

## INFLUENCIA DE LA PRECIPITACION SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE SO<sub>2</sub> Y HUMOS DE LA ATMOSFERA DE SALAMANCA

M. R. Fidalgo y J. Garmendia

Departamento de Física General y de la Atmósfera.  
Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca

### Resumen

Hemos estudiado la relación entre las concentraciones de SO<sub>2</sub> y humos y la precipitación a partir del efecto de lavado ejercido por la lluvia sobre estos contaminantes, a lo largo de tres años (1979-81).

La función estadística que presentó mejor ajuste fue la de tipo potencial. A partir de las ecuaciones correspondientes a cada contaminante obtuvimos sus concentraciones residuales.

Posteriormente hemos calculado los coeficientes de lavado  $\lambda$ , separándolos en dos grupos, según el cuadrante predominante de vientos (3.º o sector *L* y 1.º o sector *C*). Para ambos sectores los coeficientes de lavado para los humos son superiores a los correspondientes al SO<sub>2</sub>, lo que parece indicar que el efecto de lavado ejercido por la precipitación es mayor sobre este contaminante.

### Introducción

La precipitación es uno de los principales mecanismos de eliminación de los contaminantes que permanecen en suspensión en la atmósfera por el efecto de lavado que ejerce sobre ellos, de ahí que pueda considerarse como un índice de nivel de contaminación. La OMM lleva a cabo el análisis del contenido químico de la precipitación recogida en sus estaciones de fondo (Petrenchuck, 1976). Su importancia se debe al hecho de que en el agua precipitada se encuentran prácticamente todos los elementos traza conte-

nidos en la atmósfera; si bien esta presencia está en función de su solubilidad en agua, y para el caso de los aerosoles, también del tamaño de las partículas.

Uno de los procesos de eliminación de contaminantes es el lavado por lluvia o *washout* que ocurre debajo de las nubes. Es un mecanismo complejo en el que intervienen muchos factores como son: tamaño de las gotas de lluvia, temperatura, intensidad de precipitación, etc., de los que no siempre se dispone de medidas. De ahí que nuestro objetivo sea simplificar el problema de forma que un análisis de la atmósfera antes y después de una lluvia pueda darnos una estimación de la eficacia del lavado por lluvia. Es necesario, por tanto, determinar las concentraciones de los contaminantes y la cantidad de precipitación.

### Abstract

A study has been made of the relationship between the concentrations of SO<sub>2</sub> and smoke and the precipitation through the washout effect carried out by rain on these pollutants over a period of three years (1979-82).

The potential function was the one that proved to be most accurate. Through the equations of both pollutants, the residuals concentrations were obtained.

Afterwards we have calculated the washout coefficients  $\lambda$ , separating them into two groups, according to the prevailing quadrant of winds

(3.º or sector *L* and 1.º or sector *C*). For both pollutants the washout coefficients for the smoke were higher than the SO<sub>2</sub>, so the washout effect exerted by the precipitation is greather on this pollutant.

**Parte experimental**

El muestreo de los contaminantes se realizó cada veinticuatro horas durante tres años (1979-82) en un equipo McLeod cuyo caudal de aire aspirado fue de 4 m<sup>3</sup>/día<sup>-1</sup>. El filtro utilizado para la recogida de la materia en suspensión fue el Whatman número 1.

Los contaminantes analizados fueron dióxido de azufre y la materia en suspensión (caracterizada como humos negros). Su determinación cuantitativa se llevó a cabo siguiendo las normas BS 1747 por el método del peróxido de hidrógeno y por reflectometría, respectivamente (Fidalgo, 1986).

Los datos de precipitación nos fueron facilitados por el observatorio que el Instituto Nacional de Meteorología posee en la base aérea de Matacán, cercana a Salamanca.

*Estudio de la relación contaminación-precipitación*

Para establecer las correlaciones entre las concentraciones de SO<sub>2</sub> y humos con la precipitación es necesario conocer las concentraciones residuales (algunos autores las denominan «de fondo», si bien para hallar éstas sería necesaria la instalación de diversas estaciones móviles para considerar sus variaciones en el tiempo y en el espacio). Una vez conocidas éstas, podrá asignarse efecto de lavado a la precipitación cuando la concentración del día anterior al que se registró la lluvia sea superior a esa concentración residual.

A la vista de los datos, agrupamos los valores de precipitación para cada año, independiente y en conjunto, en cinco intervalos incluido el de

precipitación nula (de forma que en cada uno hubiese un número significativo de datos) y se calcularon las concentraciones medias de los contaminantes y de la precipitación en cada uno de ellos.

Se observa que la disminución experimentada por las concentraciones con la precipitación es más significativa para los primeros intervalos, atenuándose a medida que aumenta la cantidad de lluvia recogida. En la tabla 1 se muestran los resultados para los tres años independientemente y en conjunto.

TABLA 1  
VALORES MEDIOS DE PRECIPITACION Y CONCENTRACIONES DE SO<sub>2</sub> Y HUMOS PARA CADA INTERVALO CONSIDERADO

Año	Precipitación media (mm)	C <sub>SO<sub>2</sub></sub> (µg/m <sup>3</sup> )	C <sub>humos</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
1979.....	0	52,4	65,1
	0,4	31,5	23,1
	1,6	30,4	23,3
	4,3	27,1	21,7
	10,8	21,3	20,6
1980.....	0	41,7	63,8
	0,2	29,1	40,8
	1,2	23,6	30,1
	3,3	23,5	26,1
	14,6	18,0	28,9
1981.....	0	35,0	64,6
	0,4	32,2	27,6
	1,1	20,2	28,3
	3,5	21,7	26,0
	8,8	16,6	21,0
3 años .....	0	43,0	64,5
	0,5	29,0	32,6
	1,5	23,2	25,3
	3,5	25,5	24,5
	10,5	21,7	22,3

Se aprecia un aumento de la concentración de contaminantes con la precipitación en cinco casos, que tienen lugar preferentemente en intervalos con valores de precipitación alta. Estos incrementos son pequeños y sólo cabe mencionar el correspondiente al último intervalo de la con-

centración de humos y al penúltimo del SO<sub>2</sub>, cuando se consideran los tres años conjuntamente. Este comportamiento aparece también en los trabajos realizados por otros autores (Valero, 1980). Es posible que pueda deberse al hecho de que exista mayor diferencia en el número de datos entre los intervalos implicados por lo que la influencia de alguno de ellos con una concentración mayor es más notoria que en el resto. Debe tomarse en consideración que el lugar de muestreo de los contaminantes y de la precipitación distan unos 15 km.

Realizado un tanteo estadístico, la función a la que mejor se ajustó esta distribución fue la de tipo potencial  $C=bR^a$  queda reducida a la ecuación de una recta, nos queda de la forma

$$\ln C = \ln b + a \cdot LRT,$$

donde  $C$  es la concentración del contaminante,  $R$  es la precipitación y  $a$  y  $\ln b$  son las constantes de la ecuación.

Esta expresión nos ofrece mayores coeficientes de correlación y varianza explicada para cada año en particular, así como para su conjunto. Así, para los tres años las ecuaciones de ajuste fueron:

$$\ln C_{SO_2} = 3,27 - 0,08 \ln R \quad (r = -0,82)$$

$$\ln C_{\text{humos}} = 3,35 - 0,12 \ln R \quad (r = -0,95)$$

A partir de ellas, calculamos las concentraciones residuales para cada contaminante, sustituyendo el valor de  $R$  los días en los que se ha registrado precipitación.

Debemos apuntar que estas ecuaciones se han obtenido de valores promedio, tanto de precipitación como de las concentraciones en los intervalos establecidos, por lo que estas concentraciones residuales no son valores puntuales sino que deben encuadrarse en un intervalo de precipitación.

A partir de estas concentraciones residuales estableceremos que existe efecto de lavado, siempre que la concentración del día anterior al con-

siderado supere esa concentración residual; eliminando los restantes, en los que, por consiguiente, no se podría asignar a la precipitación ese efecto de limpieza de la atmósfera. En estos casos, la disminución de la contaminación puede deberse a la entrada de aire menos contaminado, consecuencia del cambio originado en las condiciones atmosféricas y que va asociado generalmente a la lluvia (Sanhuesa y Lissi, 1979).

#### *Cálculo de los coeficientes de lavado*

Hemos utilizado el método más generalizado seguido por diversos autores (Engelmann, 1965; Kellog, 1972) y que considerábamos más adecuado para nuestro caso particular.

Este coeficiente se ha definido como la disminución que experimenta la concentración de contaminante con la precipitación en la unidad de tiempo, en concreto de un día a otro, con las unidades correspondientes a cada caso.

Se expresa

$$dC/dt = -\lambda C,$$

donde  $C$  es la concentración del contaminante ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\lambda$  el coeficiente de lavado ( $\text{día}^{-1}$ ) y  $t$  el tiempo (día). Para integrar la ecuación hemos de suponer un valor promedio de  $\lambda$  al no poder hallar valores continuos y obtendremos

$$\ln C_i/C_{i-1} = -\lambda (t_i - t_{i-1}),$$

de donde

$$\lambda = -1/\Delta t \cdot \ln C_i/C_{i-1};$$

$\Delta t$  es el tiempo (día),  $C_i$  y  $C_{i-1}$  las concentraciones del contaminante el día considerado y el día anterior, respectivamente ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

De esta forma se hallaron los  $\lambda$ , teniendo en cuenta siempre que  $C_{i-1}$  sea superior a la concentración de fondo o residual, y también a  $C_i$ ; es decir, el coeficiente deberá de ser positivo. Nosotros nos hemos centrado únicamente en los coeficientes de lavado positivos, considerando la

precipitación sólo como proceso de lavado. Hemos encontrado también  $\lambda$  negativos al igual que otros investigadores (Pascual, 1983), si bien en un porcentaje significativamente menor que el de  $\lambda$  positivos, y su consideración nos llevaría a tener en cuenta otros factores asociados a la precipitación no contemplados en este trabajo. Así, estudios realizados por Gajzago (1970) para el SO<sub>2</sub> en Budapest pusieron de manifiesto que la concentración de este contaminante puede aumentar en tiempo lluvioso por la presión que ejerce la lluvia sobre él, llevándole hacia las capas cerca de la tierra. Esto depende del pH de la precipitación, ya que la adsorción de SO<sub>2</sub> en una sustancia ácida es mínima.

Una vez calculados los coeficientes de lavado para cada contaminante, los separamos en dos grupos, considerando situaciones con predominio de vientos procedentes: 1.º tercer cuadrante o sector L (proviene de la zona campo) y 2.º primer cuadrante o sector C (proviene de la ciudad). Estos dos cuadrantes son los más frecuentes en Salamanca.

En las tablas 2 y 3 mostramos los resultados obtenidos.

Se aprecia mayor número de días para el sector L, ya que el cuadrante 3.º es el más frecuente en Salamanca. De igual modo son numerosos los datos con elevada cantidad de precipitación para este sector, a diferencia del sector C, en el que la precipitación es baja. El número de casos es también superior para el sector L, debido a que las precipitaciones se registran con mayor frecuencia acompañadas de vientos del tercer cuadrante.

Cabe destacar, en ambas situaciones, que los valores de  $\lambda$  oscilan indistintamente sin seguir una pauta definida con la precipitación, sobre todo en el sector C. Ello parece indicar que, al menos en nuestro caso particular, tienen bastante influencia sobre el coeficiente de lavado los demás factores no considerados como: tamaño de las gotas, velocidad de caída, presencia de otros contaminantes, etc., aparte de la propia

TABLA 2  
COEFICIENTES DE LAVADO DE SO<sub>2</sub> Y HUMOS PARA EL SECTOR L

Sector L (3.º cuadrante)			
R (mm)	$\lambda_{SO_2}$ (día <sup>-1</sup> )	R (mm)	$\lambda_{humos}$ (día <sup>-1</sup> )
17,7	0,247	28,1	0,083
16,0	0,310	13,8	0,770
13,6	0,106	13,6	0,588
12,1	0,125	12,3	0,129
8,5	0,127	7,3	0,657
7,3	0,105	6,9	0,154
6,9	0,284	6,5	0,351
6,5	0,560	6,2	0,539
5,1	0,058	5,1	0,431
5,0	0,047	4,4	0,288
4,8	0,151	4,1	0,054
4,6	0,142	3,6	1,668
4,1	0,427	3,0	1,959
3,9	0,284	2,1	0,732
3,6	0,143	1,9	1,134
3,0	1,664	1,3	0,333
2,8	0,817	1,1	1,078
2,2	0,427	1,0	1,964
1,6	0,143	0,9	1,099
1,5	0,203	0,8	0,140
1,3	0,118	0,7	1,516
1,1	0,129	0,4	0,677
1,1	1,186	0,2	0,443
0,8	0,123		
0,2	0,916		
0,2	0,528		
$\bar{R}=5,21$	$\hat{\lambda}_{SO_2}=0,360$	$\bar{R}=5,45$	$\hat{\lambda}_{hu}=0,730$

TABLA 3  
COEFICIENTES DE LAVADO DE SO<sub>2</sub> Y HUMOS PARA EL SECTOR C

Sector C (1.º cuadrante)			
R (mm)	$\lambda_{SO_2}$ (día <sup>-1</sup> )	R (mm)	$\lambda_{humos}$ (día <sup>-1</sup> )
3	0,104	3	0,529
2,7	0,308	2,7	0,223
1,6	0,032	1,9	0,517
0,8	0,041	1,6	0,029
0,3	0,142	0,2	0,167
0,2	0,065	0,2	0,230
0,2	0,601	0,2	0,300
0,2	0,294	0,2	0,182
$\bar{R}=1,13$	$\hat{\lambda}_{SO_2}=0,198$	$\bar{R}=1,25$	$\hat{\lambda}_{humos}=0,272$

cantidad de precipitación. Dentro de su oscilación se advierte, en general, para el sector *L*, una disminución de  $\lambda$  con la cantidad de precipitación, más acusada en el caso de los humos.

## Conclusiones

Hemos observado que para ambos sectores los coeficientes de lavado de los humos se muestran superiores a los de  $\text{SO}_2$ , lo cual parece indicar, según la fórmula utilizada para su cálculo, una mayor diferencia entre las concentraciones del día en el que se ha registrado precipitación respecto del día anterior, para los humos. Todo esto se traduce en una mayor influencia del efecto de lavado sobre los humos que sobre el  $\text{SO}_2$ . Téngase en cuenta que las concentraciones de  $\text{SO}_2$  oscilan menos que las de los humos y sus valores son más cercanos a los denominados de fondo o residuales.

En general, se advierte que a igualdad de precipitación registrada, los coeficientes de lavado para el sector *L* son superiores a los del sector *C*, por lo que podemos decir que la dirección del viento aumenta o disminuye la eficacia del lavado del contaminante según la zona de donde provenga.

## Bibliografía

ENGELMANN, R. J. (1965): *The calculation of precipitation scavenging*, Atmospheric Physics Research Sec-

tion Physics and Instruments Department. Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.

FIDALGO, M. R., RODRÍGUEZ, C., y GARMENDIA, J. (1986): «Relaciones cuantitativas entre los contaminantes índice y las variables meteorológicas en Salamanca», *Rev. de Meteor. A.M.E.*, diciembre.

GAJZAGO, L. (1970): «Variations of sulphur dioxide concentration in dependence from the weather in Budapest», *Urban Climates*, WMO, núm. 254, pp. 286-288

KELLOG, W. W. *et al.* (1973): «The sulphur cycle», *Science*, 175 (4022), pp. 587-596.

PASCUAL, M. A. (1983): *El coeficiente de proceso y su relación con diferentes factores meteorológicos*, tesis doctoral. Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense, Madrid.

PETRENCHUK, O. P. (1976): *Atmospheric precipitation sampling procedures and application of cloud water chemical composition data to the estimation of background aerosol chemical composition*, WMO, núm. 460.

SANHUEZA, E.-LISSI, E. (1979): «Procesos fisicoquímicos de remoción de contaminantes atmosféricos», *Técnica, Investigación. Tratamiento Medio Ambiente*, I (4), pp. 53-84.

VALERO, F.-HERNÁNDEZ, E. (1980): «Sobre la eliminación del aerosol hierro en la atmósfera», *Anales de Física*, 76, pp. 274-277.

## Índice de tablas

Tabla 1. Valores medios de precipitación y concentraciones de  $\text{SO}_2$  y humos para cada intervalo considerado.

Tabla 2. Coeficientes de lavado de  $\text{SO}_2$  y humos para el sector *L*.

Tabla 3. Coeficientes de lavado de  $\text{SO}_2$  y humos para el sector *C*.