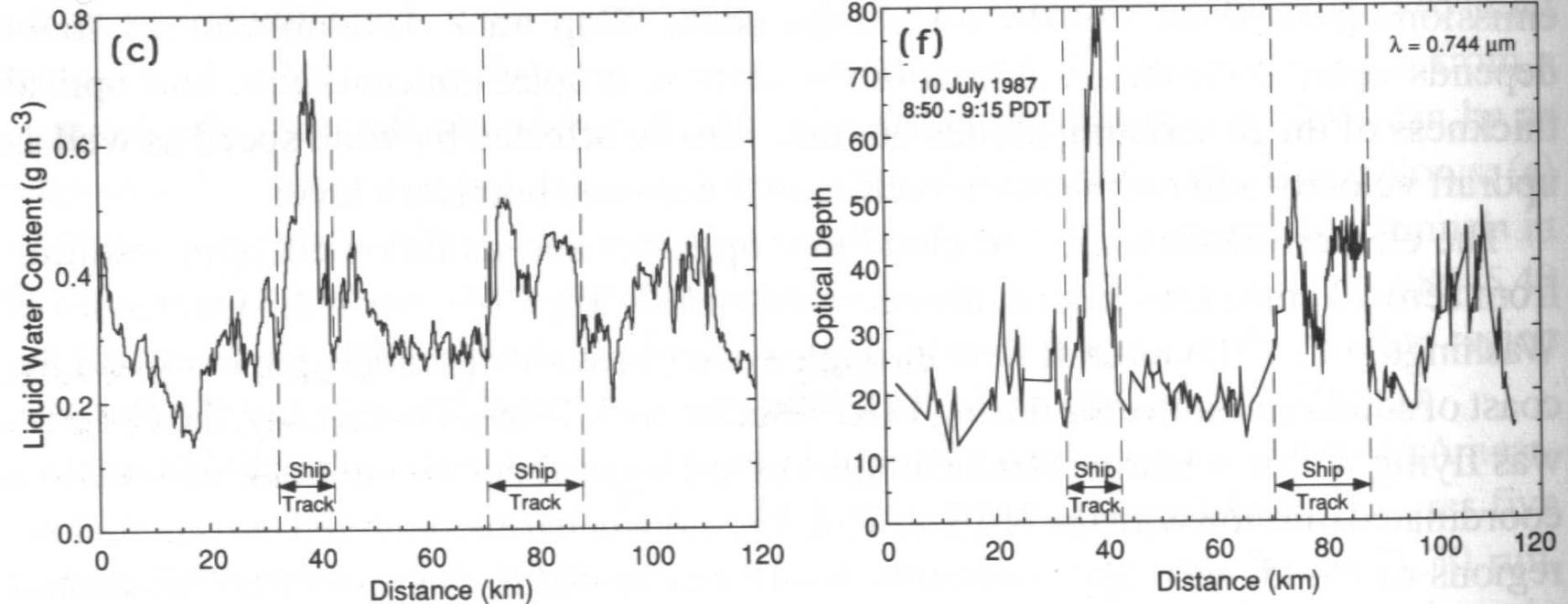


Figure 13.3 Aircraft transects of the two ship tracks on July 10, 1987, showing changes in (a) the total concentration of droplets, (b) the effective radius, (c) the cloud liquid water content, (d) the nadir (upwelling) intensities at selected wavelengths between $0.744 \mu\text{m}$ and $2.20 \mu\text{m}$, (e) the zenith (downwelling) intensities, and (f) the total optical thickness of the cloud at $0.744 \mu\text{m}$.

Efecto indirecto: Evidencia 2

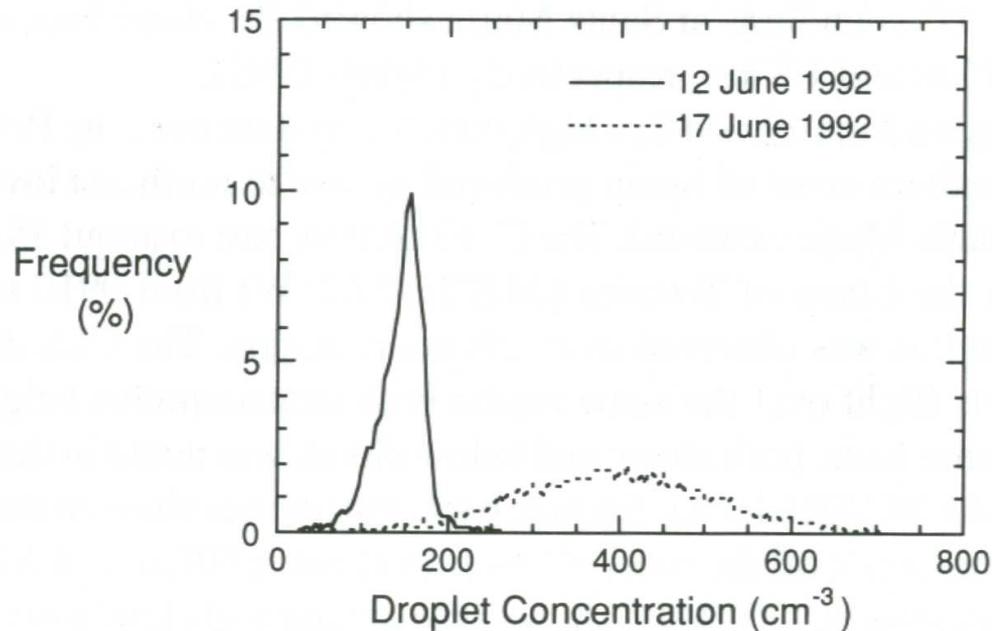
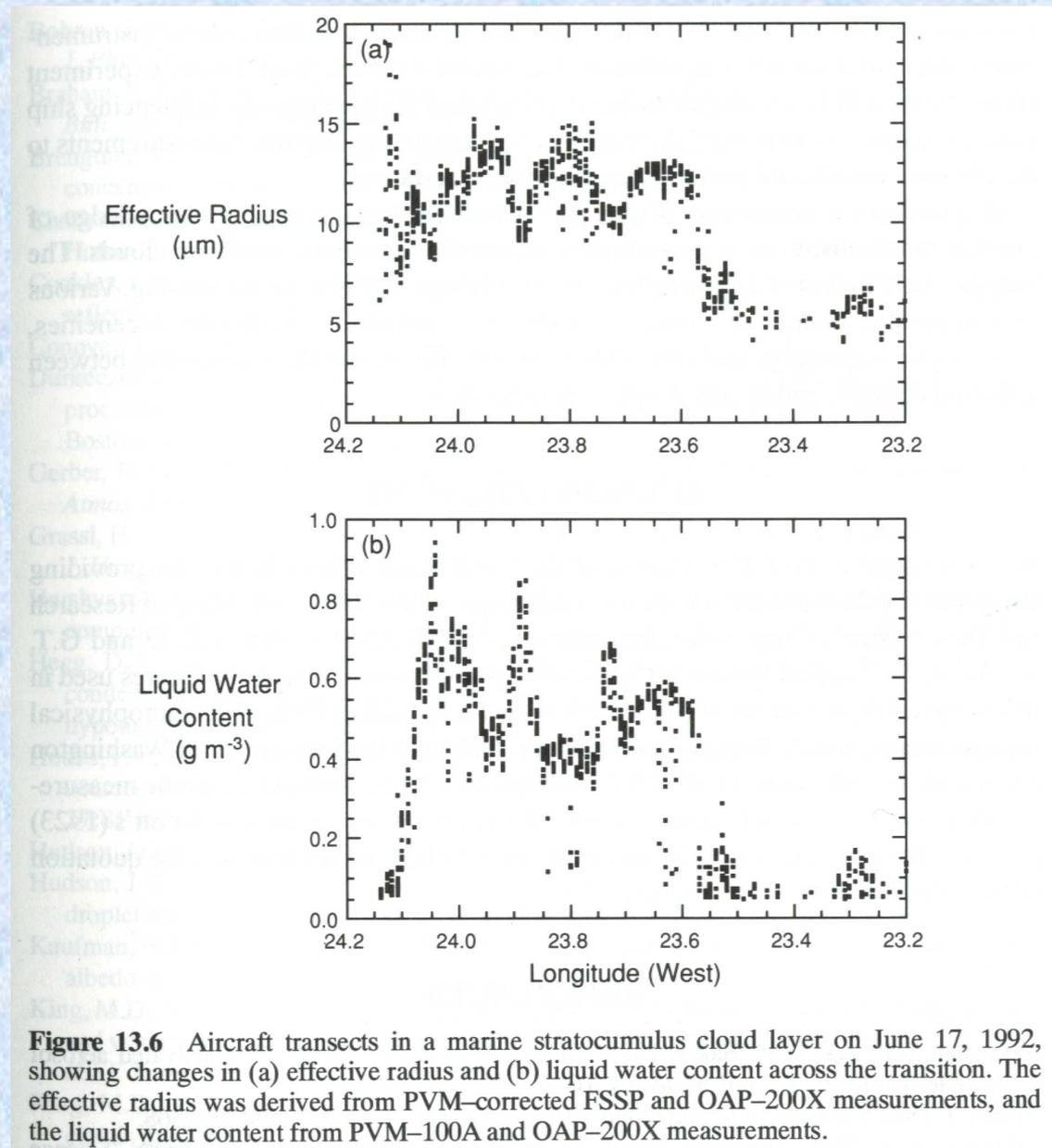


Figure 13.5 Probability distribution of cloud droplet concentration on June 12, 1992, (maritime airmass) and June 17, 1992, (continentally influenced airmass) for marine stratocumulus clouds near the Azores, Portugal, obtained from the University of Washington C-131A during ASTEX.

Efecto indirecto: Evidencia 2



Efecto indirecto: Evidencia 2

		“limpio”	“sucio”
Concentración (cm⁻³)	media	144	395
	mediana	148	393
	Desv. std	39	119
R_{eff} (μm)	media	12.7	9.9
	mediana	13.3	10.1
	Desv. std	2.3	2.1
Contenido de agua (g m⁻³)	media	0.34	0.40
	mediana	0.34	0.30
	Desv. std	0.17	0.28
CN (cm⁻³)	Encima nube	300	600-1200
	Debajo nube	200	900-1200

Resumen de Efecto indirecto

- Definición de susceptibilidad como indicador, en función de la concentración y de la distribución de tamaños de gotas
- Evidencia observacional:
 - trayectorias de buques sobre los océanos
 - mediciones in-situ en nubes stratocumulus sobre el mar en días “limpios” (condiciones marinas) y “sucios” (con influencia continental)
- Se necesitan mediciones de satélite para cobertura global

