

CLIMA Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN MADRID

POR

FELIPE FERNÁNDEZ GARCÍA

Y

ENCARNACIÓN GALÁN

Introducción

La contaminación atmosférica es un hecho fundamentalmente antrópico, derivado de las actividades humanas y las ciudades son las áreas en las que este hecho se manifiesta de forma más acusada. No obstante, las condiciones climáticas regionales desempeñan un papel primordial favoreciendo o impidiendo la dispersión de los contaminantes en función de las condiciones meteorológicas reinantes. Son muchos los autores para los que las principales medidas antipolución son las climáticas y se basan para ello en sucesos ya clásicos, como los graves episodios de contaminación de Londres, Los Ángeles, Bélgica, etc., en los que el factor meteorológico desempeñó siempre un importante papel: fueron situaciones de fuerte estabilidad y escasa ventilación las que determinaron las

Felipe Fernández García y Encarnación Galán. Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid.

Se ha realizado este trabajo dentro de un Programa de Ayuda a la Investigación sobre «El clima urbano de Madrid», Instituto de Geografía, CSIC. Departamento de Geografía. Universidad Autónoma (CICYT, Ministerio de Educación y Ciencia).

Estudios Geográficos
Tomo LVI, n.º 219, abril-junio 1995

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

elevadas concentraciones de contaminantes; las condiciones normales no se restablecieron hasta que no cambiaron las condiciones atmosféricas (Munn, 1980; Elsom, 1990).

Los avances en el conocimiento del sistema climático global, especialmente notables a partir de las recientes publicaciones sobre el cambio climático (IPCC, 1993 y 94), introducen una nueva dimensión en las relaciones clima-contaminación atmosférica. En todos ellos se destaca el papel de la contaminación como principal responsable de las modificaciones que se pueden esperar del equilibrio climático existente a escala global, debido al transporte de los contaminantes a grandes distancias desde los focos de emisión por los sistemas de vientos zonales.

La contaminación atmosférica «transfronteriza» y la contaminación atmosférica de fondo (*background air pollution*) son dos conceptos relacionados con la capacidad de transporte de los contaminantes por parte de la atmósfera e implican una escala bastante más extensa que la relacionada con la contaminación a escala local. Conviene, por tanto, precisar que sobre un lugar concreto las situaciones meteorológicas pueden ser clasificadas de favorables o desfavorables en la medida en que contribuyen de forma notable a determinar los niveles de inmisión medios sobre esas áreas; a mayor escala, sin embargo, la relación clima-contaminación atmosférica ha de ser abordada teniendo en cuenta la totalidad de las emisiones de origen antrópico, susceptibles de provocar importantes cambios en el sistema climático global, especialmente el reforzamiento del efecto de invernadero natural y con repercusiones notables en espacios, a veces alejados de las fuentes de emisión principales, como sucede con las áreas afectadas por la lluvia ácida.

Objetivos y metodología

En las notas que siguen analizamos la incidencia del clima sobre la contaminación atmosférica en el área de Madrid, por tanto a una escala local, como paso previo a otros estudios en los que se intentará determinar el área de influencia de la contaminación procedente de nuestra ciudad.

El método seguido contempla el análisis del viento y de las situaciones sinópticas típicas de nuestra región y su influencia sobre los principales contaminantes. Los datos utilizados han sido las medias diarias de SO₂,

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

registradas en las diversas estaciones de la Red Municipal de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica (RMVCA), durante los años 1990 y 1991 (figura 1); los datos de los sondeos, realizados sobre el aeropuerto de Madrid (Barajas) a las 0 y 12 horas y los datos diarios de viento de los observatorios de Retiro, situado en el interior de Madrid y del aeropuerto de Barajas, en las proximidades de la ciudad.

El carácter dual de los mecanismos de la contaminación obliga a realizar una primera matización acerca de los rasgos derivados de las condiciones antrópicas. En este caso es esencial conocer los focos de emisión, causantes de la contaminación atmosférica en Madrid, y definir los principales rasgos que de ellos se derivan.

En Madrid los principales focos de emisión son las calefacciones y el tráfico, por ello los niveles de inmisión varían de unas zonas a otras, en relación a la diversidad de tipologías y usos de suelo del conjunto urbano (Fernández García y Galán, 1993; Fernández García y cols. 1994). Asimismo se observa una marcada estacionalidad, como la periodicidad en el funcionamiento de las calefacciones y la disminución del tráfico rodado durante los fines de semana (López Gómez y Fernández García, 1984; Muscar, 1987).

La distribución espacial de los contaminantes se ha realizado a partir de las medias mensuales de SO_2 , lo que ha permitido clasificar las estaciones de la red en tres grupos representativos de otras tantas áreas urbanas:

1. *Estaciones de contaminación elevada.*—Se localizan en dos núcleos: el centro urbano —estaciones de Quevedo (5), Marañón (6), Plaza de Salamanca (7) y Cuatro Caminos (10)¹— con altas densidades de tráfico y edificaciones y un sector del sur de la ciudad, representado por la estación de Marqués de Vadillo (18), en el que el tráfico y las pequeñas industrias son los focos principales. Los niveles de contaminación registrados en esta zona superan el valor de 60 para la media anual y la media diaria se mantiene por encima de 100 en un porcentaje de días que oscila entre el 10 % y el 20 % del total anual.

2. *Estaciones de contaminación media.*—Son aquellas en las que la

¹ Los números entre paréntesis indican la identificación de la estación en la figura 1.

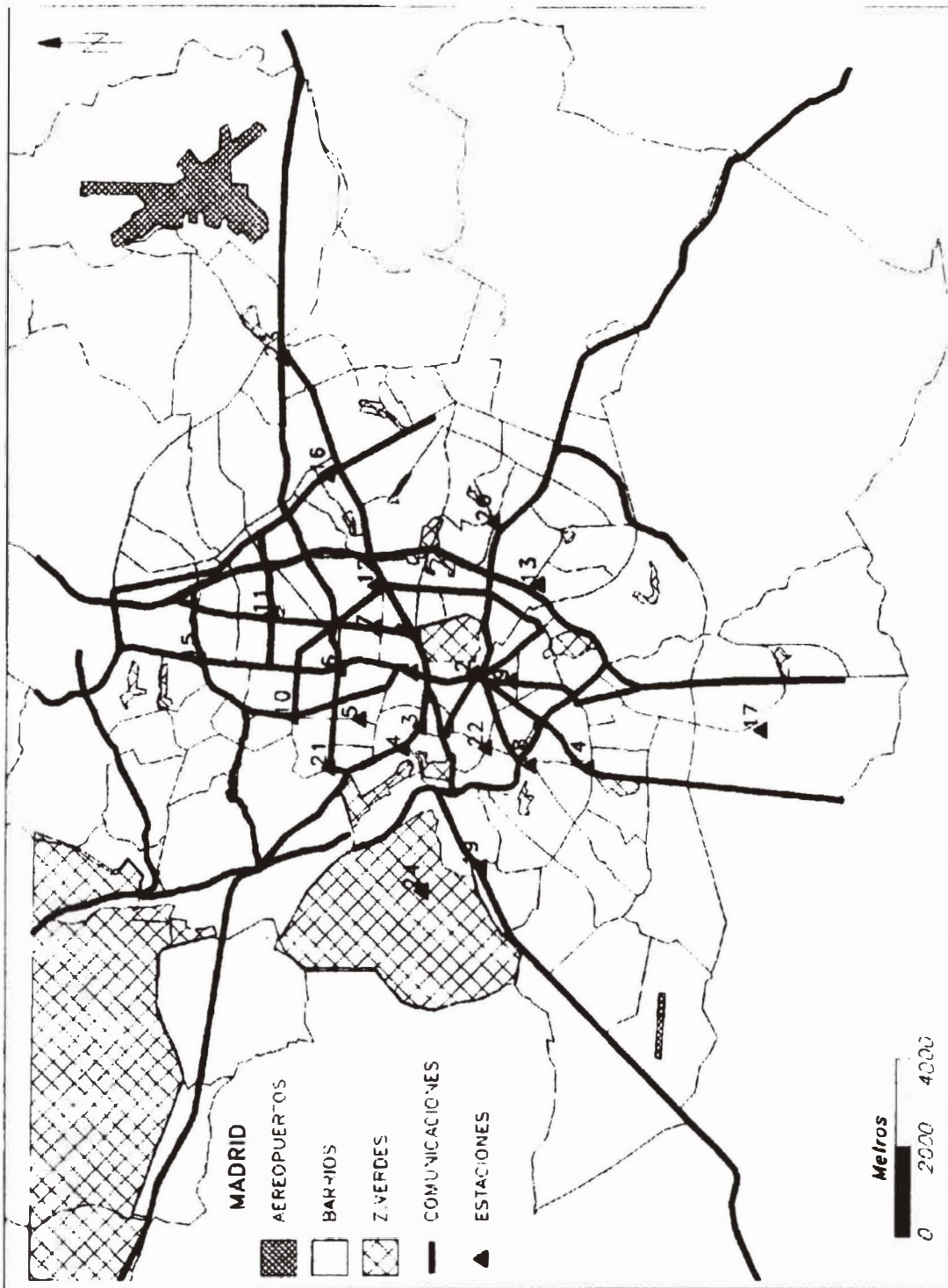


FIGURA 1.—Emplazamiento de las estaciones de la Red de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Madrid

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

media anual de SO_2 se mantiene entre los límites aceptables de 40-60 y el número de días que supera la concentración de 100 oscila entre el 10 % y el 5 %, siendo muy escasos los que sobrepasan los 150.

A este grupo pertenecen estaciones situadas en las proximidades de parques urbanos, como el de Berlín, estación de Ramón y Cajal (11) o el del Retiro, Escuelas Aguirre (8); en plazas arboladas, como las de España (4) y Roma (12). En esta categoría se incluye también un segundo grupo formado por las estaciones de Recoletos (1), Luca de Tena (9), Puerta de Toledo (22) y Marqués de Vadillo (17) con un entorno más variado y, por tanto, con rasgos comunes menos definidos.

3. *Estaciones de menor contaminación.*—Se caracterizan por una media anual inferior a $40 \mu/\text{m}^3$ y son muy raros los días en los que las concentraciones medias alcanzan los 100. Se localizan en la periferia, en barrios de no muy elevada densidad urbana, con amplias avenidas y espacios libres, caso de Arturo Soria (16) y Moratalaz (20). Otras como Fernández Ladreda (14) y Atocha (2) se localizan cerca de parques y el tráfico rodado ha sido canalizado por túneles subterráneos.

El otro rasgo característico de la contaminación atmosférica en Madrid es la variabilidad temporal de los principales contaminantes, relacionado esencialmente con el ritmo de las actividades humanas. El mejor ejemplo lo presenta el ritmo horario de SO_2 y partículas (figura 2) en clara correlación con el tráfico urbano y el contraste entre los máximos invernales, con las calefacciones domésticas en funcionamiento, y los mínimos estivales.

Las condiciones climáticas reinantes se superponen a estos rasgos y son los causantes de la presencia de episodios críticos en los que superan los umbrales admitidos por la legislación y que dan lugar a un notable deterioro de las condiciones ambientales. Su duración es variable, como también lo son los niveles de inmisión registrados en cada una de las zonas, antes mencionadas; la época del año más favorable es el invierno y siempre coinciden con situaciones anticiclónicas persistentes.

El clima de Madrid y su influencia sobre la contaminación

Los mecanismos climáticos que influyen sobre la contaminación son la estabilidad o inestabilidad de la atmósfera y la velocidad y dirección del viento son las variables más representativas.

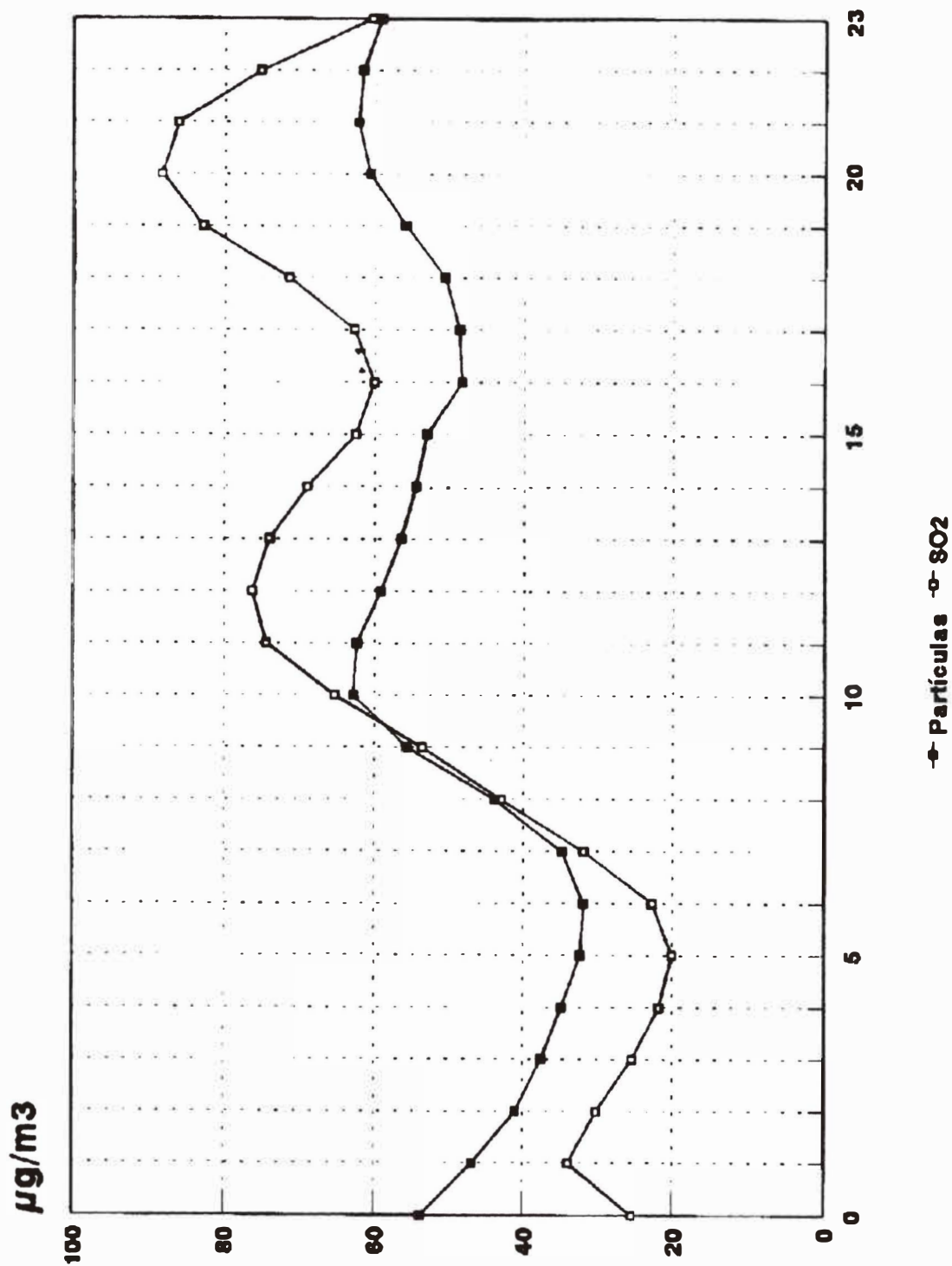


FIGURA 2.—Variabilidad temporal de la contaminación en Madrid.

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

La estabilidad atmosférica está ligada a la presencia de anticiclones, que favorecen la formación de inversiones de irradiación y de subsidencia; el espesor de la capa de mezcla, donde se acumulan los contaminantes procedentes de los focos superficiales, es muy reducido. Las nieblas, que normalmente se forman durante la noche, y la fuerte insolación durante el día favorecen, a su vez, los procesos de transformación y mezcla de los contaminantes primarios, lo que facilita la formación de contaminantes secundarios de origen fotoquímico, como el ozono. Con atmósfera estable el viento permanece en calma o se producen brisas débiles que contribuyen a la propagación de los contaminantes en toda la atmósfera urbana. La ciudad más caliente que las áreas rurales próximas (isla de calor) crea movimientos ascendentes en su interior y atrae las brisas de la periferia formándose el ya clásico «sombbrero de contaminación» sobre la misma.

La inestabilidad, por su parte, está relacionada con las borrascas y frentes que normalmente vienen acompañados de fuertes vientos y lluvias por lo que eliminan la contaminación y limpian el aire. No debemos olvidar, sin embargo, que son estas situaciones las que transportan los contaminantes hacia áreas alejadas de los focos originarios y contribuyen a su mezcla en el conjunto de la atmósfera. Ambos procesos son los responsables, como ya señalamos anteriormente, de la lluvia ácida y de los posibles cambios climáticos a escala regional o global.

Las características climáticas de Madrid son, en conjunto, bastante negativas para la contaminación, debido a la persistencia de situaciones anticiclónicas, los débiles vientos y las escasas precipitaciones. A ello habría que añadir la importancia de la isla de calor urbana que, normalmente supera los 3° C y que puede llegar hasta 9° C o más durante las noches anticiclónicas invernales (López Gómez y otros, 1990).

El viento en el área de Madrid

El sistema de vientos regionales del área de Madrid puede ser definido a partir de los datos del aeropuerto de Barajas y se caracteriza por (cuadro I) un porcentaje de calmas muy elevado, con un máximo en los meses fríos.

La velocidad media anual raramente supera los 4 m/s. y la mitad de los días registran velocidades inferiores a ese valor, como se deduce de las medianas respectivas de los diferentes meses; en el otro extremo, los

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

CUADRO I
CALMAS, VELOCIDAD MEDIA Y PERCENTILES DEL VIENTO EN NUDOS,
MEDIDO EN EL AEROPUERTO DE BARAJAS

<i>Meses</i>	<i>Calmas</i>	<i>Media</i>	<i>Mediana</i>	<i>Percentil 90</i>
Enero	56 %	4'0	2'4	12
Febrero	44 %	5'4	3'6	13'5
Marzo	43 %	5'6	3'6	13
Abril	39 %	5'4	4'0	12'5
Mayo	40 %	5'2	4'0	12
Junio	46 %	5'2	3'2	10'5
Julio	42 %	4'6	3'8	10
Agosto	44 %	4'8	3'4	11
Septiembre	54 %	3'6	2'5	9
Octubre	58 %	3'4	2'7	9'8
Noviembre	57 %	3'8	2'5	11'2
Diciembre	59 %	3'6	0'5	11'5

(Elaboración propia a partir de los datos del Mapa Eólico Nacional, INM, 1988)

valores correspondientes al percentil 90 indican que velocidades superiores a los 10 nudos, alrededor de 18 Km/h., son poco habituales.

Estos valores son insuficientes para generar una adecuada ventilación en nuestra ciudad. En efecto, al comparar las diferentes concentraciones de SO₂ y la velocidad del viento a ellas asociada (cuadro II), se observa que en las diferentes áreas urbanas las concentraciones inferiores a 50 µg/m³ aparecen asociadas a velocidades del viento próximas a los 5 nudos (4'91 en la periferia urbana, zona 3; 5'22 en la zona 2, con niveles de contaminación intermedios y 5'15 en la de mayor contaminación, localizada en el centro urbano, zona 1). Con velocidades de 4'6 nudos o inferiores, las concentraciones de SO₂ superan el valor de 100, lo que le sitúa dentro de los umbrales críticos admitidos por la legislación.

La dirección es otro de los parámetros, asociado al viento, de sumo interés en los estudios de contaminación y planificación urbana. En Barajas los vientos dominantes son del 1.^{er} y 3.^{er} cuadrante, con porcentajes del 21'5 % y 17'5 % en el total anual. Estacionalmente se mantienen ambas direcciones, pero los porcentajes varían (cuadro III).

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

CUADRO II

NIVELES DE SO₂ REGISTRADOS EN LAS DIFERENTES ZONAS DE MADRID, ASOCIADOS A DISTINTAS VELOCIDADES DEL VIENTO, MEDIDO EN BARAJAS (velocidad en nudos)

<i>Concentración de SO₂ en µg/m³</i>	<i>Zona 1 (alta contaminación)</i>	<i>Zona 2 (contaminación media)</i>	<i>Zona 3 (baja contaminación)</i>
Inferior a 50	5'15	5'22	4'91
Inferior a 100	5'13	4'89	4'61
Inferior a 200	4'61	4'55	4'54
Superior a 100	2'22	1'66	1'08
Superior a 200	1'08	1'67	—

(Fernández García, F. y Galán, E.)

Tales direcciones podrían estar relacionadas con el predominio de brisas, favorecidas por la persistencia de situaciones anticiclónicas y el emplazamiento del observatorio en el valle del río Manzanares, próximo a la Sierra de Guadarrama. De hecho, como señala Font (1984), durante el día los vientos dominantes son del SW, mientras que durante la noche son los del NE los que presentan la mayor frecuencia (figura 3).

Estas direcciones dominantes han de jugar un importante papel en la extensión del área de contaminación de Madrid hacia las áreas próximas, hecho que será estudiado en otro trabajo. En el interior de la ciudad, sin

CUADRO III

DIRECCIONES DOMINANTES DEL VIENTO EN BARAJAS. VALORES EXPRESADOS EN % DEL TOTAL ANUAL

	<i>Invierno</i>	<i>Primavera</i>	<i>Verano</i>	<i>Otoño</i>	<i>Año</i>
1.º	15	29	19	14	21
2.º	5	10	11	8	6
3.º	16	14	24	24	17
4.º	13	13	14	14	8

(Elaboración propia con datos diarios de 1990-1991, del INM)

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

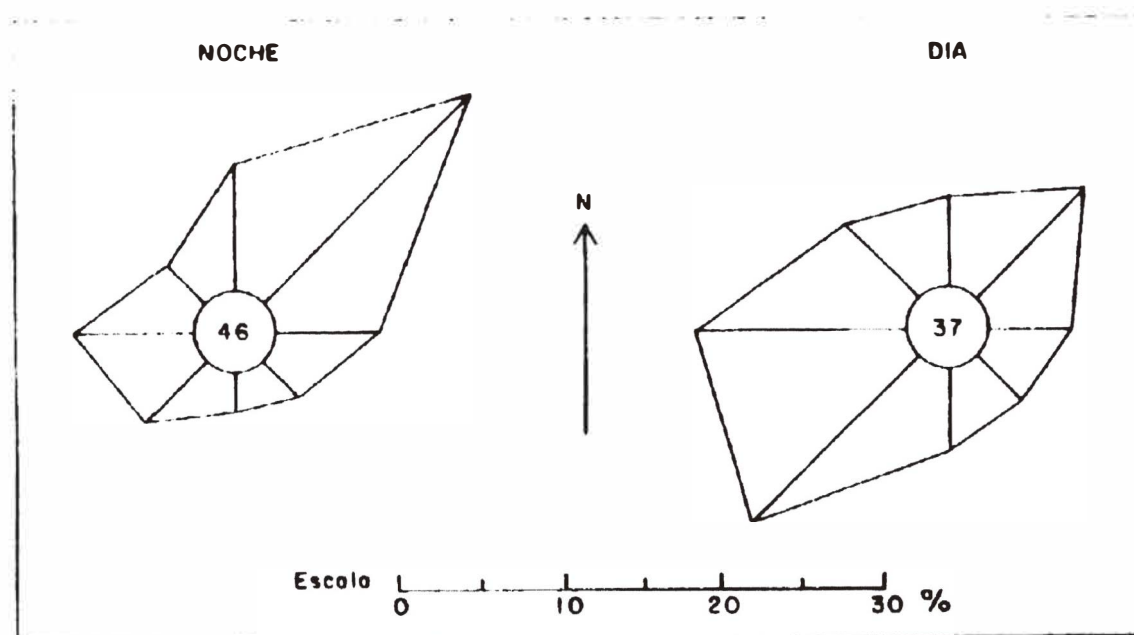


FIGURA 3.—Rosas de frecuencia de los vientos diurnos y nocturnos en Madrid (Font, 1983, p. 47)

embargo, el problema es sumamente complejo. En efecto, hemos analizado la contaminación media y máxima registrada en diferentes estaciones de la red de vigilancia de la contaminación y las direcciones del viento dominantes. Las rosas de contaminación resultantes muestran la complejidad de esta variable en las zonas urbanas, en las que las edificaciones y el trazado viario introducen modificaciones muy acusadas en la dirección y velocidad. No obstante se observa que:

1. *Los valores medios* aparecen poco diferenciados en relación a las ocho direcciones de viento seleccionadas, sobre todo en las estaciones situadas en el interior urbano; en las del extrarradio parecen individualizarse algunas direcciones favorables para la contaminación (figura 4) como pueden ser el NW y S en Vallecas (13) y Moratalaz (20) y el E en Plaza de España (4) y Arturo Soria (16).

2. *En los máximos* este hecho se agudiza y en ellos se decantan más unas direcciones predominantes. En las estaciones periféricas las direcciones más favorables son las procedentes del interior urbano, donde se registran los máximos valores de contaminación: NW en Moratalaz (20) y Vallecas (13), SE en la Plaza de Cristo de Rey (21). En ocasiones no es tan

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

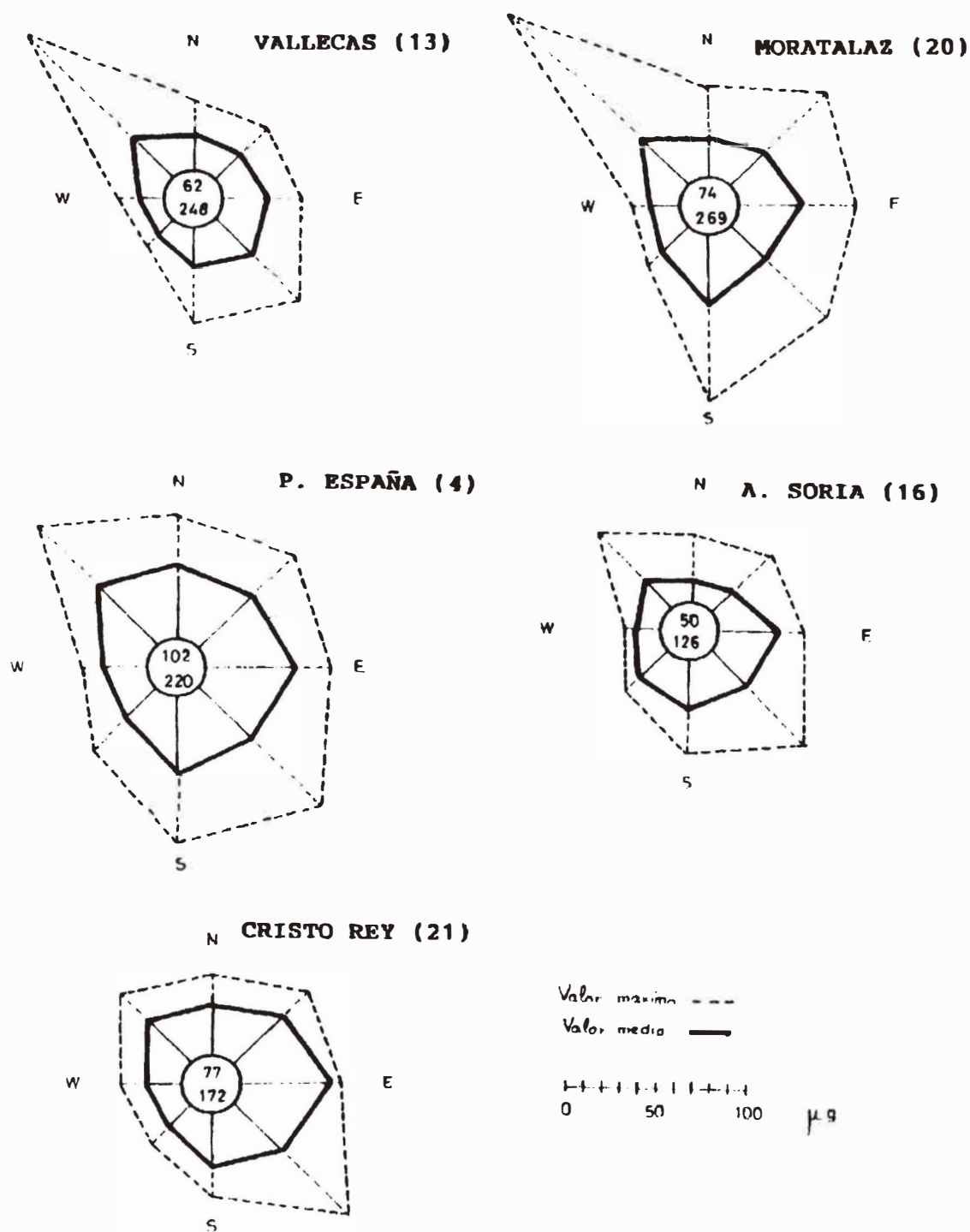


FIGURA 4.—Rosas de frecuencia de contaminación (SO₂) y viento en diferentes estaciones de Madrid. Concentraciones medias, línea continua; máximas, a trazos

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

clara la relación, como por ejemplo en Plaza de España (4) con un alto nivel de contaminación asociado al NW y en Arturo Soria (16) al SE. Sería necesario un estudio más detallado pero podemos avanzar, a modo de hipótesis, que con altos valores de contaminación la fuerza del viento es muy pequeña y las brisas y turbulencias, en el interior del palio urbano (*urban canopy layer*), adquieren gran protagonismo, así como la proximidad de zonas muy contaminadas.

Situaciones sinópticas y contaminación

La frecuencia de situaciones anticiclónicas es el rasgo predominante del clima de nuestra ciudad con porcentajes que superan el 50 % de los días en todas las estaciones salvo en primavera (cuadro IV). El verano es la época de máxima frecuencia, sin embargo, la fuerte insolación y la situación de Madrid en el interior de la Península determinan la formación de bajas de origen térmico, que favorecen la dispersión de los contaminantes, por lo que desde la óptica de la contaminación estas situaciones pueden ser consideradas como inestables.

Distinto carácter presentan los anticiclones del período frío, desde noviembre hasta marzo, que responden a las condiciones de estabilidad general. En efecto, aunque el origen y características térmicas de tales situaciones anticiclónicas es muy variado, en este período predominan los fríos oceánicos o continentales; la estabilidad se ve reforzada en las bajas capas por la inversión a escasos metros del suelo por el enfriamiento de éste.

CUADRO IV
FRECUENCIA DE SITUACIONES SINÓPTICAS

	<i>Invierno</i>	<i>Primavera</i>	<i>Verano</i>	<i>Otoño</i>
Anticiclónica	58	46	79	58
Ciclónicas	42	54	21	42

(FUENTE: Fernández García, 1986)

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

De los numerosos métodos propuestos para determinar la importancia de estas situaciones sobre la contaminación, el más conocido es el de Pasquill (Hanna, 1985; Fernández García, F., 1995), quien establece siete categorías de estabilidad en función de la insolación, nubosidad y velocidad del viento en superficie (cuadro V) o según el gradiente térmico vertical (cuadro VI).

CUADRO V
CATEGORÍAS DE ESTABILIDAD SEGÚN PASQUILL

V (m/s.)	Día			Noche	
	f	Insolación m	l	>4/8	Nubosidad <3/8
<2	A	A-B	B	—	—
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	D
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

V indica la velocidad del viento en superficie, medido en las condiciones normales de la estación meteorológica (10 metros);

f, m y l corresponden a insolación fuerte, moderada o leve;

A: situaciones extremadamente inestables;

B: situaciones moderadamente inestables;

C: situaciones ligeramente inestables;

D: situaciones neutras;

E: ligeramente estables;

F: moderadamente estables y

G: extremadamente estables.

Cuando el cielo está cubierto durante el día o la noche, se considera la categoría neutra D.

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

CUADRO VI
CLASIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA SEGÚN EL GRADIENTE
TÉRMICO VERTICAL (°)

<i>Estabilidad</i>	<i>Gradiente (τ)</i> °C / 100 m.
A	$\tau \leq -1'9$
B	$-1'9 < \tau \leq -1'7$
C	$-1'7 < \tau \leq -1'5$
D	$-1'5 < \tau \leq -0'5$
E	$-0'5 < \tau \leq 1'5$
F	$1'5 < \tau \leq 4'0$
G	$4'0 < \tau$

(Hanna, S.R. 1985)

Al considerar sólo el gradiente térmico vertical en los sondeos de Barajas, sólo aparecían las situaciones E y D, por lo que hemos optado por una tipología en la que se tuviese en cuenta, además, la velocidad del viento, tal y como aparece en el cuadro VII.

La frecuencia registrada por cada una de las situaciones definidas, durante el período 90-91, aparece recogida en el cuadro VIII. Los hechos más significativos son:

1. Las condiciones meteorológicas contempladas en las situaciones E únicamente aparecen un día, en otoño.

2. La elevada frecuencia de tipos de tiempo anticiclónicos durante el invierno, a que hicimos referencia anteriormente, queda patente en los altos porcentajes de las situaciones G y F, durante esta época: casi en el 50 % de los días el gradiente térmico vertical es inferior al normal y, en concreto, similar al de la adiabática húmeda (0'5° C/100 m.); además, en un porcentaje de días relativamente elevado (19'4 %) el gradiente se invierte, apareciendo inversión térmica absoluta entre superficie y 850 hPa (aproximadamente a 1.500 m. de altura).

La fuerte estabilidad vertical se ve reforzada por la estabilidad horizontal, con predominio de calmas o, en todo caso, una fuerza del viento inferior a 10 nudos.

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

CUADRO VII
CATEGORÍAS DE ESTABILIDAD, APLICADAS EN MADRID

TIPO	CRITERIOS
G Marcada estabilidad	.Inversión térmica entre superficie y 850 hPa . Viento en superficie < 10 nudos
F Estabilidad	.Gradiente entre superficie y 850 hPa inferior a 0.5°/100 mts. .Viento en superficie < 10 nudos
E	.Gradiente entre superficie y 850 hPa inferior a 0.5°/100 mts. .viento en superficie > 10 nudos
D Estabilidad condicionada	.Gradiente entre superficie y 850 hPa entre 0.5°/100 mts y 1°/100 mst. .Viento en superficie < 10 nudos
C Inestabilidad condicionada	Gradiente entre superficie y 850 hPa entre 0.5°C y 1°C /100 mts viento en superficie > 10 nudos
B Inestabilidad	Gradiente entre superficie y 850 hPa > 1°/100 mts. viento en superficie < 10 nudos
A Fuerte inestabilidad	Gradiente entre superficie y 850 hPa > 1°/100 mts. viento en superficie > 10 nudos

CUADRO VIII
FRECUENCIA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ESTABILIDAD

SITUACIÓN	INVIERNO		PRIMAVERA		VERANO		OTOÑO	
	n.º días	%	n.º días	%	n.º días	%	n.º días	%
G	34	19'4	0	0	0	0	8	4'5
F	52	29'7	6	3'3	0	0	16	9'0
E	0	0	0	0	0	0	1	0'6
D	73	41'7	74	40'2	70	38'3	92	52'0
C	8	4'6	8	4'3	3	1'6	5	2'8
B	7	4'0	82	44'6	97	53'0	50	28'2
A	1	0'6	14	7'6	13	7'1	5	2'8
TOTAL	175	100	184	100'0	183	100'0	177	100'0

(Fernández, F. y Galán, E.)

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

Las condiciones meteorológicas de *estabilidad condicionada (D)* se presentan el 42 % de los días invernales, mientras que las situaciones *inestables (A, B y C)* muestran una frecuencia inferior al 10 %.

3. En el verano el comportamiento es diametralmente opuesto al observado en la estación fría y son las *condiciones de inestabilidad* las que dominan claramente: el 60 % de los días el ritmo de descenso de la temperatura entre superficie y 850 hPa es muy superior al normal (1° C/100 m.). En el 53 % de los casos a la inestabilidad vertical se une una fuerza del viento en superficie superior a 10 nudos, por lo que quedan incluidos en la categoría *B*.

4. La distribución de frecuencias registradas en primavera y otoño ponen de manifiesto el carácter de transición de ambas estaciones, más inestable la primera que la segunda (las situaciones *A* y *B* representan el 52 % en primavera frente al 31 % en otoño). Por otra parte, el otoño presenta en el 45 % de los días condiciones meteorológicas de marcada estabilidad (*G*) frente a la ausencia de las mismas en el período primaveral.

Situaciones sinópticas y niveles de contaminación

Las concentraciones más elevadas de SO₂ corresponden a las situaciones de gran estabilidad, *F* y *G*, con valores que varían según zonas y épocas del año (cuadro IX). En invierno (figura 5), los valores medios asociados a estas situaciones superan los 100 microgramos en la zona 1 y 2, en éstas ligeramente inferiores, mientras que en la 3 oscilan entre 57 y 72. En otoño se reducen ligeramente, aunque se mantienen próximos a los del período invernal.

Los descensos son más significativos en primavera y, especialmente, en verano (cuadro IX y figura 6). En ninguna de las estaciones mencionadas aparecen situaciones de gran estabilidad y los valores medios más elevados no superan los 85 microgramos por m³ de aire.

Los períodos de contaminación más elevada corresponden a estas dos situaciones y afectan de forma muy parecida a todas las áreas de Madrid, especialmente durante el invierno. En las demás épocas del año los máximos se mantienen dentro de unos límites más tolerables.

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

**CUADRO IX
NIVELES DE SO₂ POR ZONAS SEGÚN TIPOS DE ESTABILIDAD**

Invierno

Situación	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	media	máximo	media	máximo	media	máximo
A	62,60	104	53,67	74	30,50	39
B	85,31	133	64,95	118	34,46	63
C	89,13	147	64,29	127	37,06	84
D	98,75	233	73,84	165	43,19	186
F	129,39	290	97,08	279	57,24	269
G	175,62	323	130,56	335	72,68	290

Primavera

Situación	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	media	máximo	media	máximo	media	máximo
A	47,59	173	38,71	98	19,93	63
B	43,93	240	30,77	90	21,92	86
C	55,25	96	38,56	95	22,44	46
D	64,16	249	44,63	135	28,88	109
F	84,37	150	65,03	158	41,13	108

Verano

Situación	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	media	máximo	media	máximo	media	máximo
A	20,29	60	20,03	44	17,19	53
B	21,29	102	20,26	91	15,73	99
C	24,27	59	15,72	32	13,17	25
D	25,56	93	22,79	73	16,78	59

Otoño

Situación	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	media	máximo	media	máximo	media	máximo
A	51,32	106	31,80	84	22,35	62
B	45,78	122	31,83	123	20,35	71
C	59,24	118	39,67	78	26,35	65
D	53,99	168	38,44	148	23,13	81
E	43,60	67	23,83	28	19,00	35
F	122,36	217	80,69	190	44,03	99
G	144,65	219	98,15	178	55,19	100

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

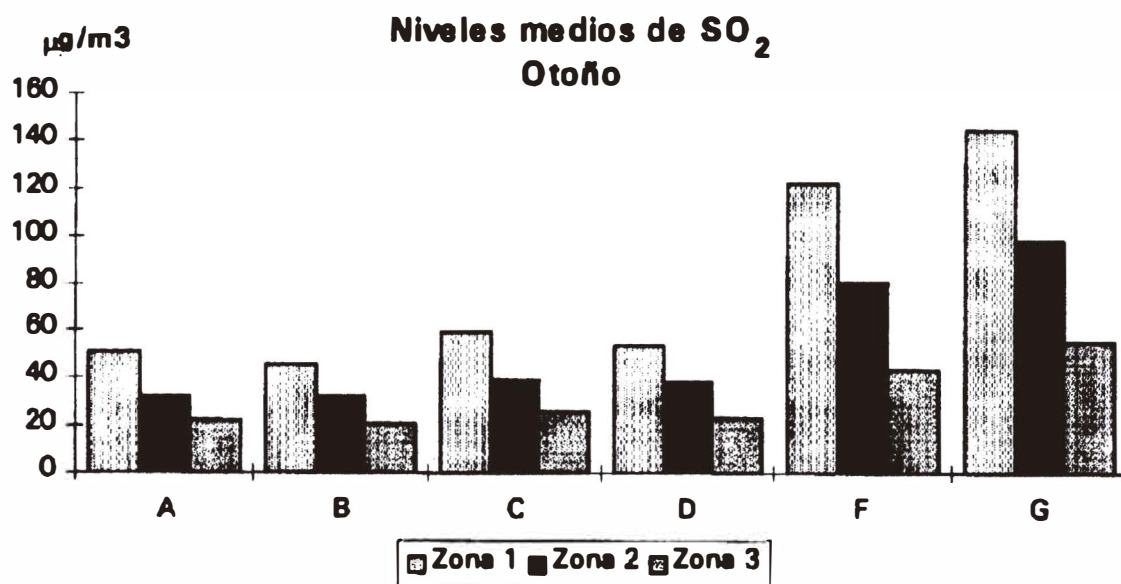
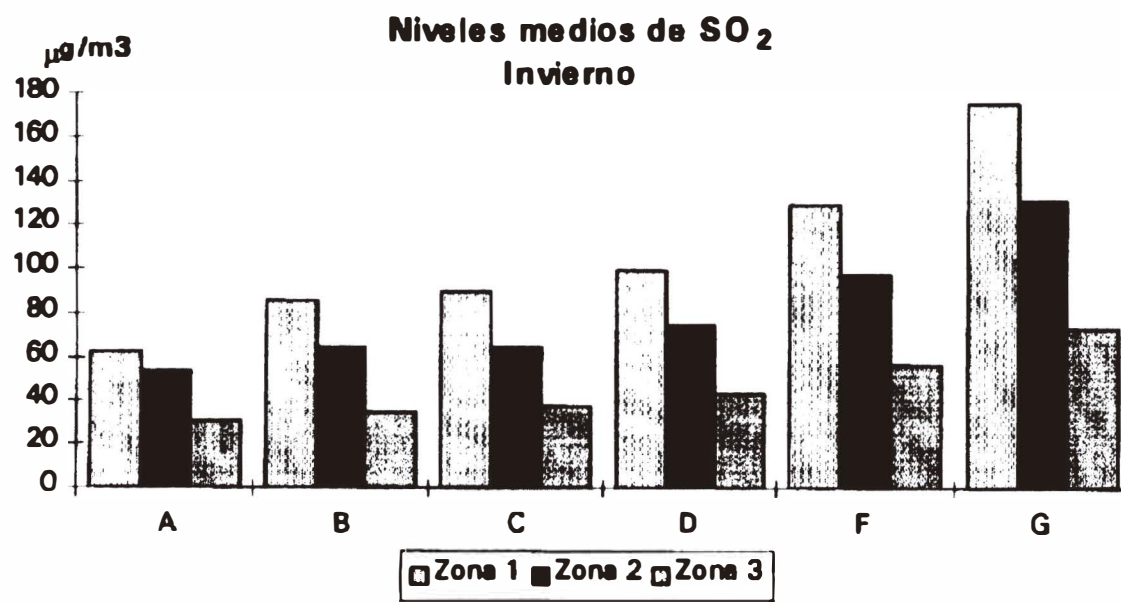


FIGURA 5.—Concentraciones medias de SO₂ en invierno y otoño, según categorías de estabilidad y zonas

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

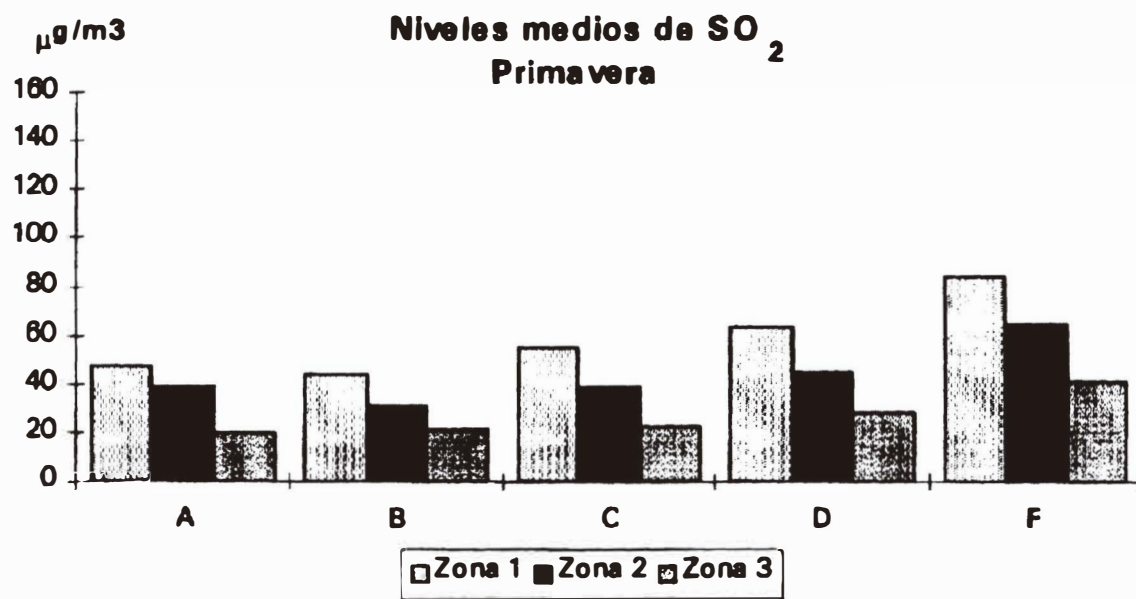


FIGURA 6.—Concentraciones medias de SO₂ en primavera y verano, según categorías de estabilidad y zonas

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

Consideraciones finales

La contaminación atmosférica en las áreas urbanas está estrechamente relacionada con el ritmo y concentración de las actividades humanas. Las condiciones climáticas regionales, por su parte, agudizan o disminuyen los efectos de tales actividades sobre la atmósfera.

A escala local las situaciones meteorológicas pueden ser clasificadas de favorables o desfavorables para la contaminación, pero a escala mayor contribuyen a la extensión de los contaminantes hacia las áreas próximas.

El clima de Madrid es, en conjunto, desfavorable para la dispersión de los contaminantes, especialmente durante el invierno por la persistencia de situaciones de gran estabilidad. La clasificación de Pasquill, adaptada a nuestra región, presenta una gran persistencia de situaciones *F* y *G*, durante el invierno y otoño; en primavera y verano desaparece el tipo *G* y dominan las situaciones de inestabilidad.

Los períodos graves de contaminación se concentran en los meses de noviembre, diciembre y enero, asociados a situaciones de inversión térmica, comprendidas en las categorías de estabilidad *F* y *G*. La zona más afectada es la 1 (el centro), donde todas las estaciones registran valores elevados; en las demás zonas también se alcanzan niveles de contaminación elevados, al menos en alguna de las estaciones de la red.

Las rosas de contaminación ponen de manifiesto la gran complejidad del viento en el interior de la ciudad. No obstante, parecen observarse unas direcciones dominantes, especialmente en las estaciones periféricas, donde dominan las direcciones procedentes del interior de la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

- CATALÁ, J. (1986): *Contaminación y conservación del medio ambiente*, Madrid, Alhambra, 105 pp.
- EGAN, B., y VAUDO, C. (1985): «Regulatory needs for air quality models», *Handbook of applied meteorology*, Houghton cor., New York, John Wiley & Sons, pp. 697-711.
- ELSOM, D. (1990): *La contaminación atmosférica*, Madrid, Cátedra, 373 pp.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1986): *El clima de la Meseta Meridional. Los tipos de tiempo*, Madrid, Ed. Universidad Autónoma, 215 pp.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F.; GALÁN, E., y GARCÍA HERNÁNDEZ, E. (1993): «Avance de un modelo de distribución espacial de la contaminación en Madrid», *XIII Congreso Nacional de Geografía*, Sevilla.

CLIMA Y CONTAMINACIÓN EN MADRID

- FERNÁNDEZ GARCÍA, F., y GALÁN, E. (1993): «La contaminación en Madrid: distribución espacial», *V Congreso de Geoquímica de España*, Madrid, CEDEX, pp. 127-133.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F.; GALÁN, E., y CAMARERO, C. (1995): «Atmospheric pollution in Madrid», en *Climatology and air pollution*, Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo, pp. 93-110.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1995): *Manual de Climatología aplicada*, Madrid, Síntesis, 285 pp.
- FONT TULLOT, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*, Madrid, INM, 296 pp.
- HANNA, S. R. (1985): «Air quality modeling over short distances», *Handbook of applied meteorology* (Houghton, edit.), New York, John Wiley & Sons Applied Meteorology, pp. 712 y ss.
- HANNA, S. R. (1981): «Applications in air pollution modeling», *Atmospheric turbulence and air pollution modelling* (Nieuwstadt and Dop, edit.), Dordrecht/Boston/Lancaster, D. Reidel Publishing Comp., pp. 275-310.
- HOUGHTON, D. (1985): *Handbook of applied meteorology*, New York, John Wiley & Sons, 1.461 pp.
- LÓPEZ GÓMEZ, A.; FERNÁNDEZ GARCÍA, F., y MORENO JIMÉNEZ, A. (1991): *El clima urbano de Madrid. Teledetección de la isla de calor*, Madrid, MOPT.
- LLANO, R., y MARTÍNEZ (1979): *Programa de soporte de la red de control de la contaminación atmosférica en el área del gran Bilbao*, Madrid, Universidad Autónoma - Centro de Investigación IBM, 39 pp.
- MAS GARCÍA, L. C. y col. (1993): *Estaciones y redes de vigilancia de la contaminación atmosférica en España*, Madrid, MOPT, Dirección General Política Ambiental, 622 pp.
- MAS GARCÍA, L. C. y col. (1993): *Calidad del aire en España, 1990*, MOPT, Dirección General Política Ambiental, 181 pp.
- MUNN, R. E. (1980): «Meteorología de la contaminación atmosférica», en *Manual de calidad del aire en el medio urbano*, Suess y Caxford edit., Washington, Organización Panamericana de la Salud, pp. 115-146.
- MUSK, L. F. (1984): «Applied climatology», *Progress in Physical Geography*, pp. 450-57.
- VESILIND, A. (1975): *Environmental pollution and control*, Michigan, ed. Ann Arbor Science, 231 pp.
- YOSHINO, M. (1975): *Climate in a small area*, Tokio, Tokyo Univ. Press, 549 pp.

RESUMEN.—*Clima y contaminación atmosférica en Madrid.* Se analiza la influencia del viento y de las situaciones atmosféricas sobre la contaminación en Madrid. Se elaboran rosas de contaminación en diversas estaciones y se aplica la tipología de Pasquill a los niveles de contaminación, registrados en diferentes zonas urbanas.

PALABRAS CLAVE.—Clima urbano. Contaminación atmosférica. Madrid.

ABSTRACT.—*Climate and air pollution in Madrid.* We analyze the influence of the wind and atmospheric situations on the air pollution in Madrid. We elaborate air pollution zones in some stations and we apply the Pasquill tipology tho the air pollution levels from the different urban zones.

KEY WORDS.—Urban climate. Atmospheric pollution. Madrid.

FELIPE FERNÁNDEZ y ENCARNACIÓN GALÁN

RÉSUMÉ.—*Climat et pollution de l'aire à Madrid.* Nous analysons l'influence du vent et des situations atmosphériques sur la contamination à Madrid. Nous élaborons zones de contamination dans les diverses stations et nous appliquons la typologie de Pasquill aux niveaux de contamination des différentes zones urbaines.

MOTS CLÉS.—Climat urbain. Pollution de l'aire. Madrid.