

Composición Elemental de Aerosoles Sub-Antárticos en función del tamaño de partícula.

M. MARGARITA PRENDEZ B.* Y SANTIAGO R. ZOLEZZI C.*

RESUMEN

La especial situación geográfica de la Antártica y sus características meteorológicas hacen que el estudio de sus aerosoles atmosféricos sea particularmente interesante.

En este trabajo se ha estudiado la composición elemental en función del diámetro de partícula de los aerosoles atmosféricos del Centro Meteorológico Eduardo Frei.

Mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica y utilizando llama aire-acetileno, se cuantificaron: Mg, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb. Los valores encontrados fueron superiores a los determinados en el Polo Sur.

Utilizando varios criterios empleados para la asignación de origen, así como también consideraciones relativas al transporte y reactividad de los aerosoles, se asignó un origen natural a Mg, Mn y Fe y un origen antrópico a Ni, Cu, Zn y Pb. Las fuentes de emisión para todos ellos, a excepción de Mg, se situaron en lugares extra-antárticos.

ABSTRACT

The geographic position of the Antarctic and its meteorological conditions give a special interest to the study of its atmospheric aerosols.

In this research the elementary composition of atmospheric aerosols was studied, in function of the particulate diameter. The studied place was the Chilean Meteorological Center "Eduardo Frei".

The following elements were studied: Mg, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb by atomic absorption spectrophotometry. The found values were higher than those determined for the South Pole.

Using several criteria for the assignment of the possible origin of the elements, and also some available data concerning the transport and reactivity of the aerosols, a natural origin was proposed for Mg, Mn and Fe and an anthropic origin for Ni, Cu, Zn and Pb. The sources of emission for all the above cited elements, with the exception of Mg, was proposed to be extra-antarctic.

INTRODUCCION

Día a día el hombre modifica en mayor medida su medio ambiente, a tal punto que el término "contaminación" resulta ya de uso diario.

* Facultad de Ciencias Básicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile. Casilla 233. Santiago.

La contaminación se extiende cada vez más y comienza a alcanzar regiones supuestamente limpias. La inquietud que esto provoca se muestra en las investigaciones efectuadas en la Antártica, continente que ofrece una situación especial dentro del hemisferio sur dada su alejada posición geográfica y sus características meteorológicas. La información disponible muestra determinaciones de elementos traza en nieve, agua y hielo (Brocas *et al.*, 1967; Murozumi *et al.*, 1969; Hall, 1972; Proc. 1st Sym. Ant. Env. Sc., 1976) y en la superficie del agua (Kaneshima y Yonahara, 1970).

A nivel del aire las modificaciones pueden rápidamente extenderse a todo el planeta, dado que el transporte de aerosoles a largas distancias es particularmente eficiente para partículas submicrónicas, sean ellas de origen antrópico o natural (Peterson y Bryson, 1968). Las investigaciones antárticas incluyen informaciones sobre la estratósfera (Fox *et al.*, 1973), el material extraterrestre (Shima y Yabuki, 1968) y las concentraciones de elementos traza en aerosoles atmosféricos antárticos de las bases Mc Murdo y Amundsen-Scott o Base Polo Sur (Duce *et al.*, 1974; Zoller *et al.*, 1974) y estación Syowa de Japón (Proc. 1st Sym. Ant. Env. Sc., 1976).

En este trabajo se han estudiado los aerosoles atmosféricos colectados durante el verano de 1980, en el Centro Meteorológico Eduardo Frei. Se cuantificaron algunos elementos traza de acuerdo al tamaño de partícula y se les asignó su posible origen.

MATERIAL Y METODOS

Se tomaron cuatro conjuntos de muestras semanales durante el mes de febrero de 1980, en el Centro Meteorológico Eduardo Frei (Lat. 62°12' S; y Long. 58°53' W). El centro está situado en las proximidades del mar, en una explanada generalmente cubierta de nieve, excepto durante algunos días de la temporada de verano (diciembre-febrero).

Se utilizó para el muestreo, un impactador de cascada del tipo Andersen de 5 etapas y un filtro final, de la Research Appliance Company con una velocidad de flujo de 4,9 cfm. Esta velocidad se mantiene constante mediante el sistema de orificio crítico, seguido de una válvula magnética que muestra la caída de presión (ΔP). El volumen total aspirado, se calcula a partir de la relación: Q (m³/hr) = 0,749 ΔP (pulg. agua) + 0,556, multiplicando por el tiempo de funcionamiento del impactador. Las características de muestreo se dan en el cuadro N° 1.

CUADRO N° 1

Características de colección de las muestras estudiadas.

N° muestreo	M1	M2	M3	M4
Fecha	8-16/2/80	16-22/2/80	22-28/2/80	28/2-5/3/80
Volumen Aspirado*	1415,9m ³	1062,2 m ³	1061,9 m ³	1238,9 m ³

* Volumen en condiciones estándar de presión (1 atm.) y temperatura (0° C)(C.S.P.T.).

Los diámetros de corte de las 5 primeras etapas fueron determinados a partir del catálogo del equipo dado por el fabricante para la velocidad de flujo usada. Para estas etapas la impactación se efectúa sobre discos de Al. El diámetro de corte (ECD) se define como el diámetro para el cual el 50% de las partículas resulta retenido en la etapa de impactación.

Una sexta etapa que utiliza un filtro de membrana Millipore AA de 3 μm colecta todas las partículas de menor diámetro que el quinto ECD. Los valores de los diámetros de corte se muestran en el cuadro N° 2.

Cuadro N° 2

Diámetros de corte (μm) para el impactador Andersen para un flujo de 4,9 cfm.

N° etapa	1	2	3	4	5	6
Diámetro	2,92	2,12	1,48	0,88	0,48	todas part. diám. < 0,48
Material de impacción	Disco Al	Disco Al	Disco Al	Disco Al	Disco Al	Millipore 3 μm

El polvo total por etapas se determinó usando el método gravimétrico con una balanza analítica de precisión de 0,01 mg. Los discos de Al y los filtros Millipore se estabilizaron para 54% de humedad relativa (HR) y 25°C de temperatura.

El material colectado se trató químicamente y en forma separada para cada etapa, según la técnica descrita por Préndez *et al.*, 1982 y se cuantificó mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) con llama aire-acetileno, los siguientes elementos traza: Mg, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb. Los errores porcentuales para la determinación de cada elemento sobre los filtros Millipore son 3,01%; 2,84%; 5,16%; 4,05%; 4,62%; 18,65% 3,83% respectivamente (Préndez *et al.*, 1982). Los discos de Al no están afectos a error en la determinación y sus eficiencias son del 100% (Préndez *et al.*, op. cit.).

RESULTADOS Y DISCUSION

Existe evidencia creciente de que las partículas que se encuentran en la atmósfera (aerosoles atmosféricos), con diámetros menores de 5 μm , se asocian en forma significativa a los efectos adversos de la contaminación del aire.

De acuerdo al estado actual de los conocimientos, la distribución de la masa en función del diámetro de estos aerosoles (espectro particulado), puede ser de la forma log-normal (Lee, 1972) o bimodal (Whitby *et al.*, 1972). Si aceptamos una distribución bimodal, la región entre los máximos (en masa o en volumen) se encuentra situada entre los 0,8 y 3,0 μm . En esta distribución, cada modo agrupa partículas con características físicas diferentes a las del otro modo, que están asociadas a diferentes efectos sobre el medio ambiente y en particular sobre los seres humanos. Dichas diferencias son debidas a que los distintos modos están asociados a fuentes de emisión diferentes.

En este trabajo el equipo Andersen utilizado, colecta partículas finas (< 2,92 μm) cuya distribución por tamaños se sitúa en una parte del primer modo y hasta el valle intermodal.

Estas partículas presentan algunas características importantes. Así por ejemplo, existe consenso entre las entidades* que estudian los modelos y criterios de incorporación del material particulado al organismo de que:

* American Conference of Governmental and Industrial Hygienists, (A.C.G.I.H.), British Medical Research Council, (B.M.R.C.), United States Atomic Energy Commission (U.S.A.E.C.), etc.

- a) para partículas de diámetro del orden de $3 \mu\text{m}$, su depósito a nivel nasal es de 50% y su depósito a nivel traqueobronquial es de 10%. Del 40% restante de las partículas inhaladas, aproximadamente la mitad se deposita en la región alveolar y el resto se elimina en el aire exhalado.
- b) el depósito nasal y bronquial de las partículas de diámetro $< 0,5 \mu\text{m}$ es bajo y casi todas penetran en la región alveolar, pero sólo aproximadamente el 20% se deposita, exhalándose el resto.

Estos hechos son muy importantes desde el punto de vista toxicológico ya que, la eficiencia de extracción de especies tóxicas presentes en las partículas depositadas en la región pulmonar es alta (60-80%), lo cual posibilita su ingreso al torrente sanguíneo (Perkins, 1974; Davison, 1974; Bierman, 1976).

En el cuadro N° 3 se dan, para cada muestreo, los valores para el polvo total en suspensión (C.S.P.T.), colectado en función del diámetro de partícula en cada periodo de muestreo. Se da también el valor promedio que se obtiene y la variabilidad correspondiente (V) definida como:

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{N}}$$

donde: δ = valor promedio - valor i
 N = número de muestreos.

CUADRO N° 3

CONCENTRACIONES DE POLVO TOTAL EN SUSPENSIÓN (C.S.P.T.) Y VARIABILIDAD (V), EXPRESADAS EN $\mu\text{g}/\text{m}^3$ EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE PARTICULA PARA LAS DIFERENTES FECHAS DE MUESTREO. CENTRO METEOROLÓGICO EDUARDO FREI, FEBRERO-MARZO DE 1980.

N° Etapa	M1	M2	M3	M4	Prom.	y	V
1	1,05	1,71	3,18	0,61	1,64	±	0,97
2	0,55	0,53	1,04	1,40	0,71	±	0,25
3	0,60	1,31	2,26	1,07	1,02	±	0,94
4	0,16	0,87	2,38	0,44	1,11	±	0,99
5	0,13	0,59	5,98	0,44	2,23*	±	2,81
6	1,23	2,76	4,02	1,56	2,67	±	1,21
Total	3,72	7,77	18,86	5,52	5,67	±	1,75

*Valor afectado de un error debido al depósito de sal.

Se puede observar que el filtro Millipore (etapa 6) colecta mayor cantidad de polvo debido a que a ese nivel ya no hay nueva separación por tamaño de las partículas y el filtro colecta todos los aerosoles de diámetro $< 0,48 \mu\text{m}$. Se exceptúa de esta situación normal, la 5ª etapa del muestreo M3. Los datos meteorológicos señalan que durante esa semana de muestreo se registraron las mayores precipitaciones y humedades relativas (HR), pero las menores temperaturas.

Esto explicaría la presencia de microcristales de sal (o sales) de cristalización cúbica que fueron observados al microscopio (pero que no podían ser separados del resto del material) y el peso elevado registrado para esta etapa, en ausencia de

* Datos proporcionados por el Centro Meteorológico Eduardo Frei.

un aumento de concentraciones de los elementos analizados a la excepción de Mg, como puede apreciarse por los resultados mostrados en el cuadro N° 4. Dicha sal o sales debe(n) contener fundamentalmente NaCl y en menor proporción Mg y Br, debido a la proximidad de la base al mar.

Si se calcula el valor promedio del polvo total colectado sin considerar el muestreo M3, el valor encontrado es de $5,67 \pm 1,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$; considerándolo, el valor es $9,0 \pm 6,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cuando se comparan los valores obtenidos para polvo total en las diferentes etapas y en la suma de ellas con datos similares colectados con el mismo equipo e informados para Santiago en el periodo de verano 1981 por Zolezzi (1982), se puede observar que la Antártica tiene una carga de partículas finas del orden de 10-15 veces inferior a la de esa ciudad.

En la figura 1 se muestran los espectros particulados para los resultados encontrados en la Antártica y en Santiago. Las curvas han sido trazadas en la forma recomendada por Whitby (1972), según la cual la ordenada contiene la diferencia entre la diferencia de masa (ΔM) para los ECD consecutivos sobre la diferencia entre los log de los correspondientes ECD ($\Delta \log \text{ECD}$). La abscisa contiene, en escala log, los ECD expresados en μm .

Las curvas muestran que las mayores diferencias se aprecian para las partículas $\leq 1 \mu\text{m}$.

En el cuadro N° 4 se dan las concentraciones (ng/m^3) de los diferentes elementos traza analizados y que están presentes en dicho polvo total, en función de los ECD para las 4 fechas de muestreo. Los errores correspondientes a cada determinación se pueden calcular a partir del error porcentual (desviación standard relativa porcentual) señalada anteriormente para cada elemento.

Como hemos dicho, el fraccionador Andersen, utilizado en este trabajo, colecta en el rango de las partículas finas, que es aquél que contiene principalmente los elementos de origen antrópico, esto es, los verdaderos contaminantes. En el cuadro N° 4 se puede observar que Ni, Cu, Zn y Pb, señalados frecuentemente como elementos netamente antropogénicos, presentan concentraciones muy bajas y frecuentes ceros. Esto sería un buen índice acerca de la débil o ausente contaminación por estos elementos existentes en la Antártica. Un análisis de correlación por pares de estos cuatro elementos, muestra una correlación significativa al 99% sólo para el par Cu/Ni, sugiriendo para ellos una fuente de emisión común.

En el cuadro N° 5 se muestran los promedios por etapa para estos 4 elementos y la variabilidad respectiva, definida más arriba. Se puede observar que Ni, Cu y Zn presentan sus menores concentraciones en la 3ª etapa ($\text{ECD} = 1,48 \mu\text{m}$), en tanto que Pb no muestra un mínimo definido.

Si se calculan las razones de las concentraciones de Ni, Cu, Zn y Pb entre Santiago durante el verano (Zolezzi, 1982) y la Antártica, los valores fluctúan entre 2,9 y 24,7 para Ni; 1,9 y 8,4 para Cu; 2,1 y 92,7 para Zn y entre 13,9 y 68,9 para Pb.

Si se dibujan los espectros particulados para estos elementos se obtienen las curvas de distribución de masa de la figura 2. Al comparar estos espectros para cada elemento, con los informados por Zolezzi, (op. cit.) para Santiago, se observan claras diferencias tanto en la forma de las curvas como en los valores de las concentraciones relativas a los ECD. Dichas diferencias podrían quizás explicarse considerando estos hechos básicos: 1) a nivel mundial las grandes masas de aire que se mueven en el hemisferio sur lo hacen desde el continente, a nivel del paralelo 30° y desde el Polo Sur hacia la región en que está situado el Centro

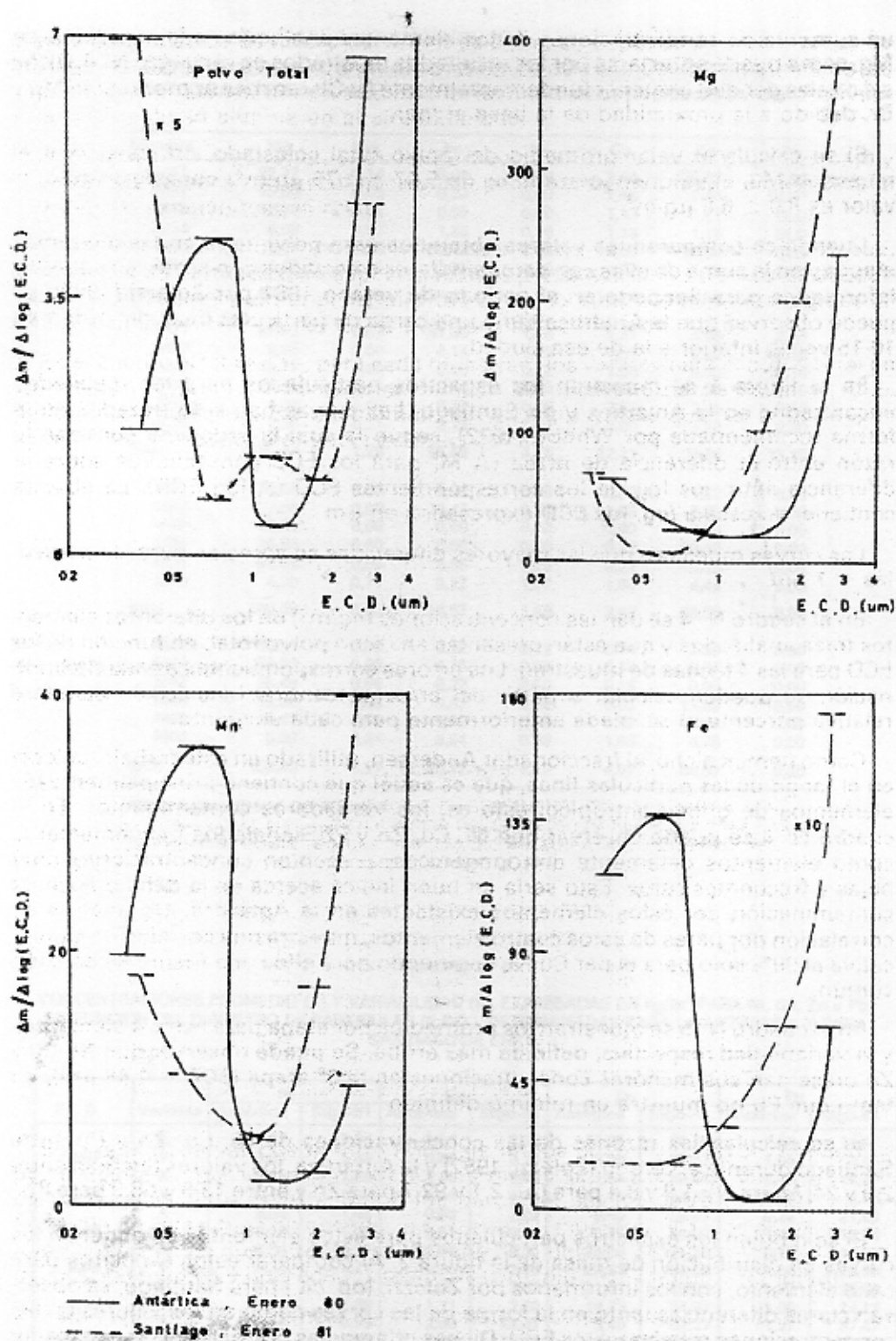


Figura 1. Curvas de distribución de masa para polvo total, Mg, Mn y Fe presentes en los aerosoles atmosféricos del Centro Meteorológico Eduardo Frei y de Santiago de Chile.

CUADRO N° 4

CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS TRAZA (ng/m³), SEGUN DIAMETRO DE PARTICULA Y FECHA DE MUESTREO. CENTRO METEOROLOGICO EDUARDO FREI.

Muestra	Mg	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
M11	22,77	0,14	0,00	0,00	1,46	39,87	1,99
M12	15,80	0,00	0,32	0,00	1,46	2,44	BLD*
M13	12,29	0,07	0,00	0,00	1,13	1,71	BLD
M14	5,09	0,07	1,83	0,16	1,13	1,15	BLD
M15	3,71	0,96	130,19	1,46	4,89	38,80	BLD
M16	1,17	0,35	2,07	0,00	4,27	1,19	2,79
total	60,83	1,59	134,41	1,62	14,14	86,16	4,78
M21	46,32	0,37	41,35	1,08	2,37	6,06	2,16
M22	9,96	0,00	0,19	1,08	1,51	0,00	2,16
M23	15,77	0,00	0,00	0,22	1,08	0,00	2,16
M24	23,47	0,18	0,40	0,65	1,08	27,59	2,16
M25	4,94	0,00	8,32	0,65	2,37	2,45	2,16
M26	2,35	0,71	8,29	1,07	3,80	3,56	2,30
total	102,81	1,26	58,55	4,75	12,21	39,66	13,10
M31	78,06	0,00	0,00	0,18	0,00	1,22	0,00
M32	17,56	0,00	0,47	0,22	1,08	2,85	0,00
M33	12,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M34	26,64	0,00	0,00	0,00	0,22	60,82	0,00
M35	62,06	0,09	6,88	0,22	0,22	0,25	0,00
M36	4,29	0,71	9,22	1,07	1,90	4,44	0,00
total	200,69	0,80	16,57	1,69	3,42	69,58	0,00
M41	66,91	0,00	0,22	0,22	0,74	2,39	0,00
M42	38,82	0,00	4,75	0,00	0,18	0,87	0,00
M43	29,49	0,08	8,22	0,00	0,18	0,00	0,00
M44	15,36	0,08	3,02	0,55	0,92	13,99	0,00
M45	5,47	0,00	3,02	0,55	0,92	42,54	0,00
M46	0,00	0,21	3,94	0,00	1,63	4,78	0,00
total	156,05	0,37	23,17	1,32	4,57	64,57	0,00

*BLD: bajo el limite de detección.

CUADRO N° 5

CONCENTRACIONES PROMEDIO (X) Y VARIABILIDAD (V), EXPRESADAS EN ng/m³ PARA Ni, Cu, Zn y Pb, EN FUNCION DEL DIAMETRO DE PARTICULAS (E.C.D.), DETERMINADAS PARA LA ANTARTICA Y PARA SANTIAGO DE CHILE.

E.C.D.	Variable	Ni		Cu		Zn		Pb	
		Antártica	Stgo-81	Antártica	Stgo-81	Antártica	Stgo-81	Antártica	Stgo-81
2,92	X	0,37	1,68	1,14	6,13	12,39	26,74	1,04	14,47
	V	0,42	1,58	0,88	5,10	3,05	22,67	1,04	3,95
2,12	X	0,33	1,69	1,06	3,90	1,54	43,11	0,72	16,47
	V	0,44	1,58	0,54	5,11	1,15	54,88	1,08	4,66
1,48	X	0,06	1,48	0,60	3,07	0,43	39,87	0,72	21,20
	V	0,10	1,59	0,51	3,47	0,75	46,07	1,08	10,74
0,88	X	0,34	0,97	0,84	2,31	25,89	121,59	0,72	40,27
	V	0,27	1,71	0,36	2,98	22,23	184,56	1,08	25,98
0,48	X	0,72	2,94	2,05	3,81	21,01	48,83	0,72	29,60
	V	0,46	2,49	1,71	2,88	19,72	34,97	1,08	14,17
<0,26	X	0,54	9,29	2,90	24,47	3,49	52,27	1,27	87,47
	V	0,54	3,13	1,15	10,64	1,40	21,64	1,28	37,74

Antártica : Centro Meteorológico Eduardo Frei.

Stgo.-81 : Área Metropolitana, enero de 1981.

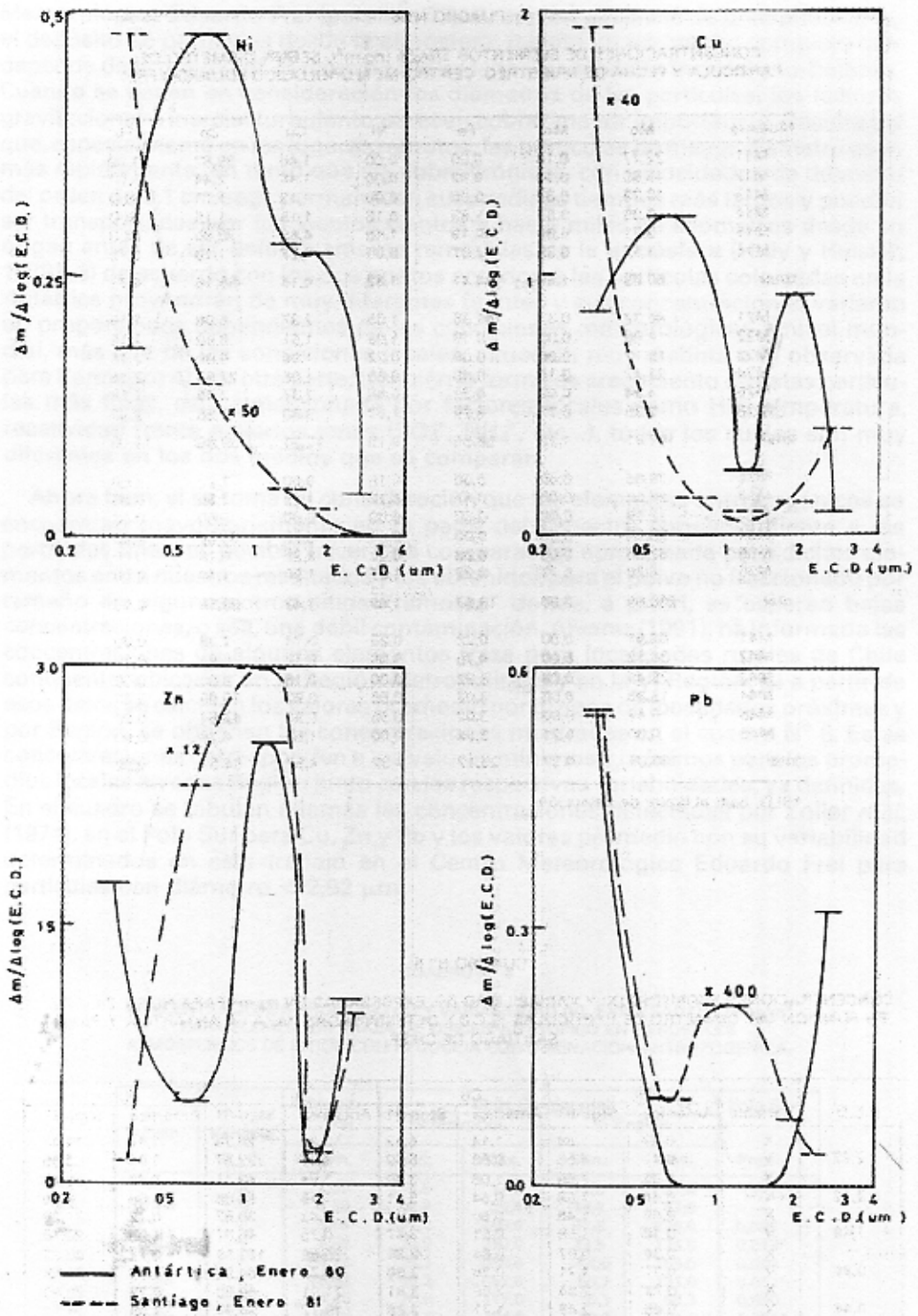


Figura 2. Curvas de distribución de masa para Ni, Cu, Zn y Pb presentes en los aerosoles atmosféricos del Centro Meteorológico Eduardo Frei y de Santiago de Chile.

Meteorológico Eduardo Frei (paralelo 62); 2) aun en ausencia de precipitaciones, el depósito de partículas desde la atmósfera, resulta un fenómeno complejo que depende de la gravedad, la difusión browniana y el depósito inercial y turbulento. Cuando se tienen en consideración los diámetros de las partículas, los factores gravitacional e inercial turbulento parecen cobrar mayor importancia. Resulta así que, especialmente en los lugares remotos, las partículas de mayor diámetro caen más rápidamente, en tanto que las submicrónicas, con velocidades de depósito del orden de 0,1 cm/seg., permanecen suspendidas tiempos más largos y pueden ser transportadas por los vientos cientos y hasta miles de kilómetros desde su origen antes de ser definitivamente removidas de la atmósfera (Hidy y Heisler, 1978); 3) de acuerdo con los dos puntos anteriores las partículas colectadas en la Antártica provendrán de muy diferentes fuentes y sus concentraciones variarán en proporciones dependientes de las condiciones meteorológicas a nivel mundial, más que de las condiciones locales, situación muy distinta a la observada para Santiago; 4) por otra parte, también la forma de crecimiento de estas partículas más finas, está condicionada por factores locales como HR, temperatura, reactividad frente a ciertos iones (SO_4^{2-} , NH_4^+ , etc...), todos los cuales son muy diferentes en los dos medios que se comparan.

Ahora bien, si se toma en consideración que los elementos antropogénicos se encuentran mayoritariamente en la parte del espectro correspondiente a las partículas finas, es posible hacer una comparación aproximada para dichos elementos entre nuestros resultados y los obtenidos para el polvo no fraccionado por tamaño en algunos otros sitios "remotos" donde, a priori, se esperan bajas concentraciones, o sea, una débil contaminación. Alvarez (1981), ha informado las concentraciones de algunos elementos traza para localidades rurales de Chile continental ubicadas en la Región Metropolitana y en la VI Región. Si a partir de esos datos se calculan los valores promedio por grupos de localidades próximas y por Región, se obtienen las concentraciones mostradas en el cuadro N° 6. Estas concentraciones corresponden a los valores mínimos y máximos para los promedios locales en cada Región junto con las respectivas variabilidades, ya definidas. En el cuadro se tabulan además las concentraciones detectadas por Zoller *et al.* (1974), en el Polo Sur para Cu, Zn y Pb y los valores promedio con su variabilidad determinados en este trabajo en el Centro Meteorológico Eduardo Frei para partículas con diámetro < 2,92 μm .

CUADRO N° 6

CONCENTRACIONES PROMEDIO (X) Y VARIABILIDAD (V), EXPRESADAS EN ng/m^3
PARA ELEMENTOS TRAZA DE ORIGEN ANTROPICO EN AEROSOL
ATMOSFERICOS DE SITIOS CON REDUCIDA CONTAMINACION ANTROPOGENICA.

Elem.	Variable	C.Meteo. E. Frei	Chile Continental ¹				Polo Sur ²
			R. Metropol.		VI Región		
			Prom.	Min.	Máx.	Min.	
Ni	X	2,35	1,6	17,8	11,8	27,4	—
	V	1,39	2,8	34,4	14,0	42,9	—
Cu	X	8,69	27,0	266,0	97,5	176,0	0,036
	V	4,68	24,9	270,0	33,5	125,0	0,019*
Zn	X	64,74	36,3	530,0	54,0	169,0	0,030
	V	16,35	46,3	652,0	50,7	131,0	0,011*
Pb	X	4,45	30,6	117,0	18,1	59,3	0,630
	V	6,35	17,8	34,0	12,8	31,5	0,300*

¹a partir de ref. (17) se tomó un conjunto de localidades rurales próximas por Región. Se dan los promedios extremos.

²desde ref. (10).

*desviación standard.

Se puede observar que las concentraciones de Cu, Zn y Pb en el Centro Meteorológico Eduardo Frei son muchas veces superiores a las determinadas en el Polo Sur, especialmente en el caso del Zn (2158 veces). Para este elemento esas concentraciones están dentro del rango de valores observado para los sitios rurales de Chile continental, siendo incluso superiores a los valores mínimos allí detectados. Para el Ni, se observa esta misma situación con respecto a la Región Metropolitana. Para Cu y Pb en cambio, si bien sus concentraciones son bastantes superiores a las detectadas en el Polo Sur (239 y 7 veces, respectivamente) ellas son netamente menores a las determinadas para los sitios rurales de Chile continental.

Para el Pb, los datos obtenidos desde los valores dados por Alvarez (1981), están en buen acuerdo con el valor promedio de $62,2 - 25,5 \text{ ng/m}^3$ asignado al área rural de la Región Metropolitana por Préndez y Garrido (1981).

La concentración de Pb para partículas de diámetro $< 2,92 \mu\text{m}$ dada en este trabajo ($4,45 \text{ ng/m}^3$) está en buen acuerdo con el valor de $3,15 \text{ ng/m}^3$ informado para polvo no fraccionado por el Departamento de Energía de los EE.UU. para el sitio de coordenadas $64^\circ 49' \text{ lat. S}$ y $62^\circ 52' \text{ long. W}$.

Se puede decir entonces que las concentraciones de Pb en la península Antártica, son del orden de 15 veces inferiores a las correspondientes a sitios rurales de Chile central continental y del orden de 7 veces superiores a las del sitio menos contaminado, el Polo Sur geográfico. Cabe destacar además, que la otra región de Chile que muestra concentraciones de Pb similares a las encontradas en la región antártica es la Isla de Pascua con $3,96 \text{ ng/m}^3$ (EML - 349, 1979).

Préndez *et al.* (1981) han asignado un origen natural a los elementos Mg, Mn y Fe detectados en los aerosoles atmosféricos de Santiago. Si dicha consideración fuera válida también en este caso, en principio Mg, Mn, y Fe debieran mostrar sus mayores concentraciones entre las partículas de mayor diámetro. Esta situación que se observa claramente en el cuadro N° 4 para Mg, resulta confusa para Mn y Fe. Si se dibujan los espectros particulados para estos elementos (figura 1) se aprecia la validez de esta suposición para Mg y su inexactitud para Mn y Fe; las concentraciones de Mn y Fe son mayores hacia las partículas de menor tamaño.

Por otra parte se encontraron correlaciones significativas al 95% para los pares Fe/Ni, Fe/Cu y Fe/Mn y al 99% para el par Mn/Ni y Mn/Cu. También se determinó la ausencia de correlaciones entre Mg y cualquiera de los otros elementos estudiados. Estos resultados sugieren una fuente de emisión común para Mn, Fe, Ni y Cu y una fuente independiente para Mg.

Todo lo dicho anteriormente explica los muy diferentes espectros particulados observados en el Centro Meteorológico Eduardo Frei y en Santiago para los elementos Mn y Fe y los espectros similares observados para Mg.

Resulta interesante observar que cuando se hacen los cuocientes entre las concentraciones promedio por pares de elementos entre Mg, Mn y Fe en las distintas localidades mostradas en el cuadro N° 8, se encuentra que las razones Mn/Fe en el Centro Meteorológico Eduardo Frei (0,0174) y en el Polo Sur (0,0123) son bastante semejantes. Por otra parte, la razón Mn/Fe en la corteza terrestre es 0,017 (Mason, 1966). Este valor corresponde a $1 - 1/6$ de los valores encontrados en las regiones rurales continentales, en las cuales el origen de estos elementos está fundamentalmente en la corteza terrestre (Alvarez, 1981). Para las razones Mg/Mn y Mg/Fe los valores entre el Centro Meteorológico Eduardo Frei y el Polo Sur son del mismo orden de magnitud y entre 10 y 30 veces superiores a las de las localidades rurales continentales, así como 5 a 7 veces superiores a las de la corteza terrestre.

† CUADRO N° 7

CONCENTRACIONES PROMEDIO (X) Y VARIABILIDAD (V), EXPRESADAS EN ng/m^3 PARA Mg, Mn y Fe EN FUNCION DEL DIAMETRO DE PARTICULAS (E.C.D.), DETERMINADAS PARA LA ANTARTICA Y PARA SANTIAGO DE CHILE.

E.C.D.	Variable	Mg		Mn		Fe	
		Antártica	Santiago-81	Antártica	Santiago-81	Antártica	Santiago-81
2,92	X	53,52	137,4	0,13	15,7	10,39	502
	V	21,09	50,4	0,16	6,3	17,87	212
2,12	X	20,54	83,8	0,00	9,8	1,43	261
	V	10,92	39,6	0,00	4,8	1,91	119
1,48	X	17,41	53,1	0,04	7,1	2,06	162
	V	7,12	16,3	0,04	3,0	3,56	74
0,88	X	13,01	30,7	0,08	5,9	1,31	98
	V	8,93	13,4	0,06	3,9	1,20	52
0,48	X	19,05	32,3	1,02	3,2	37,10	55
	V	24,85	19,2	1,21	1,6	53,78	36
< 0,26	X	1,95	50,7	0,50	8,0	5,88	100
	V	1,58	17,4	0,23	2,6	2,97	36

Antártica : Centro Meteorológico Eduardo Frei.

Sigo.-81 : Area Metropolitana, enero de 1981.

CUADRO N° 8

CONCENTRACIONES PROMEDIO (X) Y VARIABILIDAD (V), EXPRESADAS EN ng/m^3 PARA Mg, Mn y Fe EN AEROSOLAS ATMOSFERICOS DE SITIOS CON REDUCIDA CONTAMINACION ANTROPOGENICA.

Elem.	Variable	C.Meteo. E. Frei	Chile Continental ¹				Polo Sur ²
		Prom.	Min.	Máx.	VI Región		Prom.
Mg	X	130,01	384,6	3157,0	274,8	2103	1,0
	V	52,9	234,8	707,0	155,0	1134	—
Mn	X	1,01	47,6	266,6	24,2	185,8	0,0103
	V	0,46	29,2	34,3	9,1	101,8	—
Fe	X	58,2	1521,0	9139,0	366,5	9841,0	0,84
	V	46,8	728,0	1578,0	313,7	5679,0	—

¹a partir de ref. (17) se tomó un conjunto de localidades rurales próximas por Región. Se dan los promedios extremos.

²desde ref. (10).

Estos hechos parecen mostrar que el Mn y el Fe presentes en los aerosoles atmosféricos sub-antárticos tienen su origen en lugares extra-antárticos de la corteza terrestre situados a miles de km de distancia, en cambio el Mg debe presentar un origen natural local. Tomando en consideración la ubicación del Centro Meteorológico Eduardo Frei, se piensa que dicho origen pudiera encontrarse en gran medida en el agua de mar.

En trabajos anteriores hemos señalado que los factores de enriquecimiento (F.E.) constituyen un criterio útil para la asignación de origen (Préndez *et al.*, 1981; Ortiz y Préndez, 1981). El factor de enriquecimiento corresponde a la razón entre la concentración relativa de un elemento en el aire y la concentración relativa de dicho elemento en otro medio, por ejemplo la corteza terrestre o el mar. Así definido un F.E. mayor que 1 estaría señalando la presencia de fuentes de emisión ajenas al medio natural de comparación; en el caso indicado la corteza terrestre o el mar, respectivamente.

Si calculamos los F.E. correspondientes a las concentraciones del cuadro N° 4 tomando como referencia el Fe contenido en la corteza terrestre, se obtienen los F.E. del cuadro N° 9. Ellos muestran que los elementos Ni, Cu, Zn y Pb poseen elevados F.E. que les atribuirían un origen antrópico, en tanto Mn mostraría un origen natural. Ahora bien, si tomamos en consideración la discusión anterior respecto al posible origen del Mg y recalculamos los F.E. tomando la concentración de Mg en el agua de mar (González - Bonorino, 1972) como elemento de referencia, encontramos los valores del cuadro N° 10. Ellos indican un origen definitivamente no marino para todos los elementos estudiados, excepto Mg (todos los valores son mucho mayores que 10⁵).

CUADRO N° 9

FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO (F.E.) PARA AEROSOLES ATMOSFERICOS
SUB-ANTARCTICOS CALCULADOS UTILIZANDO COMO ELEMENTO
NORMALIZADOR Fe DE LA CORTEZA TERRESTRE.

Muestra	Mg	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
M11	x	x	xx	x	x	x
M12	142	0,0	xx	4645	6100	0,0
M13	x	x	xx	x	x	0,0
M14	8	2,3	65	629	503	0,0
M15	0,1	0,4	8	37	238	90
M16	1,6	8,9	0	1855	428	6038
total	1,3	0,7	9	107	507	159
M21	3,2	0,5	20	58	117	x
M22	151	x	4244	8092	x	x
M23	x	xx	x	x	xx	xx
M24	169	26,5	1213	2749	55180	x
M25	2,0	x	58	290	236	x
M26	1,0	4,6	96	412	321	x
total	5,0	0,02	61	212	542	1002
M31	x	xx	x	xx	x	xx
M32	107	0,0	350	2340	4851	0,0
M33	0,0	xx	xx	xx	xx	xx
M34	0,0	xx	xx	0	0	xx
M35	26	0,8	24	33	29	0,0
M36	1,0	4,0	85	186	360	0,0
total	34,8	2,9	76	210	3359	0,0
M41	873	0,0	747	3425	8691	0,0
M42	24	0,0	0	39	147	0,0
M43	10	0,8	0	22	0	0,0
M44	15	1,6	136	310	3706	0,0
M45	5	0,0	136	310	11269	0,0
M46	0,0	2,8	0	372	907	0,0
total	19,3	0,9	43	201	2229	0,0

x Concentraciones de Fe en el aerosol igual a cero.

xx Ambas concentraciones en el aerosol, iguales a cero.

†
CUADRO N° 10

FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO (F.E.) PARA AEROSOLES ATMOSFERICOS
SUB-ANTARTICOS CALCULADOS UTILIZANDO COMO ELEMENTO
NORMALIZADOR Mg EN AGUA DE MAR. VALORES POR 10⁻⁵

Muestra	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
M11	2,0	0,0	0,0	8,2	45,2	377
M12	0,0	0,8	0,0	13,3	4,0	0
M13	1,8	0,0	0,0	13,2	3,6	0
M14	4,4	13,7	0,8	31,9	5,8	0
M15	83,7	1335,5	7,3	181,8	270,7	0
M16	89,2	69,9	0,0	480,9	25,4	3046
total	0,5	40,8	0,5	33,4	36,2	339
M21	2,6	34,0	0,4	7,4	3,4	201
M22	0,0	0,7	2,0	21,8	0,0	935
M23	0,0	0,0	0,3	9,8	0,0	591
M24	2,5	0,6	0,5	6,6	30,4	397
M25	0,0	64,1	2,4	89,0	12,8	1886
M26	89,9	138,6	8,5	212,0	37,8	4222
total	0,2	10,5	0,9	17,1	9,9	550
M31	0,0	0,0	0,04	0,0	0,4	0
M32	0,0	1,0	0,2	8,8	4,2	0
M33	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
M34	0,0	0,0	0,0	1,0	59,1	0
M35	0,5	4,2	0,1	0,5	0,1	0
M36	49,2	84,5	4,7	48,3	25,8	0
total	0,07	1,5	0,2	2,5	9,0	0
M41	0,0	0,1	0,1	1,6	0,9	0
M42	0,0	4,7	0,0	0,7	0,6	0
M43	0,9	10,6	0,0	0,9	0,0	0
M44	1,7	7,5	0,7	8,6	23,6	0
M45	0,0	21,0	1,9	24,2	201,3	0
M46	*	*	**	*	*	*
total	0,04	2,7	0,2	4,2	10,7	0

* Concentración de Mg en el aerosol igual a cero.

** Ambas concentraciones en el aerosol, iguales a cero.

CONCLUSIONES

La información obtenida hasta ahora resulta consistente cuando se trata de atribuir un origen antrópico a Ni, Cu, Zn y Pb. Efectivamente de acuerdo al criterio de los F.E., ya sea que se tome un elemento de referencia de origen terrestre (corteza) o de origen marino (agua de mar) los F.E. para estos elementos son muy elevados. Además los espectros particulados muestran sus mayores concentraciones en las partículas finas. En el caso del par Ni/Cu parece existir además una fuente común de emisión.

Los elementos Mn y Fe si bien muestran espectros particulados con concentraciones mayores para las partículas más finas, muestran también un origen natural dado por la corteza. Además correlacionan con 2 elementos antrópicos: Ni y Cu. Esta aparente contradicción puede explicarse cuando se considera que tanto en un caso (elementos antropogénicos) como en el otro (elementos naturales) el origen es remoto y el transporte a lo largo de los cientos de kilómetros tendrá como función atenuar la existencia de diferentes fuentes de emisión.

En conclusión y de acuerdo a la información recolectada se debe asignar:

- a) un origen extra-antártico proveniente de fuentes de emisión antropogénicas a Ni, Cu, Zn y Pb.

- b) un origen extra-antártico proveniente de una fuente de emisión natural, la corteza terrestre, a Mn y Fe.
- c) un origen local marino proveniente de una fuente de emisión natural, fundamentalmente el agua de mar, al Mg.

La información disponible señala también que las concentraciones de elementos traza en los aerosoles atmosféricos sub-antárticos son siempre mayores que en los aerosoles atmosféricos del Polo Sur. Para el Pb el factor encontrado es aproximadamente igual a 7.

Se encontró además, una carga total para partículas $< 2,92 \mu\text{m}$ en los aerosoles sub-antárticos, 10 a 15 veces inferior a la de los aerosoles de Santiago de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Antártico Chileno (INACH) el transporte y facilidades otorgadas para la toma de muestras; al Sr. CARLOS ARCE R., meteorólogo IV de la Fuerza Aérea de Chile por su ayuda en la colección de las muestras; al Servicio de Desarrollo Científico, Artístico y de Cooperación Internacional, Proyecto Q-054 por el financiamiento para el tratamiento de las muestras; a la Sra. LILIANA NILO, asesor científico de INACH por la información antártica proporcionada y al Centro Meteorológico Eduardo Frei por los datos meteorológicos del período estudiado. Agradecemos en especial al Sr. JORGE ORTIZ por las útiles discusiones con él sostenidas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALVAREZ, C. 1981. Tesis de Licenciatura en Química. Fac. Ciencias Básicas y Farmacéuticas, U. de Chile.
- BIERMAN, A., y ONDOV, J. 1976. U.C.R.L. 52135. U.S. Env. Res. & Dev. Adm. N° W 7405 48 pp.
- BROCAS, J., y PICCIOTTO E. 1967. GEOPHYS. J. Res. 72, 2229-2236.
- Catálogo de Instrucciones, Impactador Andersen 5 etapas, Res. Appl. Co. 1979.
- DAVISON, R.L., NATUSH, D.F., WALLACE, J.R., y EVANS, CH.A. Jr., 1974. Env. Sci. & Technol., 8 (13) 1107-1113.
- DUCE, R.A., ZOLLER, W.H., MOYERS, J.L., 1973. J. Geophys. Res., 78, 7802.
- EML-349 Environmental Measurement Laboratory, Department of Energy, USA, 1979.
- FOX, R.J., GRAMS, G.W., SCHUSTER, B.G., y WEINMAN, J.A., 1973. GEOPHYS. J. Res., 78, 7789.
- GONZALEZ-BONORINO, F. 1972. Introducción a la Geoquímica, cap. 13, ed. O.E.A. Washington, D.C.
- HALL, S., 1972. Environ. Sci. & Technol., 6, 30.
- HIDY, G.M., y HEISLER, S.L. 1978. Recent developments in Aerosol Science, Cap. 7, ed. David Shaw, John Wiley & Sons.
- KANESHIMA, K., y YONAHARA, N., 1970. Antarctic Record, 38, 1.
- LEE, R.E., 1972. Science 77B, 567-575.
- MASON, B. 1966. Principles of Geochemistry, 3rd ed. John Wiley & Sons N.Y.
- MUROZUMI, M., Tsaihua, CHOW, J., y PATTERSON, C. 1969. Geochim. Cosmochim. Acta, 33, 1247-1294.
- ORTIZ, J.L., y PRENDEZ, M.M., 1981. Pollution Atmosphérique, 91, 231-234.
- PERKINS, H.C., 1974. Air Pollution, Mc Graw Hill Kogakusha, Intern. Stud. Ed.
- PETERSON, J.T., y BRYSON, R.A. 1968. Science, 162, 120-121.
- PRENDEZ, M.M., y GARRIDO, J. 1981. Rev. Col. Quím. Puerto Rico, XXVI, 20-23.
- PRENDEZ, M.M., ORTIZ, J.L., GARRIDO, J.L., y HUERTA, C.R. Alvarez y S. Zolezzi, 1982. A publicarse en Radiochem. Radial. Letters.
- PRENDEZ, M.M., ORTIZ, J.L., CORTES, E., y CASSORLA, V. enviado a Air Poll. Control Assoc., julio 1981.
- Proceedings of the 1st Symposium on the Antarctic Environmental Sciences, Sept., 27, 1976. Organiz. Nat. Inst. of Polar Res., Japan.
- SHIMA, M., y YABUKI, H. 1968. Antarctic Record, 33, 53.
- WHITBY, K.T., HUSAR, R.B., y B.Y. H. LIU, 1972. J. Colloid Interface Sci., 39, 117.
- ZOLEZZI, S. 1982. Tesis de Licenciatura en Química. Fac. Ciencias Básicas y Farmacéuticas, U. de Chile, en prensa.
- ZOLLER, W.H., GLADNEY, E.S. y DUCE, R.A. 1974. Science 183, 198-200.