

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA Y MODELOS DE PREDICCIÓN DE DIVERSOS CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA URBANA DE SALAMANCA

PANERO SANTOS, C.; DE PABLO DÁVILA, F.;
SÁNCHEZ LLORENTE, J.M.; TOMÁS SÁNCHEZ, C.

RESUMEN: El primer objetivo de este trabajo ha consistido en describir y analizar tendencias temporales, (evolución anual, estacional y diaria), de observaciones horarias concurrentes de los contaminantes CO, NO₂, NO y SO₂ en el área urbana de Salamanca, (estación de vigilancia ambiental SA001), para el periodo de tiempo comprendido entre el día 1 de diciembre de 1993 y el día 30 de noviembre de 1994.

Posteriormente y contando también con las series horarias correspondientes a diversas variables meteorológicas en el mismo lugar y periodo, (dirección de viento, humedad relativa, presión, radiación, temperatura y velocidad de viento), se han estudiado mediante técnicas de regresión lineal, las relaciones que estas últimas presentan con cada uno de los contaminantes; tanto en forma individual como con carácter multivariante; obteniéndose resultados que explican desde el 40% de la varianza de la serie para el NO₂, al 66% de la misma para el SO₂.

Por último y dentro de esta etapa modelizadora, hemos comprobado que las series de contaminantes presentan en si mismas "información" suficiente para, mediante técnicas autorregresivas y de medias móviles integradas (A.R.I.M.A.), poder determinar valores de contaminación futuros, que una vez predichos han sido contrastados con los medidos u observados con el fin de comprobar la bondad del modelo.

SUMMARY: The first aim of this paper is to describe and analyse the changes in the concentration of pollutants, such as CO, NO₂, NO and SO₂, on a temporal basis (i. e. annual, seasonal and daily evolution). The data have been taken and fixed times in the urban area of Salamanca - Environment Station SA 001 - during the period going from December 1 st, 1993, to november 30 st, 1994.

Subsequently, the temporal evolution of other weather variables relative humidity, pressure, radiation, temperature and direction and speed of wind in

the same place, times and period have also been taken into account. The relationship between these variables and each of the pollutants has been studied using linear regression techniques, both individually and as multivariates. The results explain from 40% of the variance for the NO series, to 66% of the same parameter for SO₂.

Finally, it was checked that the predicted results and the actual data agreed, therefore in this modeling stage it has been proved that, using autorregresive integrated moving average techniques (A.R.I.M.A), pollutants series by themselves can give enough "information" to determine future pollution indexes.

PALABRAS CLAVE: Contaminación atmosférica, Regresión lineal múltiple, Metodología ARIMA.

ABREVIATURAS UTILIZADAS

CO	Monóxido de carbono.
NO ₂	Dióxido de nitrógeno.
NO	Monóxido de nitrógeno.
SO ₂	Dióxido de azufre.
DIR	Dirección del viento.
HR	Humedad relativa.
PRE	Presión barométrica.
RAD	Radiación solar.
TEM	Temperatura del aire.
VEL	Velocidad del viento.
O ₃	Ozono.
mg/m ³	Miligramos por metro cúbico.
µg/m ³	Microgramos por metro cúbico.
r	Coficiente de correlación lineal de Pearson.
r-squared	Coficiente de determinación r ² .
error std.	Error standard.
F	Distribución F de Snedecor.
sign. F	Nivel de significación de F.
var	Varianza.
Skew.	Coficiente de asimetría o de Skewness.
Kurt.	Coficiente de apuntamiento o de Kurtosis.
AR(p)	Proceso autorregresivo de orden p.
MA(q)	Proceso de medias móviles de orden q.
ARMA (p,q)	Proceso autorregresivo y de medias móviles.
ARIMA (p,d,q)	Proceso autorregresivo p y de medias móviles q diferenciado de orden d regularmente.
ARIMA (P,D,Q)	Proceso autorregresivo P y de medias móviles Q diferenciado de orden D estacionalmente.
ARIMA (P,D,Q) * ARIMA (p,d,q)	Proceso diferenciado (o integrado) multiplicativo, autorregresivo y de medias móviles de órdenes P,Q y p,q respectivamente en el parte estacional y regular.
ACF	Función de autocorrelación.
PACF	Función de autocorrelación parcial.

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el hombre se dio cuenta del peligro de una atmósfera contaminada. Ya en la Edad Media se tenía conciencia del problema de la contaminación atmosférica. Así el siglo XIV existía en Gran Bretaña un control legislativo sobre los daños producidos por los humos, que debió ser paulatinamente actualizado, ya que posteriormente la introducción del carbón como fuente de calor incrementó la polución en el aire. Sin embargo a partir de las últimas décadas y como consecuencia en gran medida de los avances técnicos, es cuando la contaminación atmosférica ha llegado a constituir una seria preocupación para la humanidad.

En los momentos actuales el problema de la contaminación se ha convertido en un tema prioritario dentro de los estudios sobre medio ambiente, teniendo en cuenta la presencia de las más variadas partículas en concentraciones elevadas tanto en zonas industriales como en grandes urbes. Esta actualidad viene impuesta porque hasta hace poco tiempo no se contaba ni con técnicas analíticas de medida precisa para bajas concentraciones de contaminantes atmosféricos, ni con la infraestructura técnica complementaria para su captación, lo que hacía de este tema un perfecto desconocido.

Desde hace décadas se asume que los episodios importantes de contaminación atmosférica en el medio ambiente urbano, no son exclusivamente originados por repentinos aumentos en la emisión de los propios contaminantes, sino que surgen como el resultado conjunto de condiciones meteorológicas desfavorables, las cuales disminuyen la posibilidad de que la atmósfera disperse los nocivos efectos.

Por esto no sorprende que en los últimos años, los mayores esfuerzos de investigación en este tema se hayan dedicado a plantear las interrelaciones existentes entre la concentración de los contaminantes, fundamentalmente troposféricos, y los diversos parámetros meteorológicos: Fidalgo et al. (1989) para Salamanca (España), Shindo et al. (1990) para Japón, Longhetto et al. (1992) para Turín (Italia), Velissariou (1992) para Attica (Grecia), Pandey et al. (1992) para Varanasi (India), Ortiz et al. (1993) para Santiago de Chile (Chile) y Simpson y Xu (1994) para Brisbane (Australia), efectúan estudios entre otros.

Otro grupo numeroso de investigadores: Jauregui (1988) en México D.F. (México), García et al. (1988) en Oviedo (España), Sánchez et al. (1990) en Valladolid (España), Eggleston et al. (1992) en el Reino Unido, Boznar et al. (1993) en Eslovenia, Yamamoto et al. (1995) en Yokoyama (Japón) o Bravo et al. (1996) en México, analizan las condiciones meteorológicas asociadas con altos niveles de concentraciones de contaminantes, partiendo de perspectivas sinópticas. Estos trabajos muestran resultados cualitativos o semicuantitativos y mediante diversos criterios, proponen clasificaciones que intentan describir las relaciones entre condiciones de meteorología sinóptica respecto de la contaminación atmosférica urbana. Algunos de estos autores plantean relaciones y modelos entre los

valores máximos de la concentración de contaminantes y los diferentes parámetros meteorológicos.

Algunos de estos modelos son totalmente empíricos y no explican los mecanismos que se desarrollan; parten de largas series de observaciones y construyen los modelos sobre la evolución de la contaminación atmosférica ajustando los datos a funciones de densidad más o menos complejas. Presentan como mayor inconveniente que no es posible utilizarlos, cuando se introduce una nueva variable que no se había incluido en la formulación empírica inicial.

Los modelos analíticos intentan resolver este inconveniente mediante el empleo de argumentaciones físicas que muestren primeramente cuales deben ser las variables a utilizar de entrada. Sin embargo, cuando la formulación del modelo es analítica, los coeficientes del mismo se determinan mediante técnicas de optimización estadística y por lo tanto estamos ante modelos estocásticos (ej: Tomás C y de Pablo F. (1991)).

Cuando ocurre esto, los parámetros de partida deben ser elegidos o seleccionados a partir de datos observados o medidos, siendo necesario efectuar hipótesis que se basan en argumentos empíricos.

En el presente trabajo, en primer lugar desarrollamos una estadística descriptiva, tanto de las series de contaminantes como de las variables atmosféricas asociadas, en escala anual, estacional y diaria; lo que nos permite obtener una perspectiva global cualitativa y cuantitativa de la situación actual del tema en nuestra ciudad.

Posteriormente realizamos una etapa modelizadora de las mismas series, basándonos en dos metodologías diferentes: un análisis de regresión lineal multivariante, donde obtendremos cuales de las variables atmosféricas estudiadas y en qué medida presentan mayor influencia sobre cada contaminante; y un técnica autorregresiva, de medias móviles integradas (conocida habitualmente como metodología A.R.I.M.A.) que nos permita predecir a corto plazo y partiendo exclusivamente de los propios datos del contaminante cuales serán los niveles de contaminación futura previsibles.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA Y LOS DATOS UTILIZADOS

La estación de la red de vigilancia de la contaminación atmosférica

Dadas la características de Salamanca, ciudad poco industrializada, pero con una densidad de tráfico alta a determinadas horas del día y un casco histórico de gran belleza que comienza a padecer las consecuencias de la contaminación atmosférica; se hizo necesario poner en marcha una red informatizada de estaciones que de forma constante nos indicara los índices de polución alcanzados. La ciudad de Salamanca (40° 58' de latitud Norte, 5° 10' de latitud Oeste y 797 m sobre el nivel

del mar) se encuentra localizada en la parte occidental de la Península Ibérica. Es una ciudad poco industrializada y las fuentes de contaminación son principalmente la circulación, intensa en algunas avenidas durante ciertas horas del día, y durante el largo invierno, las calefacciones domésticas, pues las calderas más antiguas utilizan en su mayoría el carbón, rico en compuestos azufrosos, como combustible.

La Red de Vigilancia de Contaminación Atmosférica de Castilla y León entró en funcionamiento en Salamanca en marzo de 1993. La estación de vigilancia y meteorológica SA001 fue la primera en instalarse, por iniciativa de la Junta de Castilla y León en colaboración con el Ayuntamiento. Esta estación está situada en la confluencia de dos de las avenidas que más densidad de tráfico presentan durante el día en la ciudad. Además es una zona de alta densidad demográfica. Podemos así entender que si los índices de contaminación en este punto no fueran preocupantes, tampoco lo serían en ningún otro punto de la ciudad.



FIG. 1. Situación de la estación de vigilancia SA 001.

La altura de toma de las muestras es de 3 m sobre la altura de la vía para los contaminantes y de 7 m para los parámetros meteorológicos. Los datos tomados

para este estudio comprenden desde las 1.00 h. del día 1 de diciembre de 1993 hasta las 24.00 h. del día 30 de noviembre de 1994. Para los modelos de predicción tomamos además los datos correspondientes al año 1995.

ORIGEN Y DESTINO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Se dice que hay contaminación en el aire cuando la presencia de sustancias extrañas o una variación importante en sus constituyentes son susceptibles de provocar un efecto perjudicial o de crear una molestia, teniendo en cuenta los conocimientos científicos del momento. Esta definición fue dada por el consejo de Europa y es una de las más precisas.

Según la Orden Ministerial de 18 de octubre de 1976 un contaminante atmosférico es una partícula sólida, líquida, vapor o gas, contenido en la atmósfera y que no forma parte de la composición normal del aire o que está presente en una cantidad anormal.

Existen gran cantidad de contaminantes atmosféricos pero nos limitaremos a estudiar aquellos que, bien por su concentración más elevada, o por sus efectos altamente nocivos son los considerados contaminantes principales por la legislación española.

Monóxido de carbono (CO).

Es un gas incoloro e inodoro y es el contaminante más abundante en las capas bajas de la atmósfera. Aunque antes se le atribuía un origen totalmente antropogénico, se ha visto que también existen fuentes naturales que emiten CO. Entre las primeras podríamos citar la combustión incompleta de carburantes sólidos como los de los vehículos de motor y la combustión de carbón y petróleo entre otros.

El CO es un contaminante no reactivo fotoquímicamente y su permanencia en la atmósfera puede ser desde algunas horas hasta varios meses, considerando un mes como el periodo medio de permanencia.

Óxidos de nitrógeno (NO₂ Y NO).

El NO₂ puede presentarse en la atmósfera por oxidación de NO. Entre las fuentes artificiales cabe destacar la combustión de carbón, petróleo y gasolina.

El NO es emitido tanto por fuentes naturales como artificiales, estas últimas debidas a la combustión de carburantes a altas temperaturas.

El NO₂ y el NO pasan a ser nitratos y nitritos en un periodo inferior a una semana.

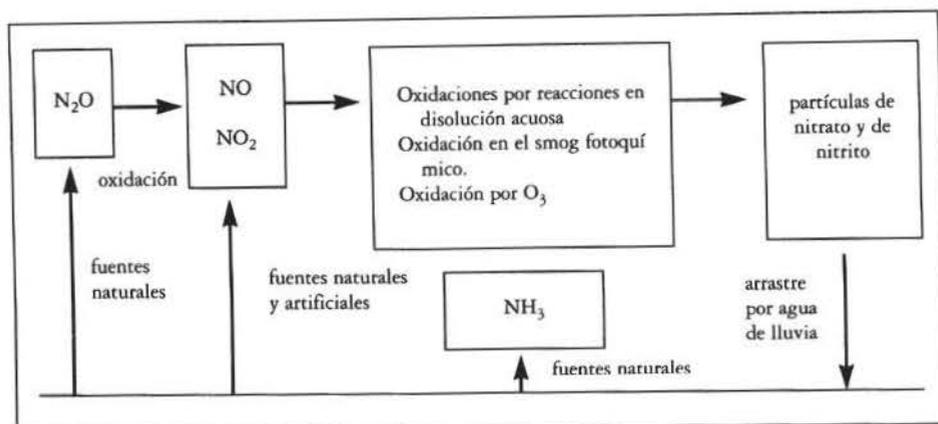


FIG. 2. Ciclo de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera.

Dióxido de azufre (SO_2).

Es también un gas incoloro y la principal fuente de este contaminante en la atmósfera es la combustión de carbón, seguida muy de lejos por la combustión de petróleo. Puede presentarse en la atmósfera como consecuencia de la emisión de fuentes artificiales, o por oxidación de H_2S emitido de forma natural a la misma. Después se oxidará de nuevo a SO_3 y por reacción con H_2O pasa a H_2SO_4 que dará lugar a sulfatos por combinación con otras sustancias ajenas. El agua de lluvia se encargará de devolverlas al suelo, completando así un ciclo que dura varios días.

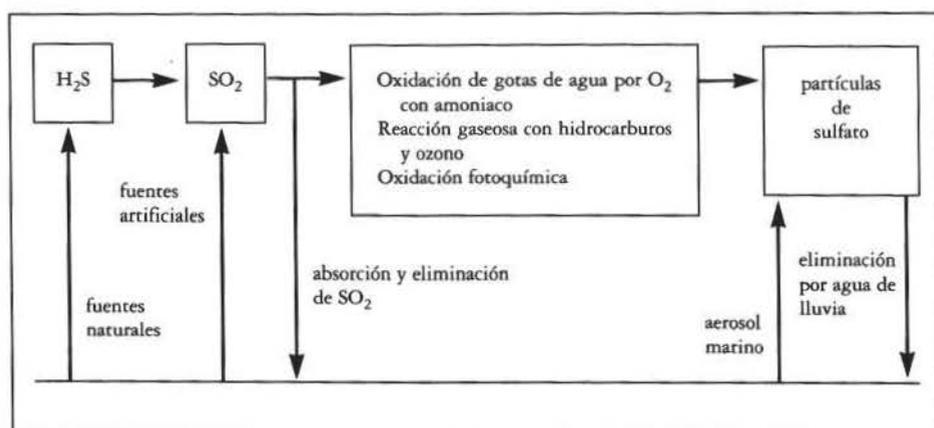


FIG. 3. Ciclo del SO_2 en la atmósfera.

TÉCNICAS DE MEDIDA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Los aparatos de medida de los 4 contaminantes atmosféricos se basan en distintas técnicas de análisis químico que exponemos a continuación:

Técnica de medida de CO.

La medida de la concentración de CO en la atmósfera se lleva a cabo mediante la técnica denominada espectrometría infrarroja. El aparato utilizado mide los espectros de absorción de las moléculas presentes en la banda de longitud de onda infrarroja, que corresponde al intervalo: 2.5 a 25 mm. Se dispone de una célula que contiene la muestra separada en dos cavidades por una membrana. El espectro infrarrojo del CO es muy característico y su absorción se utiliza para enfriar diferencialmente uno de los dos lados de la célula provocando un desplazamiento de la membrana. Este desplazamiento es medido electrónicamente y nos indica la concentración de CO en la muestra, habiendo calibrado anteriormente el aparato.

Técnica de medida de NO y NO₂.

Su concentración puede medirse con mucha exactitud mediante la técnica denominada quimioluminiscencia.

En principio describiremos este procedimiento para medir la concentración de NO:

Exponemos la muestra a un gran exceso de ozono. Éste reaccionará rápidamente con el NO que había en la muestra y se formará NO₂* excitado, que volverá al estado fundamental emitiendo radiación. Esa radiación será medida y relacionada con la cantidad de NO que inicialmente había en la muestra.



En principio podría pensarse que el principal inconveniente de esta técnica sería la posible interferencia de otras sustancias como NO₂, SO₂ ... ; pero se ha observado que la radiación emitida por éstas es despreciable en la región de luminiscencia del NO₂*.

El mismo procedimiento se utiliza para medir el NO₂. Éste se reduce previamente a NO por medio de un catalizador de oro. Al NO resultante se le somete al proceso anterior. El problema que podría presentarse en este caso es que el oro reduce no sólo el dióxido de nitrógeno, sino también los nitratos y nitritos existentes en la atmósfera. Debido a esto, a veces se produce alguna interferencia en la medida.

Técnica de medida de SO₂

La técnica utilizada para la medida de este contaminante es la fluorescencia ultravioleta. Cuando una radiación ultravioleta irradia una muestra que contiene SO₂, ésta emite otra radiación ultravioleta de longitud de onda mayor. La intensidad de esta radiación será en función de la cantidad de SO₂ presente en la muestra y de la intensidad de radiación incidente. Habrá que colocar por tanto dos detectores, uno para dicha radiación y otro para la emitida por la muestra, procesando así las señales de los dos. Los sensores se calibran con botellas de SO₂ a alta concentración.

Una emisión fluorescente parecida la presentan algunos hidrocarburos presentes en la atmósfera junto con el SO₂, por lo que es aconsejable utilizar algún dispositivo de separación a la entrada de la unidad analizadora.

CONSIDERACIONES SOBRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

En nuestro estudio tendremos en cuenta los valores de los parámetros meteorológicos para hacer consideraciones sobre la contaminación atmosférica. Será por tanto muy importante observar si los valores de estas variables para el periodo estudiado corresponden a un año normal o anómalo meteorológicamente hablando.

TABLA 1. SERIES HORARIAS DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS (DIC. '93 A NOV. '94)

VAR AN	Nº d Datos	Media	E. S. Media	Desv. std.	Skew.	Kurt.	Max.	Min.	Rango
DIR	8703,00	225,29	0,89	83,43	-0,32	-1,55	344,00	25,00	319,00
HR	8717,00	64,68	0,23	21,50	-0,59	-0,77	100,00	6,00	94,00
PRE	8716,00	925,79	0,07	6,75	-0,05	0,31	944,00	897,00	47,00
RAD	8379,00	137,87	2,23	88,58	0,70	-1,09	954,00	8,00	946,00
TEM	8717,00	12,20	0,07	6,94	0,58	-0,21	32,00	-4,00	36,00
VEL	8717,00	0,76	0,01	0,74	0,81	0,78	4,00	0,00	4,00

Hemos efectuado un análisis estadístico de las variables meteorológicas, cuyo cuadro resumen presentamos en la tabla 1. A partir de estos datos podemos determinar que: el valor promedio de dirección de viento es engañoso, pues rara vez el viento sopla con una dirección de 225 °, sino que este resultado es el promedio de las dos direcciones predominantes que son en torno a 120 ° y 310 ° que corresponderían a los dos sentidos de la Avenida de Portugal donde se encuentra situa-

da la estación meteorológica. Aunque podríamos pensar que ésta se encuentra encajonada y que por lo tanto el viento está obligado a soplar en esta dirección; lo cierto es que en Salamanca los vientos más frecuentes son los del Oeste, coincidiendo con La Porte y Labajo (1983). Las dos direcciones de viento predominantes que obtuvieron son: el NE en abril y julio por la existencia de borrascas en el sur y el este de la Península Ibérica y sobretodo el SW durante el resto del año. Por otra parte la velocidad del viento no es muy elevada, y su valor oscila entre los 15 km h⁻¹ y la ausencia de viento o calma. Esta variable podría tomarse como un índice de medida de la inestabilidad atmosférica.

La humedad relativa media es 64.6 % pero presenta una alta variabilidad entre las distintas estaciones climáticas. La media más alta corresponde al invierno (79.11 %) y la más baja al verano (45.58 %); siendo intermedia en primavera y otoño (62.58 % y 71.72 %) respectivamente. Sus mínimos son muy bajos, en torno al 20 %, y en consecuencia los rangos amplios. Esto es debido al hecho de considerar el dato horario. Estos mínimos se corresponderían con días del verano entre las 15 h. y las 17 h.

La presión atmosférica media fue 925.79 hPa, es muy poco variable y alcanza máximos por lo general en invierno, siendo 3 hPa superior y mínimos en primavera. La presión es prácticamente constante no sólo en cada estación, sino a lo largo de todo el año. Esta constancia de la presión viene reflejada en los rangos tan pequeños observados, el mayor de ellos en invierno 47 hPa considerando el dato horario.

El valor promedio de temperatura fue 11.9 °C. El mes más caluroso es julio (22.1 °C.) y el más frío enero (5.8 °C.). La temperatura es máxima en verano, cuya media supera los 20 °C. y mínima en invierno, con un valor puntual máximo de 15 °C. y uno mínimo de -4 °C. Las temperaturas medias de primavera y otoño son muy parecidas (10.8 °C. y 11.6 °C. respectivamente). El día más caluroso del año registró una temperatura media de 28.6 °C y el día más frío solamente -0.8 °C. La temperatura puntual más alta registrada fue de 36 °C y la más baja -4 °C. Todos estos datos nos indicarían que el clima de Salamanca es templado, con inviernos fríos y veranos calurosos, hecho que contrastaremos posteriormente con los estudios climatológicos realizados por La Porte y Labajo (1983).

La radiación presenta una media 4 veces superior en verano que en invierno (250 W m⁻² por 58 W m⁻²); siendo 186.3 W m⁻² en primavera y 92 W m⁻² en otoño. La radiación, aunque puede ser más variable de un año a otro, coincide con los valores obtenidos por C. Tomás et al. (1991).

Se observa una buena correlación entre la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar. Una mayor radiación implica más alta temperatura y en consecuencia más baja humedad relativa. Los coeficientes de correlación lineal entre HR y TEM, HR y RAD, y TEM y RAD son: $r = 0.77$, $r = 0.73$ y $r = 0.70$ respectivamente.

La Porte y Labajo (1983) realizaron su estudio sobre el clima de Matacán (Salamanca) entre los años 1945 y 1974 utilizando el dato promedio diario como

referencia. El amplio periodo de tiempo nos hace pensar que los resultados promediados obtenidos definen perfectamente el clima de Salamanca. El valor promedio que obtuvieron de temperatura fue 11.9 °C. El mes más caluroso es julio (23.6 °C.) y el más frío enero (4.0 °C.). Durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre el promedio de temperaturas máximas fue superior a los 25 °C. A su vez, el promedio de temperaturas mínimas en diciembre y enero no superó los 0 °C. La humedad relativa media fue 70.2 % siendo mínima en julio y agosto (51 % y 53 % respectivamente) y máxima en enero y diciembre (86 % y 87 % respectivamente). La precipitación fue máxima en marzo, mayo y noviembre; y mínima en julio y agosto. Las dos direcciones de viento predominantes son el NE en abril y julio sobretodo el SW durante el resto del año. La presión atmosférica media fue 925.25 hPa, es muy poco variable y alcanza máximos por lo general en invierno y mínimos en primavera.

Existen pequeñas diferencias entre los valores de algunos de los parámetros observados por ellos y por nosotros. La explicación a estos cambios hay que buscarla en que nuestras medidas han sido tomadas en una avenida correspondiente al área urbana de Salamanca y las suyas corresponden a la estación sita en el aeropuerto de Matacán, a 10 Km de la capital. Sin embargo, los años de nuestro estudio y predicciones fueron normales climatológicamente hablando.

Teniendo en consideración todos los datos anteriores podríamos considerar que el clima de Salamanca es un clima continental en el que las influencias oceánicas son mínimas. Por su temperatura media podríamos decir que el clima de Salamanca es templado y como el rango de temperaturas es superior a 20 °C. podríamos considerarlo moderado, muy próximo a extremado. Siguiendo el criterio de Lang, cuyo índice "L" resulta de dividir la precipitación total entre la temperatura media anuales, sería un clima árido o semiárido.

EFFECTOS DE LA METEOROLOGÍA SOBRE LA CONTAMINACIÓN

Las concentraciones de contaminantes en áreas localizadas, como son las ciudades, distan mucho de ser constantes, pudiéndose observar ciclos diarios (concentraciones más altas durante el día) y estacionales (concentraciones más altas en invierno y otoño).

Todas estas variaciones son consecuencia por una parte por la falta de uniformidad de las emisiones antropogénicas de contaminantes y por otra de las condiciones meteorológicas consideradas, cuya situación viene determinada por las condiciones atmosféricas generales y por las propias características del área considerada.

Podríamos dividir en tres grandes grupos las variables meteorológicas que manifiestan influencia sobre las concentraciones de los contaminantes en la atmósfera:

1. Variables que dan cuenta de la dispersión de los contaminantes:
 - Dirección y velocidad del viento.

2. Variables que dan cuenta de la estabilidad atmosférica:

- Precipitación, visibilidad, inversión.

3. Variables de carácter estacional:

- Temperatura, humedad relativa, duración del día.

En general el tiempo turbulento y los movimientos verticales favorecen la dispersión de contaminantes, limpiando la atmósfera. Por el contrario, el buen tiempo con estabilidad favorece el aumento en la concentración de contaminantes.

Normalmente, las curvas de estado, que nos indican las variaciones de la temperatura con la altura; tienen pendientes negativas. En algún caso ocurre lo contrario dando lugar a un fenómeno llamado "inversión térmica". En estas condiciones los movimientos verticales de masas de aire no se producen y las concentraciones de contaminación son bastante altas.

Debemos también tener en cuenta que la contaminación no sólo está en la zona de las fuentes sino que es la propia atmósfera la que se encarga de dispersarla. En este sentido debemos indicar la importancia que tienen la velocidad y la dirección del viento.

La radiación solar también es influyente, pues no debemos olvidar las reacciones que algunos contaminantes primarios tienen con la luz, dando lugar a otros contaminantes secundarios.

ESTUDIO DE LAS SERIES DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Estudio anual de la evolución horaria

En la tabla 2. presentamos los datos estadísticos básicos de las series horarias de los contaminantes atmosféricos. El periodo de estudio comprende desde el día 1 de diciembre de 1993 al día 30 de noviembre de 1994.

TABLA 2. SERIES HORARIAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

CONT AN	Nº de Datos	Media	E. S. Media	Desv. std.	Skew.	Kurt.	Max.	Min.	Rango
CO	8464,00	4,95	0,04	3,54	1,17	2,31	36,00	0,00	36,00
NO ₂	8614,00	85,79	0,46	42,55	0,51	0,26	373,00	2,00	371,00
NO	8546,00	116,04	1,04	96,16	2,11	10,06	1352,00	3,00	1349,00
SO ₂	8581,00	85,68	0,78	72,06	1,70	3,30	568,00	0,00	568,00

El valor promedio anual de inmisión de todos los contaminantes atmosféricos estudiados entra dentro de lo que podemos considerar "normal" de acuerdo con la legislación vigente, y nos indica que por lo general nuestra ciudad está poco contaminada. El amplio volumen de datos analizados y la disparidad de los mismos, al corresponder estos tanto a periodos diurnos como nocturnos y a cualquiera de las 4 estaciones climatológicas del año implica, que el rango, y en consecuencia la desviación estándar presenten una alta variabilidad y dispersión. El error estándar es sin embargo pequeño, sobre todo en el caso del CO que es el contaminante atmosférico menos variable de los 4 estudiados, lo cual es un buen índice de la precisión del valor promedio.

Los valores máximos no son excesivos, a excepción del máximo de NO, 1352 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y los valores mínimos son todos muy bajos, prácticamente nulos. Analizando las fuentes de contaminación atmosférica en Salamanca, básicamente la circulación y las calefacciones domésticas en el periodo invernal, estos mínimos corresponderían a las horas de la madrugada, cuando la densidad de tráfico es muy baja y las calderas de calefacción no están en funcionamiento. También se producirían en situaciones de inestabilidad atmosférica, donde los ascensos verticales renuevan constantemente el aire urbano, o situaciones de lluvia, que conllevan una limpieza de la atmósfera y un posterior depósito en el suelo de los contaminantes. Esta última circunstancia se refleja en la claridad que adquiere el aire urbano después de haber llovido. Dado que por lo general no se registraron altas concentraciones, tampoco los rangos fueron amplios, a excepción del rango de NO debido al máximo anteriormente comentado.

Del análisis de los coeficientes de asimetría (Skewness) y apuntamiento (Kurtosis) concluimos que la distribución de frecuencias de NO₂ se aproxima a una distribución normal mesocúrtica, ligerísimamente asimétrica a la izquierda. El resto de las distribuciones de frecuencias presentan una tendencia de tipo logarítmico-normal y en el caso del NO con un coeficiente de apuntamiento elevado.

Estudio de la evolución horaria por estaciones climatológicas

En las tablas 3. a 6. se presentan los datos estadísticos básicos de las series horarias de los contaminantes atmosféricos por estaciones climáticas. La división en 4 estaciones del periodo estudiado es la siguiente:

- Invierno.- desde el día 1 de diciembre de 1993 al día 28 de febrero de 1994.
- Primavera.- desde el día 1 de marzo de 1994 al día 31 de mayo de 1994.
- Verano.- desde el día 1 de junio de 1994 al día 31 de agosto de 1994.
- Otoño.- desde el día 1 de septiembre de 1994 al día 30 de noviembre de 1994.

En lo sucesivo cuando mencionemos una estación climática entenderemos que nos estamos refiriendo al periodo arriba indicado.

Señalaremos lo más significativo de estas tablas, principalmente en qué estaciones se producen los máximos y mínimos de cada contaminante o variable y cuáles son las estaciones con más elevada contaminación.

TABLA 3. SERIES HORARIAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS (INVIERNO).

CONT I	Nº de Datos	Media	E. S. Media	Desv. std.	Skew.	Kurt.	Max.	Min.	Rango
CO	2147,00	6,28	0,09	4,07	0,74	0,37	28,00	0,00	28,00
NO ₂	2156,00	77,23	0,77	35,84	0,55	0,69	314,00	8,00	306,00
NO	2156,00	143,28	2,14	99,57	1,19	2,44	674,00	7,00	667,00
SO ₂	2155,00	139,64	1,93	89,56	0,87	0,50	568,00	6,00	562,00

TABLA 4. SERIES HORARIAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS (PRIMAVERA).

CONT P	Nº de Datos	Media	E. S. Media	Desv. std.	Skew.	Kurt.	Max.	Min.	Rango
CO	2032,00	4,68	0,07	3,25	0,84	0,69	19,00	0,00	19,00
NO ₂	2114,00	73,26	0,75	34,40	0,17	-0,49	188,00	3,00	185,00
NO	2114,00	82,70	1,41	64,77	1,42	2,77	450,00	4,00	446,00
SO ₂	2112,00	79,95	1,20	55,25	1,24	2,19	407,00	0,00	407,00

TABLA 5. SERIES HORARIAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS (VERANO).

CONT V	Nº de Datos	Media	E. S. Media	Desv. std.	Skew.	Kurt.	Max.	Min.	Rango
CO	2130,00	3,60	0,05	2,28	0,75	0,74	15,00	0,00	15,00
NO ₂	2179,00	91,90	0,94	44,04	0,15	-0,56	268,00	2,00	266,00
NO	2179,00	81,15	1,14	53,16	0,64	0,19	323,00	3,00	320,00
SO ₂	2148,00	41,11	0,48	22,18	0,82	1,00	155,00	3,00	152,00

TABLA 6. SERIES HORARIAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS (OTOÑO).

CONT O	Nº de Datos	Media	E. S. Media	Desv. std.	Skew.	Kurt.	Max.	Min.	Rango
CO	2156,00	5,20	0,08	3,72	1,34	4,00	36,00	0,00	36,00
NO ₂	2165,00	100,40	1,04	48,39	0,44	0,05	373,00	11,00	362,00
NO	2097,00	157,92	2,71	124,24	2,03	9,18	1352,00	7,00	1345,00
SO ₂	2166,00	81,80	1,40	64,93	1,81	3,90	438,00	6,00	432,00

Las concentraciones más altas de contaminantes se producen en invierno y otoño. Las medias más altas de CO y SO₂ se producen en invierno y las más bajas en verano. Las concentraciones de estos contaminantes en la primera de las estaciones indicadas superan en el doble a las del verano, e incluso en el caso del SO₂ llegan a triplicarse. Los óxidos de nitrógeno tienen sus medias más altas en otoño y las más bajas en primavera. Los resultados obtenidos por J. Pandey et al. (1990) en la India y J. Shindo et al. (1992) en Japón para el NO₂ y el SO₂ coinciden con los nuestros. C. Ramos y M. L. Sánchez (1989) obtienen en Valladolid también máximos de SO₂ y partículas en invierno y mínimos en verano. En todo caso los errores estándar de estas medidas son pequeños, lo que nos indica de nuevo la precisión de los respectivos valores de las medidas promedio.

Aunque hemos señalado el invierno y el otoño como estaciones más contaminadas, todos los máximos puntuales, a excepción del SO₂ que se produce en invierno, ocurren en otoño. Los rangos son máximos en invierno y otoño y mínimos en primavera y verano, ya que al tratarse de datos horarios, a determinadas horas de la madrugada, con densidad mínima de circulación y en ocasiones inestabilidad atmosférica, las concentraciones mínimas registradas en todas las estaciones climáticas son prácticamente nulas.

Las distribuciones de frecuencias obtenidas se aproximan a distribuciones normales o gaussianas para el caso de los hidrocarburos en todas las estaciones, y para el NO₂ en primavera y verano. El resto de las distribuciones de frecuencias se aproximan más a distribuciones de tipo logarítmico normal siendo por lo general menos asimétricas y apuntadas que las series totales.

Estudio de las series de valores medios y máximos diarios

En ocasiones el valor puntual de concentración registrado para un determinado contaminante no es tan importante por sus efectos como puede ser el valor medio durante algunas horas o incluso el día completo. En la tabla 7. reflejamos los valores medios diarios de contaminación.

TABLA 7. SERIE ANUAL DE LAS MEDIAS DIARIAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

MEDC AN	Nº de Datos	Media	E. S. Media	Desv. std.	Skew.	Kurt.	Max.	Min.	Rango
CO	359,00	4,94	0,10	1,93	0,92	0,73	12,33	1,29	11,04
NO ₂	362,00	85,84	1,12	21,35	0,18	-0,72	146,54	35,71	110,83
NO	360,00	116,21	3,30	62,68	1,40	2,67	436,42	20,92	415,50
SO ₂	361,00	85,57	2,58	49,04	0,84	0,03	263,57	12,04	251,52

Las concentraciones medias más altas sobrepasan en contadas ocasiones los valores establecidos para una buena calidad del aire, si bien, nunca llegan a registrarse situaciones de emergencia de 1^{er}, 2^o grado o total, reflejadas en el R.D. 833/75. Los valores promedio mínimos son muy bajos y en consecuencia el rango es amplio. Esto nos indica la variabilidad en la concentración de todos los contaminantes y trataremos de ver si esta se produce entre días consecutivos o por el contrario lo hace en periodos amplios de tiempo como son las estaciones climatológicas.

En las gráficas 4. a 7. se representan los valores promedio diario y nos ayudan a tener una visión inmediata de la diferencia de concentración para las distintas estaciones del año. Cabe destacar que las concentraciones más altas se registran en otoño e invierno como consecuencia del mayor número de emisiones producidas. Por el contrario en primavera y sobre todo en verano se registran los valores más bajos. Los rangos disminuyen notablemente con respecto a los anuales en estas dos estaciones, pero sin embargo son amplios en otoño e invierno. Las situaciones de inestabilidad hacen que la atmósfera presente cambios frecuentemente. Sobresale en ellas la diferencia de concentración por estaciones de CO, NO y SO₂ y puede observarse un descenso notable en los óxidos de nitrógeno, CO entre los datos 25 y 45 de las gráficas, que se corresponde con las fechas de Navidad. Se da la circunstancia de que estos contaminantes son principalmente generados por la circulación de vehículos a motor.

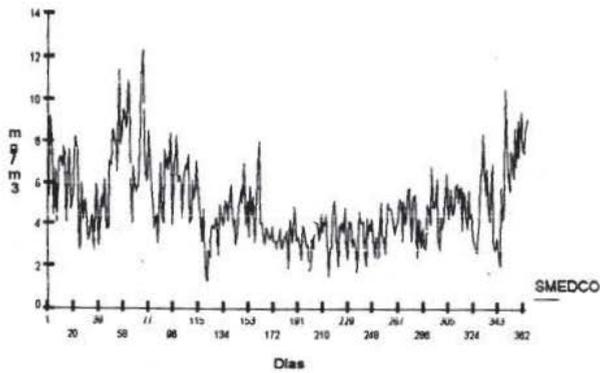


Fig. 4. Serie de valores medios diarios de CO.

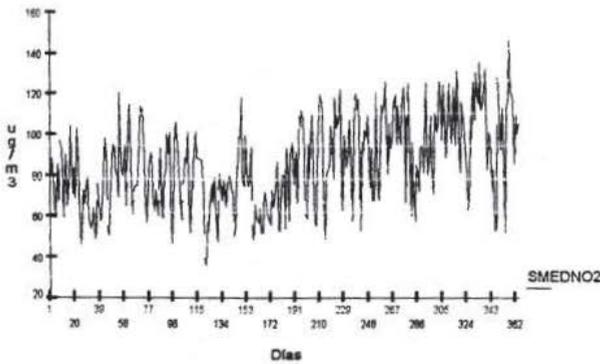


Fig. 5. Serie de valores medios diarios de NO₂.

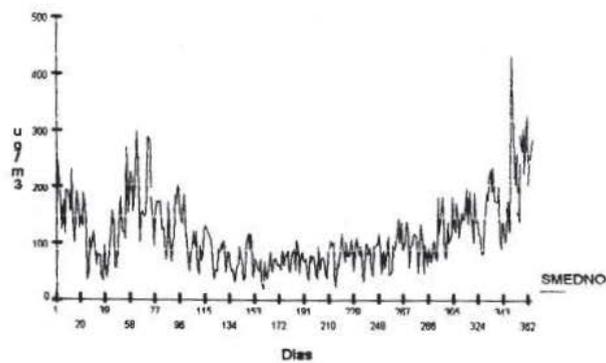


Fig. 6. Serie de valores medios diarios de NO.

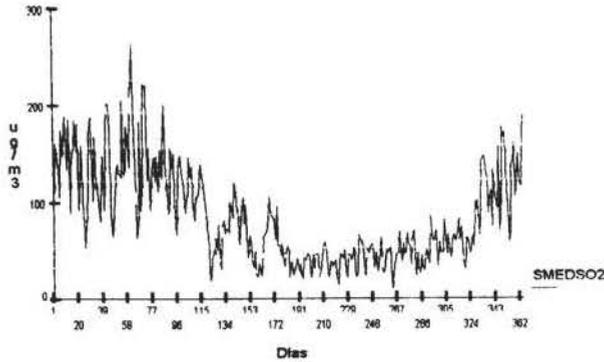


Fig. 7. Serie de valores medios diarios de SO₂.

A continuación exponemos cuales fueron aquellos días de mayor contaminación y cuales fueron esos valores respecto a la calidad del aire establecida.

TABLA 8. DÍAS DE MÁXIMA Y MÍNIMA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES Y SUS CORRESPONDIENTES VALORES
(Concentraciones de CO en µg/m³, NO₂, NO y SO₂ en µg/m³).

	máximo	día	mínimo	día
CO	12.33	11 FEB	1.29	1 ABR
NO ₂	146.54	23 NOV	35.71	31 MAY
NO	436.42	14 NOV	20.92	8 MAY
SO ₂	263.57	1 FEB	12.04	21 AGO

A la vista de la tabla anterior podemos señalar que todos los máximos diarios de concentración se producen en días de otoño e invierno y los mínimos en primavera y verano. El día que registró una mayor concentración de contaminantes fue el 14 de noviembre y el de menos concentración el 1 de abril.

Estudio de la evolución a lo largo del día de los contaminantes atmosféricos

En la tabla 9. se refleja la estadística básica de las series de evolución a lo largo del día de los contaminantes atmosféricos para todo el año.

TABLA 9. SERIE DE EVOLUCIÓN A LO LARGO DEL DÍA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

EVOLC AN	Nº de Datos	Media	E. S. Media	Desv. std.	Skew.	Kurt.	Max.	Min.	Rango
CO	24,00	4,93	0,46	2,26	-0,27	-0,98	8,82	1,39	7,43
NO ₂	24,00	85,78	5,93	29,05	-0,85	-0,84	116,24	31,10	85,14
NO	24,00	116,29	10,03	49,15	-0,53	-0,95	182,33	30,67	151,66
SO ₂	24,00	85,62	7,03	34,43	-0,14	-1,29	138,57	32,74	105,83

Las concentraciones medias anuales ya han sido comentadas y sus valores nos indicaban que Salamanca era una ciudad con unos índices de contaminación que podíamos considerar como normales. Nuestro interés se centrará en analizar como evoluciona esa concentración durante las 24 horas del día, tanto anualmente como por estaciones climatológicas y analizar las causas de esta evolución.

Promediando sobre los 365 datos anuales para cada una de las 24 horas del día, establecemos las series de evolución a lo largo del día, cuyas gráficas presentamos a continuación.

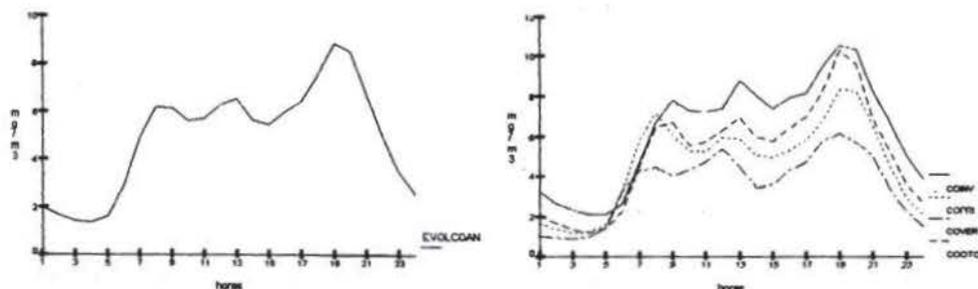


Fig. 8a. Evolución de la concentración de CO a lo largo del día, durante todo el año.

Fig. 8b. Evolución de la concentración de CO a lo largo del día, por estaciones climáticas.

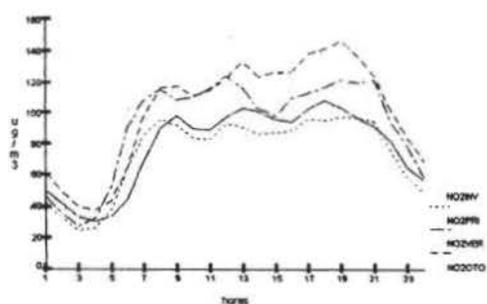
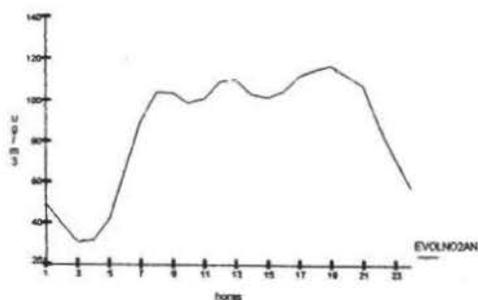


Fig. 9a. Evolución de la concentración de NO_2 a lo largo del día, durante todo el año.

Fig. 9b. Evolución de la concentración de NO_2 a lo largo del día, por estaciones climáticas.

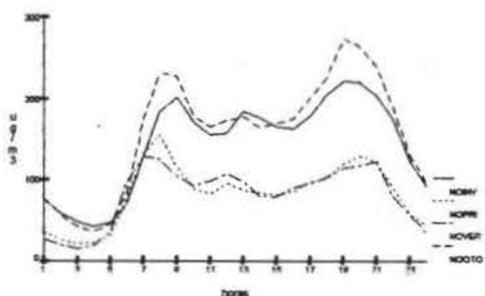
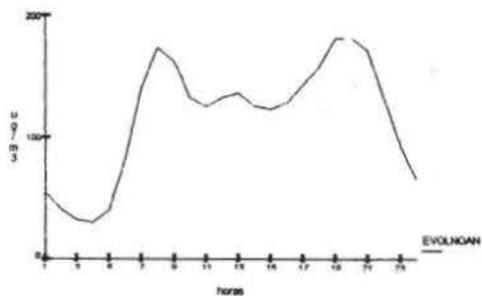


Fig. 10a. Evolución de la concentración de NO a lo largo del día, durante todo el año.

Fig. 10b. Evolución de la concentración de NO a lo largo del día, por estaciones climáticas.

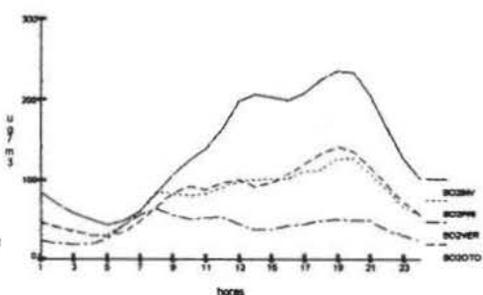
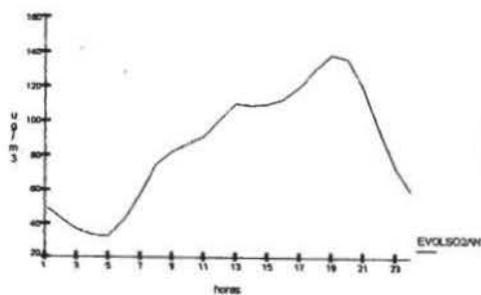


Fig. 11a. Evolución de la concentración de SO_2 a lo largo del día, durante todo el año.

Fig. 11b. Evolución de la concentración de SO_2 a lo largo del día, por estaciones climáticas.

Lo más significativo de las gráficas anteriores es que los 4 contaminantes estudiados siguen un ciclo diario. El mínimo de contaminación se produce a las 4.00 h. para todos los contaminantes analizados y el máximo, aunque señalaremos con más detenimiento los máximos significativos que se producen a lo largo del día, corresponde a las 19.00 h. En general el rango de los contaminantes será la diferencia entre el valor correspondiente a las 19.00 h. y a las 4.00 h. En todos los casos, el rango es amplio. Esto es debido a la fuerte dependencia de la contaminación atmosférica con la densidad de tráfico.

TABLA 10. HORAS DEL DÍA A LAS QUE SE PRODUCEN LOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS. (* MÁXIMOS MÁS SIGNIFICATIVOS)

	Máximos (h)			Mínimos (h)
CO	8.00 9.00	13.00	19.00 *	4.00
NO ₂	8.00 9.00 *	13.00 *	19.00 *	3.00 4.00
NO	8.00 *	13.00	19.00 20.00 *	4.00
SO ₂		13.00	19.00 *	4.00 5.00

El análisis de la tabla anterior nos indica la gran similitud de la evolución a lo largo del día de los contaminantes atmosféricos. El mínimo de todas estas concentraciones se sitúa en torno a las 4.00h. ó 5.00 h., que efectivamente coincide con las horas de menor densidad de tráfico. A partir de ahí y hasta las 8.00 h ó 9.00. h. se produce el mayor incremento de contaminación, y algún contaminante como el NO alcanza a esta hora un máximo casi comparables al máximo absoluto. Este incremento coincide con el inicio de la jornada laboral en la ciudad. El único contaminante que no presenta el máximo anteriormente señalado es el SO₂, que al ser un contaminante más propio de las calefacciones que de la circulación alcanzará su máximo absoluto y prácticamente el único a las 19.00 h. El resto de contaminantes presentan también otro máximo relativo a las 13.00 h. Este máximo es importante en el caso del CO y NO₂. Su significado hay que buscarlo en la conclusión de la jornada matinal de trabajo. El tercero de los máximos y en todos los casos el máximo absoluto, es el de las 19.00 h. Este máximo coincide con la conclusión de la jornada de trabajo y es mayor que el de las 13.00 h., puesto que se produce el regreso de personas que trabajan fuera de Salamanca además de un efecto acumulativo.

Analizando esta misma evolución por estaciones, podemos ver las influencias que las variables meteorológicas pueden tener en los contaminantes atmosféricos. En general, la evolución a lo largo del día de los contaminantes es la misma, inde-

pendientemente de la estación climática considerada, manteniendo normalmente los máximos y mínimos a las horas ya indicadas. No ocurre lo mismo con los niveles de concentración, por lo general mucho más altos en invierno que en verano.

El CO mantiene los tres máximos ya comentados en las cuatro estaciones del año. Sus concentraciones son más altas en invierno, más bajas en verano e intermedias y muy parecidas en primavera y otoño, aunque ligeramente superiores en esta última. La diferencia de valores entre el invierno y el verano es notable. Los resultados obtenidos por I. Isidro-Valeroso y C. A. Monteverde (1992) mostraban dos máximos en Manila, uno a las 8.00 h. y otro a las 20.00 h., si bien el primero de ellos era mayor.

Los dos óxidos de nitrógeno estudiados siguen una evolución diferente: el NO₂ sigue una evolución a lo largo del día muy parecida en invierno y primavera y es inferior a las concentraciones de verano e incluso otoño. A pesar de esto, las diferencias entre estaciones no son muy acentuadas. No ocurre así con el NO, donde la evolución a lo largo del día en primavera y verano es exactamente la misma, siendo solamente algo superior el máximo de las 8.00 h. en la primera de las estaciones señaladas. Las concentraciones en invierno y otoño son similares y muy superiores durante todo el día a las anteriores. La mayor diferencia está en los máximos de las 8.00 h. y las 19.00 h., que en otoño son más altos. C. S Stevens (1987), en Johannesburg había obtenido dos máximos para los óxidos de nitrógeno, uno correspondiente a la mañana y otro a la tarde, siendo el primero de ellos el mayor.

El contaminante que muestra de forma más acusada la diferencia entre las estaciones climatológicas es el SO₂. Su evolución a lo largo del día pasa por ser prácticamente constante en verano, con unos índices de concentración muy bajos, a tener en invierno un aumento progresivo con el transcurso del día hasta alcanzar el máximo de las 19.00 h. Mientras, en invierno, el valor promediado para las 19.00 horas fue 235.16 µg/m³, en verano ese mismo valor 63.63 µg/m³. Primavera y otoño sigue una evolución a lo largo del día idéntica y los valores promediados para las 19.00 h. se sitúan en torno a 140 µg/m³. Esta gran diferencia entre estaciones viene marcada por el uso de las calefacciones, que son la principal fuente de emisión de este contaminante. Una idea de en qué medida el tráfico es fuente de emisión de SO₂ nos la daría su concentración en verano, ya que la contaminación a cargo de la industria en Salamanca es muy baja. Para el SO₂ M. Bizjak et al. (1988) obtuvieron dos máximos en Ljubljana: uno a las 9.00 h. y otro a las 21.00 h. e I. Isidro-Valeroso y C. A. Monteverde (1992) encontraron un máximo por la tarde, que prácticamente coincide con nuestros resultados para Salamanca, pues el máximo de las 13.00 h. es poco relevante.

Estudio de la evolución mensual de los contaminantes atmosféricos

En el siguiente cuadro estudiaremos las concentraciones mensuales medias de los contaminantes atmosféricos.

TABLA 11. VALORES DE LA CONCENTRACIÓN MEDIA MENSUAL DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

	CO	NO ₂	NO	SO ₂
DIC	6.04	76.45	147.13	138.2
ENE	6.36	75.50	125.09	137.75
FEB	6.45	79.98	159.11	143.45
MAR	5.83	81.13	115.11	113.97
ABR	4.24	73.42	72.94	71.94
MAY	3.97	67.50	63.60	57.31
JUN	3.44	87.17	72.06	38.27
JUL	3.42	90.49	77.73	39.84
AGO	3.95	97.91	94.16	45.13
SEP	4.43	94.49	103.83	51.51
OCT	5.00	106.04	153.31	72.19
NOV	6.22	100.57	213.59	122.26

De la tabla anterior concluimos que en febrero se produce la mayor concentración de CO, y SO₂. Esta circunstancia no debe extrañarnos, ya que estos contaminantes son propios de las calefacciones, sobretodo el SO₂ y febrero es junto con enero el mes más frío en Salamanca, siendo su temperatura media ligeramente superior a 5° C. Octubre es el mes con mayor concentración de NO₂ y noviembre de NO. En cualquier caso, todos son meses, a excepción de octubre correspondientes al invierno.

Por lo que respecta al CO y SO₂ existen diferencias notables entre los valores obtenidos en lo que podríamos considerar meses de invierno (desde octubre hasta marzo incluidos) y los valores correspondientes al resto de los meses del año.

Los meses de menor concentración son: mayo, donde la concentración es mínima en NO₂ y NO, junio con una concentración mínima de SO₂, y julio en el que la concentración de CO es mínima. Las concentraciones son por lo general bajas desde los meses de abril hasta septiembre incluidos, debido principalmente a la disminución de las emisiones, sobretodo por parte de las fuentes estáticas o calefacciones. Hemos indicado también que en abril y más aún en mayo se producían bajas concentraciones en casi todos los contaminantes y mínimos principalmente en los óxidos de nitrógeno. Si nos fijamos en la variable velocidad de viento y la tomamos como un índice de inestabilidad atmosférico vemos que precisamente en

estos dos meses es cuando el viento sopla con más velocidad. Por tanto, aunque las emisiones sean mayores que en los meses de verano, la constante regeneración del aire con movimientos verticales explica que se alcancen estos niveles durante esta época del año, sin ser mínimas las emisiones. Por otra parte los máximos señalados para algunos contaminantes en los meses de octubre y noviembre, dados los valores mínimos de velocidad de viento, podrían ser debidos a las situaciones de fuerte estabilidad atmosférica.

Por último, los meses más calurosos son julio y agosto, que son los meses de máxima radiación, y mínima humedad relativa. A pesar de la estabilidad atmosférica en verano que favorecería el aumento de la concentración, las emisiones son mínimas durante estos meses por razones que expondremos posteriormente.

Estudio de la evolución semanal de los contaminantes atmosféricos

Otra forma de ver la fuerte influencia que sobre la contaminación atmosférica ejerce la circulación, se verá reflejada también en la tabla siguiente donde se observan las diferencias en las concentraciones en días laborables y festivos.

TABLA 12. EVOLUCIÓN SEMANAL DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

Concentraciones de CO en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂, NO, y SO₂ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

	CO	NO ₂	NO	SO ₂
LUNES	5.23	91.01	129.23	87.51
MARTES	5.04	89.89	121.06	89.12
MIÉRCOLES	5.04	89.00	122.09	93.28
JUEVES	4.93	89.87	117.51	89.01
VIERNES	5.71	98.31	135.67	92.84
SÁBADO	4.60	76.43	100.87	74.82
DOMINGO	3.89	65.94	82.85	70.57

Es significativo comentar en esta tabla como las concentraciones se mantienen constantes de lunes a jueves, notándose un incremento los viernes, sobretodo en los óxidos de nitrógeno. Por otra parte los sábados y domingos son los días de menor contaminación, siendo los valores de este último día notablemente inferiores a los del resto de la semana. Los siguientes gráficos nos dan una clara visión de lo anteriormente expuesto y nos permiten observar el descenso de la concentración de los contaminantes atmosféricos durante el fin de semana.



Fig. 12. Evolución semanal de la concentración de CO.



Fig. 13. Evolución semanal de la concentración de NO₂.



Fig. 14. Evolución semanal de la concentración de NO.



Fig. 15. Evolución semanal de la concentración de SO₂.

Legislación sobre los niveles de inmisión permitidos y calidad del aire

Hemos citado ya como en el siglo XIV en Gran Bretaña existía un control legislativo sobre los humos emitidos a la atmósfera. Se tenía conciencia ya de los daños, en ocasiones muy graves, que estos tenían sobre el hombre. Esta legislación se ha ido adaptando con el resurgir de las nuevas fuentes de energía y los avances técnicos, con los cuales la contaminación ha alcanzado sus más graves episodios en las últimas décadas, sobresaliendo el caso de Londres en diciembre de 1952 con 4000 muertos. Hoy día los niveles de contaminación en las grandes ciudades

como: Atenas, Roma, Sao Paulo o Ciudad de México entre otras, son muy preocupantes. Se hace por ello necesario un control y una legislación actual que nos permita determinar cual es la calidad del aire que respiramos. A continuación presentamos un cuadro resumen donde se indica si esta calidad es muy buena, buena, aceptable o mala, de acuerdo con los valores que establece la legislación.

Para establecer cada una de las cuatro categorías de la calidad del aire hemos determinado que esta es :

Muy buena: cuando el valor medido está comprendido entre 0 y el 25% del valor límite.

Buena: cuando el valor medido está comprendido entre 26% y el 80% del valor límite.

Aceptable: cuando el valor medido está comprendido entre 81% y el valor límite.

Mala: cuando supera el valor límite.

Para el NO la legislación no es tan específica. En ocasiones, los criterios de calidad del aire para los óxidos de nitrógeno (NO₂ y NO principalmente) se expresan en dióxido solamente.

TABLA 13. CRITERIOS DE CALIDAD DEL AIRE EN SALAMANCA

CALIDAD DEL AIRE	VALOR ESTABLECIDO	CONTAMINANTE	FUENTE
Muy buena	de 0 a 10 (mg/m ³)	CO (media horaria)	P.M.S. Salamanca
Buena	de 11 a 32 (mg/m ³)	CO (media horaria)	P.M.S. Salamanca
Aceptable	de 33 a 40 (mg/m ³)	CO (media horaria)	P.M.S. Salamanca
Mala	más de 40 (mg/m ³)	CO (media horaria)	P.M.S. Salamanca
Muy buena	de 0 a 75 (ug/m ³)	NO ₂ (media horaria)	R.D. 171/87
Buena	de 76 a 240 (ug/m ³)	NO ₂ (media horaria)	R.D. 171/87
Aceptable	de 241 a 345 (ug/m ³)	NO ₂ (media horaria)	R.D. 171/87
Mala	más de 345 (ug/m ³)	NO ₂ (media horaria)	R.D. 171/87
Muy buena	de 0 a 37 (ug/m ³)	SO ₂ (media diaria)	R.D. 1613/85
Buena	de 38 a 120 (ug/m ³)	SO ₂ (media diaria)	R.D. 1613/85
Aceptable	de 121 a 172 (ug/m ³)	SO ₂ (media diaria)	R.D. 1613/85
Mala	más de 173 (ug/m ³)	SO ₂ (media diaria)	R.D. 1613/85

TABLA 14. CALIDAD DEL AIRE POR ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

	MUY BUENA	BUENA	ACEPTABLE	MALA
CO INV	34 días	56 días	0 días	0 días
CO PRI	54 días	38 días	0 días	0 días
CO VER	79 días	13 días	0 días	0 días
CO OTO	39 días	51 días	1 día	0 días
CO ANUAL	206 días	158 días	1 día	0 días
NO ₂ INV	1 día	88 días	1 día	0 días
NO ₂ PRI	3 días	89 días	0 días	0 días
NO ₂ VER	0 días	90 días	2 días	0 días
NO ₂ OTO	0 días	87 días	3 días	1 día
NO ₂ ANUAL	4 días	354 días	6 días	1 día
SO ₂ INV	0 días	29 días	40 días	21 días
SO ₂ PRI	12 días	67 días	13 días	0 días
SO ₂ VER	34 días	58 días	0 días	0 días
SO ₂ OTO	8 días	65 días	16 días	2 días
SO ₂ ANUAL	54 días	219 días	69 días	23 días

El CO es el contaminante más abundante de los que se encuentran en las capas bajas de la atmósfera. Establecemos para él un segundo criterio de calidad del aire que es el valor medio durante 8 horas consecutivas.

TABLA 15. CRITERIO DE CALIDAD DEL AIRE EN SALAMANCA PARA CO.
(DURANTE 8 HORAS)

CALIDAD DEL AIRE	VALOR ESTABLECIDO	CONTAMINANTE	FUENTE
Muy buena	de 0 a 3.75 (mg/m ³)	CO (durante 8 horas)	R.D. 833/75
Buena	de 3.75 a 12 (mg/m ³)	CO (durante 8 horas)	R.D. 833/75
Aceptable	de 12 a 15 (mg/m ³)	CO (durante 8 horas)	R.D. 833/75
Mala	más de 15 (mg/m ³)	CO (durante 8 horas)	R.D. 833/75

TABLA 16. 2º CRITERIO DE LA CALIDAD DE AIRE PARA EL CO (8 HORAS).

	MUY BUENA	BUENA	ACEPTABLE	MALA
CO INV	3 días	68 días	16 días	3 días
CO PRI	3 días	88 días	1 día	0 días
CO VER	16 días	76 días	0 días	0 días
CO OTO	2 días	81 días	6 días	2 días
CO ANUAL	24 días	313 días	23 días	5 días

En general la calidad del aire fue buena para los cuatro contaminantes atmosféricos analizados. El dióxido de azufre registró unos niveles más altos y en invierno, durante 21 días la calidad del aire fue mala, aunque en ningún caso se llegaron a producir valores de inmisión alarmantes. Los niveles permitidos de CO fueron sobrepasados durante 5 días y siempre en periodos de 8 horas consecutivas y nunca con valores puntuales elevados.

Podemos decir por tanto que la calidad del aire en Salamanca fue buena, y sólo fueron superados los límites establecidos durante periodos cortos de tiempo; generalmente algunas tardes de las estaciones más frías del año, donde a los efectos de la circulación se suman los de las calefacciones domésticas.

Influencia de las fuentes de emisión en la concentración de cada contaminante atmosférico

Anteriormente hemos analizado cuales fueron las horas, días, estaciones y meses de mayor y menor concentración de contaminantes. Como conclusión podemos decir que las mayores concentraciones se producen en otoño y sobre todo en invierno.

Analizando las fuentes de contaminación descritas en el informe Corine y extrapolando los resultados para el caso de Salamanca, donde básicamente las fuentes de emisión se reducen a dos: el tráfico urbano, principalmente vehículos ligeros y las calefacciones domésticas, podemos concluir que la contribución de cada una de estas dos fuentes en la concentración de cada contaminante es la siguiente:

TABLA 17. CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN A LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES.

	CO	NO _x	SO ₂
TRÁFICO	67%	73%	11%
CALEFACCIONES	33%	27%	89%

Como vemos, la principal fuente de contaminación atmosférica es el tráfico (globalmente es el 70 % de la contaminación atmosférica total) y las gráficas de evolución a lo largo del día así lo reflejaban. En ellas podían observarse tres máximos diarios de concentración que coincidían con las horas de tráfico más intenso en las zonas próximas a la estación meteorológica. Estos máximos aparecían a las 8.00 h., a las 13.00 h. y el máximo absoluto a las 19.00 h. Las concentraciones mínimas se producen durante la noche y todos los contaminantes atmosféricos presentan un mínimo a las 4.00 h. que por otra parte es la hora de menor intensidad de tráfico.

Otros factores que nos llevan a pensar en esta causa como principal son por ejemplo los descensos en la concentración durante el verano. La mejora de las condiciones meteorológicas y la ausencia del trabajo durante el periodo vacacional en los meses de julio y agosto tienen como consecuencia un descenso en la utilización del automóvil para desplazarse al lugar de trabajo. Aunque en otros meses como mayo se producen concentraciones mínimas, estas serían consecuencia más de la inestabilidad atmosférica que permite una regeneración constante del aire urbano, que de un descenso en las fuentes de emisión. Por otra parte el descenso durante las Navidades también es significativo, y los niveles registrados durante estas 3 semanas son comparables a los promediados durante los fines de semana.

Vemos también que en el estudio realizado entre días laborables y festivos se producía un descenso considerable en la concentración de todos los contaminantes. El descenso más notable se produce en el CO y en los óxidos de nitrógeno; y es mayor incluso los domingos que los sábados, como cabría esperar.

Mención a parte merece el único contaminante cuya principal fuente de emisión no es la circulación. El SO₂ tiene su origen principal en los procesos de combustión en los que las calefacciones domésticas juegan el papel más importante en nuestra ciudad, más aún si tenemos en cuenta la alta cantidad de calderas existentes con combustibles de carbón, ricos en concentración de azufre y derivados azufrosos. Este contaminante presenta una alta variabilidad durante el día. Las concentraciones durante la noche son muy bajas, alcanzando un mínimo a las 4.00 h. al igual que ocurría con el resto de los contaminantes, sin embargo presentan un único máximo a las 19.00 h. Normalmente las horas de encendido de las calderas de calefacción, generalmente por la tarde, indican que ésta debe ser su evolución a lo largo del día. Otro aspecto que nos hace pensar en las calefacciones como principal fuente de emisión de SO₂, es la diferencia de concentración existente entre los meses de abril a octubre con el resto del año. El resultado es todavía más evidente si comparamos las gráficas de evolución a lo largo del día por estaciones o la coincidencia de las concentraciones más altas en los meses más fríos y más bajas en los más calurosos.

Resultados parecidos obtienen otros autores como M. Costa y J.M. Baldasano (1995) en Barcelona, donde a pesar de tratarse de una ciudad altamente industrializada, no dudan en señalar la circulación como la causa del 60% de la contaminación atmosférica total.

MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL

Análisis bivariante de cada contaminante atmosférico con cada variable meteorológica.

A lo largo del apartado anterior hemos venido indicando que, así como el ciclo diario de los contaminantes era función de la no uniformidad de las fuentes de emisión antropogénicas, la evolución estacional era debida en su mayor parte a las condiciones meteorológicas. Veremos, mediante un análisis de regresión lineal simple cual es el grado de correlación entre cada contaminante atmosférico y cada variable meteorológica, para posteriormente, mediante regresión lineal múltiple tratar de encontrar la relación entre la concentración de cada contaminante y las variables meteorológicas observadas.

La dependencia del CO con las variables meteorológicas, es más alta respecto a la presión, radiación y temperatura, cuyos coeficientes de determinación son del orden de 20% a 25%. El coeficiente de correlación entre el NO₂ y la velocidad del viento es $r = 0.520$, que corresponde a un coeficiente de determinación de 27%. El resto de coeficientes son pequeños e incluso para la presión y la radiación, el nivel de significación de F es alto (0.194 y 0.668 respectivamente), lo que indica que el ajuste realizado no es bueno para estas dos variables (consideraremos un buen ajuste cuando $\text{sig. } F < 0.005$). Contrariamente a lo ocurrido con el NO₂, el NO tiene su mayor correlación con la radiación ($r^2 = 0.27$). El resto de los coeficientes de determinación se sitúan entre el 10% y el 20% y en cualquier caso el ajuste realizado es bueno. Por último, es el SO₂ el contaminante que presenta una mayor correlación respecto de las variables. Podríamos definir la relación entre la concentración con respecto a la humedad relativa, la presión, la radiación y la temperatura con unos coeficientes de determinación de 27%, 21%, 41% y 36% respectivamente y con un buen ajuste en todos los casos. La correlación del SO₂ es negativa con la temperatura. Su explicación está en que a menores temperaturas, se consume más combustible para calefacciones domésticas, con el consiguiente incremento de emisiones. Además las estaciones de mínima temperatura coinciden con las de mínima radiación y por tanto la correlación con esta variable es igualmente negativa. La humedad relativa es sin embargo máxima en invierno y por tanto su correlación con los contaminantes es directa.

La velocidad del viento favorece la dispersión de los contaminantes, siendo la correlación de esta variable con la concentración, negativa en todos los casos.

Análisis multivariante de cada contaminante atmosférico con las 6 variables meteorológicas

Hemos visto las relaciones existentes entre las concentraciones de cada contaminante con cada variable a partir de un análisis de regresión lineal simple. Los coeficientes de correlación y en consecuencia, los coeficientes de determinación son por lo general pequeños. Intentaremos mejorar los resultados obtenidos haciendo

un análisis de regresión múltiple entre cada contaminante atmosférico con las seis variables meteorológicas estudiadas. Las ecuaciones obtenidas y sus coeficientes de correlación son los siguientes:

TABLA 18. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE ENTRE CADA CONTAMINANTE ATMOSFÉRICO Y TODAS LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.

	Cte (E.Std.)	DIR (E. Std.)	HR (E. Std.)	COEFICIENTES				r	squared	error std	F	sign.F
				PRE (E. Std.)	RAD (E. Std.)	TEM (E. Std.)	VEL (E. Std.)					
CO	-58.62 (10.690)	-0.002 (0.001)	-0.043 (0.007)	0.077 (0.011)	-0.007 (0.001)	-0.173 (0.021)	-1.271 (0.198)	0.752	0.565	1.30	73.41	0.000
NO ₂	27.05 (141.37)	-0.028 (0.019)	-0.374 (0.095)	0.111 (0.150)	-0.094 (0.014)	1.090 (0.278)	-16.451 (2.549)	0.631	0.398	16.81	37.64	0.000
NO	-1448.64 (389.60)	-0.102 (0.050)	-0.170 (0.261)	1.826 (0.413)	-0.239 (0.039)	-1.642 (0.761)	-45.386 (6.949)	0.693	0.481	45.68	52.41	0.000
SO ₂	-1624.37 (245.962)	0.001 (0.034)	-0.121 (0.166)	1.952 (0.261)	-0.167 (0.025)	-3.291 (0.483)	-34.669 (4.446)	0.813	0.661	29.25	111.01	0.000

Los coeficientes de determinación para cada ecuación son del orden de 56%, 40%, 48% y 66% respectivamente para: CO, NO₂, NO y SO₂ con niveles de significación nulos, lo cual indica que el ajuste realizado es bueno.

En las gráficas 16. a 19. se representa la evolución anual real de los contaminantes atmosféricos desde el día 1 de diciembre de 1994 hasta el día 30 de noviem-

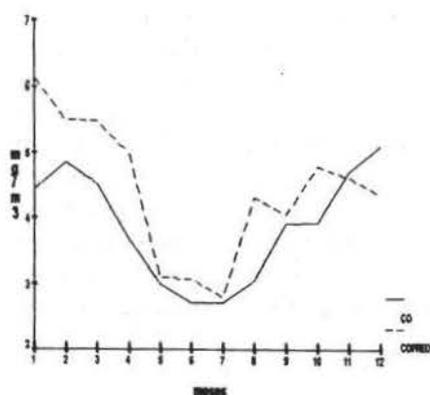


Fig. 16. valores reales y predichos de CO durante 1995.

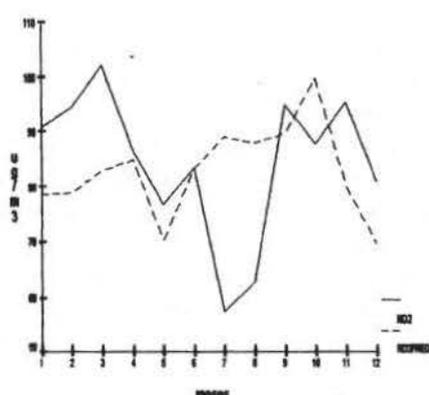


Fig. 17. valores reales y predichos de NO₂ durante 1995

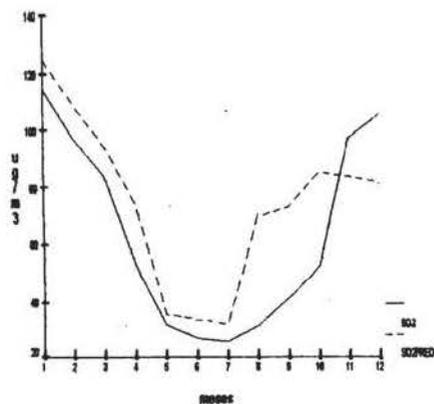
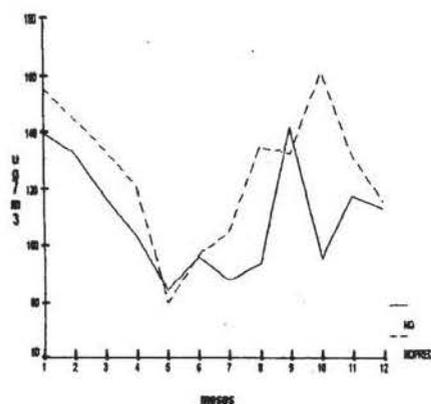


Fig. 18. valores reales y predichos de NO durante 1995.

Fig. 19. valores reales y predichos de SO₂ durante 1995.

bre de 1995 y la evolución predicha mediante el ajuste de regresión lineal múltiple.

Análisis multivariante de cada contaminante atmosférico con las 6 variables meteorológicas y la concentración del día anterior

La atmósfera será el destino de los contaminantes atmosféricos emitidos. En ella y dependiendo de las condiciones que presente se producirán reacciones fotoquímicas de algunos contaminantes, favorecidas en horas de máxima radiación y se alcanzarán concentraciones elevadas si la situación es de estabilidad o concentraciones mínimas en caso contrario, con fuertes vientos, en situación de lluvia o de mínima emisión. Los contaminantes no se concentrarán solo allí donde son emitidos, sino que será también la atmósfera la encargada de transportarlos a veces incluso a decenas de kilómetros de las fuentes. En definitiva será la atmósfera el medio donde convivan los contaminantes y donde permanezcan desde que son emitidos hasta que son eliminados. Este proceso es largo y ya hemos citado que algunos contaminantes atmosféricos permanecen incluso durante meses hasta ser eliminados. En el siguiente análisis de regresión consideramos importante incluir, además de las 6 variables meteorológicas la concentración del día anterior. Comprobaremos en que medida mejoran los resultados predichos.

TABLA 19. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE DE CADA CONTAMINANTE ATMOSFÉRICO CON TODAS LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y LA CONCENTRACIÓN DEL DÍA ANTERIOR.

	Cte (E.Std.)	DÍA ANT (E.Std.)	COEFICIENTES						r	r-squared	error std.	F	sign.F
			DIR (E. Std.)	HR (E. Std.)	PRE (E.Std.)	RAD (E. Std.)	TEM (E. Std.)	VEL (E. Std.)					
CO	-34.86 (10.49)	0.381 (0.002)	0.001 (0.001)	-0.032 (0.007)	0.046 (0.011)	-0.005 (0.000)	-0.107 (0.022)	-0.915 (0.192)	0.827	0.651	1.17	84.91	0.000
NO ₂	111.82 (133.56)	0.347 (0.046)	-0.018 (0.018)	-0.395 (0.094)	-0.011 (0.141)	-0.099 (0.020)	0.711 (0.285)	-14.779 (2.444)	0.706	0.499	15.22	46.30	0.000
NO	-645.97 (336.40)	0.527 (0.042)	-0.043 (0.044)	-0.412 (0.229)	0.861 (0.357)	-0.184 (0.048)	-0.741 (0.662)	-31.411 (6.164)	0.814	0.662	37.19	90.21	0.000
SO ₂	-769.07 (208.15)	0.522 (0.038)	0.019 (0.027)	-0.320 (0.140)	0.959 (0.222)	-0.121 (0.030)	-1.890 (0.409)	-28.941 (3.680)	0.893	0.797	22.99	181.45	0.000

Los coeficientes de determinación nos permiten predecir el valor de los contaminantes con un porcentaje de acierto del orden de 65%, 50%, 66% y 80% y respectivamente para: CO, NO₂, NO y SO₂ con niveles de significación nulos. En todos los casos se observa que la variable concentración del día anterior tiene una influencia notable. Los resultados mejoran entre un 10% y un 15% los obtenidos en el apartado anterior. En las gráficas 20. a 23. se representa la evolución anual real de los contaminantes atmosféricos desde el día 1 de diciembre de 1994 hasta el día 30 de noviembre de 1995 y la evolución predicha mediante el ajuste de regresión lineal múltiple.

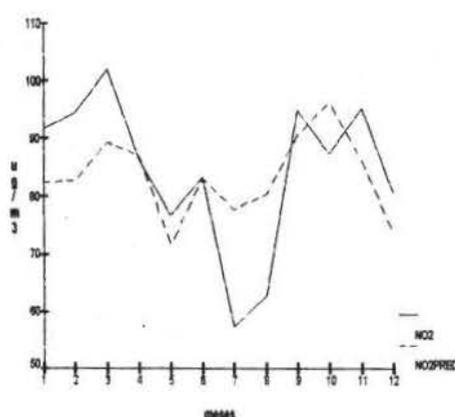
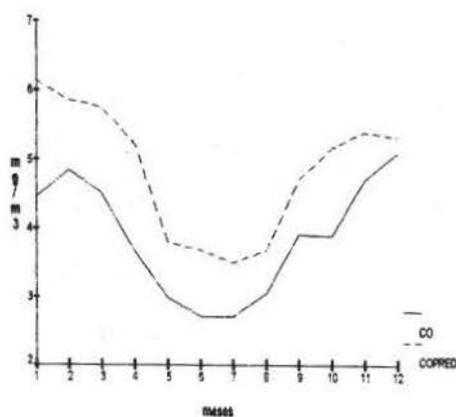


Fig. 20. valores reales y predichos de CO durante 1995. Con la concentración del día anterior.

Fig. 21. valores reales y predichos de NO₂ durante 1995. Con la concentración del día anterior.

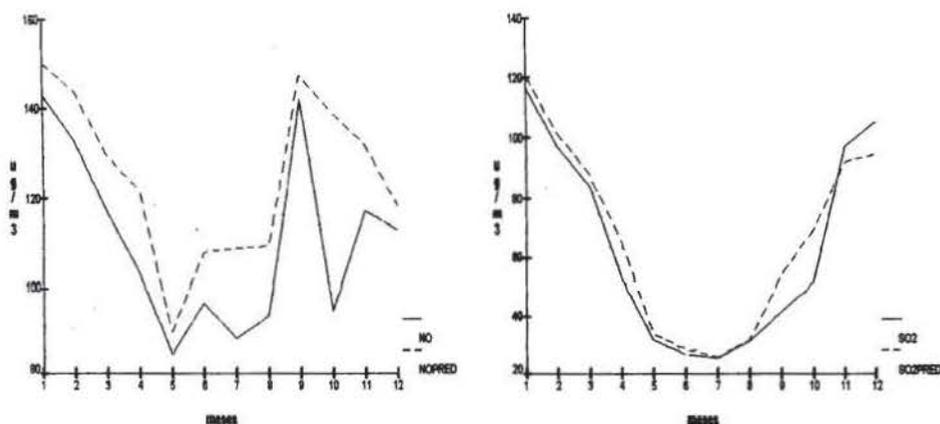


Fig. 22. valores reales y predichos de NO durante 1995. Con la concentración del día anterior.

Fig. 23. valores reales y predichos de SO₂ durante 1995. Con la concentración del día anterior.

METODOLOGÍA ARIMA APLICADA A LAS SERIES CO y SO₂

Hemos comprobado como en determinados contaminantes, la concentración de un día ejerce mucha influencia sobre la del día siguiente. Utilizaremos ahora solamente información de la propia serie para predecir la evolución de la concentración de los contaminantes en la atmósfera. Para su realización hemos tomado datos medios diarios de concentración para dos de los contaminantes estudiados, el CO y el SO₂. El periodo de estudio tomado ha sido desde el día 1 de mayo de 1993 y el día 1 de marzo de 1993 para el CO y SO₂ respectivamente, hasta el 30 de noviembre de 1995. Hemos elegido el CO por ser el contaminante más abundante de los que se encuentran en la atmósfera y proceder del tráfico de vehículos en su mayor parte, y el SO₂, por tener su procedencia, a diferencia del resto, en las calderas de calefacción doméstica, ser el único que supera los valores estimados de una calidad de aire aceptable en Salamanca y ser altamente peligroso para la salud en concentraciones elevadas. Esta metodología utiliza únicamente información contenida en la propia serie, que partiendo de un análisis univariante ampliamente utilizado en la bibliografía y conocido como modelos Box-Jenkins (1976) o como modelos ARIMA (Uriel (1985)) configura 4 etapas sucesivas: identificación del modelo, determinación de parámetros, evaluación del modelo y predicción futura. Por ser suficientemente conocidas las diferentes etapas, nos limitaremos a presentar los resultados de la mismas, no sin indicar que son modelos de predicción a corto plazo.

Análisis de estacionariedad de las series

En las figuras 24. a 27. presentamos las series de valores medios y los histogramas de frecuencias de ambos contaminantes. Se puede observar una periodicidad

dad anual implícita y una no constancia en media y en varianza. Podemos así suponer que las series originales no son estacionarias, lo que habrá que conseguir mediante las transformaciones adecuadas.

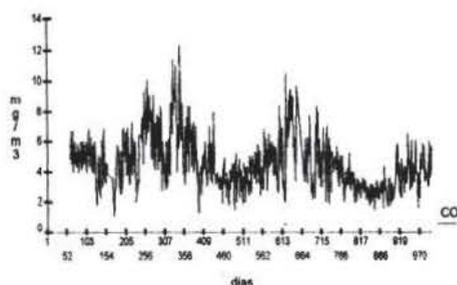


Fig. 24. Serie de valores medios diarios de CO.

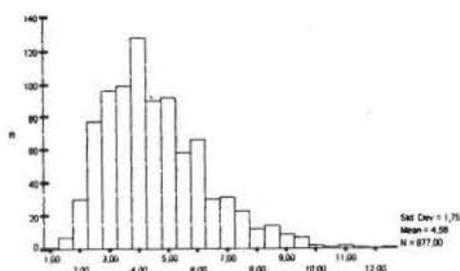


Fig. 25. Histograma de valores medios diarios de CO.

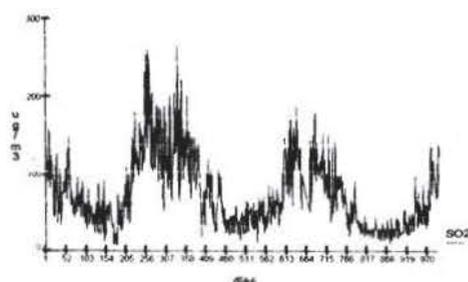


Fig. 26. Serie de valores medios diarios de SO₂.

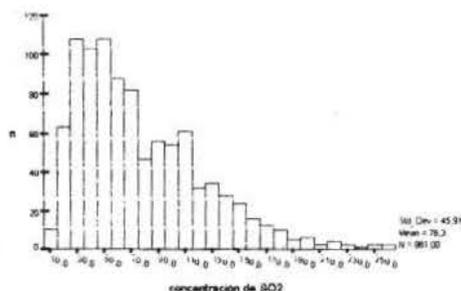


Fig. 27. Histograma de valores medios diarios de SO₂.

Esta presunción también es confirmada por la gráfica de las funciones de autocorrelación (FAC), figs. 28. y 29. donde observamos el lento decaimiento, así como la alta correlación entre los datos muestrales y una ciclicidad de periodo 7, que ya habíamos estudiado en las gráficas de evolución semanal (figs. 12 a 15).

Los histogramas de frecuencias siguen una distribución tipo logarítmico-normal, aunque no muy acusada; por lo que consideraremos que simplemente diferenciando la serie, conseguiremos la estacionariedad tanto en media como en varianza.

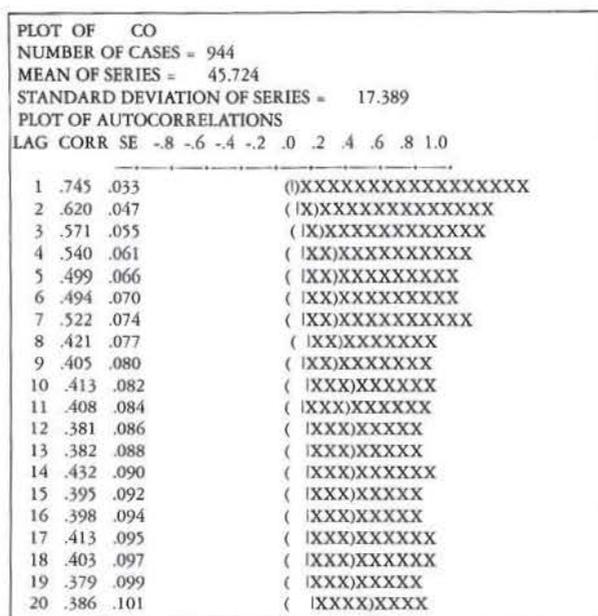


Fig. 28. FAC de la serie original de CO

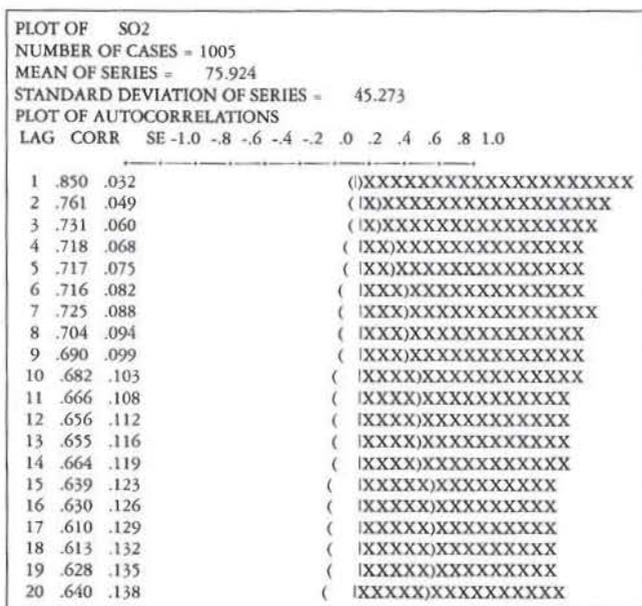


Fig. 29. FAC de la serie original de SO₂

Una vez diferenciadas las series, $d = 1$ para conseguir estabilizar la media y $D = 1$ y periodo $s = 7$ para eliminar las ciclicidades de orden semanal, y a la vista de sus respectivas funciones FAC y PACF, (figs. 30. a 33.) en las que los coeficientes de autocorrelación decaen rápidamente a partir de un cierto retardo, se determinan los coeficientes de los modelos propuestos.

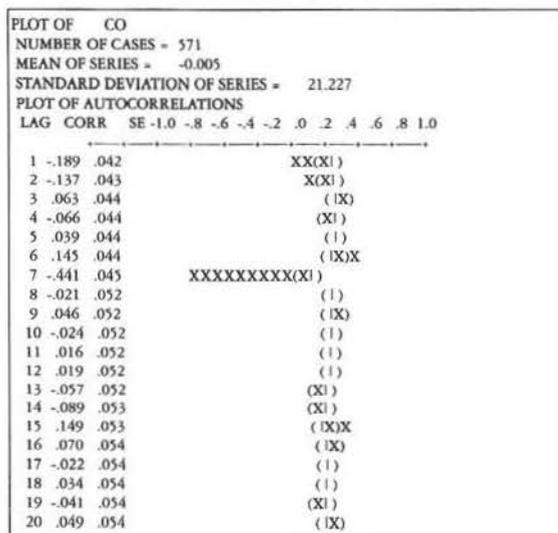


Fig. 30. FAC de la serie diferenciada de CO

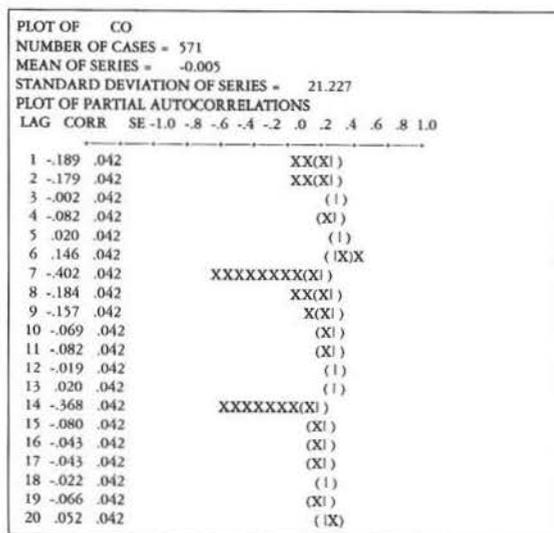


Fig. 31. FACP de la serie diferenciada de CO

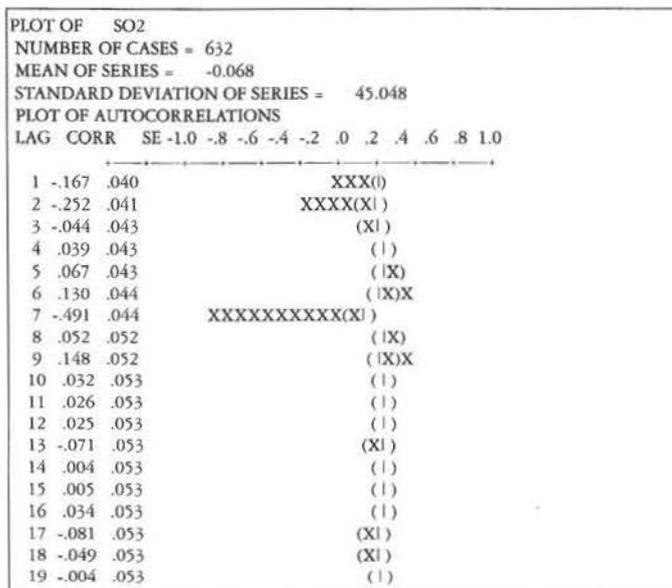


Fig. 32. FAC de la serie diferenciada de SO₂

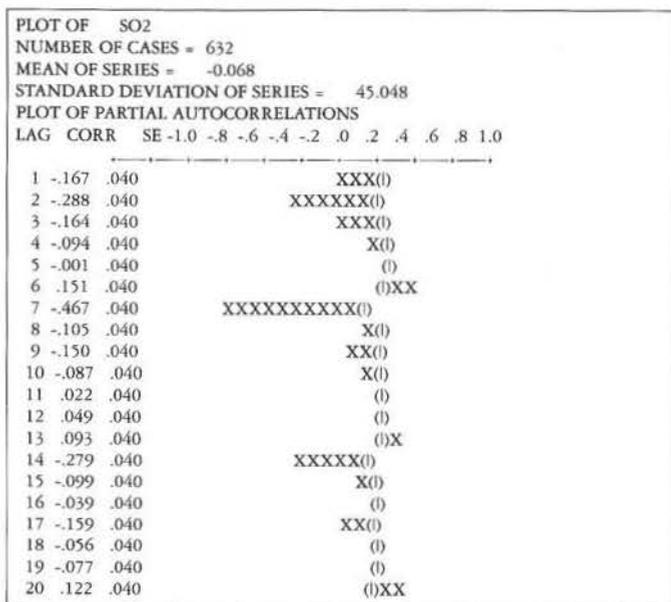


Fig. 33. FACP de la serie diferenciada de SO₂

La diferenciación de orden $D = 1$ y periodo $s = 365$, que se refleja claramente en las figuras 24. y 26. no la consideramos por disponer de un periodo relativamente corto de datos y porque únicamente tratamos de predecir los valores correspondientes a las tres semanas siguientes al último dato diario considerado. De esta forma la ciclicidad semanal es mucho más influyente.

Identificación del modelo ARIMA generador de las series

Las series diferenciadas deben estar generadas por unos modelos multiplicativos que representaremos por $ARIMA(P,D,Q)*(p,d,q)$. La primera parte corresponde al comportamiento estacional y la segunda al comportamiento regular de la serie. Nuestro objetivo será hallar los coeficientes Φ_i , ϕ_i , Θ_i y θ_i autorregresivos y de medias móviles, tanto de la parte estacional como regular.

Para determinar P , Q , p y q estudiamos las ACF y PACF de las series transformadas.

Para la parte regular, observamos que en las ACF de los dos contaminantes, los únicos coeficientes distintos de 0 son los dos primeros. En las PACF se observa un mismo comportamiento en los coeficientes, por lo que podemos pensar que la parte regular es de tipo AR, MA, o combinación de ambos, pero a lo sumo con dos coeficientes tanto para el CO como para el SO₂.

Para la parte estacional de orden 1 y periodo 7, observamos que en las ACF de los dos contaminantes, el único coeficiente distinto de 0 es el primero. En las PACF se observa un decaimiento de tipo exponencial en los coeficientes. Podemos pensar que la parte estacional es de tipo MA con un coeficiente tanto para el CO como para el SO₂.

Estimación de los parámetros

Vistos los posibles modelos de predicción obtenemos los coeficientes ARIMA. Los modelos para los que obtuvimos las mejores predicciones fueron:

Para el CO:

$ARIMA(2,1,0)*(0,1,1)_7$ con coeficientes AR = -0.276, AR = -0.185 y SMA = 0.903

Para el SO₂:

$ARIMA(1,1,1)*(0,1,1)_7$ con coeficientes AR = 0,465 MA = 0.875 y SMA = 0.911

Validación de los modelos

En esta fase trataremos de establecer si los modelos elegidos son los que en realidad generan las series temporales. Para ello veremos si los residuos de cada

modelo son un ruido blanco (valores totalmente incorrelados, distribución normal de frecuencias y media 0).

En ambos modelos los residuos están incorrelados y sus histogramas de frecuencias presentan para los dos modelos una distribución normal de media 0. Podemos afirmar por tanto que los residuos se aproximan a un proceso de ruido blanco tanto para el CO como para el SO₂. Presentamos las funciones de autocorrelación de los residuos para los dos modelos propuestos.

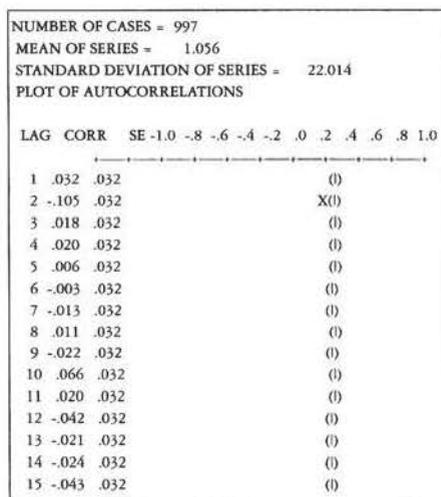
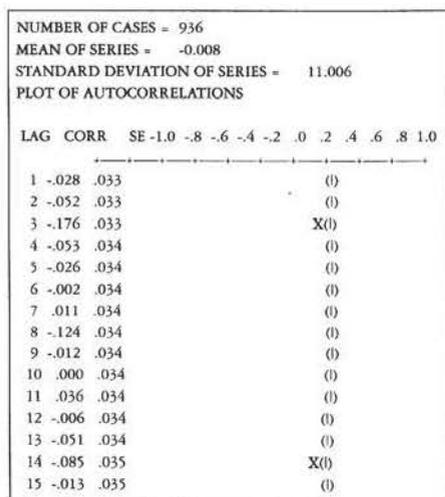


Fig. 34. ACF de los residuos de CO. (ARIMA (2,1,0)*(0,1,1)₇).

Fig. 35. ACF de los residuos de SO₂. (ARIMA (1,1,1)*(0,1,1)₇).

Predicción

Validados los modelos, nos proponemos hacer una predicción para los 21 primeros días del mes de diciembre de 1995. En las figuras 36. y 37. se presentan los valores reales y predichos para el CO y el SO₂.

La predicción es mejor para el CO, pues es más estable en la atmósfera y presenta mayor ciclicidad semanal. En ambos modelos puede observarse la ciclicidad semanal reflejada muy bien en el descenso de los valores reales y predichos para la concentración de CO los días 3, 10 y 17 de diciembre, correspondientes a los tres primeros domingos del mismo mes.

El SO₂ presenta una concentración más variable y al depender en mayor medida de otros factores exógenos atmosféricos, la concordancia entre los valores reales y predichos fluctúa más. En este caso la predicción mediante análisis de regresión múltiple muestra mejores resultados que los modelos ARIMA.

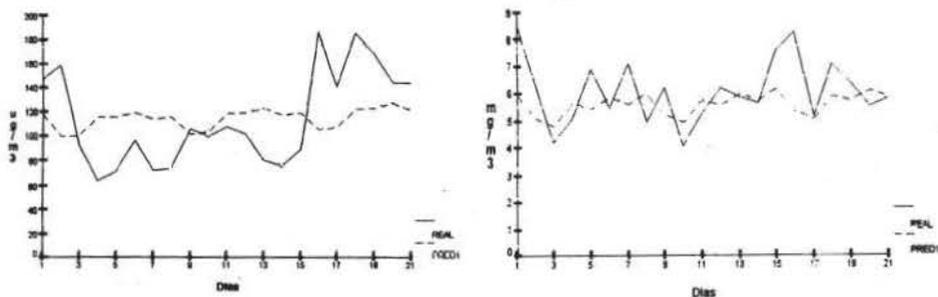


Fig. 36. Predicción de CO con el modelo ARIMA $(2,1,0)*(0,1,1)_7$.

Fig. 37. Predicción de SO_2 con el modelo ARIMA $(1,1,1)*(0,1,1)_7$.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las mayores concentraciones de contaminantes se produjeron en invierno. En algunas ocasiones, las concentraciones alcanzadas en esta estación, e incluso durante los últimos meses del otoño, fueron varias veces superiores a las alcanzadas en el resto del año. El ejemplo más significativo es el del SO_2 que muestra con claridad que las fuentes de emisión de este contaminante son mayoritariamente las calefacciones existentes en nuestra ciudad, y dentro de estas, las que consumen carbones ricos en compuestos azufrosos contaminantes.

A lo largo del año podemos diferenciar en la contaminación global dos grandes periodos: el comprendido entre los meses de noviembre y marzo inclusive y el correspondiente al resto del año. Los meses más contaminados son enero y febrero que a su vez son los más fríos. Por su parte abril y mayo por su inestabilidad y los meses de verano por la disminución de las emisiones, son los meses menos contaminados.

Los valores máximos registrados en ningún caso fueron alarmantes. La calidad del aire fue buena por lo general. El único contaminante para el cual, durante 21 días no consecutivos en invierno se llegaron a alcanzar valores altos, fue el SO_2 . Los niveles permitidos de CO fueron sobrepasados durante 5 días en invierno y siempre en periodos inferiores a 8 horas consecutivas.

La evolución de la concentración a lo largo del día está estrechamente ligada a la de las fuentes de emisión. Todos los contaminantes presentan la misma evolución a lo largo del día, con un mínimo a las 4.00 h. y un máximo a las 19.00 h. Dos máximos secundarios se producen a las 8.00 h. y a las 13.00 h, a excepción del SO_2 que evoluciona de forma constante hasta alcanzar el máximo de las 19.00 h.

La principal fuente de contaminación en Salamanca es la circulación. El emplazamiento de la estación meteorológica, en una de las zonas de mayor circulación, hace pensar que de no superarse ahí los niveles permitidos difícilmente lo harían en el resto de la ciudad. El tráfico sería casi el 70% de la contaminación global. Dada la ausencia de fuentes de emisión de tipo industrial, y estar situada la estación en una zona urbana residencial, el resto sería la contribución de las calderas de calefacción domésticas.

En un estudio semanal podemos observar como la concentración se mantiene constante de lunes a jueves, aumenta los viernes y es mínima los sábados y sobre todo los domingos. Son unos resultados que refuerzan la idea de responsabilizar al tráfico como causa principal de la contaminación atmosférica en Salamanca.

Predecir qué niveles de concentración tendremos a partir de una sola variable meteorológica es físicamente inconsistente. La bondad del ajuste y por lo tanto el coeficiente de correlación es sin embargo elevado cuando se realiza un análisis de regresión múltiple y los coeficientes de determinación oscilan entre el 40% para el NO_2 y el 66% para el SO_2 . Los resultados son mejorados si consideramos como variable explicativa la concentración del día anterior además de las 6 variables utilizadas anteriormente. Los coeficientes de determinación y por lo tanto la varianza explicada fluctúan ahora entre el 50% para el NO_2 y el 80% para el SO_2 .

El hecho de que los resultados mejoren notablemente una vez introducida la concentración del día anterior, nos lleva a pensar que es posible buscar modelos predictores basados únicamente en la información que da la propia inercia de las series de los contaminantes atmosféricos. Se realiza un análisis univariante a partir de los modelos ARIMA (modelos autorregresivos y de medias móviles integrados). Realizadas las distintas etapas de identificación, estimación, validación y predicción, obtenemos que para los contaminantes CO y SO_2 los modelos que mejor explican la predicción a corto plazo son modelos de tipo multiplicativo:

$$\begin{aligned} \text{CO} & \dots\dots \text{ARIMA } (2,1,0)*(1,1,1)_7 \\ \text{SO}_2 & \dots\dots \text{ARIMA } (1,1,1)*(1,1,1)_7 \end{aligned}$$

El análisis comparativo de los valores predichos frente a los medidos para los 21 primeros días de diciembre de 1995, arrojan unos resultados mucho mejores para el CO que para el SO_2 . Esto nos permite confirmar la validez de este tipo de predicción en aquellos contaminantes que presentan una menor variabilidad en la atmósfera y una ciclicidad semanal notable.

A la vista de los resultados de ambos planteamientos en la modelización de los contaminantes del aire, podemos afirmar que presentan mayor fiabilidad en la predicción los procesos de regresión lineal múltiple para aquellos contaminantes con una fuerte dependencia de las condiciones atmosféricas. Por el contrario, aquellos contaminantes más estables en la atmósfera y cuya serie presente alguna ciclicidad bien definida, pueden ser descritos de forma satisfactoria mediante modelos

ARIMA. El inconveniente en este caso es, además de tratarse de una predicción válida a corto plazo, despreciar la dependencia de los factores externos, a los que todo contaminante está expuesto en mayor o menor medida. No obstante, contrastar los dos modelos de predicción sería la mejor manera de obtener los mejores resultados.

Por último, podemos confirmar la idea subjetiva que tienen los habitantes de nuestra ciudad, de que Salamanca es, hasta la fecha, una *ciudad saludable* desde el punto de vista de la contaminación atmosférica.

REFERENCIAS

- STEVENS, C. S. 1987. "Ozone formation in the greather Johannesburg region" *Atmospheric Environment*, vol 21, nº. 3, pp. 523-530.
- BIZJAK, M; BENNER, W. H; HANSEN, D. A; HRCEK, D; HUDNIK, V; NOVAKOV, T. 1987. "Spatial and Temporal Variations of Aerosols Sulfate and trace Elements in a Source-dominated Urban Environment" *Atmospheric Environment*, vol 22, nº. 12, pp. 2851-2862.
- JAUREGUI, E. 1988. "Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin". *Atmósfera*, vol 1, pp. 131-140.
- GARCÍA, B.A; FERNÁNDEZ, J.M; RUIPEREZ, L.G; LÓPEZ, A. 1988. "Concentrations, sources and particle size distribution of the atmospheric aerosol of the Oviedo urban nucleus (Spain)". *Atmospheric Environment*, vol 22, nº. 12, pp. 2963-2969.
- SHINDO, J.; OI, K.; MATSUMOTO, Y. 1990. "Considerations on air pollution monitoring network design in the light of spatio-temporal variations of data". *Atmospheric Environment*, vol 24. B, nº. 2, pp. 335-342.
- ISIDRO-VALEROSO, I.; MONTEVERDE, C.A.; ESTOQUE, M.A. 1992. "Diurnal variations of air pollution over metropolitan Manila". *Atmósfera*, vol 5, pp. 241-257.
- VELISSARIOU, D.; DAVISON, A.W.; BARNES, J.D., PFIRRMANN, T.; MACLEAN, D.C.; HOLECVAS, C.D. 1992. "Effects of air pollution on pollutions levels in Attica, Greece". *Atmospheric Environment*, vol 26. A, nº. 3, pp. 373-380.
- LONGHETTO, A.; GIACOMELLI, L.; GIRAUD, C.; ZARAMELLA, G. 1992. "A study of correlation among solar energy, atmospheric turbidity and pollutants in urban area". *Atmospheric Environment*, vol 26. B, nº. 1, pp. 29-43.
- PANDEY, J.; AGRAWAL, M.; KHANAM, N.; NARAYAN, D.; RAO, D.N. 1992. "Air pollutant concentrations in Varanasi, India". *Atmospheric Environment*, vol 26. B, nº. 1, pp. 91-98.
- EGGLESTON, S. HACKMAN, M.P.; HEYES, C.A.; IRWIN, G.J.; TIMMIS, R.J.; WILLIAMS, M.L. 1992. "Trends in urban air pollution in the United Kingdom during recent decades". *Atmospheric Environment*, vol 26. B, nº. 2, pp. 227-239.
- JUNG SHU, K. 1992. "Time series analysis of the interdependence among air pollutants". *Atmospheric Environment*, vol 26. B, nº. 4, pp. 491-503.

- ORTIZ, J.L.; APABLAZA, N.; CAMPOS, C.; ZOLEZZI, S.; PRÉNDEZ, M. 1993. "Tropospheric aerosols above the thermal inversion layer of Santiago, Chile: size distribution of elemental concentrations". *Atmospheric Environment*, vol 27. A, n.º 3, pp. 397-399.
- BOZJAR, M.; LESJAK, M.; MLAKAR, P. 1993. "A neural network-based method for short-term predictions of ambient SO₂ concentrations in highly polluted industrial areas of complex terrain". *Atmospheric Environment*, vol 27. B, n.º 2, pp. 221-230.
- QIN, Y.; CHAN, L.Y. 1993. "Traffic source emission and street level air pollution in urban areas of Guangzhou, South China (P.R.C.)". *Atmospheric Environment*, vol 27. B, n.º 3, pp. 275-282.
- SIMPSON, R.W.; XU, H. 1994. "Atmospheric lead pollution in an urban area-Brisbane, Australia". *Atmospheric Environment*, vol 28, n.º 19, pp. 3073-3082.
- YAMAMOTO, N.; NISHIURA, H.; HONJO, T.; ISHIKAWA, Y.; SUZUKI, K. 1995. "A long-term study of atmospheric ammonia and particulate ammonium concentrations in Yokohama, Japan". *Atmospheric Environment*, vol 29, n.º 1, pp. 97-103.
- BRAVO, J. L.; DÍAZ, M. T.; GAY, C.; FAJARDO, J. 1996. "A short prediction model for surface ozone at southwest part of Mexico valley". *Atmósfera*, 9, pp. 33-45.

Trabajos publicados en España

- FIDALGO M.R.; GARMENDIA, J. 1987. "Tipos de tiempo asociados a los altos niveles de contaminación en Salamanca". *Revista de Meteorología*, Junio, pp. 25-35.
- RAMOS, M.C.; SÁNCHEZ, M.L. 1989. "Los sulfatos atmosféricos: sus relaciones con las concentraciones de SO₂ y algunas variables meteorológicas". *Revista de Geofísica*, n.º 45 pp. 15-22.
- FIDALGO M.R.; GARMENDIA, J. 1989. "Análisis de la estabilidad atmosférica y su relación con la contaminación atmosférica en Salamanca. Comparación de métodos". *Anales de Física*, vol 85, serie B, pp. 356-359.
- SÁNCHEZ, M.L.; PASCUAL, D.; RAMOS, M.C.; PÉREZ, I. 1990. "Forecasting particulate pollutant concentrations in a city from meteorological variables and regional weather patterns". *Atmospheric Environment*, vol 24 A, pp. 1509-1519.
- TOMÁS, C.; DE PABLO, F.; EGIDO, M. 1991. "Análisis y predicción de la irradiación solar y la temperatura del aire mediante modelos estocásticos". *Revista de Geofísica*, n.º 47 pp. 107-115.
- COSTA, M.; BALDASANO, J.M. 1995. "Development of a source emission model for atmospheric pollutants in the Barcelona area". *Atmospheric Environment*, vol 30, n.º 2, pp. 309-318.

Libros:

- BOX, J. E. P.; JENKINS, J. W. 1976. "Time series analysis: modeling and forecasting". Ed Holden-Day. San Francisco.

- LA PORTE, P; LABAJO, J.L. 1983. "El clima de Matacán (Salamanca)" .Ed. I.N.M. Publicación A-74.
- PANKRATZ, A. 1983. "Forecasting with univariate Box-Jenkins models. Concepts and cases". Ed. John Wiley and Sons. New York.
- URIEL, E. 1985. "Análisis de series temporales. Modelos ARIMA". Colección Ábaco. Ed Paraninfo.
- PEÑA SÁNCHEZ DE RIBERA D. 1987. "Estadística. Modelos y métodos. 2. Modelos lineales y series temporales". Ed. Alianza Universidad textos.
- SERVICIO DE PUBLICACIONES DEL MOPTMA. 1993. " Medio ambiente en España, 1992". Ed MOPTMA. Madrid.
- SERVICIO DE PUBLICACIONES DEL MOPTMA. 1994. " Medio ambiente en España, 1993". Ed MOPTMA. Madrid.
- PLAN MUNICIPAL DE SALUD DE SALAMANCA. 1994. Documento 4 "Los sistemas municipales de información y vigilancia en salud y medio ambiente". Excmo Ayuntamiento de Salamanca.