

# ESTUDIO DE LAS CONCENTRACIONES DE OZONO SUPERFICIAL EN LA ATMÓSFERA DE LA COMUNIDAD DE MADRID USANDO MUESTREADORES PASIVOS

## *STUDY OF THE SUPERFICIAL OZONE CONCENTRATIONS IN THE ATMOSPHERE OF COMUNIDAD DE MADRID USING PASSIVE SAMPLERS*

D. Galán Madruga, R. Fernández Patier, E. Díaz Ramiro, M<sup>a</sup> D. Herce Garraleta.

Área de Contaminación Atmosférica. Centro Nacional de Sanidad Ambiente. Instituto de Salud Carlos III.

Ayuda: Consejería de Educación y Cultura de la Comunidad de Madrid del proyecto titulado "Elaboración de un mapa de riesgo sanitario y medioambiental del ozono troposférico en la Comunidad de Madrid", nº exp 08.7/0001/1998.

### RESUMEN

El ozono es un contaminante atmosférico secundario formado por reacciones fotoquímicas de compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). En España, el ozono es un gran problema como consecuencia de los altos niveles alcanzados por la radiación solar. Exposiciones periódicas a concentraciones elevadas de ozono, pueden causar daños en la salud pública y alteraciones en la vegetación.

El objetivo del presente estudio es desarrollar y validar un método de medida que permita evaluar los niveles de ozono superficial en la Comunidad de Madrid, identificando las áreas más significativas, donde posteriormente medir en forma continua este contaminante y en donde la salud y la vegetación se pueden ver afectados. Para ello se utilizan muestreadores pasivos, los cuáles disponen de filtros de fibra de vidrio impregnados con una disolución de nitrito sódico, carbonato potásico, glicerol y agua. El ión nitrito en presencia de ozono es oxidado a ión nitrato, el cuál se analiza, después de su extracción con agua ultrapura, por cromatografía iónica, siendo proporcional a la concentración de ozono existente en el punto de muestreo.

Los resultados de validación, a partir de ensayos de campo, muestran una excelente correlación entre muestreadores pasivos y el método de referencia automático.

Las mayores concentraciones de ozono superficial se localizan en zonas rurales, alejadas de focos emisores de contaminantes primarios (óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles...), principalmente en dirección suroeste y noroeste de la Comunidad de Madrid.

**PALABRAS CLAVE:** Ozono superficial, salud y muestreador pasivo.

### ABSTRACT

The ozone is a secondary atmospheric pollutant which is generated for photochemical reactions of volatile organic compounds (VOC's) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>). In Spain the ozone is a big problem as a consequence of the solar radiation to reach high levels. Exposure over a period of time to elevated ozone concentrations can cause damage in the public health and alterations in the vegetation.

The aim of this study is to carry out the development and validation of a measurement method to let asses the superficial ozone levels in the Comunidad de Madrid, by identifying the zones more significant, where to measure with UV photometric monitors (automatic methods) this pollutant and where the health and the vegetation can be affected. To such effect, passive samplers are used, which have glass fiber filters coated with a solution of sodium nitrite, potassium carbonate, glycerol and water. The nitrite ion in the presence of ozone is oxidized to nitrate ion, which it is extracted with ultrapure water and analyzed for ion chromatography, by seen proportional to the concentration existing in the sampling point.

The results of validation from field tests indicate a excellent correlation between the passive and the automatic method.

The higher superficial ozone concentrations are placed in rural zones, distanced of emission focus of primary pollutants (nitrogen oxides and volatile organic compounds...) principally in direction southwest and northwest of the Comunidad of Madrid.

**KEY WORDS:** Superficial ozone, health and passive sampler.

## 1. INTRODUCCIÓN

En 1993<sup>1</sup> desarrollan en la Universidad de Harvard, el muestreador pasivo para ozono Ogawa, basado en la impregnación de los filtros captadores con una solución de nitrito que al reaccionar con ozono pasa a nitrato, siendo este determinado posteriormente por cromatografía iónica. La determinación por cromatografía iónica es totalmente selectiva y sin interferencias.

Las ventajas del método de sistemas pasivos de ozono se basan esencialmente en el hecho de solventar las dificultades esenciales que manifiestan los instrumentos automáticos en continuo<sup>2</sup>. Algunas de sus características más conspicuas como son el bajo coste adquisitivo y analítico, la sencillez en su manipulación y la facilidad de transporte, así como la versatilidad de ubicación en el momento de localizarlos en los muestreos, hacen de los sistemas pasivos la herramienta idónea para la ejecución de estudios de base de detección de ozono superficial que abarquen grandes áreas espaciales (en el ámbito provincial o regional)<sup>3</sup>.

En los últimos años se está difundiendo el uso de los muestreadores pasivos para la evaluación de la exposición personal<sup>4</sup>, exposiciones en ambientes interiores<sup>5</sup> y evaluación ambiental<sup>6,7</sup>.

### FUNDAMENTO DE LOS SISTEMAS PASIVOS

Los muestreadores pasivos para la captación de gases se rigen por la Ley de Fick<sup>8</sup> que relaciona el flujo de un gas que difunde desde una región de alta concentración (extremo abierto del tubo), con el tiempo de exposición y el área del captador, que está expuesto al contaminante.

La base de los muestreadores pasivos para captación de gases es la primera Ley de Fick, siendo ésta:

$$F = D \frac{[O_3]}{L} \quad (I)$$

siendo:

- F Flujo de ozono, en moles por centímetro cuadrado y minutos (moles / cm<sup>2</sup>·min)
- D Coeficiente de difusión del gas, en centímetros cuadrados por minuto (cm<sup>2</sup> / min)
- [O<sub>3</sub>] Concentración ambiental de ozono, en moles por centímetro cúbico (moles / cm<sup>3</sup>)
- L Longitud de la zona de difusión, en centímetros (cm)

El captador de ozono posee forma cilíndrica, con un área *a* (cm<sup>2</sup>) y una longitud *L* (cm). En estas condiciones, la cantidad de gas, *Q*, que difunde a través del tubo por unidad de tiempo es:

$$Q = F \cdot a \cdot t$$

Sustituyendo el valor de *F* de la expresión (I)

$$Q = D \frac{[O_3]}{L} \cdot a \cdot t \quad (II)$$

Teniendo en cuenta que el coeficiente de captación, *S* (cm<sup>3</sup> / min) es:

$$S = \frac{D \cdot a}{L}$$

Sustituyéndola en la ecuación (II) se obtiene:

$$Q = S \cdot [O_3] \cdot t$$

y despejando

$$[O_3] = \frac{Q}{S \cdot t} \quad (III)$$

### CÁLCULOS

Para el cálculo de la concentración de ozono ambiental, es necesario conocer el valor del coeficiente de captación, *S*, el cuál se obtiene a partir de un analizador automático, según la expresión:

$$S = \frac{Q}{[O_3] \cdot t} \quad (IV)$$

donde:

El tiempo de muestreo, *t*, está expresado en minutos (min)

La cantidad, *Q*, de moles de ozono, se obtiene a partir de los moles de nitrato, obtenidos por cromatografía iónica, de este modo se puede poner que:

$$Q_{NO_3} = \frac{[NO_3] \cdot V_{ext}}{PM_{NO_3}}$$

siendo:

- Q*<sub>NO<sub>3</sub></sub> los moles de nitrato que se han determinado (moles)
- [NO<sub>3</sub>] la concentración de nitrato determinado, en microgramos por mililitro (mg / ml)
- V*<sub>ext</sub> el volumen de extracción de la muestra, en mililitros (ml)
- PM*<sub>NO<sub>3</sub></sub> el peso molecular del ión nitrato (62,10<sup>6</sup> mg/mol)

Sustituyendo en la ecuación (IV), tenemos:

$$S = \frac{[NO_3] \cdot V_{ext}}{PM_{NO_3} \cdot [O_3] \cdot t} \quad (V)$$

Conocido el valor del coeficiente de captación, *S* (cm<sup>3</sup>/min), el cálculo de la concentración de ozono ambiental, *C*, expresado en ppb, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$C = \frac{[\text{NO}_3] \cdot V_{\text{ext}}}{\text{PM}_{\text{NO}_3} \cdot S \cdot t \cdot k}$$

siendo

k constante molar de ozono, expresada en moles por litro (mol / l), en las condiciones ambientales de presión y temperatura.

## FINALIDAD DEL ESTUDIO

Frente a las nuevas técnicas en desarrollo de análisis de contaminantes fotoquímicos en Europa por sistemas pasivos, accesorias a las metodologías automáticas, se pretendió llevar a cabo la elaboración de un mapa de riesgo sanitario y medioambiental del ozono superficial en la Comunidad de Madrid, evaluando los potenciales efectos que pudieran devenir sobre la salud de la población expuesta. Para su confección, se resumen a continuación, las actuaciones propuestas como objetivos principales del estudio:

1. Desarrollo de la metodología de sistemas pasivos, como método de medida de contaminantes nocivos para la salud humana (ozono...), basada en el uso de muestreadores pasivos, al objeto de cubrir amplias áreas de muestreo.
2. Contrastación empírica de la técnica de muestreadores pasivos con la metodología automática de análisis de gases con el fin de ponderar su eficiencia, dadas las ventajas de su empleo en la acción del proyecto.
3. Desarrollo de campañas de medición durante los periodos de mayor actividad fotoquímica (de mayo a septiembre) en la Comunidad de Madrid, con el objeto de obtener los datos necesarios para elaborar un mapa regional en el que queden reflejados los distintos niveles de las concentraciones de ozono, significativamente perjudiciales para la salud y la vegetación.
4. Identificación de las posibles *zonas calientes* que para el ozono superficial se revelen en la Comunidad de Madrid, atendiendo a los criterios del Real Decreto 1494/1995, de 8 de septiembre.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. TÉCNICA ANALÍTICA

Los muestreadores pasivos para ozono constan de un cuerpo polimérico cilíndrico (de 2 cm de diámetro x 3 cm de longitud) y un broche dentado (4 x 3 cm)<sup>9</sup>. Presenta dos cavidades en los extremos del cilindro, cada una de las cuales custodiará entre dos rejillas de acero inoxidable un filtro impregnado con una disolución de nitrato sódico, carbonato potásico y glicerol. Las cápsulas de difusión cubren y fijan los

filtros y las rejillas. Previo al ensayo, el muestreador ensamblado es sellado con una bolsa de plástico autocerrable dentro de una botella de poliestireno.

Excepto durante la exposición en el muestreo, todos los muestreadores están contenidos en las bolsas de autocierre dentro de las botellas.

Los muestreadores expuestos y los vacíos son ensamblados y desensamblados en una cámara hermética de manipulación, en la que se hace recircular en continuo aire libre de contaminantes, pasando en serie por cartuchos de adsorción de contaminantes.

Los dos filtros impregnados de cada tubo, una vez empleados en el muestreo, serán sometidos a un proceso de extracción con agua ultrapura por ultrasonidos con el objeto de proceder posteriormente a su análisis por cromatografía iónica, para determinar la concentración de nitrato.

#### 2.1.1. IMPREGNACIÓN DE LOS FILTROS

Se emplearon, para la captación de ozono troposférico, filtros de fibra de vidrio Schleicher & Schuell de 14 mm de diámetro y grado 30.

La disolución impregnadora es una disolución 0,24 M de NO<sub>2</sub>Na con carbonato potásico y glicerol, la cuál se almacena en cámara frigorífica hasta su uso.

La impregnación se lleva a cabo en una cámara de metacrilato (libre de contaminantes) con 100 ml de disolución de impregnación utilizando una micropipeta.

#### 2.1.2.- ENSAMBLAJE Y DESENSAMBLAJE

Se empleo una cámara de metacrilato para el ensamblaje y desensamblaje de los muestreadores.

Los filtros una vez desensamblados, son más estables cuando son almacenados secos en unos viales de extracción.

#### 2.1.3. EXTRACCIÓN DE FILTROS

La extracción se llevó a cabo con 10 ml de agua, calidad Mili-Q, mediante baño de ultrasonidos durante un periodo de 20 minutos, inmediatamente antes del análisis por cromatografía iónica.

#### 2.1.4. DETERMINACIÓN POR CROMATOGRAFÍA IÓNICA

Para el análisis del nitrato procedente de la oxidación del nitrito por la acción oxidante del ozono se utilizó un cromatógrafo iónico Dionex mod. 4000i con inyector automático. Como disolución eluyente se ha utilizado una disolución 0,27 mM de CO<sub>3</sub>Na<sub>2</sub> y

0,3 mM de  $\text{CO}_3\text{HNa}$  y como disolución regenerante, disolución 25 mN de  $\text{SO}_4\text{H}_2$ . El caudal de elución ha sido de 1,9 ml / min. La columna separadora utilizada ha sido una ICN PAC AS12A y la columna supresora una AMMS-11 de membrana.

## 2.2. PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA EN LA COMUNIDAD DE MADRID

### 2.2.1. PUNTOS DE MUESTREO

Para la ubicación de los muestreadores pasivos en sus respectivos puntos de muestreo se tuvieron en cuenta los siguientes criterios, a fin de ser representativos del emplazamiento.

1. Los muestreadores se colocaron lejos de fuentes locales de óxidos de nitrógeno (tales como camiones, autobuses, automóviles, u otros ingenios de combustión interna), los cuales harían decrecer las concentraciones de ozono por debajo de la concentración ambiental general en el área de muestreo.
2. Los muestreadores fueron situados lo suficientemente lejos de barreras u otras superficies que reduzcan la concentración de ozono en las proximidades del muestreador. Generalmente una distancia adecuada es de 20 cm o más desde superficies verticales y entre 1,5 y 2 m desde el suelo.
3. El muestreador se colocó en el interior de una cubierta protectora previniendo el contacto con la lluvia y actuando también como barrera del viento, para estabilizar la velocidad de captación.

La selección de los puntos de muestreo se llevó a cabo atendiendo a criterios geomorfológicos y sanitarios del área de la Comunidad de Madrid.

Conforme a estas premisas, en la primera campaña, del año 1999, fueron seleccionados 24 puntos de muestreo, en zonas urbanas, suburbanas y rurales, abarcando casi la superficie total de la Comunidad de Madrid.

La distribución de los puntos de muestreo corresponde como sigue:

- Áreas rurales: 12 puntos de muestreo.
- Áreas suburbanas: 10 puntos de muestreo.
- Áreas urbanas: 2 puntos de muestreo.

Para la campaña del año 2000, se ampliaron a 31, los puntos de muestreo, manteniéndose los de la campaña de 1999, siendo su distribución:

- Áreas rurales: 19 puntos de muestreo
- Áreas suburbanas: 10 puntos de muestreo
- Áreas urbanas: 2 puntos de muestreo

### 2.2.2. PERIODO Y FRECUENCIA DE MUESTREO

Se consideró conveniente la ejecución de periodos de muestreo de dos semanas de duración por cada punto entre los meses de mayo a septiembre, periodo este de mayor actividad fotoquímica en la Comunidad de Madrid, ampliando el periodo de 3 meses de la propuesta de la Directiva Hija (mayo-julio).

## 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para los objetivos previstos en el proyecto se relacionan a continuación:

### 3.1. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE SISTEMAS PASIVOS

#### 3.1.1. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MÉTODO

- *Validación de la técnica de cromatografía iónica para determinaciones de nitratos*

En las condiciones de operación mencionadas en el apartado 2.1.4., para la determinación del ión nitrato, mediante la técnica de cromatografía iónica, se han obtenido los siguientes parámetros estadísticos:

Exactitud:	8,44 %
Precisión:	1,20 %
Incertidumbre:	0,04 mg N / l (k=2)
Límite de detección:	0,08 mg N / l

La determinación de nitrato, por cromatografía iónica, es la misma que la que se utiliza en el laboratorio para la determinación de nitrato en precipitación. Esta metodología está acreditada por ENAC, mediante acreditación 223/LE460 de 7 de julio de 2000.

- *Precisión y exactitud de la determinación mediante sistemas pasivos*

El cálculo de exactitud y precisión, para el sistema pasivo, se calcula con los datos, de ambas campañas, utilizando como referencia, los resultados obtenidos por absorción U.V. (metodología acreditada por ENAC, 223/LE460 de 7 de julio de 2000). Los valores obtenidos son:

Exactitud:	9,55 %
Precisión:	5,53 %

#### 3.1.2. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CAPTACIÓN EXPERIMENTAL

Los datos correspondientes al coeficiente de captación experimental ( $S$ ,  $\text{cm}^3/\text{min}$ ), para la campaña de 1.999 y la campaña de 2.000 se presentan en las **Tablas 1 y 2**, respectivamente.

El valor promedio del coeficiente de captación ( $S$ ), correspondiente a la campaña de 1.999 y de 2.000. es 18,12  $\text{cm}^3/\text{min}$ .

**Tabla 1: Valores quincenales del coeficiente de captación experimental (cm<sup>3</sup>/min) para el periodo de estudio mayo - septiembre de 1.999**

MES	QUINCENA	COEF. DE CAPTACIÓN EXPERIMENTAL (cm <sup>3</sup> /min)
MAYO	Primera	16,37
	Segunda	14,07
JUNIO	Primera	17,15
	Segunda	21,28
JULIO	Primera	21,10
	Segunda	18,99
AGOSTO	Primera	17,81
	Segunda	18,57
SEPTIEMBRE	Primera	18,35
	Segunda	14,44

**Tabla 2: Valores quincenales del coeficiente de captación experimental para el periodo de estudio mayo - septiembre de 2.000**

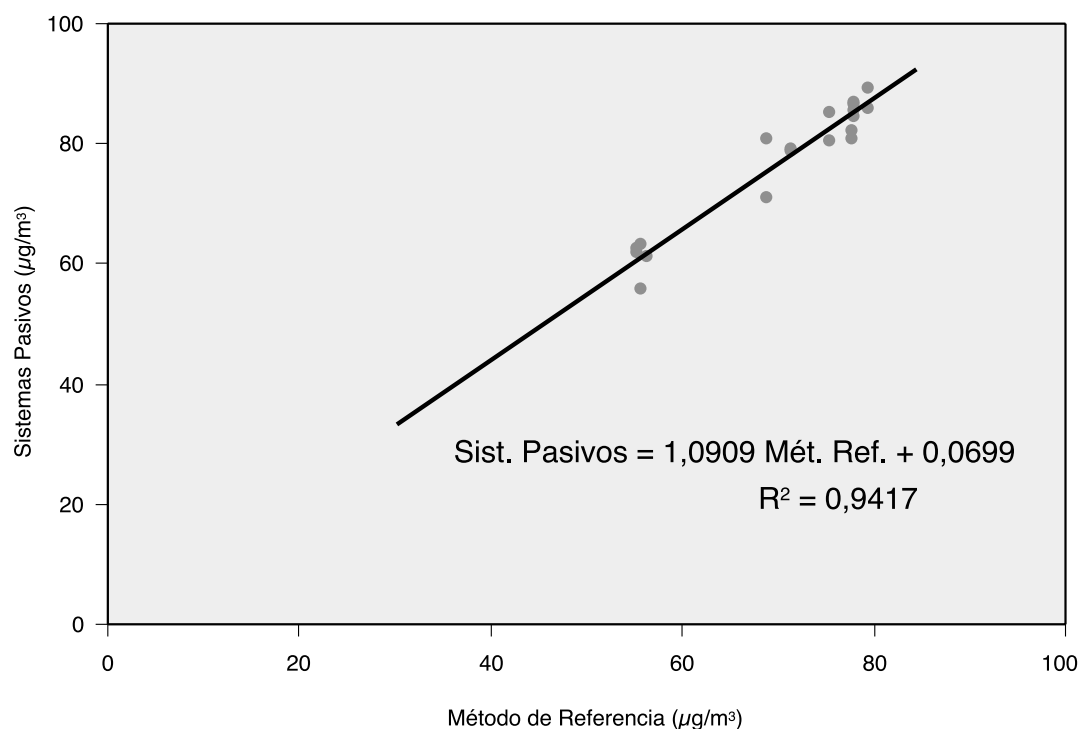
MES	QUINCENA	COEF. DE CAPTACIÓN EXPERIMENTAL (cm <sup>3</sup> /min)
MAYO	Primera	17,08
	Segunda	18,14
JUNIO	Primera	19,12
	Segunda	21,55
JULIO	Primera	18,11
	Segunda	18,02
AGOSTO	Primera	19,25
	Segunda	18,60
SEPTIEMBRE	Primera	17,37
	Segunda	17,13

### 3.2. COMPARACIÓN CON ANALIZADOS AUTOMÁTICOS

A fin de estudiar la correlación de los sistemas pasivos con el método de referencia, en la estación ubicada en Majadahonda, perteneciente al Instituto

de Salud Carlos III, se pusieron dos captadores pasivos en el techo de la estación donde se analiza el ozono por absorción ultravioleta. La regresión obtenida entre ambos métodos se muestra en la **Figura 1** (para la campaña de 2.000)

**Figura 1: Regresión entre Sistemas Pasivos y el Método de Referencia. Campaña de 2.000**



**3.3. RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS**

En las **Tablas 3 y 4** se presentan los datos de concentraciones de ozono (µg/m<sup>3</sup>) correspondientes a la campaña de 1.999 y 2.000, respectivamente.

**3.3.1. Tablas de concentraciones de ozono por campaña**

**Tabla 3: Concentraciones de ozono (µg/m<sup>3</sup>). Campaña de 1.999 (mayo – septiembre).**

PUNTO DE MUESTREO	MAYO 1ª QUINC.	MAYO 2ª QUINC.	JUNIO 1ª QUINC.	JUNIO 2ª QUINC.	JULIO 1ª QUINC.	JULIO 2ª QUINC.	AGOSTO 1ª QUINC.	AGOSTO 2ª QUINC.	SEPTIEMB. 1ª QUINC.	SEPTIEMB. 2ª QUINC.	PROMEDIO
Majadahonda	68	72	78	82	90	98	70	84	62	56	76
Sinesio Delgado	50	62	48	70	68	76	64	64	46	50	60
Leganés	70	56	50	60	60	62	54	48	46	36	50
Getafe	42	52	52	38	54	60	44	42	52	28	46
Fuenlabrada	56	64	62	68	72	76	68	68	56	60	64
Móstoles	50	64	66	66	68	72	62	60	54	52	62
Alcorcón	60	62	58	64	62	72	64	62	32	54	60
Alcobendas	42	52	48	66	78	86	60	60	62	38	60
Coslada	*	64	56	74	78	84	64	62	56	44	64
Torrejón de Ardoz	42	50	56	58	58	62	48	48	46	30	50
Alcalá de Henares	50	54	56	68	56	76	62	56	54	48	58
Villamanrique del Tajo	*	74	82	78	76	82	54	58	70	60	70
Talamanca del Jarama	*	82	76	88	84	74	78	82	78	58	78
Hayedo de Montejo	64	96	72	70	54	70	60	74	64	66	68
Rascafría	24	94	50	70	68	78	66	76	70	74	66
Horcajuelo	98	137	107	111	113	133	105	117	115	111	115
Manzanares el Real	52	107	74	96	86	113	86	98	92	76	88
Los Molinos	48	109	80	94	78	113	86	100	98	80	88
Robledo de Chavela	80	115	80	101	101	127	101	103	113	96	101
Chapinería	50	96	88	101	103	125	98	107	101	60	94
Navalcarnero	74	105	70	90	34	105	82	96	86	70	82
Pl. Elíptica	40	62	38	60	58	64	58	52	52	40	52
Aranjuez	58	64	68	70	66	68	56	52	58	60	62
Cubas de la Sagra	*	80	56	84	88	96	86	82	76	46	78

Leyenda: \* No se puso muestra

**Tabla 4: Concentraciones de ozono ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Campaña de 2.000 (mayo – septiembre).**

PUNTO DE MUESTREO	MAYO 1ª QUINC.	MAYO 2ª QUINC.	JUNIO 1ª QUINC.	JUNIO 2ª QUINC.	JULIO 1ª QUINC.	JULIO 2ª QUINC.	AGOSTO 1ª QUINC.	AGOSTO 2ª QUINC.	SEPTIEMB. 1ª QUINC.	SEPTIEMB. 2ª QUINC.	PROMEDIO
Majadahonda	60	62	76	86	82	80	88	86	84	62	76
Sinesio Delgado	54	40	66	66	68	72	*	68	64	52	60
Leganés	50	46	48	64	70	66	68	66	72	52	60
Getafe	54	46	68	72	74	74	70	72	80	54	66
Fuenlabrada	*	*	*	*	*	84	88	86	86	66	82
Móstoles	*	*	*	*	*	86	82	80	84	62	78
Alcorcón	48	42	48	58	62	64	56	66	54	46	54
Alcobendas	62	58	76	76	92	82	92	88	72	58	76
Coslada	52	40	64	64	72	66	68	68	54	46	60
Torrejón de Ardoz	40	30	54	52	58	52	56	54	50	36	48
Alcalá de Henares	62	50	66	70	78	74	54	78	82	54	68
Pezuela de las Torres	78	62	74	76	86	86	88	90	58	82	78
Arganda del Rey	*	50	66	68	72	74	70	68	58	54	64
Tielmes	66	62	78	72	74	76	76	68	60	66	70
Villamanrique del Tajo	74	64	78	68	66	58	64	52	60	56	64
Aranjuez	24	60	76	74	78	82	84	74	48	72	66
Fuente el Saz del Jarama	64	58	76	74	80	76	86	78	105	64	76
Talamanca del Jarama	64	54	74	68	78	72	82	76	66	64	70
El Atazar	90	78	94	92	103	101	111	111	103	101	100
Hayedo de Montejo	68	56	66	60	68	64	74	76	78	66	68
Gargantilla de Lozoya	92	74	94	90	98	92	105	103	90	101	96
Rascafría	70	54	66	62	74	64	74	78	64	68	68
Horcajuelo	*	*	107	100	111	101	125	117	105	115	109
Manzanares el Real	70	62	78	82	96	88	100	96	107	82	86
Los Molinos	*	72	84	80	88	101	88	94	101	88	90
San Lorenzo de El Escorial	92	86	107	92	109	78	131	107	127	115	105
Robledo de Chavela	88	72	98	96	96	90	86	103	117	101	94
Cadalso de los Vidrios	86	68	100	103	105	107	109	111	115	107	101
Chapinería	84	52	76	90	90	92	105	92	92	92	86
Navalcarnero	80	66	78	84	90	92	94	94	101	80	86
Pl. Elíptica	52	44	50	56	62	62	58	62	54	44	54

Legenda: \* No se puso muestra

### 3.3.2. MAPAS DE CONCENTRACIONES DE OZONO SUPERFICIAL

#### 3.3.2.1. ELECCIÓN DEL MÉTODO PARA LA REALIZACIÓN DE MAPAS DE CONCENTRACIONES DE OZONO

Para la realización de mapas de isóneas de concentraciones de ozono, se ha utilizado el programa informático *Surfer (Win 32) Versión 6.04*. Dicho programa dispone de un número determinado de opciones para la elaboración de mapas, las cuáles son:

- Regresión polinómica
- Interpolación triangular
- Curvatura mínima
- Proximidad al punto
- Inverso de la distancia al punto
- Kriging
- Método de Shepard
- Función básica radial

La elección del método, se realizó mediante la elaboración de mapas de isóneas de concentraciones de ozono, a partir de todos los métodos repre-

sentativos posibles, observándose que el método más representativo para la elaboración de mapas de isóneas de concentraciones de ozono es el método "*Función básica radial*".

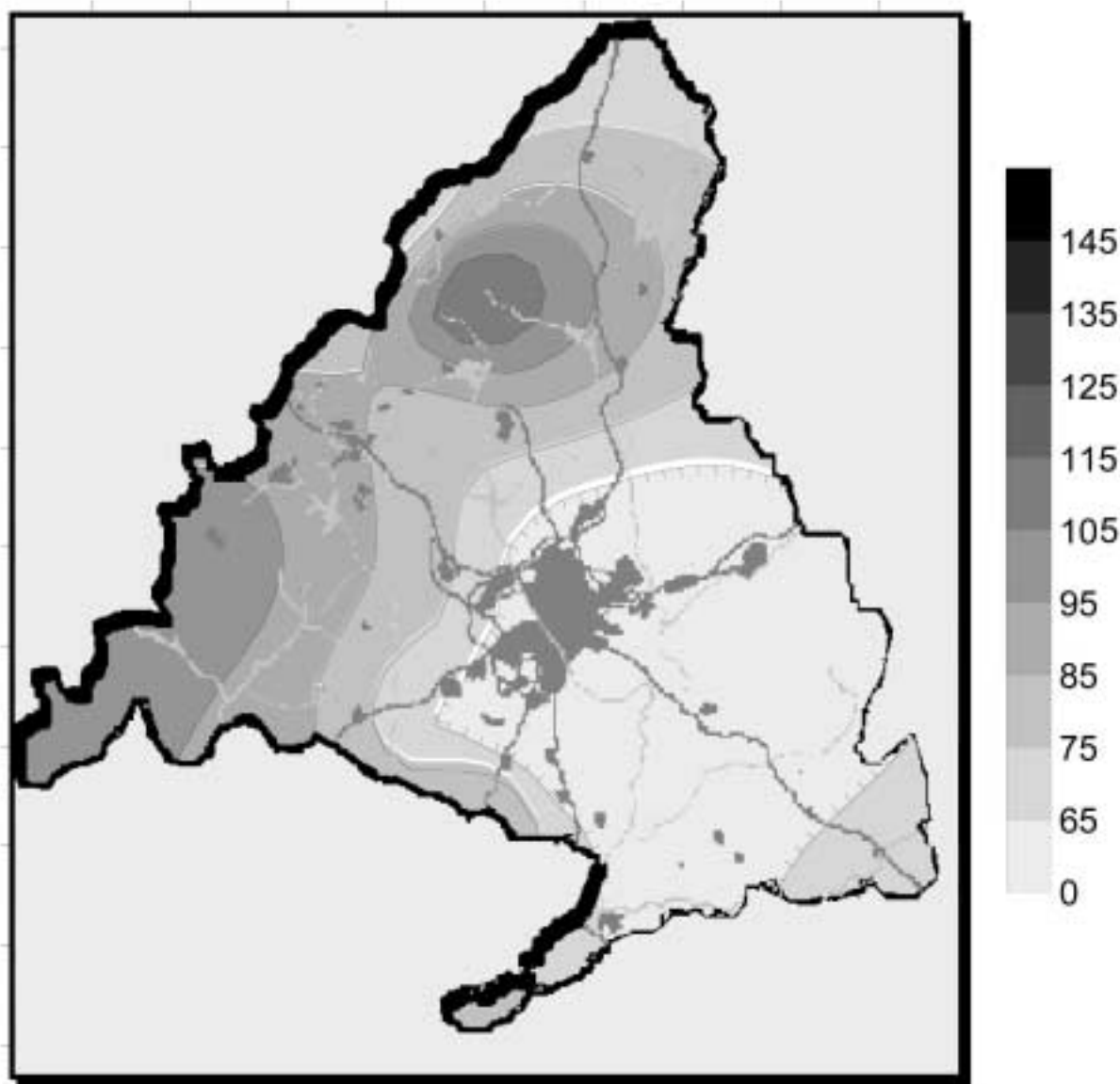
#### 3.3.2.2.- MAPAS 1999 Y MAPAS 2000

En las **Figuras 2 y 3**, aparecen los mapas de isóneas de concentraciones promedio de ozono correspondientes a la campaña de 1.999 y de 2.000.

## 4. DISCUSIÓN

Como consecuencia del presente estudio, para la Comunidad de Madrid pueden establecerse varias zonas, según la relación existente entre efectos sobre la salud humana y la vegetación, y los niveles de concentraciones de ozono.

Las menores concentraciones de ozono se localizan en la ciudad de Madrid, donde la salud humana y la vegetación no se verán afectadas.

**Figura 2: Mapa de isolíneas de concentraciones promedio de ozono para la campaña 1.999 (mayo – septiembre)**

Unidades:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Equidistancia entre isolíneas:  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

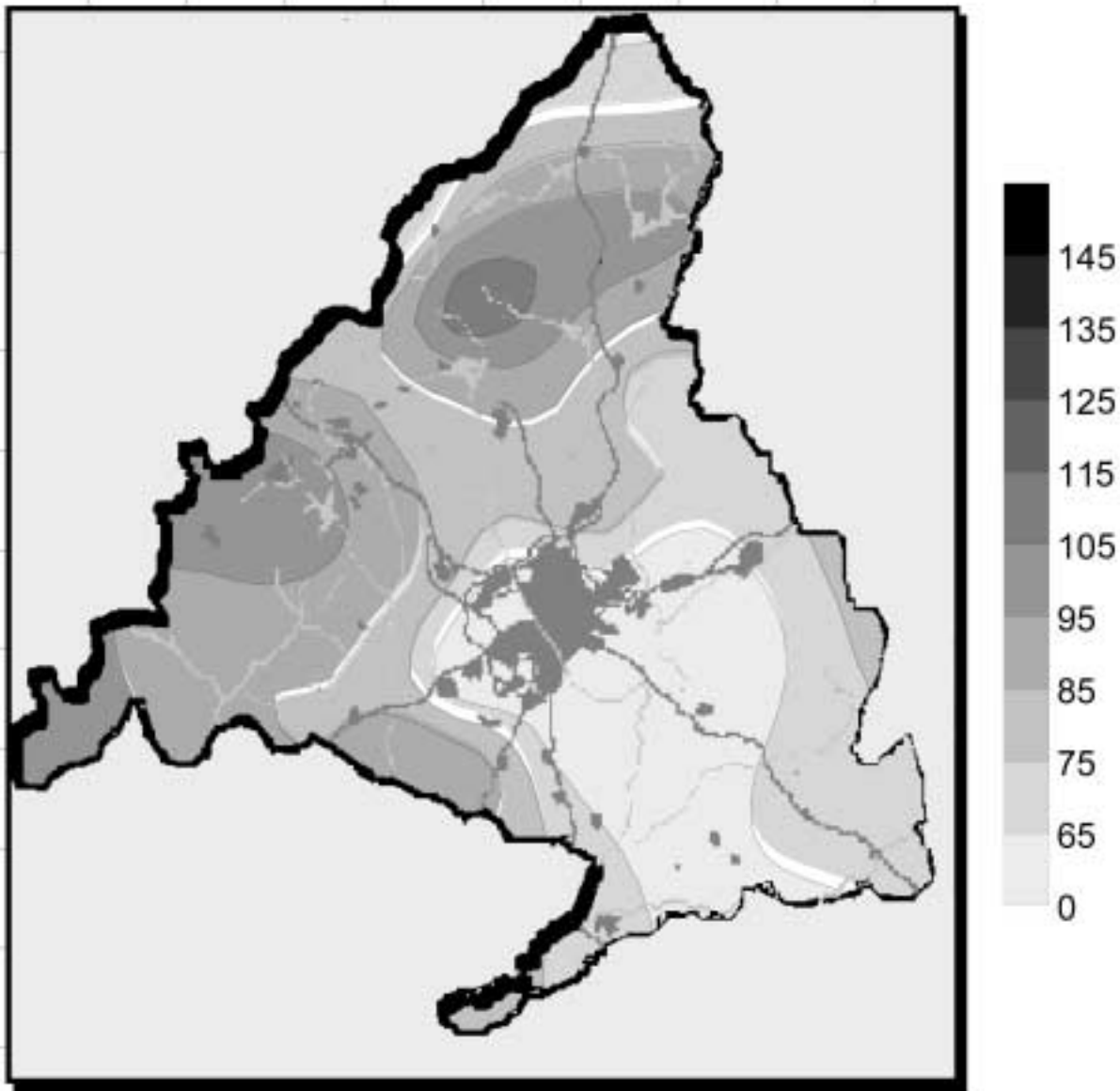
Hasta 20 km del Municipio de Madrid, al superarse el umbral de protección de la vegetación, según indica el Real Decreto 1494/1995 de 8 de septiembre ( $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como valor medio en 24 horas), ésta se verá afectada. Sin embargo, aunque el umbral de protección de la salud ( $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como valor medio en 8 horas) no se vea superado, al tratarse de valores promedios de 5 meses, época estival de ambas campañas, 1.999 y 2.000, respectivamente, y alcanzándose valores promedios máximos de  $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para esta zona (hasta 20 km de la ciudad de Madrid), resulta fácil entender que durante un margen horario del día, el umbral de protección de la salud se vea superado significativamente, viéndose afectado la salud humana, preferiblemente en dirección oeste.

Los mayores niveles de concentraciones de ozono se encuentran ubicados en la zona norte y oeste de la Comunidad de Madrid (desde el punto ubicado más al norte, Hayedo de Montejo, hasta el punto ubicado más al suroeste, Cadalso de los Vidrios), donde la salud y la vegetación se ven afectados, puesto que los umbrales de protección de la salud y de la vegetación se ven superados notablemente.

Por ello, se identifican como puntos críticos de ozono, la zona suroeste y noroeste de la Comunidad de Madrid, donde debería extremarse la vigilancia de los niveles de ozono en aire ambiente y la realización de estudios epidemiológicos.

Las reacciones de formación de ozono no son inmediatas, sino que necesitan un determinado



**Figura 3: Mapa de isolíneas de concentraciones promedio de ozono para la campaña 2.000 (mayo-septiembre)**

Unidades:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Equidistancia entre isolíneas:  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

tiempo para llevarse a cabo, y como consecuencia del carácter dinámico de la atmósfera, se deduce que las mayores concentraciones de ozono se ubican en zonas alejadas a los focos emisores de sus precursores (compuestos orgánico volátiles y óxidos de nitrógeno...)<sup>10, 11</sup>

Los resultados de campo, muestran una excelente correlación entre el método pasivo y el método automático, por tanto, el muestreo pasivo es una alternativa eficaz para la medición de concentraciones de ozono superficial en puntos geográficos donde la medida en continuo no sea factible<sup>12</sup>, así como una alternativa para tendencias futuras en el estudio de contaminantes atmosféricos<sup>13</sup>

#### BIBLIOGRAFÍA

1. Koutrakis P., Wolfson J. M., Bunyaviroch A., Froehlich S.E., Hirano K., and Mulik J.D. Measurement of ambient ozone using a nitrite-coated filter. *Analytical Chemistry* 1.993; 65.
2. Koutrakis P., Wolfson J. M., Bunyaviroch A., and Froehlich S.E. A passive ozone sampler based on a reaction with nitrite. *Res. Rep. Health Eff. Inst.*1993; 19-47.
3. Sally Liu L. J., Koutrakis P., Leech J. and Broder I. Assessment of ozone exposures in the greater metropolitan Toronto area. *J.Air Waste Manage. Assoc.*1995; 45, 223-34.
4. Geyh, A. S., Xue, J., Ozkaynak, H. and Spengler, J. D. The Harvard Southern California Chronic Ozone Exposure Study:Assesing ozone exposure of grade-school-

- age children in two southern California Communities. *Environ. Health Persp.* 2000; 108, 265-270.
5. Salman, L. G., Cass, G. R., Bruckman, K. and Haber, J. Ozone exposure inside museums in the historic central district of Krakow, Poland. *Atmosph. Environ.* 2000; 34, 3823-3832.
  6. Kruppa, S. V. and Legge, A. H. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective. *Envir. Poll.* 2000; 107, 31-45.
  7. Cooper, S. M. and Peterson, D. L. Spatial distribution of tropospheric ozone in western Washington. USA. *Envir. Poll.* 2000; 107, 339-347.
  8. Koutrakis, P., Wolfson, J.M., Bunyaviroch, A. and Froehlich S. Investigators' Report: A passive ozone sampler based on a reaction with nitrite. Health Effects Institute Research. Report Number 1994; 63, 19-47.
  9. Geyh, A.S., Xue, J., Özkaynak, H. and Spengler, J.D., The Harvard southern California chronic ozone exposure study: Assessing ozone exposure of grade-school-age children in two southern California communities. *Environmtal Health Perspectives*, 2000; 108, 265-270.
  10. Fernández Patier, R., Díez Hernández P., Díaz Ramiro, E., Bomboí Mingarro, M.T., García dos Santos-Alves, S. Formación del smog fotoquímico en la Comunidad de Madrid." *Ingeniería Municipal*, 1993; 22-25.
  11. Kalabokas, P.D., Viras, L. G., Bartzis, G. J., and Repapis, C.C. Mean rural ozone characteristics around the urban area of Athens. *Atmosph. Environ.* 2000; 34, 5199-5208.
  12. Manning, W. J., Krupa, S.V., Bergeweiles, C.J. and Nelson K.L. Ambient ozone (O<sub>3</sub>) in three class I wilderness areas in the northeastern USA: Measurements with Ogawa passive samplers. *Envir. Poll.* 1996; 3, 399-403.
  13. Levin, J.O. and Lindahl, R. Diffusive air sampling of reactive compounds. A review. *Analyst* 1994; 119, 79-83.