

# CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE TIEMPO Y SU INFLUENCIA EN LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO, MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) Y OZONO EN LA CIUDAD DE MADRID, ESPAÑA

**María Rosa Cañada Torrecilla**

Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid  
rosa.canada@uam.es

## RESUMEN

El establecimiento de los tipos de tiempo y la contaminación atmosférica asociada a los mismos son los dos objetivos que se han perseguido en esta investigación. Los datos utilizados han sido las variables meteorológicas diarias de superficie y de 850Hpa de la estación de Madrid (Barajas) y los niveles de inmisión diarios de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub> de las estaciones de la red de calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid. Las técnicas empleadas han sido el análisis factorial con el método de componentes principales para eliminar información redundante y el análisis de cluster con la técnica de Ward para delimitar los tipos de tiempo. Se ha constatado que el tiempo anticiclónico de centro invierno, ligado a masas de aire frío y seco, es el que produce elevadas concentraciones de NO<sub>2</sub> y de PM<sub>10</sub>. Mientras que el tiempo anticiclónico de verano está asociado a elevadas concentraciones de ozono y si además hay invasiones de aire sahariano también hay elevadas inmisiones de PM<sub>10</sub>. Por el contrario, los tipos de tiempo con vientos más fuertes, ya sean anticiclónicos o ciclónicos, desencadenan menores niveles de inmisión de contaminantes.

**Palabras clave:** tipo de tiempo, contaminación, análisis factorial, cluster, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>.

---

Fecha de recepción: mayo 2016.

Fecha de aceptación: junio 2017.

## ABSTRACT

The establishment of the weather types and associated air pollution are the two objectives that have been pursued in this research. The data used were the daily observations of meteorological surface and 850Hpa variables of the Madrid (Barajas) station and the daily pollution  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{O}_3$  of the stations of the air quality network of the city of Madrid. Factor analysis (ACP) was used to eliminate redundant information and the cluster analysis (Ward's method) to define weather types. It has been observed that the anticyclonic weather of winter, linked to masses of cold and dry air, is the one that produces high pollution concentrations of  $\text{NO}_2$  and  $\text{PM}_{10}$ . In contrast, to the summer anticyclonic weather is associated with high pollution concentrations of ozone and if there are also invasions of Saharan air, there are also high immissions of  $\text{PM}_{10}$ . Weather types with stronger winds, either anticyclonic or cyclonic, trigger lower immission levels of pollutants.

**Keywords:** weather types, pollution, factorial analysis, cluster,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$ .

## I. INTRODUCCIÓN

Las áreas urbanas son zonas muy complejas donde interactúan, por un lado, las variables meteorológicas y ambientales, y por otro, la isla de calor y la variedad de fuentes de emisión de contaminantes existentes. De ahí la importancia del análisis sinóptico climático, por permitir resumir una serie de condiciones del tiempo en un catálogo que contiene un pequeño número de tipos de tiempo (Shahgedanova *et al.*, 1998) que al final son responsables de la concentración o inmisión de contaminantes en la ciudad y por lo tanto de la calidad del aire en la misma.

La relación que hay entre contaminación atmosférica y variables meteorológicas es bien conocida. Se sabe que la velocidad del viento juega un papel importante en la dispersión de los contaminantes; que las condiciones de estabilidad atmosférica con formación de inversiones térmicas obstaculizan la difusión de los mismos; que la nubosidad es responsable de la reducción de actividad fotoquímica y por lo tanto puede influir en la desaceleración de la formación de contaminantes secundarios como el ozono, mientras que la radiación solar y la alta temperatura la pueden favorecer (Kassomenos *et al.*, 2003; McGregor y Bamzeli, 1995). Pero la ventaja de la aproximación sinóptica climática al estudio de la calidad del aire estriba en que la contaminación no depende de un solo elemento climático sino de la totalidad de variables meteorológicas de superficie y de altura que definen el tipo de tiempo (Shahgedanova *et al.*, 1998; Kalstein y Corrigan, 1986).

En el establecimiento del tipo de tiempo se tienen en cuenta las propiedades termodinámicas de la masa de aire (temperatura, humedad, etc.), los factores geográficos y los tipos de circulación, que son las configuraciones que adopta un campo meteorológico (presión a nivel del mar, altura geopotencial, etc.) sobre un ámbito espacial concreto (Rasilla, 2003). Cada tipo de tiempo está asociado a un comportamiento determinado de variables meteorológicas que explican en conjunto los niveles que pueden alcanzar las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

Existen múltiples métodos para abordar la clasificación de las condiciones del tiempo en categorías. Yarnal (1993) hacía una distinción entre clasificaciones manuales frente a clasificaciones automáticas. Los procedimientos manuales realizan una clasificación subje-

tiva de modelos de circulación a partir del análisis visual de mapas sinópticos, como la que aplicó Lamb (1972) para el Reino Unido, Pédelaborde (1957) para París u Olcina (1994) para España. Tienen la ventaja de que el investigador controla todo el proceso de clasificación y se adapta a sus necesidades; el inconveniente es que se tarda mucho tiempo en realizar y son únicas, sin poder extrapolarse a otros lugares. La subjetividad en ellas es excesiva. La revolución informática facilitó el uso de las clasificaciones automáticas u objetivas, con técnicas de análisis multivariado que han permitido cuantificar todas las variables meteorológicas a la vez. Tienen la ventaja de que son más fáciles de realizar, se forman grupos estadísticamente similares y significativos y al basarse en datos y criterios estandarizados, los resultados son más fácilmente reproducibles. Un tercer tipo de clasificaciones son las que combinan ambos métodos en un esquema híbrido (Sheridan, 2001; Raiham *et al.*, 2005).

La clasificación que se propone en este artículo es una clasificación objetiva, que tiene como finalidad establecer unos tipos de tiempo que son resultado de la combinación de una serie de variables meteorológicas tratadas conjuntamente y tras las cuales se esconden unos determinados modelos de circulación. Tras esta caracterización sinóptica se evaluarán las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en los diferentes tipos de tiempo establecidos. Esta metodología ha sido aplicada por varios autores que estudian la contaminación asociada a diferentes tipos de tiempo (Kalkstein y Corrigan, 1986; Cheng y Lam, 2000; McGregor y Bamzels, 1995; Vanos *et al.*, 2013, Fernández, 2001).

## II. DATOS Y MÉTODOS

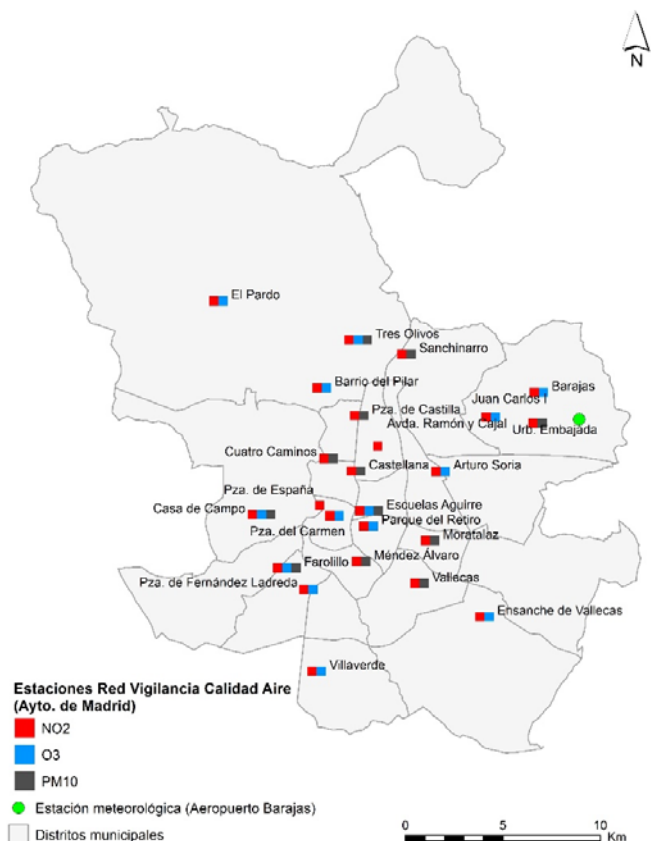
La información meteorológica utilizada procede de la estación sinóptica de Madrid (Barajas) (08221) que ha suministrado datos meteorológicos diarios de superficie a las 13 horas y de la altura geopotencial en el nivel de 850 hPa a las 12 horas<sup>1</sup>. Aunque en principio se consideraron un mayor número de variables, el análisis en componentes principales ha permitido reducir la información inicial. Las variables de superficie han sido: la presión, dos variables de temperatura (máxima y mínima), dirección y velocidad del viento, convertidas en un vector escalar de componente meridiana sur-norte ( $v$ ) y componente zonal oeste-este ( $u$ ) mediante la transformación seno/coseno, humedad relativa y cubierta nubosa. Las variables de altura han sido: altura a la que se encuentran los 850 hPa, temperatura a esa altura, temperatura del punto de rocío y dirección y velocidad del viento, convertidas en un vector escalar, con el mismo procedimiento que el empleado en los datos de superficie. El periodo de observación abarca desde el 1 de enero de 2010 a 31 de diciembre de 2015.

Todas estas variables informan de las propiedades termodinámicas e hidrodinámicas de las masas de aire que afectan a la zona central de la Península Ibérica. La cobertura nubosa, en particular, es un indicador de la humedad en altura.

Los datos de contaminación proceden de la red de calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid cuya cobertura espacial es diferente según el indicador utilizado. De dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) hay 24 estaciones, de partículas en suspensión de un tamaño inferior a 10 micras ( $\text{PM}_{10}$ ) 12 y de ozono ( $\text{O}_3$ ) 14. La variable utilizada ha sido la media diaria de esos contaminantes (figura 1).

<sup>1</sup> Los datos han sido suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Figura 1  
 LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE CONTAMINACIÓN Y DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA EN EL MUNICIPIO DE MADRID



Fuente: elaboración propia.

La información de partida fue sometida a un control de calidad consistente en la identificación y eliminación de datos erróneos y en la sustitución de los mismos y relleno de lagunas. Tanto los datos de la AEMET de escala diaria como los datos diarios de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid han presentado algunos inconvenientes como son la presencia de lagunas, valores erróneos, valores consecutivos demasiados altos o bajos. Para identificar los datos erróneos se ha aplicado el cálculo del umbral  $Q1 \pm 3 * IQR$ , localizando así los posibles valores “outliers” o atípicos, una vez detectados, fueron eliminados del análisis. Para el relleno de lagunas sólo se ha calculado el promedio del dato del día anterior y posterior. Si la ausencia de valor era superior a dos días, se ha preferido prescindir del registro y se ha considerado como valor perdido. Al final la serie de datos climáticos ha quedado reducida a 2165 días; en cuanto al número de días con datos de contaminación varía según la estación y contaminante.

La delimitación de los tipos de tiempo se realizó con las técnicas de Análisis Factorial (método Análisis en Componentes Principales (ACP) y técnicas de agrupamiento (cluster analysis). El ACP reduce la información de partida (12 variables) en unas nuevas variables, llamadas componentes, que son linealmente independientes y que se ordenan en función de la varianza explicada. Se calculan los coeficientes de correlación entre las variables originales y los componentes (factor loading o matriz de componentes). Para finalizar se obtienen las puntuaciones de las variables de cada día en cada factor (factor scores o matriz factorial). Los días con similares condiciones meteorológicas tendrán unas puntuaciones factoriales similares.

La técnica de cluster se utilizará para agrupar los días con puntuaciones factoriales similares en grupos homogéneos desde el punto de vista meteorológico, es decir, con un tipo de tiempo similar. Entre los diferentes métodos de clasificación existentes y tras realizar algunas pruebas, se decidió el empleo de un método jerárquico aglomerativo, la técnica de Ward por ser mucho más efectiva en la delimitación de los tipos de tiempo (Kalkstein, 1979). Esta técnica se basa en la mínima variación intragrupo. A partir de una matriz de similaridades o distancias se evalúan en cada fase todas las posibles fusiones, bien entre dos días aislados, o entre un día y un grupo previamente creado, o bien entre dos grupos, y se realiza aquella que produce el menor incremento en la suma total de las variaciones intragrupo. Dichas variaciones intragrupo se evalúan como la suma de las diferencias al cuadrado entre los valores de cada día y sus medias de grupo (Bosque y Moreno, 1994). El método de average linkage se ha descartado porque creaba grupos muy grandes frente a otros con pocos individuos. El conocimiento climático de la zona fue muy importante en la elección del número final de tipos de tiempo establecidos. Con posterioridad, se sometieron a pruebas de contrastes de medias para ver si las diferencias entre los mismos eran significativas desde el punto de vista estadístico.

Tras la realización de la clasificación se calculará el promedio de las doce variables meteorológicas en cada tipo de tiempo y se revisarán los modelos de circulación predominantes de los días clasificados en cada categoría a partir del análisis de los mapas de presión de altura y superficie. Después se pondrá en relación los tipos de tiempo y los niveles de inmisión registrados en las estaciones de calidad del aire de la ciudad de Madrid para establecer las causas y mecanismos que contribuyen a la mejor o peor calidad del aire y en su caso contribuir a la toma de medidas pertinentes para solucionar o limitar los efectos negativos de la contaminación.

### **III. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La aplicación del ACP conlleva tres fases consecutivas: obtención de la matriz de correlación, el cálculo de la matriz de componentes “factor loading” y por último la obtención de la matriz de puntuaciones factoriales “factor scores”.

#### **III.1. Aplicación del Análisis Factorial (ACP)**

La matriz de correlaciones es el punto de partida del análisis estadístico de los datos. En la tabla 1 aparecen los coeficientes de correlación para cada par de variables meteorológicas y su significación. La presión en superficie se correlaciona con signo positivo con la altura a la que

se alcanzan los 850 hPa y con signo negativo con las temperaturas de superficie y de altura y con la velocidad del viento. Cuanto mayor es la presión, menores son las temperaturas máxima y mínima y menor es la velocidad del viento tanto zonal como meridiana. La temperatura máxima tiene alta correlación positiva con la temperatura mínima, con la temperatura a 850 hPa y con la temperatura del punto de rocío a ese nivel de presión y negativa con la humedad y la cubierta nubosa. Con correlación no muy alta, aunque sí significativa, existe una asociación entre las temperaturas y la circulación de tipo meridiano, lo que significa que cuando el viento sopla del sur las temperaturas en general son más elevadas. La temperatura mínima sigue el mismo patrón que la máxima. La circulación zonal de superficie se correlaciona con la circulación zonal de altura y lo mismo sucede con la circulación meridiana. A mayor humedad, la cubierta nubosa es superior, y menor valor alcanzan las temperaturas, tanto la máxima como la mínima, y de manera análoga sucede con las temperaturas de altura, siendo también menor la altitud a la que se alcanzan los 850 hPa. La cubierta nubosa presenta el mismo tipo de asociación que la humedad. Todas las correlaciones indicadas son significativas al nivel del 0,01.

Para descubrir los factores que subyacen a la matriz de correlación, se aplica el análisis en componentes principales. Si se tienen en cuenta sólo los componentes con valores superiores a la unidad, son 4 los componentes resultantes que explican el 82,77% de la varianza total (tabla 2). Al examinar los coeficientes de carga de cada una de las variables en cada componente o factor (tabla 3), se deduce que las variables tanto de superficie como de altura que ponen el énfasis en las propiedades térmicas de las de la masa de aire frente al contenido en humedad, están altamente correlacionadas con el primer componente, que explica el 34,8% de la varianza. La interpretación que se hace es que aquellos días que tienen mayor temperatura son los que por otra parte presentan menor contenido en humedad y menor cubierta nubosa. La presión en superficie y la altura geopotencial a 850 hPa, contribuyen al componente 2 con altos valores negativos frente a la temperatura del punto de rocío y cubierta nubosa que presentan valores positivos. Se incluirán aquí los días con valores más bajos de presión y con mayor contenido en humedad y cubierta nubosa. El componente 3 está fuertemente representado por la componente meridiana del viento ( $v$ ), de sur a norte. Y la componente zonal del viento ( $u$ ), oeste-este, está representada en el componente 4.

A continuación, se calculan las puntuaciones factoriales para cada uno de los 2165 días incluidos en el análisis. Estas puntuaciones constituirán el punto de partida para su agrupación en categorías o tipos de tiempo con ambientes atmosféricos homogéneos.

### III.2. Aplicación del análisis de cluster

La Delimitación de los tipos de tiempo se realizó con la técnica de Ward pero teniendo presente las condiciones climáticas de la zona de estudio. Existen varios trabajos sobre los tipos de tiempo de la zona central de la Península Ibérica que hemos utilizado como referencia (Fernández, 1985; Cañada, 1989). De hecho, a partir de una primera clasificación automática, se procedió a unir, de manera manual, algunos grupos que presentaban características climáticas similares. El resultado final han sido el establecimiento de 9 clusters o tipos de tiempo diferentes. Con el fin de identificarlos a partir de sus variables meteorológicas, se calculó el promedio y medidas de dispersión de cada una de las variables climáticas que comprenden todos los casos de un mismo grupo. Cada grupo se caracterizará por una masa de aire diferente. Para facilitar

su interpretación se ha recurrido a examinar las situaciones sinópticas a nivel de 850 hPa y en superficie de los tipos de tiempo definidos. Antes de pasar a describir las características de cada tipo de tiempo, se comprobará la consistencia estadística de la clasificación realizada.

### *III.2.1. Pruebas de contraste de las diferencias entre las medias de los diferentes tipos de tiempo*

El contraste de las medias de las variables meteorológicas de los diferentes grupos, para ver si son iguales o diferentes, se ha realizado mediante la aplicación del análisis de la varianza de un factor (ANOVA). Las hipótesis de contraste han sido las siguientes:  $H_0$ : las medias son iguales y  $H_1$ : las medias son distintas. Suponiendo que la hipótesis nula sea cierta, el estadístico utilizado en el análisis de la varianza sigue una distribución *F* de Fisher-Snedecor con  $k-1$  y  $n-k$  grados de libertad, siendo  $k$  el número de muestras y  $n$  el número total de observaciones que participan en el estudio. Además, el estadístico *F* se basa en el cumplimiento de dos supuestos fundamentales: normalidad y homocedasticidad. El proceso de cálculo se inicia con el contraste de la hipótesis de igualdad de las varianzas mediante el estadístico de Levene que al ser su nivel crítico inferior a 0,05 en todas las variables de los grupos permite rechazar la hipótesis nula de igualdad de varianzas. El estadístico *F* con un nivel de significación en todas las variables inferior a 0,05, permite rechazar la igualdad de medias, y afirmar que existen diferencias significativas entre los grupos basados en esas variables meteorológicas.

Para constatar qué media difiere de qué otra se han empleado los contrastes llamados comparaciones múltiples post hoc o pruebas a posteriori asumiendo que las varianzas no son iguales y que los grupos tienen un número diferente de días, es decir, que los grupos son desequilibrados. Aceptando estos dos supuestos, se ha utilizado la T3 de Dunnett. Los resultados muestran que hay variables que diferencian muy bien entre los distintos tipos de tiempo y otras que no señalan diferencias significativas entre ellos. Hecho que no es de extrañar, porque el tipo de tiempo es una combinación de varias variables meteorológicas que caracterizan el estado de la atmósfera en un momento temporal concreto y algunos de ellos comparten características comunes en algunas variables.

De todas las variables que se han tenido en cuenta en la clasificación de los tipos de tiempo, la que mejor diferencia entre ellos es la altura a que se alcanzan los 850 hPa, seguida por la temperatura máxima, la humedad relativa y temperatura mínima. Por el contrario, la cubierta nubosa presenta valores comunes entre algunos grupos, lo que permite una menor discriminación entre los diferentes tipos de tiempo.

### *III.2.2. Características de los tipos de tiempo y su frecuencia a lo largo del año*

En la tabla 4 figuran la media y la desviación típica de las variables meteorológicas de cada tipo de tiempo, en la figura 2 sus frecuencias a lo largo del año y en la figura 3 situaciones sinópticas representativas al nivel de 850 hPa y de superficie.

El tipo 1 corresponde a masas de aire polares marítimas, canalizadas por un anticiclón situado en el Atlántico, al norte de las Azores, o por una borrasca al oeste de las Islas Británicas, con vientos del suroeste en superficie con una velocidad de 5,29 m/s (brisa leve según la escala de Beaufort) y del noroeste en altura con mayor velocidad, 8,02 m/s (vientos refrescantes) (figura 3). Sobre la Península prevalecen altas presiones, aunque no muy elevadas. Temperatura

media de las máximas diaria 13,2°C y medias de las mínimas 4,5°C. Este tipo de tiempo está presente en todos los meses del año salvo en el verano, siendo enero y febrero los que logran la máxima frecuencia. El porcentaje de días de este tipo 1 respecto al total es del 10,9% (figura 2).

El tipo 2 agrupa a los días con masas de aire polares marítimas que llegan a latitudes muy bajas a través de una gran vaguada atlántica, donde se calientan y envían a la Península vientos húmedos de componente suroeste en superficie, 2,64 m/s (brisa suave) y más fuertes, 6,36 m/s (brisa moderada) en las capas altas de la atmósfera. Sobre el interior de la Meseta hay altas presiones con temperaturas de 13,6°C (máximas medias) y 5,2°C (mínimas medias), un contenido en humedad del 68% y una cubierta nubosa de 7 octas. Este tipo de tiempo predomina principalmente en los meses de enero y diciembre, aunque noviembre también tiene alta frecuencia. El porcentaje de días respecto al total es del 9,2% (figuras 2 y 3).

El tipo 3 corresponde a días con masas de aire tropicales marítimas con vientos de componente sureste en superficie y en altura, con una velocidad de 1,58 m/s (brisa suave) y 3,64 m/s (brisa leve) respectivamente, canalizadas por una borrasca ubicada sobre la Península Ibérica (figura 3). Existe inestabilidad, temperaturas altas, 17,6°C las máximas medias y 8,6°C las mínimas medias; a 850 hPa se alcanza los 7°C de media. Este tipo de tiempo representa el 10,7%, predominando sobre todo en primavera y otoño, en concreto la máxima frecuencia se alcanza en los meses de noviembre y abril (figura 2).

El grupo 4 se caracteriza por vientos de componente NW en superficie (5,6 m/s) y del NE en altura (7,1 m/s) (brisa moderada en la escala de Beaufort). La masa de aire procede del interior de Europa, es una masa de aire polar continental que penetra a través de una vaguada con un eje NE-SW y es canalizada por una borrasca ubicada en el mar Ligur (figura 3). Las temperaturas son bajas, máximas alcanzan una media de 10,6°C y las mínimas de 2,6°C. La humedad relativa es del 51%. Su ocurrencia alcanza el 3,7%, siendo los meses de febrero y noviembre los que presentan la máxima frecuencia (figura 2).

El tipo 5 muestra la configuración de un anticiclón que se extiende desde el Atlántico hasta Europa Central, enviando vientos de componente noreste, 3,50 m/s en superficie (brisa leve) y 6,27 m/s en altura (brisa moderada) (figura 3). La cubierta nubosa es reducida y también la humedad relativa que alcanza el 30% de media. En algunos días, en este tipo de tiempo se pueden producir inversiones térmicas. De hecho, el promedio de la temperatura a 850 hPa (7,7°C) es superior al promedio de la temperatura mínima de superficie (6,6°C). Puede ocurrir en cualquier mes del año, aunque la máxima frecuencia se produce en marzo. Respecto al total de tipos de tiempo representa el 9% (figura 2). La masa de aire es seca, será fría en los meses de invierno y más cálida en los meses equinocciales y en los del verano.

El tipo de tiempo correspondiente al grupo 6 es el típico tiempo anticiclónico de invierno, con el anticiclón centrado en la Península y una dorsal en altura (figura 3). La masa de aire en origen tropical marítima experimenta un enfriamiento paulatino en el interior de la Península hasta transformarse en una masa de aire fría y seca. Es un tipo de tiempo con amplias oscilaciones diurnas de temperatura y frecuentes heladas. Presenta las temperaturas mínimas más bajas de todos los tipos de tiempo, la mínima promedio es -0,41°C, siendo frecuentes las inversiones térmicas, la temperatura media a 850 hPa es 6,3°C. Vientos del suroeste en superficie (0,83 m/s) y del noroeste en altura (1,21 m/s). Su máxima frecuencia es en los meses de diciembre, enero y febrero. Representa el 12% del total del período estudiado (figura 2).





Tabla 3  
COEFICIENTES DE CARGA DE LOS COMPONENTES ROTADOS

	Componentes			
	1	2	3	4
P13	-,208	-,906	-,119	-,206
TMAX	,969	,012	,197	-,025
TMIN	,826	,350	,323	,009
u_13	,092	,134	,023	,899
v_13	,148	-,019	,789	,327
HU13	-,839	,205	,279	-,054
TOT_13	-,566	,502	,344	-,013
Altura_850	,416	-,825	,084	-,220
T850	,898	-,036	,307	-,018
Td850	,432	,504	,471	-,103
u_850 Hpa	-,131	,143	,330	,798
v_850 Hpa	,069	,127	,851	,078

Tipo de tiempo anticiclónico corresponde al grupo 7. La configuración isobárica es semejante al grupo 6, pero con masas de aire más cálidas (figura 3). La temperatura máxima alcanza un promedio de 23,3°C y la mínima 7,1°C. Vientos del sureste tanto en superficie (0,95 m/s) como en las capas altas de la atmósfera (0,97 m/s). Aire muy seco y escasas nubes (1,8 octas). Es más habitual en los meses de primavera y otoño. Su frecuencia alcanza el 8,4% (figura 2).

El tipo 8 es un tipo de tiempo con promedios de temperatura máxima de 23,8°C y mínima de 12,5°C, consecuencia de masas de aire tropicales marítimas que llegan a la región con procedencia suroeste a partir de una vaguada atlántica que se corresponde en superficie con una baja presión. La meseta queda en una situación de altas presiones o de bajas presiones relativas (figura 3). Los vientos del suroeste alcanzan velocidades de 4,73 m/s en superficie (brisa leve) y de 5,97 m/s a 850 hPa (brisa moderada). La humedad llega al 42% y la cubierta nubosa es de 5,4 octas. Este tipo de tiempo es representativo de los meses de octubre y septiembre, por un lado, y de abril y mayo por otro. El 6% de los días del periodo estudiado tienen este tipo de tiempo (figura 2).

El tipo 9 incluye los tipos de tiempo ligados a los meses de verano que representan el 29,7% (figura 2). El anticiclón de las Azores sube en latitud, situado sobre el archipiélago que lleva su nombre, y canaliza hacia nuestra zona masas de aire tropicales marítimas. Esta situación barométrica alterna con otra de bajas presiones térmicas situadas sobre la meseta, con masas de aire muy cálidas y muy secas, procedentes del norte de África (figura 3). Las temperaturas máximas son muy elevadas, medias de 32,3°C, vientos de componente suroeste (2,85 m/s y 2,73 m/s en superficie y en altura respectivamente). Escasa humedad relativa (22%) y poca nubosidad (2 octas de media).

Figura 2  
FRECUENCIA DE LOS NUEVE TIPOS DE TIEMPO A LO LARGO DEL AÑO

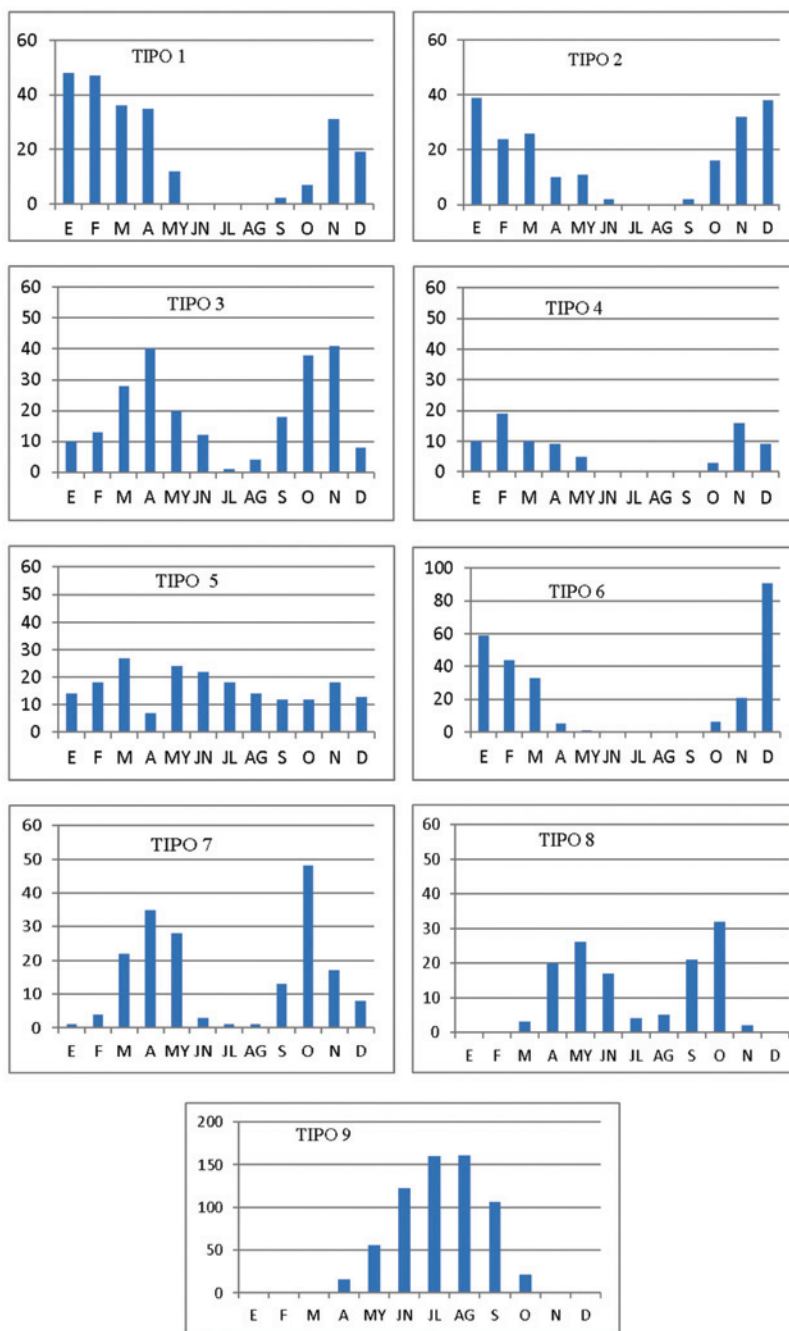
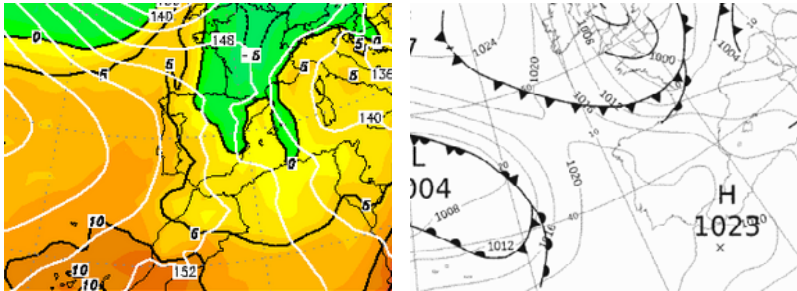


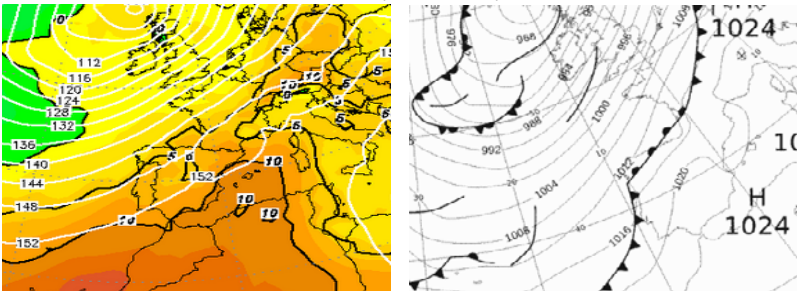
Tabla 4  
VALOR MEDIO Y DESVIACIÓN TÍPICA DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LOS 9 TIPOS DE TIEMPO BARAJAS (2010-2015)

Ward Method	P13	TMAX	TMIN	u_13	v_13	HUI3	TOT13	Altura_850	T850	Td850	u_850	v_850
<b>Tipo 1</b>												
<i>Media</i>	1016,52	13,25	4,46	5,06	1,56	54,38	5,35	1455,07	2,60	-2,22	7,98	-0,77
<i>Desv. típ.</i>	7,17	3,38	3,94	2,76	3,67	13,91	1,88	56,80	3,01	4,58	4,86	4,83
<b>Tipo 2</b>												
<i>Media</i>	1021,56	13,66	5,27	0,84	2,51	68,33	6,76	1503,95	4,73	0,74	5,35	3,44
<i>Desv. típ.</i>	5,43	4,26	4,06	1,71	2,90	15,07	1,47	40,63	3,33	4,00	4,75	4,20
<b>Tipo 3</b>												
<i>Media</i>	1016,12	17,64	8,55	-1,32	0,88	60,17	6,47	1478,47	7,03	3,23	-1,61	3,26
<i>Desv. típ.</i>	6,85	6,16	4,08	1,79	3,49	18,76	1,70	66,72	4,56	3,96	4,65	5,37
<b>Tipo 4</b>												
<i>Media</i>	1013,06	10,68	2,63	0,21	-5,60	51,47	5,01	1413,80	1,00	-4,60	-0,28	-7,10
<i>Desv. típ.</i>	7,37	4,17	3,88	2,14	4,09	16,98	2,50	56,57	3,93	5,37	3,51	6,08
<b>Tipo 5</b>												
<i>Media</i>	1023,08	20,85	6,63	-0,96	-3,37	30,79	1,71	1535,79	7,16	-4,13	-2,97	-5,52
<i>Desv. típ.</i>	5,60	8,49	6,80	1,85	2,67	10,93	1,98	33,18	6,85	8,45	3,52	3,87
<b>Tipo 6</b>												
<i>Media</i>	1032,00	15,17	-0,42	0,38	0,74	47,01	1,95	1584,68	6,35	-10,46	0,63	-1,03
<i>Desv. típ.</i>	4,63	4,19	2,95	1,20	1,33	15,57	2,39	37,82	3,73	9,37	3,90	4,19
<b>Tipo 7</b>												
<i>Media</i>	1024,76	23,34	7,13	-0,01	0,95	36,17	1,87	1563,55	10,16	-0,20	-0,51	0,83
<i>Desv. típ.</i>	3,85	4,69	3,41	1,44	1,76	12,13	1,96	30,74	4,19	4,30	3,17	2,98
<b>Tipo 8</b>												
<i>Media</i>	1015,78	23,81	12,46	2,73	3,86	42,35	5,45	1499,13	10,89	4,87	4,52	3,90
<i>Desv. típ.</i>	3,80	3,42	3,87	1,87	1,73	11,85	1,84	29,85	3,07	3,56	2,72	2,74
<b>Tipo 9</b>												
<i>Media</i>	1017,38	32,30	15,99	1,71	2,29	22,45	2,04	1546,31	17,26	4,22	2,01	1,85
<i>Desv. típ.</i>	3,18	3,82	3,44	2,16	2,11	7,45	2,08	30,13	3,67	4,24	3,01	2,46

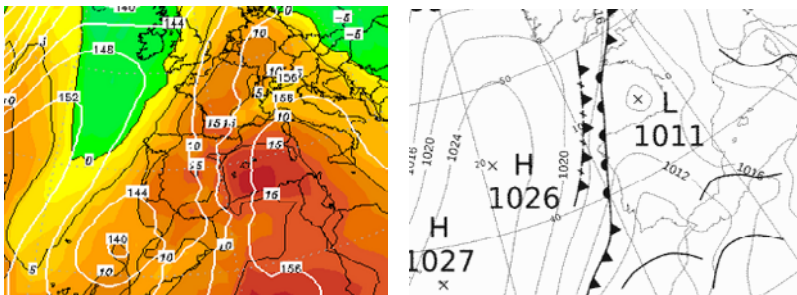
Figura 3  
SITUACIONES SINÓPTICAS DE LOS NUEVE TIPOS DE TIEMPO, CON EL GEOPOTENCIAL A 850 HPA (DAM),  
TEMPERATURA A ESE NIVEL (IZQDA.) Y PRESIÓN EN SUPERFICIE (DCHA.)



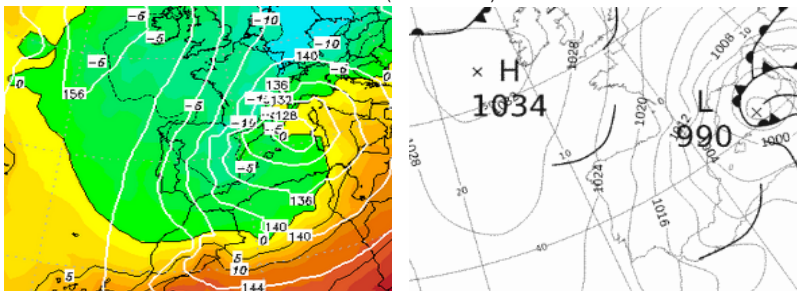
Cluster 1 (17\_04\_2012)



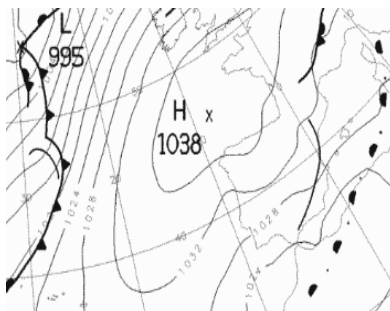
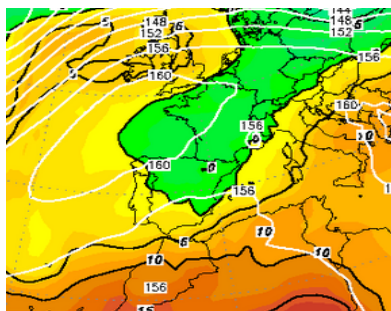
Cluster 2 (7-01-2014)



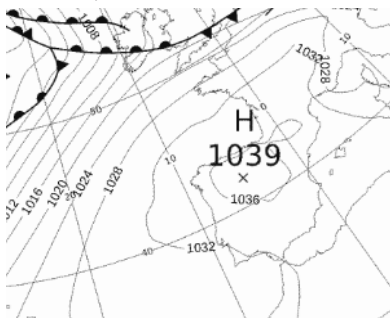
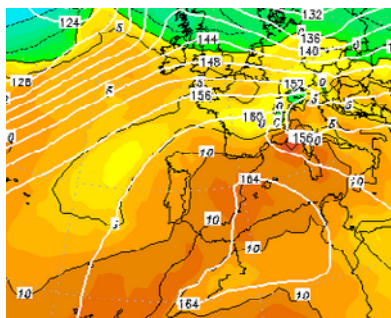
Cluster 3 (23-11-2014)



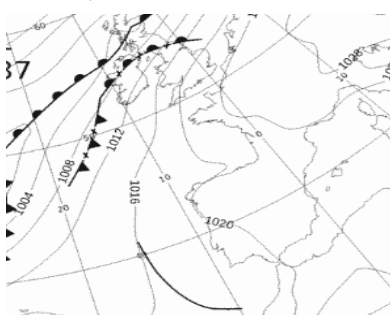
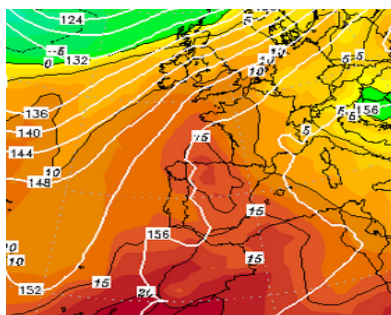
Cluster 4 (5-02-2012)



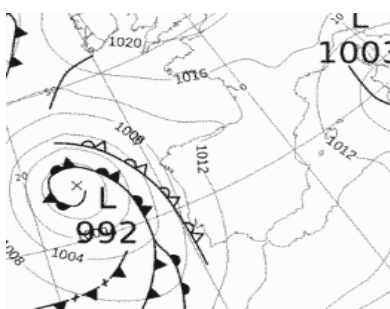
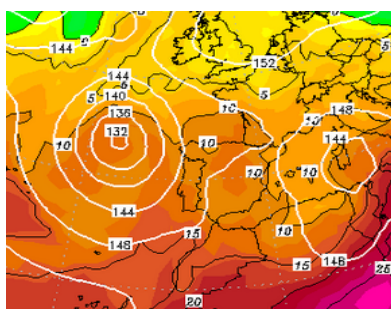
Cluster 5 (20-03\_2012)



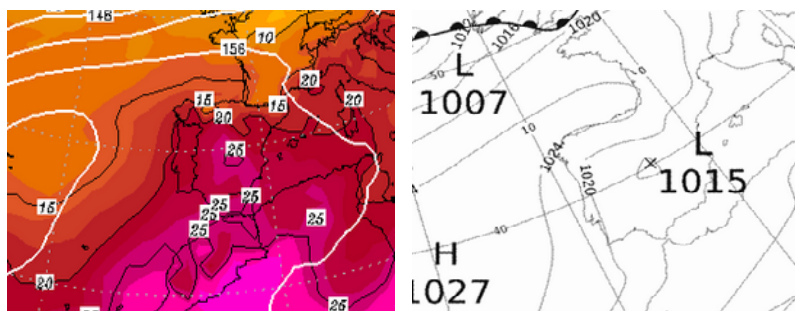
Cluster 6 (1-12\_2015)



Cluster 7 (27-10-2014)



Cluster 8 (10-10-2015)



Cluster 9 (23\_7\_2015)

Fuente: www.wetterzentrale.de

### III.3. Aplicación de los resultados del ACP y cluster a la concentración de contaminantes en el aire

Para cada tipo de tiempo, definido por unos valores de las variables meteorológicas, se ha calculado la media y estadísticos de variabilidad de las concentraciones de contaminación por  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{O}_3$  de los días incluidos en ese tipo, y para todas las estaciones de medición que existen en la ciudad de Madrid. Además se ha aplicado el test ANOVA de un factor para probar que las diferencias en las medias de los diferentes contaminantes de cada estación en cada grupo son estadísticamente significativas. Los niveles de significación de la F son inferiores en todos los casos a 0,001.

#### III.3.1. Contaminación por $\text{NO}_2$

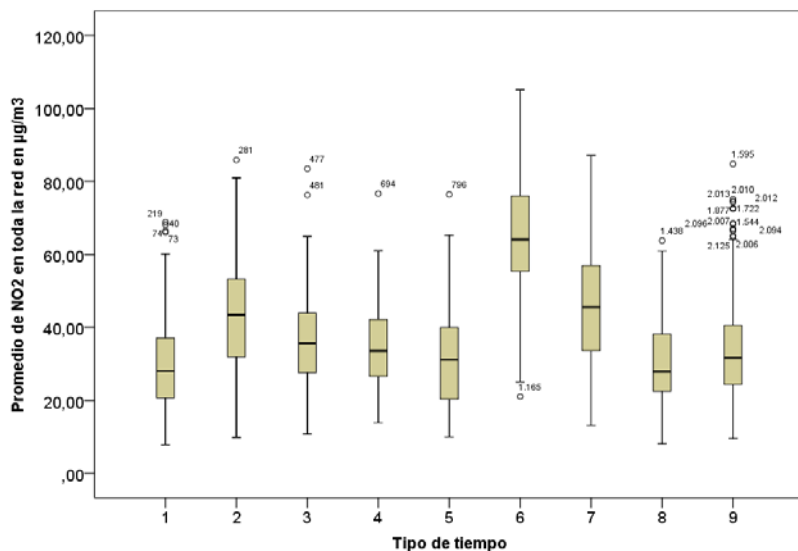
El tipo de tiempo que desencadena la contaminación más alta por dióxido de nitrógeno es el tipo 6. Corresponde a un tipo de tiempo anticiclónico de invierno, con un centro de altas presiones muy potente sobre el interior de la Península Ibérica, vientos del suroeste en superficie (0,83 m/s) y del noroeste en altura (1,21 m/s), ventolina en la escala Beaufort, temperaturas bajo cero en superficie, debido al enfriamiento del aire en contacto con la superficie fría, por la fuerte irradiación nocturna, favorecida por los cielos despejados, temperaturas más altas a 850 hPa, produciéndose importantes inversiones térmicas, que impiden los movimientos ascendentes del aire y favorecen el estancamiento de los contaminantes. Este tipo de tiempo suele ser muy persistente y durar varios días seguidos.

De manera general son las estaciones de tráfico las que registran cifras más elevadas de contaminación por  $\text{NO}_2$  y las estaciones suburbanas, las que anotan los valores más bajos, en todos los tipos de tiempo, puesto que el dióxido de nitrógeno es un contaminante indicador de actividades de transporte, sobre todo, de tráfico rodado.

La estación que alcanza la cifra más alta, en este tipo de tiempo, es la Plaza Fernández Ladreda con más de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , seguida de cerca por Villaverde, Barrio del Pilar, Cuatro Caminos, Escuelas Aguirre, Ramón y Cajal, Plaza Castilla, Carmen y Plaza España, con valores por debajo de 80 y por encima de  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por el contrario, El Pardo y Juan Carlos I no llegan a los  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Los tipos 7 y 2 también están asociados a altos niveles de contaminación por NO<sub>2</sub>, aunque inferiores al tipo 6 (figura 4). Se trata de tipos de tiempo anticiclónicos, con temperaturas más altas. El tipo 7 es frecuente en los meses de otoño y primavera ligado a masas de aire tropicales secas con vientos de componente sur. Y el tipo 2 es desencadenado por masas polares marítimas con mayor contenido en humedad, su frecuencia es mayor en enero, diciembre y noviembre. En el tipo 7, las estaciones de contaminación tienen un comportamiento similar al tipo 6, las mayores concentraciones de NO<sub>2</sub> se dan en Fernández Ladreda (68,9 μg/m<sup>3</sup>) y en Escuelas Aguirre (60,14 μg/m<sup>3</sup>) y las menores en El Pardo (21,4 μg/m<sup>3</sup>), Juan Carlos I (27,01 μg/m<sup>3</sup>), Casa de Campo (31 μg/m<sup>3</sup>) y Retiro (36,5 μg/m<sup>3</sup>). En el resto de estaciones, las cifras fluctúan por encima de 40 μg/m<sup>3</sup> y por debajo de 60 μg/m<sup>3</sup>. En el tipo 2, las estaciones se comportan de manera similar pero con valores un poco bajos que en el tipo 7, las cantidades oscilan entre 60 μg/m<sup>3</sup> y 21,19 μg/m<sup>3</sup>.

Figura 4  
 PROMEDIO DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO PARA EL CONJUNTO DE LA RED (2010-2015)



Fuente: elaboración propia.

Los tipos de tiempo con menores concentraciones de NO<sub>2</sub> son el 1 y el 8 (figura 4). Ambos casos corresponden a tipos de tiempo con presiones no muy elevadas y con viento, lo que facilita la dispersión de la contaminación. El primero se identifica con masas de aire polares marítimas, vientos del suroeste en superficie con una velocidad de 5,29 m/s (brisa leve según la escala de Beaufort) y del noroeste en altura con mayor velocidad, 8,02 m/s (vientos refrescantes), que facilitan el barrido de la contaminación, por lo que los niveles de NO<sub>2</sub> no son altos, oscilan entre un mínimo de 12,3 μg/m<sup>3</sup> en El Pardo y Casa de Campo y un máximo de 45 μg/m<sup>3</sup> en Plaza de Castilla. El tipo 8 corresponde a masas de aire tropicales marítimas que llegan a la región con procedencia suroeste tanto en superficie como



en altura, con velocidades de 4,73 m/s en superficie (brisa leve) y de 5,97 m/s a 850 hPa (brisa moderada). La concentración de NO<sub>2</sub> fluctúa entre 15,2 μg/m<sup>3</sup> en El Pardo y 43,75 μg/m<sup>3</sup> en Fernández Ladreda.

Dado el gran espacio que ocupa la tabla de estadísticos descriptivos de todos los observatorios, se ha optado por representar sólo el promedio de los contaminantes para el conjunto de la red mediante un gráfico de caja y bigotes. En la figura 4 aparece la situación del dióxido de nitrógeno, donde se observa que el tipo 6 es el que presenta valores de NO<sub>2</sub> más elevados seguido por el tipo 7 y 2. Por el contrario el tipo 1 y 8 son los que presentan valores más bajos. En la figura 5 se muestra la concentración media de NO<sub>2</sub> para todo el periodo (2010-2015) por estaciones.

### III.3.2. Contaminación por Ozono (O<sub>3</sub>)

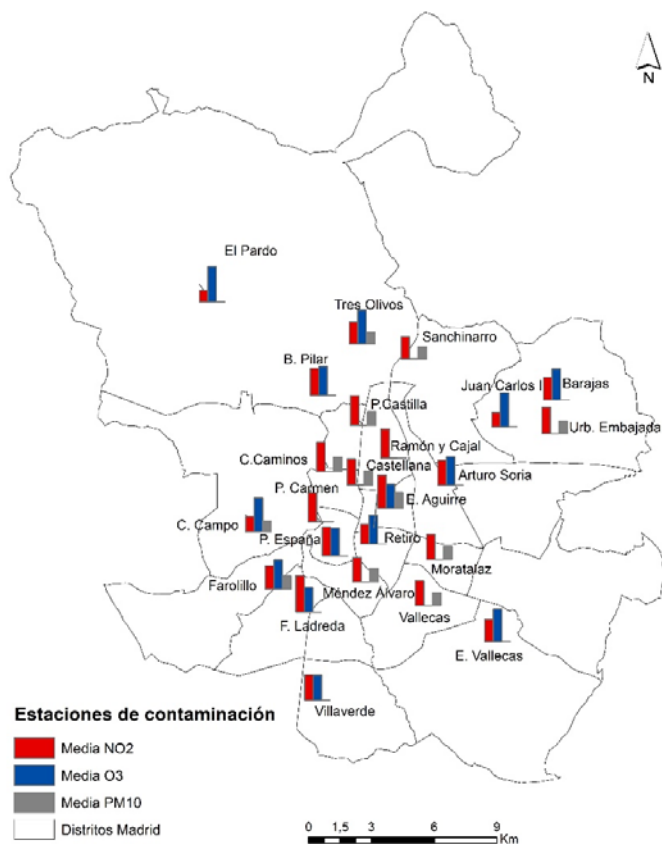
El tipo de tiempo 9 es el que produce los mayores niveles de inmisión de ozono en la atmósfera. Es un tiempo anticiclónico de verano, vinculado a masas de aire tropicales marítimas y tropicales continentales cálidas y secas, que causan en esta estación temperaturas muy elevadas, alcanzando las máximas diarias 32 °C de media y las mínimas 16 °C, aunque las máximas diarias pueden llegar 40 °C. Vientos de componente suroeste (brisa suave) en superficie y en altura con 2,85 m/s y 2,73 m/s respectivamente. Valores exigüos de humedad relativa (22,4%) y mínima cubierta nubosa (2 octas), luego alto valor de insolación. La altura media a la que se alcanza los 850 hPa es de 1546,3 metros donde la temperatura llega a de 17 °C.

La configuración isobárica que desencadena este tipo de tiempo es o bien una dorsal en altura o una cresta sahariana centrada con su eje en torno a los 5° oeste (Martín Vide y Olcina Cantos, 2001) con un predominio de las altas presiones generalizadas. Bajo estas condiciones meteorológicas se dificultan la dispersión de contaminantes (Castell *et al.*, 2004).

Con este tipo de tiempo las estaciones de contaminación que muestran las mayores medias diarias de concentración de ozono (superior a 70 μg/m<sup>3</sup>) son: Tres Olivos, Casa de Campo, El Pardo y Juan Carlos I, todas ubicadas en zonas metropolitanas o suburbanas. Por el contrario, la Plaza de Fernández Ladreda, Escuelas Aguirre y Villaverde, localizadas en áreas de abundante tráfico, exhiben las cifras más bajas, en este tipo de tiempo, con valores por encima de 52 μg/m<sup>3</sup> (figura 5). Este modelo de distribución espacial de ozono es opuesto al del dióxido de nitrógeno descrito en el párrafo III.3.1. La razón estriba en los procesos de formación y destrucción del ozono. De manera simplificada, el proceso de producción del ozono se inicia al reaccionar los óxidos de nitrógeno con luz solar de longitud de onda inferior a 400 nm (1 nm = 10<sup>-9</sup> m), según el siguiente proceso: NO<sub>2</sub> + luz → NO + O, el oxígeno atómico así formado reacciona rápidamente con el oxígeno del aire para formar ozono, O + O<sub>2</sub> → O<sub>3</sub>. Por otro lado, en entornos urbanos contaminados el NO recién emitido puede combinarse inmediatamente con el ozono reduciendo sus concentraciones en el ambiente, según la siguiente reacción: NO + O<sub>3</sub> → NO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>. En el centro de la ciudad, donde hay intenso tráfico, la emisión continua de NO<sub>2</sub> implica un ciclo continuado de formación destrucción del ozono, por lo que rara vez se alcanzan niveles elevados en la concentración de este contaminante; en las zonas periféricas de la misma, la formación de NO<sub>2</sub> es bastante menor y el ozono se forma a partir de precursores procedentes de la ciudad transportados por los vientos dominantes (Fernández, 2001). Por tanto, las concentraciones de ozono dependerán de los

precursores, de las condiciones topográficas de la ciudad y del transporte horizontal, importante en el régimen de brisas y del transporte vertical y mezcla dentro de la troposfera y entre la troposfera y la estratosfera (Adame *et al.*, 2010).

Figura 5  
CONCENTRACIÓN MEDIA DE  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  y  $\text{PM}_{10}$  POR ESTACIONES EN  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (2010-2015)

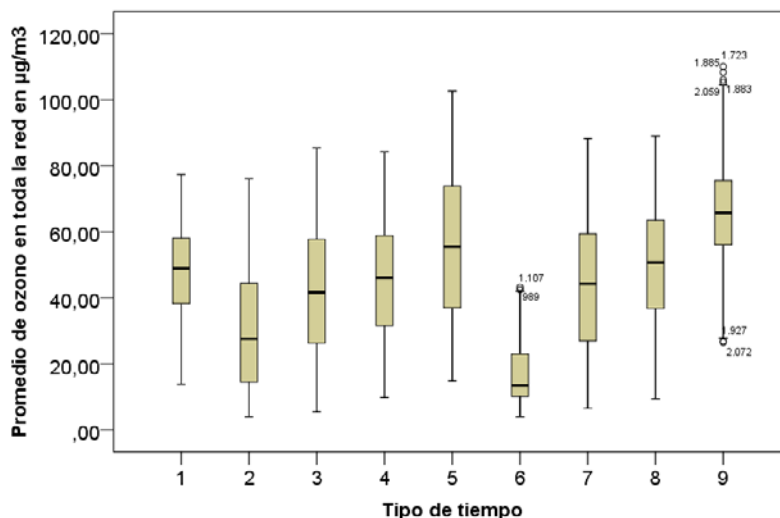


Fuente: elaboración propia.

Altos valores de ozono están asociados a los tipos 5 y 8, ambos anticiclónicos, con temperaturas medias de las máximas diarias de 20,8°C y 23,8°C respectivamente. Sigue observándose el mismo comportamiento entre estaciones centrales y periféricas. En el tipo de tiempo 5 las cifras oscilan entre unos mínimos de 44 y 47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y unos máximos entre 60 y 64,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y en la categoría 8, los valores más bajos fluctúan entre 37,2 y 43,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y los más altos entre 55,7 y 57,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

El tipo de tiempo que origina menores concentraciones de ozono es el 6, precisamente es el que provocaba las mayores cantidades de inmisión de  $\text{NO}_2$ . Es el tipo de tiempo de centro invierno, caracterizado por las temperaturas más bajas de todos los tipos de tiempo (figura 6).

Figura 6  
 PROMEDIO DE OZONO PARA EL CONJUNTO DE LA RED (2010-2015)



Fuente: elaboración propia.

Se puede afirmar que el ozono tiene una fuerte estacionalidad (Yarnal, 1992), demostrada en este trabajo y también en otros, de otras zonas de la Península Ibérica, como en Zaragoza (Matute y González, 2011), Huelva (Adame et al., 2010), Comunidad Valenciana (Castell et al., 2004) o valle bajo del Ebro (Adame y Sole, 2013).

### III.3.3. Contaminación por partículas en suspensión ( $PM_{10}$ )

Las partículas en suspensión con un tamaño inferior a  $10 \mu m$  están constituidas por multitud de compuestos diferentes, orgánicos, metales pesados, óxidos metálicos y compuestos de calcio, aluminio y silicio, procedentes de polvo del suelo.

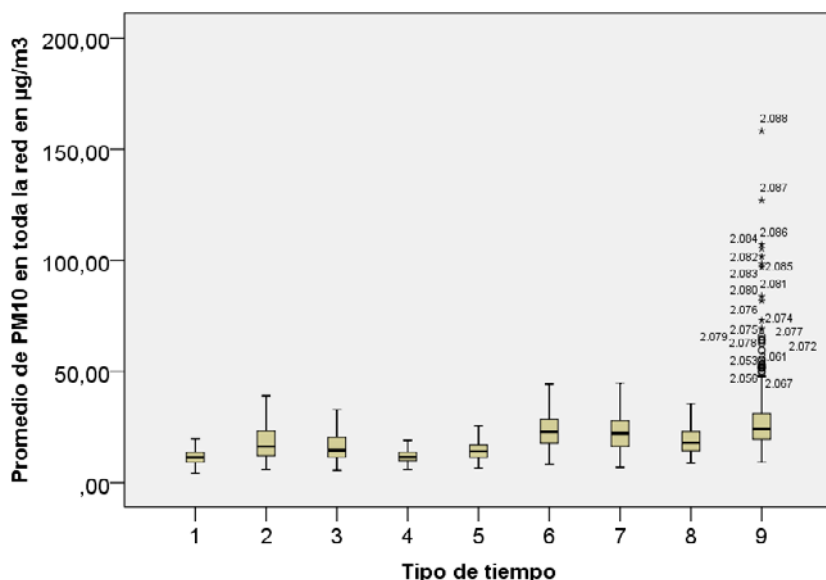
El principal foco emisor es el transporte, aunque se generan en los procesos de combustión de todos los sectores considerados. Los vehículos con mecánica diesel son los principales responsables de estas emisiones. Otros focos de emisión serían los sectores residencial e industrial (cuyas emisiones han descendido gracias a las mejoras alcanzadas en las calderas) y las actividades agrícolas y ganaderas, donde también se generan considerables cantidades de  $PM_{10}$ .

Estas partículas permanecen de forma estable en el aire durante largos de tiempo sin caer al suelo, pudiendo ser trasladadas por el viento a distancias importantes (Rodríguez *et al.*, 2015). Las partículas pueden influir en la temperatura atmosférica por su capacidad para absorber o emitir radiación (Foster *et al.*, 2007), también pueden alterar la cubierta nubosa y servir de medio para reacciones químicas.

Los niveles de  $PM_{10}$  tienen una componente no antropogénica de difícil control, que es la entrada de vientos saharianos, siendo el norte de Africa la principal fuente de polvo del mundo (Rodríguez *et al.*, 2015).

De las doce estaciones de la red de calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid que miden partículas en suspensión inferiores a  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), en nueve, el tipo de tiempo que desencadena los mayores niveles de inmisión es el 9, en una estación (Cuatro Caminos) existe una coincidencia entre el tipo 9 y 6, y en dos estaciones (Méndez Alvaro y Plaza Castilla) es el tipo 6 el que sobrepasa al 9 en cuanto niveles de contaminación por partículas. Ambos tipos de tiempo son anticiclónicos, uno de verano y el otro de centro invierno (veáse figura 7).

Figura 7  
 PROMEDIO DE  $\text{PM}_{10}$  PARA EL CONJUNTO DE LA RED 2010-2015



Fuente: elaboración propia.

El tipo 9 es característico del verano, cuando invaden la Península Ibérica masas de aire tropicales continentales procedentes de África, que son las principales responsables de la presencia en la atmósfera de polvo en suspensión. Acompañadas de altas temperaturas y calima. Todas las estaciones se encuentran por debajo del límite diario establecido por la legislación que es  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pero todas incumplen el valor límite anual de la Organización Mundial de la Salud (OMS) marcado en  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La estación que presenta peor situación es Escuelas Aguirre con una concentración media diaria de  $32,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en la que junto a las partículas de origen natural hay que sumar las procedentes del tráfico rodado. La que muestra cifras más bajas es la Casa de Campo con  $24,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ubicada en zona suburbana, con menos influencia de tráfico pero donde llega de manera natural el polvo en suspensión sahariano (figura 5).

En el tipo 6, la fuerte estabilidad atmosférica y la inversión térmica impiden la dispersión de contaminantes, favoreciendo la abundancia de partículas en suspensión, procedentes de

los procesos de combustión donde se incluye el tráfico rodado, y la inmisión de dióxido de nitrógeno, que también es elevada estos días. La distribución espacial de la contaminación de  $PM_{10}$  sigue el mismo patrón que en el tipo 9, por encima de  $28 \mu g/m^3$ , se encuentran las estaciones de Escuelas Aguirre, Mendez Álvaro y Cuatro Caminos, el resto están por encima de  $20 \mu g/m^3$ , salvo Casa de Campo que presenta  $19,32 \mu g/m^3$ .

Por lo tanto hay dos estaciones favorables donde la inmisión de partículas es importante, el invierno donde la principal fuente de emisión son los procesos de combustión, favorecidos por la baja capacidad de dispersión de la atmósfera en esta época, y el verano, donde la principal fuente de emisión es el polvo sahariano (Artiñano *et al.*, 2004).

Los tipos de tiempo que provocan menos concentración de partículas son el 1 y el 4 (figura 7). El primero es un tipo de tiempo anticiclónico asociado a masas de aire polares marítimas con vientos de componente oeste y el 4 es un tipo tiempo ligado a una masa de aire polar continental procedente del interior de Europa, que penetra a través de una vaguada con un eje NE-SW. Los valores de contaminación con estas situaciones son muy bajos, registrando cifras más elevadas, como siempre, las estaciones de tráfico (Escuelas Aguirre,  $15,15 \mu g/m^3$  o Plaza Castilla,  $15,55 \mu g/m^3$ ) que las estaciones suburbanas o metropolitanas (Casa de Campo  $7,9 \mu g/m^3$ ) (figura 5).

#### IV. CONCLUSIONES

Se han aplicado técnicas de análisis multivariante, en concreto análisis factorial y cluster en la clasificación e identificación de los tipos de tiempo en Madrid (Barajas) teniendo como base el conocimiento climático de la región. El periodo temporal considerado ha sido 2010-2015.

Las 12 variables meteorológicas utilizadas han quedado reducidas a cuatro componentes o factores que explican el 83% de la varianza total. La temperatura con valores positivos y la humedad con valores negativos están altamente correlacionadas con el primer componente. La presión en superficie y la altura geopotencial a 850hPa contribuyen al segundo componente con cifras negativas frente a a la temperatura del punto de rocío a 850 hPa y cubierta nubosa que lo hacen con cifras positivas. Los factores 3 y 4 hacen referencia a la componente meridiana y zonal del viento respectivamente.

Tras calcular las puntuaciones factoriales de todos los días para los 4 componentes, se procedió a agrupar los días con un método jerárquico aglomerativo, la técnica de Ward. El resultado han sido 9 clusters o tipos de tiempo diferentes. Para cada uno, se ha calculado su frecuencia a lo largo del año, las características medias y medidas de variación de las variables meteorológicas utilizadas en su definición. Se comprobó que existen diferencias estadísticamente significativas entre los distintos grupos basados en esas variables. El estadístico F presentó un nivel de significación inferior a 0,05. Las comparaciones múltiples realizadas con la T3 de Dunnet reforzaron la significación estadística de las diferencias entre grupos, si bien algunos pares de variables no mostraban diferencias significativas. En concreto la altura a la que se alcanzan los 850 hPa es la que mejor discrimina y la que peor la cubierta nubosa.

Para cada tipo de tiempo se ha computado la media y medidas de dispersión para las concentraciones de contaminación por  $NO_2$ ,  $O_3$  y  $PM_{10}$  de todas las estaciones de medición de la ciudad de Madrid.

Los resultados indican que el tipo de tiempo 6, anticiclónico de invierno, ligado a masas de aire frías y secas, con frecuentes inversiones térmicas, es el que ocasiona los máximos niveles de inmisión de  $\text{NO}_2$ . Las estaciones de tráfico son las que registran cifras más elevadas y las estaciones suburbanas valores más bajos. La Plaza Fernández Ladreda con más de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , es la que muestra peor situación, seguida de cerca por Villaverde, Barrio del Pilar, Cuatro Caminos, Escuelas Aguirre, Ramón y Cajal, Plaza Castilla, Carmen y Plaza España, con valores por debajo de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y por encima de  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por el contrario, El Pardo y Juan Carlos I no llegan a los  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Este mismo tipo de tiempo es el que contribuye a elevadas tasas de inmisión de  $\text{PM}_{10}$ , provocadas por un tráfico muy intenso unido a la gran estabilidad atmosférica. Todas las estaciones presentan medias diarias inferiores a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pero superiores a  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  salvo Casa de Campo ( $19,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Como contrapartida, este tipo de tiempo es el que produce menores concentraciones de ozono.

Las concentraciones más bajas de  $\text{NO}_2$  se alcanzan con los tipos anticiclónicos 1 y 5. En el tipo 1, los valores oscilan entre  $12,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en El Pardo y Casa de Campo y  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en Plaza de Castilla. En el tipo 5, entre  $15,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en El Pardo y  $56,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en Fernández Ladreda. Además, este último, ocasiona alta concentración de ozono.

El tipo de tiempo de verano (tipo 9), anticiclónico, de gran estabilidad, vinculado a masas de aire cálidas tropicales marítimas y tropicales continentales, con temperaturas muy altas, baja nubosidad y alta insolación, es el que produce los mayores niveles de inmisión de ozono en la atmósfera. Son las estaciones suburbanas, Tres Olivos, Casa de Campo, El Pardo y Juan Carlos I, las que muestran las mayores cifras diarias, superiores a  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por contra, la Plaza de Fernández Ladreda, Escuelas Aguirre y Villaverde, localizadas en áreas de abundante tráfico, exhiben las cifras más bajas, pero con valores por encima de  $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este modelo de distribución espacial de ozono es opuesto al del dióxido de nitrógeno. La razón estriba en los procesos de formación y destrucción del ozono.

Además el tipo 9 cuando está vinculado a la llegada a la Península de masas de aire tropicales continentales procedentes de África (aire sahariano), responsables de la presencia en la atmósfera de polvo en suspensión, desencadena altas tasas de inmisión de  $\text{PM}_{10}$ . Con este tipo de tiempo, aunque todas las estaciones se encuentran por debajo del límite diario establecido por la legislación que es  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , todas incumplen el valor límite anual de la Organización Mundial de la Salud (OMS) marcado en  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La estación que presenta peor situación es Escuelas Aguirre con una concentración media diaria de  $32,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en la que junto a las partículas de origen natural hay que sumar las procedentes del tráfico rodado. La que muestra cifras más bajas es la Casa de Campo con  $24,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ubicada en zona suburbana, con menos influencia de tráfico pero donde llega de manera natural el polvo en suspensión.

El tipo de tiempo 1, anticiclónico, asociado a masas de aire polares marítimas con vientos predominantes de componente oeste, junto con el tipo 4, ligado a masa de aire polar continental procedente de Europa (noreste), son los que desencadenan la menor concentración de contaminación por  $\text{PM}_{10}$ , por la ventilación atmosférica que les caracteriza. Las cifras oscilan entre  $15,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de Escuelas Aguirre y  $15,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de Plaza Castilla (estaciones de tráfico) y  $7,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de Casa de Campo (estación metropolitana).

Los resultados alcanzados confirman la importancia de los tipos de tiempo en la calidad del aire de la ciudad. Los niveles de polución del aire están controlados por unas determi-

nadas condiciones atmosféricas de tal manera que éstas se podrían utilizar para predecir episodios de alta contaminación en la zona de estudio y elaborar sistemas de alerta para las personas más sensibles ante la llegada de masas de aire que está demostrado están asociadas a altos niveles de inmisión de contaminantes.

## V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha elaborado en el marco del proyecto “Contaminación atmosférica urbana y justicia ambiental: metodología de evaluación y estudio de casos con sistemas de información geográfica”, CSO2011-26177, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- ADAME, J.A., BOLIVAR, J.P. y DE LA MORENA, B.A. (2010): “Surface ozone measurements in the southwest of the Iberian Peninsula (Huelva, Spain)”, *Environmental Science Pollution Research*, 17, 355-368.
- ADAME, J.A. y SOLE, J.G. (2013): “Surface ozone variations at a rural area in the northeast of the Iberian Peninsula”, *Atmospheric Pollution Research*, 4, 130-141.
- ARTIÑANO, B., SAVADOR, P., ALONSO, D.G., QUEROL, X. y ALASTUEY, A. (2004): “Influence of traffic on the PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> urban aerosol fractions in Madrid (Spain)”, *Science of The Total Environment*, Vol. 334-335, pp. 111-123.
- BOSQUE, J. y MORENO, A. (1994): *Prácticas de análisis exploratorio y multivariante de datos*. Barcelona, Oikos-tau, 214 p.
- CAÑADA TORRECILLA, M.R. (1989). *El Clima de Extremadura: estudio analítico y dinámico*. Publicaciones de la Universidad Autónoma de Madrid.
- CASTELL, N., MANTILLA, E., FERNÁNDEZ, F. y LÓPEZ, E. (2004): “Distribución espacial y temporal de los episodios de contaminación por ozono y su relación con las situaciones sinópticas en la vertiente mediterránea”, en GARCÍA CODRÓN *et al.* (Ed.): *El clima entre el mar y la montaña*. Publicaciones de la Asociación española de Climatología (AEC), serie A, nº 4, pp. 599-605.
- CHENG, S. y LAM, K.CH. (2000): “Synoptic typing and its application to the assessment of climatic impact on concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong”, *Atmospheric Environment*, 34, pp. 585-594.
- FERNÁNDEZ, F. (1985): *El clima de la meseta meridional. Los tipos de tiempo*. Publicaciones de la Universidad Autónoma de Madrid.
- FERNÁNDEZ, F. (2001): “Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y aplicación al área de Madrid”, en RASO, J. y VIDE, J.: *Proyectos y métodos actuales en climatología*. Barcelona, Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), serie B, nº 1, pp. 41-66.
- FORSTER, P., RAMASWAMY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., FAHEY, D.W., HAYWOOD, J., LEAN, J., LOWE, D.C., MYHRE, G., NGANGA, J., PRINN, R., RAGA, G., SCHULZ, M. y VAN DORLAND, R. (2007): Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING,

- Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR AND H.L. MILLER (Eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- KALSTEIN, L.S. y CORRIGAN, P. (1986): "A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations", *Annals of the Association of American Geographers*, 76, 381-395.
- KASSOMENOS, P.A., SINDOSI, O.A. y LOLIS, CH.J. (2003): "On the relation between seasonal synoptic circulation types and spatial air quality characteristics in Athens, Greece", *Air & Waste Management Association*, 53, pp. 309-324.
- MARTÍN VIDE, J. y OLCINA CANTOS, J. (2001): *Climas y tiempos de España*. Madrid, Alianza Editorial, 258 pp.
- MCGREGOR, G.R. y BAMZELIS, D. (1995): "Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution relations, Birmingham, United Kingdom", *Theoretical and Applied Climatology*, 51, 223-236.
- LAMB, H.H. (1972): *British Isles weather types and a register daily sequence of circulation patterns, 1861-1971*. Geophysical Memoir, 116, HMSO, London, 85 pp.
- OLCINA CANTOS, J. (1994): "Métodos de clasificación sinóptica en España. Revisión y propuesta", *Estudios Geográficos*, 215, pp. 357-387.
- PÉDELABORDE, P. (1957): *Le climat du bassin Parisien, essai d'une méthode rationnelle de climatologie physique*. París, M.Th., Ed. Génin.
- RAINHAM, D.G., SMOYER-TOMIC, K., Sheridan, S.C., y Burnett, R.T. (2005): "Synoptic weather patterns and modification of the association between air pollution and human mortality", *International Journal of Environmental Health Research*, 15(5), pp. 347-360.
- RASILLA ÁLVAREZ, D. F. (2003): "Aplicación de un método de clasificación sinóptica a la Península Ibérica", *Investigaciones Geográficas*, 30, pp. 27-45.
- RODRÍGUEZ, S., CUEVAS, E., PROSPERO, J.M., ALASTUEY, A., QUEROL, X., LÓPEZ-SOLANO, J., GARCÍA, M.I., y ALONSO-PÉREZ, S. (2015): "Modulation of Saharan dust export by the North African dipole", *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 7471-7486.
- SHAHGEDANOVA, M., BURT, T.P. y DAVIES, T.D. (1998): "Synoptic Climatology of air pollution in Moscow", *Theor. Appl. Climatol.*, 61, pp. 85-102.
- SHERIDAN, S.C. (2002): "The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America", *International Journal of Climatology*, 22, pp. 51-68.
- VANOS, J.K., CAKMAK, S., BRISTOW, B., BRION, V., TREMBLAY, N., MARTIN, S.L., SHERIDAN, S.S. (2013): "Synoptic weather typing applied to air pollution mortality among the elderly in 10 Canadian cities", *Environmental Research*, 126, pp. 66-75.
- YARNAL, B. (1992): "Relations between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania", *Atmospheric Environment*, vol. 26B, n° 3, pp. 301-312.
- YARNAL, B. (1993): *Synoptic Climatology in Environmental Analysis*. Belhaven Press, London, 192 pp.