

## **Evolución del ozono en Burgos y provincia a partir de los datos de la red de medida de contaminación atmosférica**

**Autor principal:** Verónica Tricio Gómez

Institución: Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Burgos  
Teléfono: 947259527  
E-mail: vtricio@ubu.es

**Otros autores:** Ramón Vilorio (Universidad de Burgos); Alberto Minguito (Universidad de Burgos)

## RESUMEN

Entre los contaminantes presentes en el aire, el ozono despierta gran interés debido a sus efectos adversos sobre la salud humana y el ecosistema. Se trata de un oxidante fotoquímico que es un contaminante secundario porque no se vierte directamente a la atmósfera por el hombre sino que se genera en ésta a través de un complejo sistema de reacciones fotoquímicas. Las tendencias recientes muestran el interés de continuar ampliando las redes de medida de este contaminante y la legislación europea además de fijar unos valores objetivo para el ozono a largo plazo establece cómo y donde deben efectuarse las mediciones de los contaminantes.

Nuestro grupo, desde hace años viene realizando estudios de contaminación atmosférica y meteorología midiendo concentraciones de este contaminante en zonas tanto urbanas como rurales. En este trabajo, presentamos resultados de la evolución de ozono, para lo que hemos dispuesto de los datos de la red de contaminación atmosférica, estaciones de medida en inmisión, que el Gobierno de Castilla y León tiene instaladas en distintas ubicaciones de las ciudades de Burgos, Miranda de Ebro y Aranda de Duero.

La metodología aplicada en el proceso experimental se basa en los datos quinceminutales procedentes de las estaciones citadas; el estudio abarca un periodo temporal de los últimos cinco años, y se han realizado los siguientes trabajos: Con los datos experimentales disponibles de las estaciones de medida se han calculado valores estadísticos de las concentraciones del contaminante y de los parámetros meteorológicos más influyentes en aquéllas.

Los resultados que se presentan se han obtenido a partir de la determinación de los promedios horarios y diarios, los máximos y mínimos diarios en algún periodo temporal, y los promedios mensuales. Se ha evidenciado la influencia de los parámetros meteorológicos en los episodios de contaminación. Se ha comparado también con los valores objetivo y con ello tendremos una primera idea de la calidad del aire de un determinado lugar.

## ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Desde hace años está asumido que la contaminación del aire no solo representa un riesgo para la salud humana sino que también puede reducir la producción de alimentos y la recolección de madera pues los altos niveles de contaminación afectan la fotosíntesis. Y existen otros efectos como la lluvia ácida, la corrosión de los materiales, el cambio climático y el calentamiento global del planeta, por indicar alguno de los más representativos. Por tanto todos los esfuerzos que se hagan para su prevención, detección y estudio, supondrán una ayuda al mejor conocimiento de la problemática de la gravedad de los problemas de contaminación atmosférica. [7] La calidad del aire depende de la interacción entre una serie de factores naturales, tales como la climatología o la orografía, y de una serie de factores humanos como la densidad de población, el desarrollo industrial o los transportes, por lo que sigue siendo necesario detectar y analizar el fenómeno, legislar y poner remedio a los elevados niveles en la atmósfera de sustancias o energías perjudiciales.

Cada contaminante atmosférico presenta diferencias en el tiempo específico de exposición, la concentración dada y los efectos sobre la salud, la vegetación o los objetos. [3] Se conoce que las reacciones químicas entre los constituyentes mayoritarios

de la troposfera son prácticamente inexistentes; en cambio, la formación de muchas especies químicas activas bajo la influencia de la luz solar produce un rápido incremento de reacciones en cadena que desempeñan un papel muy importante en la presencia de trazas en la composición de la atmósfera.

Entre los contaminantes presentes en el aire, Hemos seleccionado el ozono como contaminante atmosférico representativo del estado de la atmósfera, [1], [3]. Es un contaminante inorgánico, cuyo origen principal es antropogénico por lo que presenta en general mayores posibilidades de control de sus emisiones. Se trata de un oxidante fotoquímico que es un contaminante secundario porque no se vierte directamente a la atmósfera sino que se genera en ésta a través de un complejo sistema de reacciones fotoquímicas. Ambientalmente despierta gran interés debido, por un lado a la formación de los radicales hidroxilo, y, por otro lado, por sus efectos adversos sobre la salud humana y el ecosistema. El ozono es entre los oxidantes fotoquímicos presentes en el aire el de mayor importancia, el mejor estudiado y cuyos efectos son mejor comprendidos

La concentración natural máxima del ozono sobre la superficie terrestre aparece referida entre límites de 0.010 y 0.040 ppmV, que reflejan distintas situaciones. Su concentración en áreas urbanas y en áreas rurales de continentes industrializados es muy superior a estos valores que son encontrados en regiones remotas apartadas de la actividad antropogénica, [3] [4] [5]. En los últimos años se ha observado un aumento en su concentración debido a la intensificación de actividades humanas (industriales, agrícolas, generación de energía, quemado de bosques...).

Si bien los parámetros meteorológicos influyen en los niveles de contaminación atmosférica, en la contaminación por ozono hay dos parámetros que son muy representativos de esa influencia: Radiación Solar, que participa directamente en las reacciones fotoquímicas que tienen lugar en la atmósfera; Temperatura, porque todas las reacciones químicas dependen en una u otra medida de la temperatura necesitando unas condiciones favorables de ésta para poder producirse.

Nuestro grupo, viene trabajando desde hace años en estudios de micrometeorología y contaminación atmosférica, enmarcados en la línea de investigación de Medio Ambiente Atmosférico, [6]. En particular realiza mediciones de las concentraciones de ozono troposférico y de variables meteorológicas en zonas tanto urbanas como rurales y semiurbanas; nuestro interés actual está centrado en los modelos de contaminación por ozono superficial [3], empezando a aplicar entre otras la técnica cluster para el agrupamiento de estaciones diferentes a las de este estudio y a realizar el análisis posterior de las variabilidades de concentración de ozono.

El objetivo general es el estudio del comportamiento de ozono troposférico en una provincia representativa de de la comunidad de Castilla y León, como es Burgos, [1] [3]. Los objetivos específicos de este trabajo son: el seguimiento de los valores de ozono en el caso urbano y en los alrededores de Burgos y otras ciudades, el análisis de la variación espacial y temporal que presenta el ozono en la provincia, la caracterización de las series temporales de este contaminante, la valoración de la calidad del aire relativo a la superación de los umbrales marcados por la legislación vigente y la relación entre los niveles de concentración de ozono y los parámetros meteorológicos de temperatura y radiación solar global.

## DATOS EXPERIMENTALES DE PARTIDA

En España las medidas que se realizan sistemáticamente suelen estar dentro de las ciudades fundamentalmente por el riesgo a la salud ocasionado por altos niveles de este contaminante atmosférico, [1]. Las tendencias recientes muestran el interés de continuar ampliando las redes de medida de este contaminante y la legislación europea además de fijar unos valores objetivo para el ozono a largo plazo establece cómo y donde deben efectuarse las mediciones de los contaminantes.

Desde hace varios años algunas entidades públicas, regionales y municipales han adoptado los principios del V programa marco de la Unión Europea y de la Conferencia de Río con la aplicación de directivas comunitarias, en concreto con las relacionadas con la calidad ambiental del aire de nuestras ciudades, [1]. [2] Muchas de las anteriores aplicaciones se encuentran plasmadas en la legislación que España, como miembro de la Comunidad Europea, debe cumplir (ver Directiva 96/62/CE de 27/9/96 sobre valoración y gestión de la calidad del aire ambiente).

La Junta de Castilla y León, (JCyL), a través de la Consejería de Medio Ambiente, inició en el año 1990 la instalación de una red de estaciones fijas, con la finalidad de llevar a cabo la vigilancia de la calidad del aire en diversas poblaciones de la Comunidad. [3] Actualmente la JCyL dispone de más de 30 estaciones de medida fijas en 16 municipios de la región castellano leonesa. Estas estaciones de medida en inmisión miden diferentes contaminantes y parámetros meteorológicos, pero no todas ofrecen el mismo conjunto de variables. Las medias diarias del día anterior de los diferentes contaminantes están disponibles a través de la página web de la Junta de Castilla y León [7].

En este contexto, la provincia de Burgos cuenta con varias estaciones fijas de medida en puntos concretos del casco urbano y de los alrededores de las ciudades seleccionados como lugares de monitorización de la contaminación en el ámbito urbano, donde se recogen datos de concentración de diversos contaminantes junto con algunos parámetros meteorológicos.

Para estudiar las concentraciones de ozono en estas áreas se han utilizado los registros de ocho estaciones de la Red de Vigilancia, con una base de datos correspondiente al período 2001-2005. Los datos experimentales son procedentes de las cuatro estaciones ubicadas en Burgos ciudad y de las estaciones ubicadas en dos ciudades de la provincia, tres en Miranda de Ebro y una en Aranda de Duero.

Las características generales de los lugares donde están instaladas las estaciones de medida son las siguientes:

Burgos. Ciudad del norte de España con una población cercana a los 170000 habitantes y una superficie municipal total aproximada de 107 km<sup>2</sup>. Las características geográficas medias de la ciudad de Burgos son altitud 854msnm, latitud (N) 42°20' y longitud (W) 3°42'. Disponemos de datos desde el mes de abril de 2001; las estaciones de medida situadas dentro de la ciudad podemos clasificarlas como urbanas.

- Estación nº 1 Nuestra Señora de Fátima (BU1). En esta estación las medidas de ozono no están operativas, sin embargo hemos utilizado las medidas de temperatura y radiación solar como valores representativos de la ciudad; disponemos de datos de la misma a partir de agosto de 2002.

- Estación nº 2 Facultad de Teología (BU2). Hemos utilizado las medidas de ozono de esta estación. Disponemos de datos hasta el mes de marzo de 2004.

- Estación nº 3 San Agustín (BU3). Hemos utilizado las medidas de ozono de esta estación. Disponemos de datos hasta el mes de mayo de 2002.

- Estación nº 4 Fuentes Blancas (BU4). Es una estación situada a las afueras de la ciudad en una zona verde, se trata de una zona semiurbana. Hemos utilizado las medidas de ozono, temperatura y radiación solar.

Miranda de Ebro. Está ubicada a 80 km al noreste de la provincia de Burgos, con una población de 47.664 habitantes. Las características geográficas medias de la ciudad son altitud 471 msnm, latitud (N) 42°41' y longitud (W) 2°56'. Disponemos de datos de la misma a partir de enero de 2003.

- Estación nº 1 Carretera Miranda Logroño (MI1). Hemos utilizado las medidas de ozono, temperatura y radiación solar de esta estación.

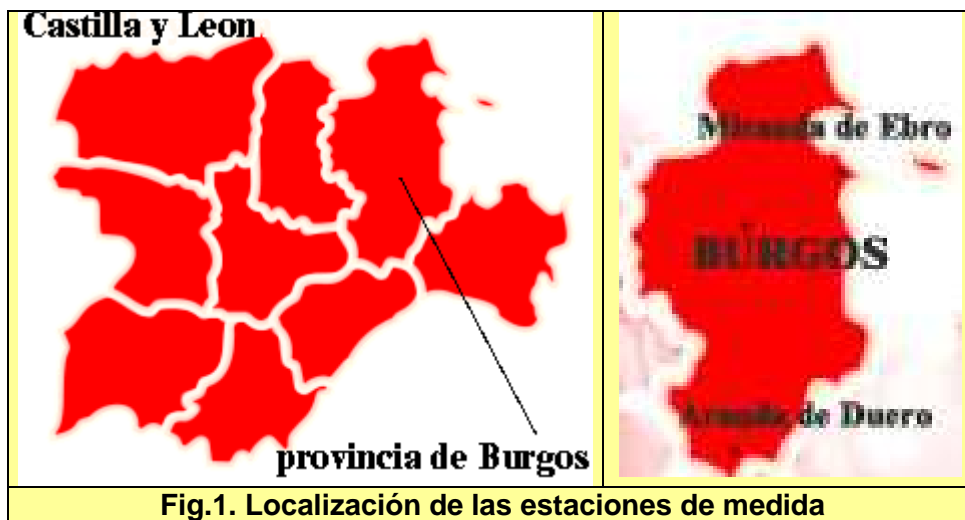
- Estación nº 2 Parque Antonio Cabezón (MI2). Hemos utilizado las medidas de ozono de esta estación.

- Estación nº 3 Antiguo Recinto Ferial (MI3). Hemos utilizado las medidas de ozono de esta estación. La estación de control de la calidad del aire de Miranda 3 se ha dado de baja, por lo que a partir del 4 de noviembre de 2003 no disponemos de datos.

Aranda de Duero. Ubicada al sur de la provincia de Burgos, es la tercera población en número de habitantes de la provincia, con 31.247 hab. Las características geográficas medias de la ciudad son altitud 798 msnm, latitud (N) 41°41' y longitud (W) 3°41'. Disponemos de datos de la misma a partir de enero de 2003.

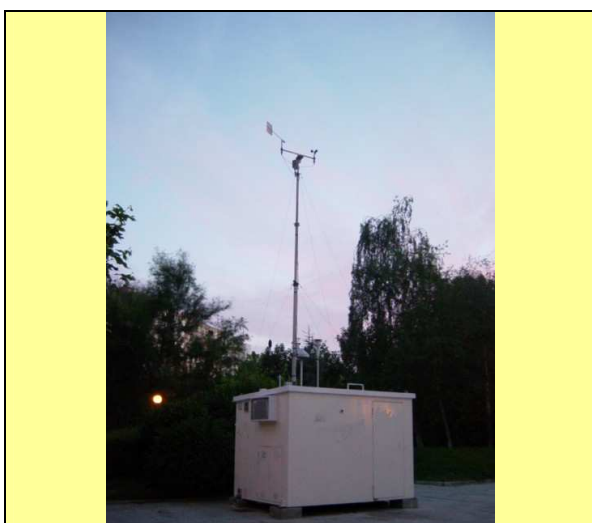
- Estación Jardines de Don Diego (AR1). Hemos utilizado las medidas de ozono, temperatura y radiación solar de esta estación.

La figura 1 muestra la situación geográfica de las estaciones de medida que hay en Burgos.



**Fig.1. Localización de las estaciones de medida**

La figura 2 es una fotografía de la estación BU1, ubicada en el casco urbano de Burgos.



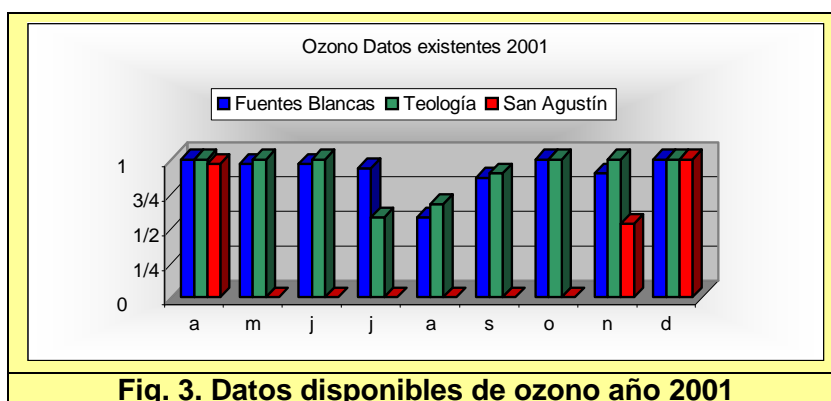
**Fig. 2. Una estación ubicada en Burgos**

En cada estación la medición se realiza con un aparato medidor de ozono, modelo 1008-RS de la casa comercial Dasibi Environment cuyo funcionamiento está basado en la técnica de medida de absorción espectroscópica de luz ultravioleta a 253.7 nm por el ozono. La concentración de ozono que se obtiene en la cámara de absorción se actualiza cada 10 s en la pantalla del aparato [8]. El rango de medida es: 0 - 1000 ppb. Este valor es la concentración de ozono de una muestra de aire representativa de la zona que rodea la estación de medida. Luego se transforma en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en condiciones normales (La legislación establece que las unidades deben estar referidas a 20°C y presión de 1

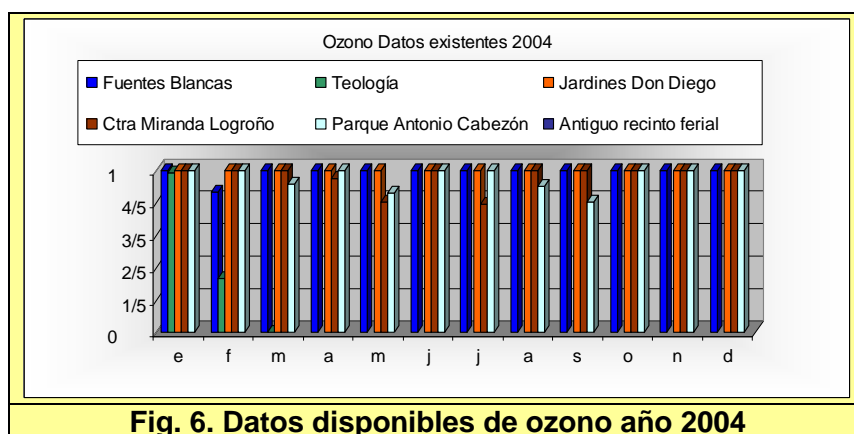
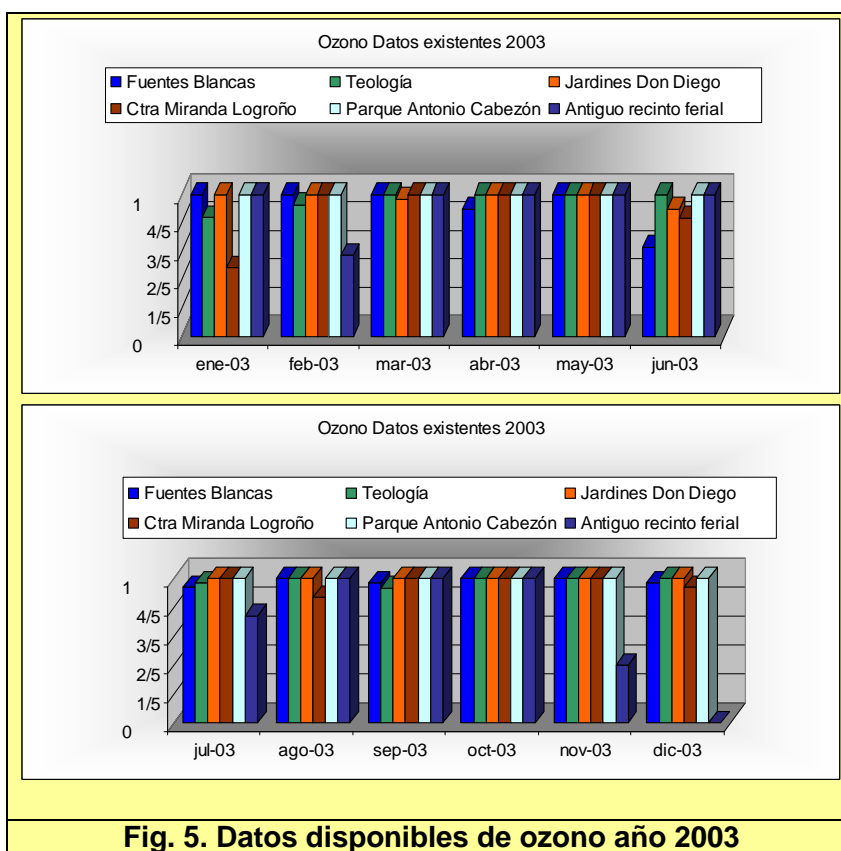
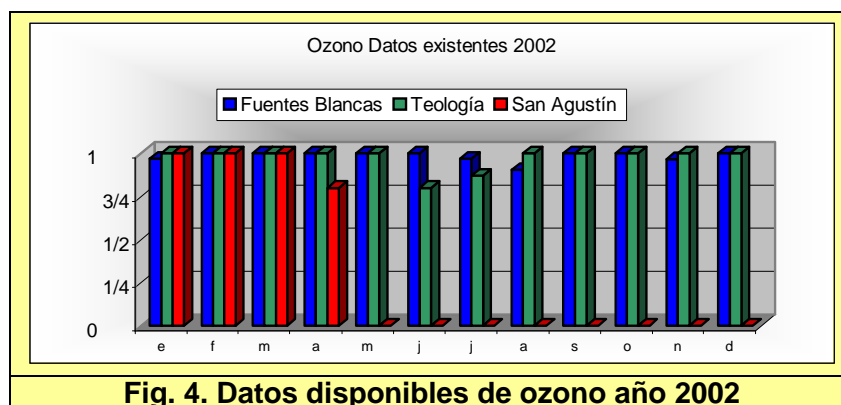
atm), multiplicando por el factor de conversión 1.997. Un programa informático elabora posteriormente una media con los valores registrados durante quince minutos.

La metodología aplicada en nuestro proceso experimental se basa en los datos quinceminutales de las estaciones citadas que nos han sido proporcionados por la Junta de Castilla y León, (Consejería de Medio Ambiente-Dirección General de Calidad Ambiental), [1]. Las unidades de las medidas proporcionadas vienen dadas, para las concentraciones del ozono en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y para los parámetros meteorológicos de temperatura ambiente seca y radiación solar global en °C y  $\text{W}/\text{m}^2$ , respectivamente.

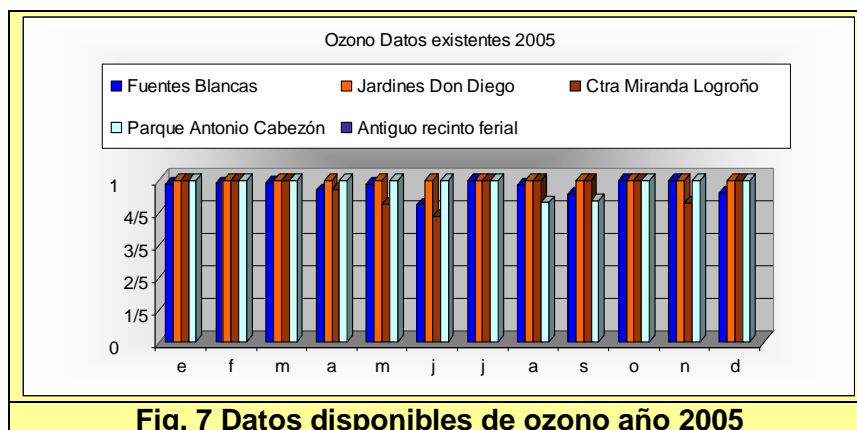
El periodo de este estudio abarca desde abril de 2001 hasta diciembre de 2005. Los datos de Burgos comienzan en el año 2001, aunque en algunas estaciones se han interrumpido las medidas por diferentes razones técnicas. Los datos de Aranda y Miranda comienzan en el año 2003. Los datos de todas las estaciones de medida están referidos a la hora solar aproximada. El número de datos reales de ozono, en tanto por ciento de las diferentes estaciones de medida de este contaminante, se muestran en las figuras de la 3 a la 7 siguientes.



**Fig. 3. Datos disponibles de ozono año 2001**







**Fig. 7 Datos disponibles de ozono año 2005**

En la figura 4 se aprecia que el porcentaje de datos de 2002 es muy superior a los existentes en el año anterior. Los datos disponibles del año 2003 y 2004 son los más completos de todo el periodo de estudio, durante este año el número de estaciones es el mayor y el de datos perdidos es el menor tal y como refleja las figuras 6 y 7, lo cual supone una ventaja y una mayor fiabilidad en los resultados. Los datos disponibles del año 2005 son los más completos para las estaciones operativas ese año.

#### **EL OZONO Y LA CALIDAD DEL AIRE**

Los efectos perjudiciales del ozono han llevado a la Organización Mundial de la Salud, (OMS), recomendar unos niveles guía basados en diversos estudios sobre exposición al ozono. Aunque se han recomendado diferentes valores en función del tiempo de exposición, la principal conclusión establece un valor guía de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por un periodo máximo de ocho horas/día como el nivel en el que los efectos agudos sobre la salud pública probablemente sean pequeños [9].

Los valores de la OMS fueron recogidos por la legislación, (RD 1494/1995), que establece una serie de valores umbrales para la concentración en la atmósfera de este contaminante. Los umbrales de protección de ozono ( $\text{O}_3$ ) se han recogido en la tabla 1. La expresión del volumen de dicha tabla debe referirse a las condiciones de temperatura y de presión 293 Kelvin y 101.3 kPa, respectivamente. La media a lo largo de ocho horas es de tipo móvil sin recuperación [10].

Tipo de umbral	Valor de umbral y referencia
Protección de la vegetación	$200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor medio en una hora
Protección de la vegetación	$65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor medio en veinticuatro horas
Protección de la salud	$110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor medio en ocho horas
Información a la población	$180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor medio en una hora
Alerta a la población	$360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor medio en una hora

**Tabla 1. Umbrales de protección de ozono**

Estos umbrales están siendo actualmente modificados por la legislación, según el RD 1796/2003. Los nuevos valores, valores objetivo y umbrales, están reflejados en la tabla 2 [11].



Tipo de umbral	Valor	Periodo de referencia
Información a la población	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio horario
Alerta a la población	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio horario. Para los planes de acción inmediata se evalúa durante 3 horas consecutivas.
Protección a la salud	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media móvil octohoraria sin recuperación máxima de cada día, no podrá superarse más de 25 días por cada año civil de promedio en un periodo de 3 años.
Protección a la vegetación	AOT40 = 6.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$	Valores horarios de mayo a julio.
Protección de los bosques	AOT40 = 20.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ h}$	Valores horarios de abril a septiembre
Daños a los materiales	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Año civil
La AOT40 (accumulated exposure over threshold 40 ppb) se calcula para el periodo de mayo a julio con las medias horarias de todos los días de 8:00 a 20:00. Media de la diferencia entre los valores mayores de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
<b>Tabla 2. Valores objetivo y umbrales de protección de ozono</b>		

## TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Con los datos experimentales disponibles de las estaciones de medida se han calculado valores estadísticos de las concentraciones del contaminante y los parámetros meteorológicos seleccionados. Se resume a continuación el procedimiento seguido, [3].

**1. Inventario de inmisiones:** a partir de la recopilación de los datos quinceminutales brutos, se realiza una sistemática de organización de datos con la siguiente secuencia:

- Biblioteca de datos brutos: se organizan éstos en ficheros anuales y mensuales, individualizados para cada estación de medida.
- Biblioteca de datos válidos: que se completa en dos etapas:
  - Selección de datos válidos: dentro de cada fichero con las variables de interés para este trabajo (ozono, temperatura y radiación solar) se eliminan los datos anómalos debidos a razones de mantenimiento, averías u otras de naturaleza desconocida.
  - Elaboración de nuevos ficheros: los datos válidos se organizan en ficheros mensuales, (DFM), agrupando dentro del mismo fichero los datos de las diferentes estaciones.

**2. Valores estadísticos:**

- Elaboración de medias en ficheros mensuales, (MFM): dentro de cada fichero, (DFM), se calculan las medias horarias, y a partir de ellos las diarias y mensuales de las variables de estudio. Asimismo se elaboran las medias octohorarias móviles de los datos de ozono troposférico según lo establecido en los RD 1494/1995 y 1796/2003.
- Elaboración de medias en ficheros anuales (MFA): las medias horarias, diarias y mensuales son extraídas de los ficheros mensuales para elaborar ficheros anuales de todo el intervalo de estudio, (MFA), de medias diarias y máximas y mínimas horarias así como para elaborar otros ficheros nuevos de medias horarias diarias.
- Las medias mensuales se han recogido en otro fichero agrupando todo el rango de datos y todas las estaciones, asimismo aquí se recogen las estimaciones de las medias anuales.

La tabla 3 muestra diferentes expresiones utilizadas para elaborar las distintas medias del procedimiento anteriormente citado. Aunque existen varias posibilidades de conseguir estas medias, nosotros utilizamos las indicadas en la tabla por ser la opción más aconsejable ya que la ausencia de datos puede falsear el resultado de las medias cuando se utilizan otros procedimientos de cálculo, [3].

Nombre	Símbolo / Intervalo	Para cada estación de medida
Datos válidos	$X_i$ cada hora	$i = 1, 2, 3, 4$
Medias horarias	$X_h, [h]_1^{24}$	$X_h = \sum_{i=1}^{n \leq 4} \frac{X_i}{n}$
Medias octohorarias	$X_o, [o]_1^4$	$X_o = \sum_{h=1}^8 \frac{X_h}{n}, \sum_{h=9}^{16} \frac{X_h}{n}, \sum_{h=13}^{20} \frac{X_h}{n}, \sum_{h=17}^{24} \frac{X_h}{n} \quad n \leq 8$
Medias diarias	$X_d, [d]_1^{365}$	$X_d = \sum_{i=1}^{n \leq 96} \frac{X_i}{n}$
Medias mensuales	$X_m, [m]_1^{12}$	$X_m = \sum_{i=1}^{n \leq 2976} \frac{X_i}{n}$
Media anual	$X_a$	$X_a = \sum_{d=1}^{n \leq 365} \frac{X_d}{n}, \quad X_a = \sum_{m=1}^{n \leq 12} \frac{X_m}{n}$
Medias horarias diarias	$X_{hd}, [hd]_1^{24}$	$X_{hd} = \sum_{i=1}^{n \leq 31} \frac{X_{h(1+24(n-1))}}{n}$
Máximas horarias	$X_{\text{máx}}$	$X_{\text{máx}} = \text{Valor máx}[X_h]$
Mínimas horarias	$X_{\text{mín}}$	$X_{\text{mín}} = \text{Valor mín}[X_h]$
<b>Tabla 3. Expresiones utilizadas</b>		

Con los datos transformados y organizados de esta manera se pueden cubrir, en primera aproximación, los diversos aspectos de relacionados con la dinámica de formación del ozono troposférico, tanto los efectos debidos a los ciclos fotoquímicos diarios como los que ejercen los fenómenos meteorológicos que tienen lugar en periodos de tiempo más largos, y sin olvidar al mismo tiempo los límites y valores umbrales que marca la legislación vigente.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL OZONO

Por el procedimiento indicado en el apartado anterior, se han determinado los valores de diferentes medias estadísticas tanto de las concentraciones de ozono como de los parámetros meteorológicos seleccionados, y se ha realizado un estudio sistemático del comportamiento del ozono durante el periodo de estudio. En este apartado presentaremos en gráficas y tablas algunos de los resultados significativos obtenidos. Para simplificar el análisis de la evolución del ozono, hemos clasificado los resultados de acuerdo al esquema que se muestra en la tabla 4.

Clasificación	Valores utilizados	Unidad de escala	Intervalo temporal
Evolución de las series mensuales	$X_m$ Media mensual	Meses del año	Todo el periodo de estudio
Evolución a lo largo del día	$X_{hd}$ Media diaria horaria	Horas del día	Por año, cada mes
*Máximos y mínimos diarios de ozono	$X_{máx}$ , $X_{mín}$ de $X_{hd}$ de día	Horas del día	Por año, cada mes
*Máximos y mínimos nocturnos de ozono	$X_{máx}$ , $X_{mín}$ de $X_{hd}$ de noche	Horas del día	Por año, cada mes
Evolución de las series diarias	$X_d$ Media diaria	Día del mes	Variable
Superaciones de los umbrales	Valor referencial de la legislación	Variable	Por año, durante el periodo de estudio
Evolución para altas concentraciones	$X_d$ , $X_{hd}$ , $X_o$ , $X_{máx}$	Variable	Periodos cortos

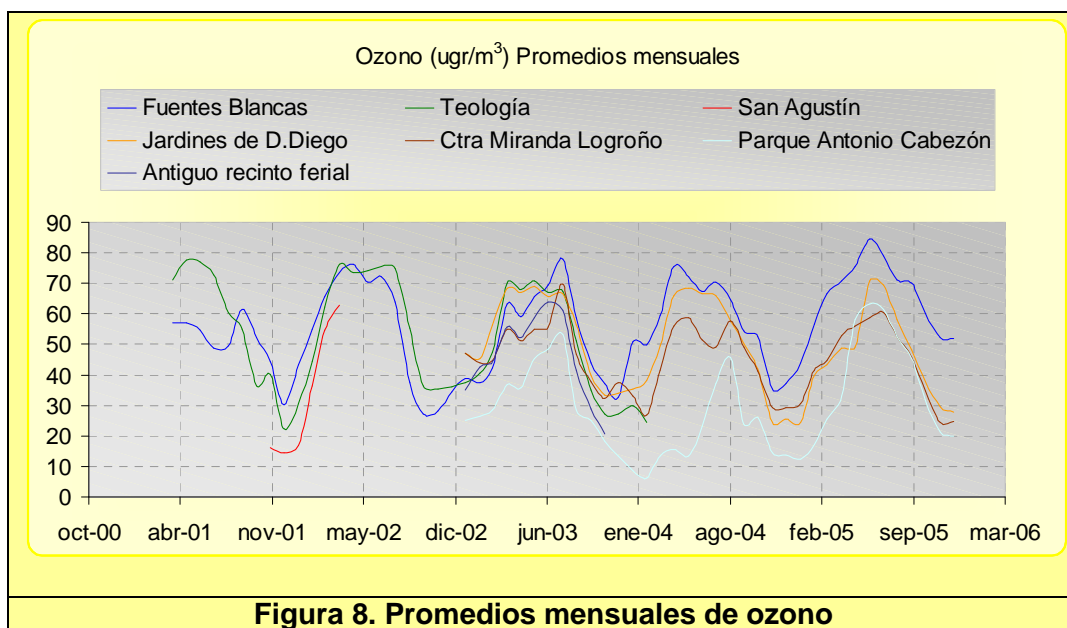
**Tabla 4. Tipología de resultados**

A continuación destacamos algunas situaciones y características de cada uno de los grupos de esta clasificación.

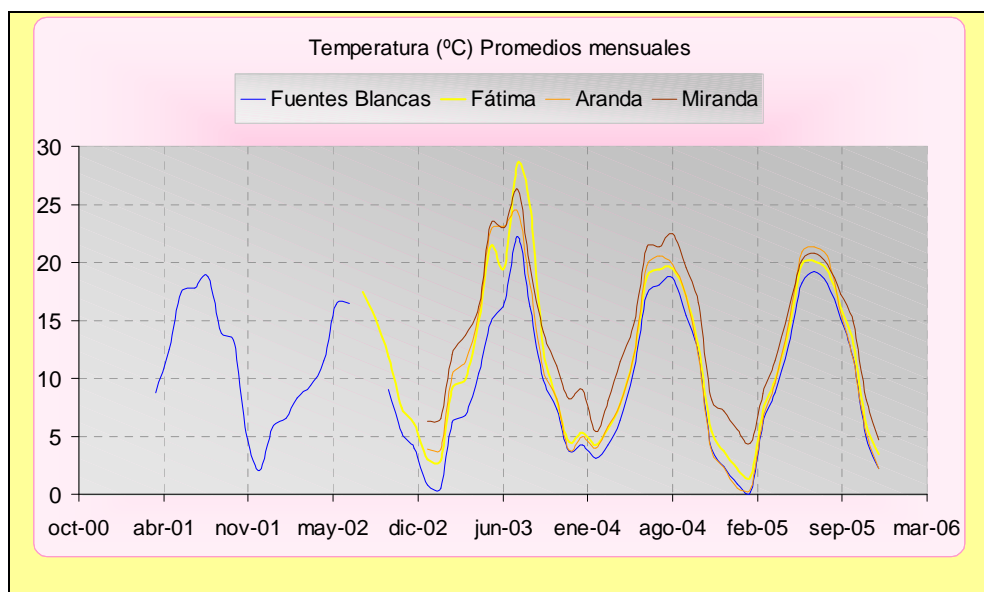
### Evolución del ozono en las series mensuales

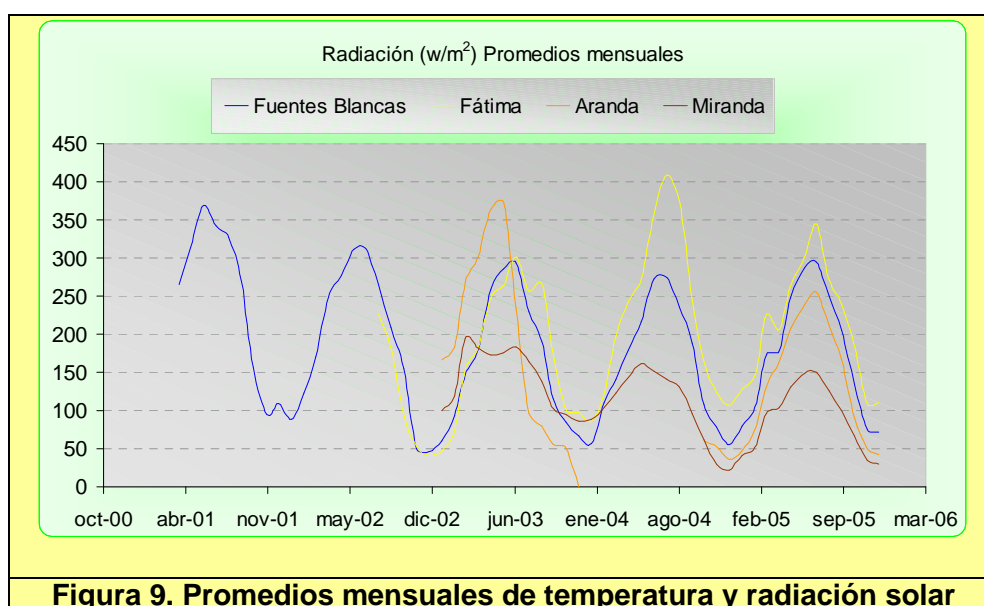
En general, la representación gráfica de las medias mensuales se utiliza para ver la evolución temporal de los contaminantes y de los parámetros a lo largo de los años. Las series temporales de los promedios mensuales de concentración de ozono se muestran en la figura 8 y de temperatura y radiación se muestran en la figura 9. Estas series se han elaborado, como ya hemos indicado, con el conjunto total de valores de los ficheros preparados para el intervalo temporal de nuestro estudio, [3].

Los resultados obtenidos para el ozono indican la existencia de periodos de mayores concentraciones centrados alrededor de los meses de primavera y verano. El valor más alto detectado se da en el mes de junio de 2005 para la estación BU4, con  $84.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Otros máximos relativos detectados en las otras estaciones se corresponden con: mayo de 2001, junio de 2005, agosto de 2003, junio de 2005 y julio de 2003, registrados en las estaciones BU2 (77.71), AR1 (70.73), MI1 (69.56), MI2 (63.17) y MI3 (63.81) respectivamente. Las concentraciones más bajas corresponden con el mes de febrero de 2004 y diciembre de 2001 para BU3 y MI2 con valores de 6.18 y 14.54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. El mínimo de la serie BU4 se localiza en octubre de 2002 con 27.03  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las siete series muestran perfiles muy similares localizándose la principal diferencia en la serie BU4 durante el año 2001 con un mínimo en julio de 48.87  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y un máximo en septiembre de 61.64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La serie MI2 presenta en general, niveles más bajos, con un mínimo relativo en mayo de 2004 de 13.43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , como se aprecia en la figura 8.





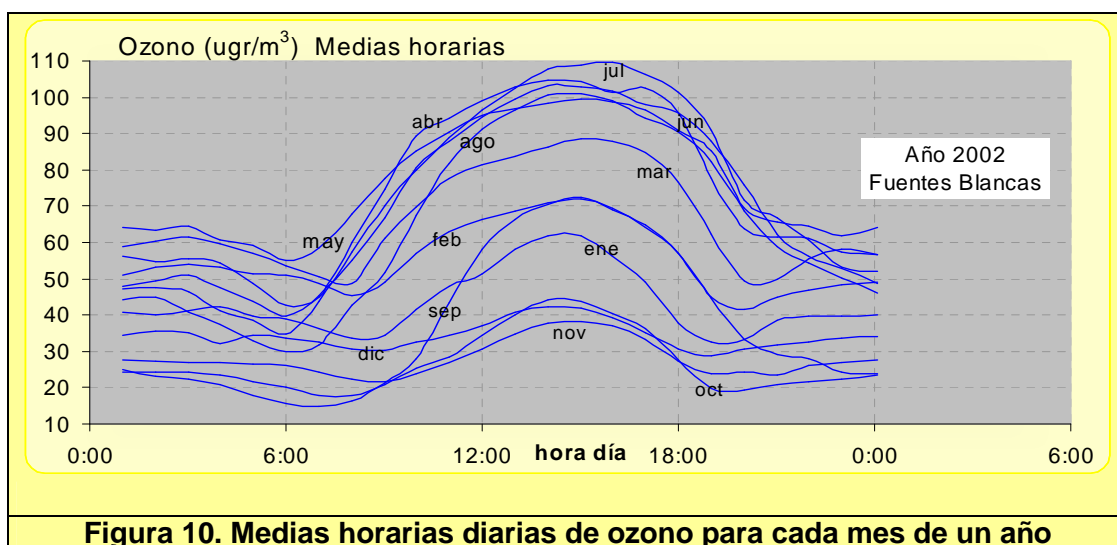
**Figura 9. Promedios mensuales de temperatura y radiación solar**

Los promedios mensuales de temperatura y radiación mostrados en la figura 9, toman sus valores más altos durante el verano, concretamente los mayores valores de temperatura se producen durante el mes de agosto en cada uno de los tres años correspondiendo el máximo absoluto de las series al año 2003 con temperaturas medias de 26.3 y 24.3 °C en Miranda y Aranda respectivamente, siendo ambos superados por los valores correspondientes a la estación BU4 con una temperatura media de 28.6 °C. Por otro lado los valores máximos de los promedios mensuales de radiación solar se han detectado en los meses de junio para el año 2001 y 2003 y en julio para los años 2002, 2004 y 2005. El máximo valor de radiación solar de todo el periodo de estudio, 409 w/m<sup>2</sup>, se alcanzó en julio de 2004 en la estación BU1. Los valores que le siguen son de junio de 2003 y 2001, con 373 w/m<sup>2</sup> y 370 w/m<sup>2</sup> para las estaciones AR1 y BU4 respectivamente.

A la vista de las figuras 8 y 9 se pueden establecer algunos paralelismos entre las tres variables seleccionadas, cada una de ellas presenta un ciclo anual con valores altos de las variables centrados alrededor de los meses de primavera y verano y valores más bajos alrededor del invierno, y aunque no existe una coincidencia exacta en la ubicación temporal de todos los valores extremos ni entre las diferentes variables ni generalmente en la propia variable a lo largo de los tres años, éstos se presentan siempre en meses próximos.

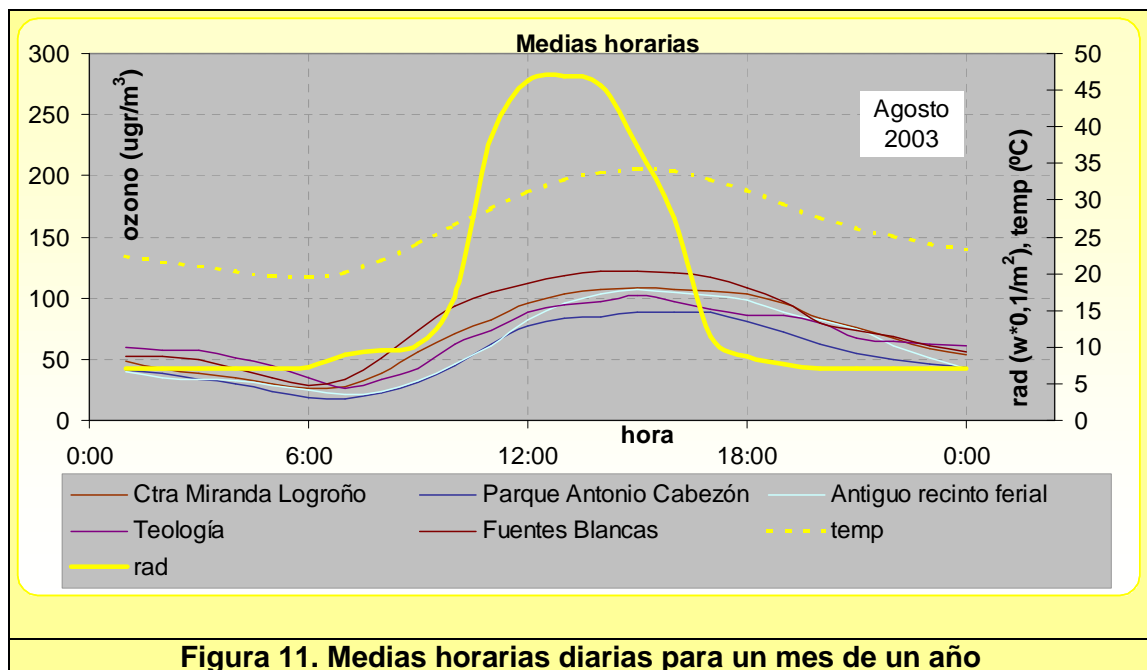
### **Evolución del ozono a lo largo del día**

Para ver esa evolución hemos representado anualmente los valores medios horarios promediados para cada mes de cada año entre la 1 y 24 horas. Este tipo de curvas nos permiten centrar la atención tanto en la evolución mensual y anual -que ya hemos observado a través de los promedios mensuales en la figura 8 y atribuible a factores meteorológicos- como en la evolución diaria, atribuible a factores fotoquímicos en determinadas condiciones meteorológicas.



Un comportamiento de esta evolución se muestra en la figura 10, obtenida para los valores de la estación BU4, que muestra alguna característica diferenciada del comportamiento “tipo” de estudios que abarcan intervalos temporales más largos. En dicha figura se observa una evolución media de las concentraciones de ozono a lo largo del día para cada mes del año 2002. La superposición en la misma gráfica de las diferentes curvas de los distintos meses nos ofrece también la posibilidad de observar la evolución mensual de las mismas; por ejemplo, en esa estación de medida los valores máximos se dan a las 15:00 para ocho de los doce meses del año.

En dicha gráfica se observa como la concentración de ozono varía a lo largo de los meses, y crece casi paulatinamente hasta alcanzar los máximos valores en julio (esto puede variar de unas estaciones a otras y de unos años a otros). Los meses de agosto, junio, incluso mayo y abril presentan perfiles muy similares. A continuación comienza a disminuir paulatinamente. Finalmente la menor concentración en BU4 se observa en octubre, mientras que en las otras estaciones los valores mínimos se dan alrededor del mes de diciembre.

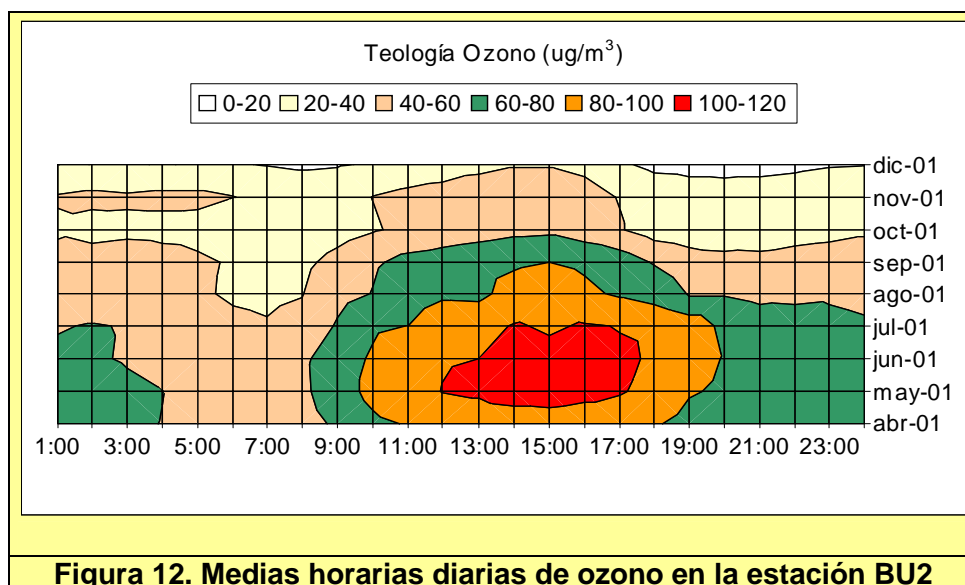


La figura 11 incluye las medias horarias en el mes de agosto del año 2003, además de las de ozono en varias estaciones, las de radiación solar y temperatura, estas últimas en Miranda. En ella se observa que los perfiles de ozono son muy semejantes y están muy agrupados, mostrando un comportamiento “tipo” de la evolución horaria de este contaminante para este mes en las distintas estaciones representadas. Los perfiles de las variables meteorológicas son representativos de este mes del año, mostrando un comportamiento “tipo”, con máximos de radiación y temperatura de  $470 \text{ w}/\text{m}^2$  a las 13 horas y de  $34,2^{\circ}\text{C}$  a las 15 horas respectivamente.

También se ve en ambas gráficas la evolución horaria cada día de las concentraciones de ozono, se observa un máximo central en todos los casos relacionado con los ciclos diarios de temperatura y radiación solar. En la mayor parte de los meses aparece un mínimo claramente definido y situado a la izquierda del máximo aunque con una ubicación diferente dependiendo de los meses. En algunos casos, por ejemplo enero, la curva presenta picos de ozono durante la noche en las primeras horas del día y también un mínimo antes de las últimas horas del día. La semejanza más significativa entre las gráficas se obtiene en la evolución horaria observándose un perfil muy similar entre temperatura y ozono. En cuanto a la evolución mensual se observan ciertas diferencias, cada una de las variables presenta sus mayores valores en meses diferentes. Este tipo de gráficas son bastante habituales en estudios de contaminación atmosférica, y los resultados obtenidos en nuestro estudio es similar a los de otros autores que muestran que mientras que la variación estacional varía mucho de unos lugares en cambio los máximos observados a mediodía presentan variaciones menores [11].

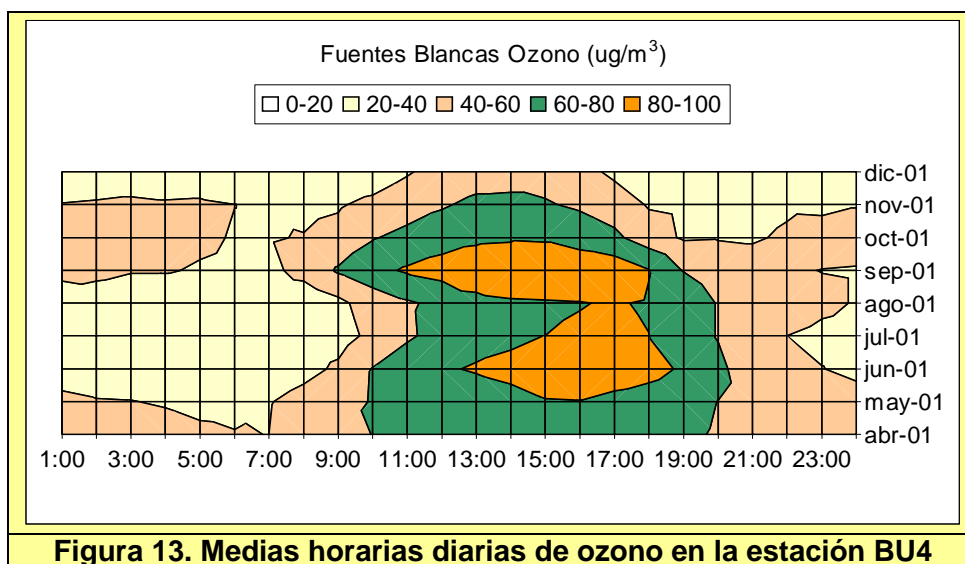
La figura 12, también elaborada a partir de los valores medios horarios diarios, proporciona la evolución de las curvas de ozono en el estudio de los datos de 2001 para la estación BU2. En ella se representan intervalos de concentración en vez de valores concretos obteniendo un mapa continuo de valores tanto a lo largo del día como a lo largo de los meses, de muy rápida visualización.





Esta gráfica de superficie proporciona una estimación cualitativa de los periodos horarios o bien mensuales con mayores y menores concentraciones de ozono. Por ejemplo, se observa que los rangos de concentraciones más altas de ozono se han obtenido en los meses de primavera y verano, mientras que las horas de mayores concentraciones se dan entre las 13:00 y las 17:00.

Los resultados presentados en esta figura son muy similares a los obtenidos para el mismo año en la estación BU3 y podría considerarse ésta la tendencia esperada de las series de ozono a lo largo del año, debido a las similitudes con la evolución de los parámetros meteorológicos de temperatura y radiación solar, sin embargo se dispone de un número escaso de datos en la estación BU3, [3], como para dar valoraciones categóricas.



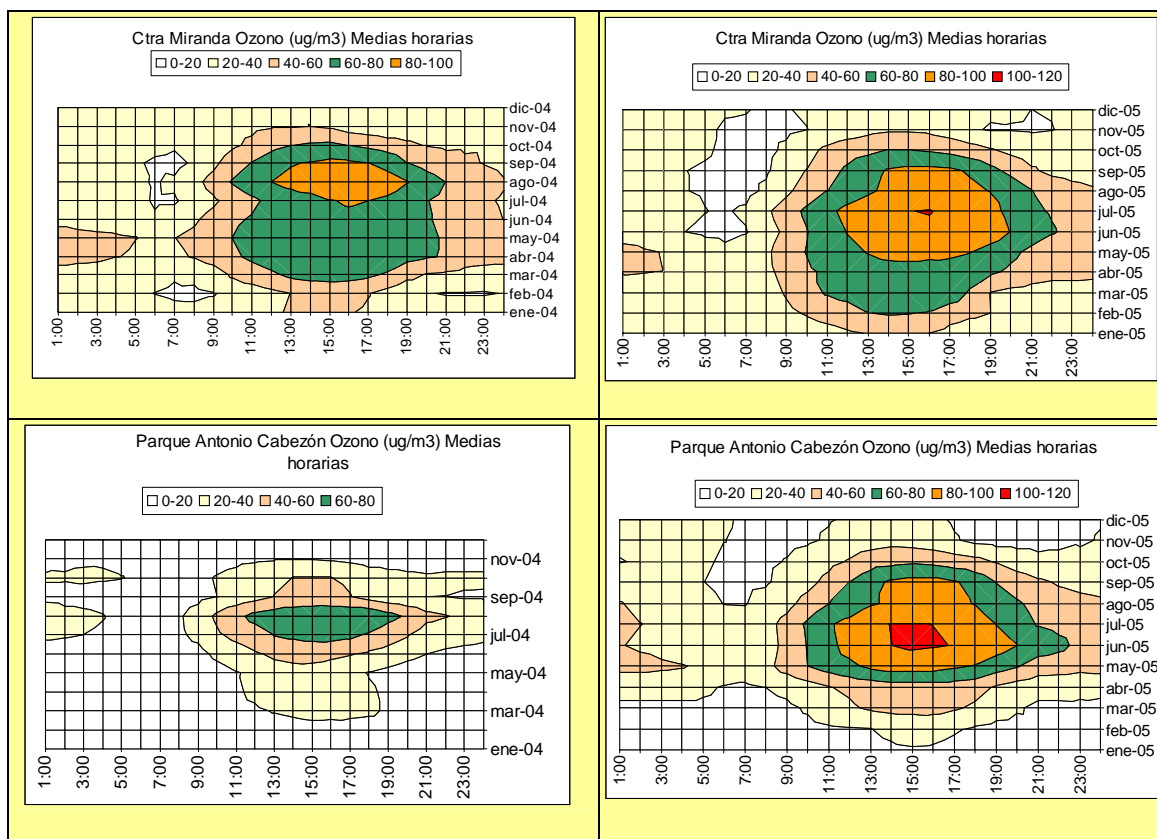
En la gráfica de superficie de la estación BU4 en el mismo año, ver figura 13, se observan dos periodos de altas concentraciones de ozono en los meses de los equinoccios de primavera y otoño, ya que aunque el rango de concentraciones durante el verano alcanza

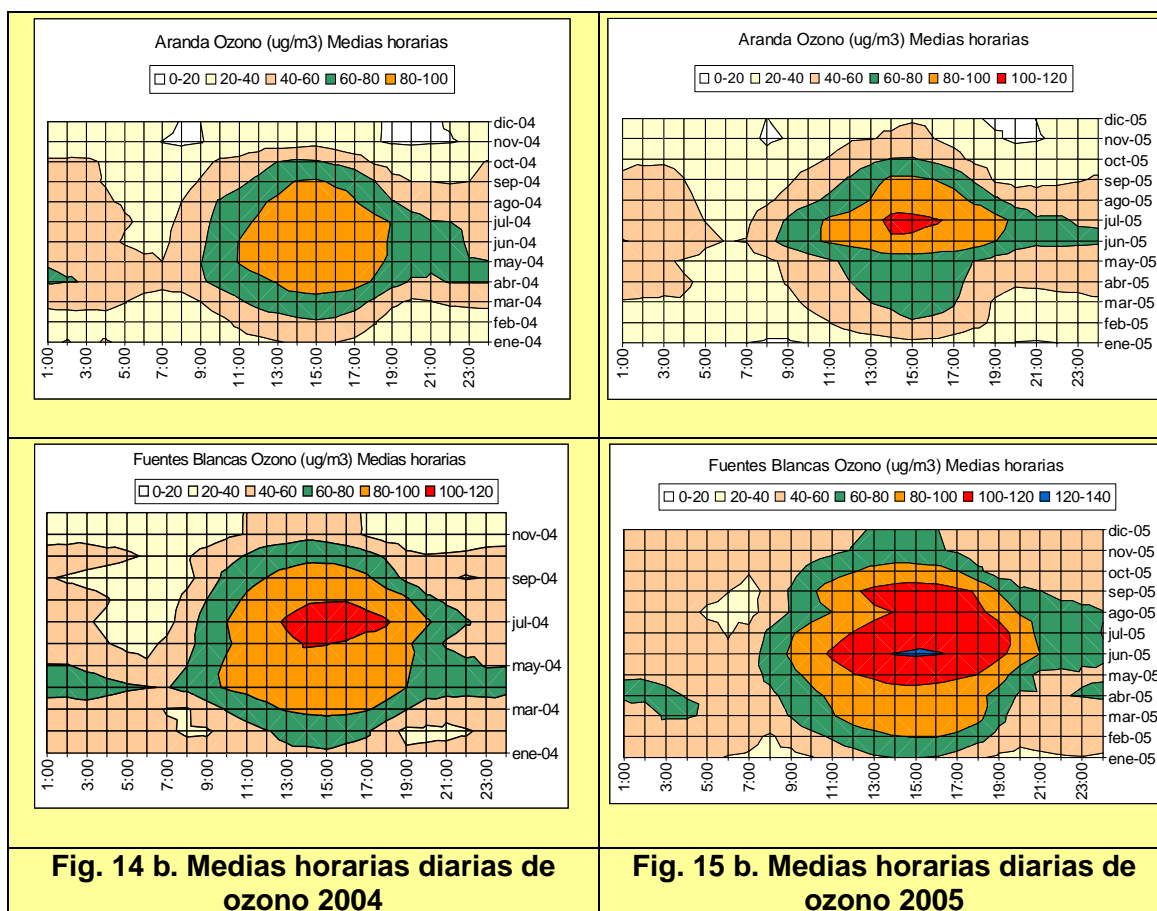
al registrado durante junio y septiembre el rango horario en cambio es muy inferior y por este motivo la figura apunta al mes de septiembre como el de más ozono de todo el año. La gráfica en este caso no permite establecer claramente un periodo horario igual para todo el año de concentraciones más elevadas detectándose diferencias estacionales.

Existen claras diferencias entre las figuras 12 y 13, los mayores niveles de ozono se alcanzan en BU2 que son muy superiores a los de BU4 durante la primavera; mientras que al adentrarse en el verano las diferencias disminuyen siendo los rangos horarios de concentraciones similares, en los meses siguientes los rangos de concentraciones de ozono en Fuentes Blancas se vuelven superiores a los de Teología.

Respecto a los parámetros meteorológicos, los resultados obtenidos en el mismo año 2001, por ejemplo en la estación BU4, muestran que las mayores concentraciones de radiación solar corresponden al mes de junio mientras que las de temperatura lo hacen con el mes de agosto. En cuanto a la evolución a lo largo del día de los valores de estos parámetros, se obtiene que los intervalos de mayor radiación solar está entre las 12:00 y 13:00 horas para todo el año, mientras que para la temperatura las mayores se registran entre las 15:00 y 17:00 horas en agosto, en cambio durante los meses con menor temperatura noviembre, diciembre estos intervalos se desplazan a horas anteriores.

Comparemos las figuras 13 y 10 que muestran las concentraciones de ozono de las medias horarias diarias de BU4 durante los años 2001 y 2002. Ambas son similares en el sentido de que hay dos periodos de altas concentraciones de ozono con un periodo aparente de menores concentraciones entre medias. Los mayores valores se localizan uno en verano, centrado en julio y el otro en abril en 2002, mientras que en 2001 se localizaban en los meses de mayo y septiembre en esta ocasión por tanto se adelantan.





**Fig. 14 b. Medias horarias diarias de ozono 2004**

**Fig. 15 b. Medias horarias diarias de ozono 2005**

Aparte de esto existen otras diferencias entre las figuras 13 y 10. En 2002 las concentraciones son mucho mayores, y además en mayo, un mes con menores concentraciones aparentemente, se observa sin embargo que las concentraciones de ozono persisten a lo largo de todo el día (salvo el mínimo característico localizado alrededor de las 5:00-7:00 de la madrugada), y esto ocasiona que la concentración media del mes sea la mayor del año  $76.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

El resultado más habitual encontrado es la forma bastante similar de las curvas de nivel en las gráficas de superficie para la concentración (ver también figuras 14 y 15) y también para los parámetros meteorológicos: todas ellas muestran un rango temporal anual con un mayor valor de la variable correspondiente en torno al cual ésta disminuye. Por lo que, en primera aproximación el comportamiento de la evolución en las concentraciones de ozono puede interpretarse a través de la temperatura y la radiación solar. Sin embargo, como se observan en la figura 13, pueden darse dos rangos temporales con alto valor de ozono que no quedan satisfactoriamente interpretados. En una segunda aproximación para el comportamiento de las concentraciones de ozono, éstas se relacionan además con otras variables meteorológicas y/o con la diferente presencia en el aire de los precursores de ozono a lo largo de los meses.

#### Máximos y mínimos diarios de ozono

A partir de los resultados de los valores medios valores horarios diarios de cada mes en los años 2004 y 2005, se han presentado otras gráficas de superficie, como las de las figuras 14 y 15 donde observar rápidamente la localización horaria de los intervalos de

valores extremos de las concentraciones de ozono, tanto para el día como para la noche en cuatro estaciones de medida.

En general, para todo el periodo de estudio, se da una variabilidad horaria de los valores extremos, tanto mínimos como máximo; aunque se puede considerar habitual que las menores concentraciones de ozono se suelen producir entre las 5:00 y las 9:00 de la mañana, en tanto que las mayores suelen ocurrir entre las 13:00 y las 17:00 retrasándose en algunas ocasiones hasta las 18:00 horas. Como se observan en las figuras anteriores, los resultados presentan variaciones en las diferentes estaciones y años, por ejemplo en algunos casos el mínimo se desplaza hasta las 11:00 horas en noviembre. Los máximos valores en cambio no presentan un patrón estacional tan claro principalmente debido a que las concentraciones alcanzadas se mantienen en niveles muy próximos durante varias horas. Durante los meses más fríos las concentraciones máximas se producen en torno a las 14:00-15:00 horas mientras en los meses de verano estos máximos se retrasan teniendo lugar en torno a las 15:00-16:00 horas. En algunas ocasiones como en el mes de junio 2005, (figura 15), este máximo se retrasa aún más y en este caso se produce cerca de las 17:00 horas. La variabilidad horaria de los valores extremos se ha obtenido también en otros trabajos, en algunos, por ejemplo, el máximo diario anual se sitúa en las 15:00 y el mínimo a las 7:00 [13].

Los desplazamientos a los que hacemos referencia en los máximos y en los mínimos del día pueden estar relacionados con la intensidad de la radiación solar: los mínimos de ozono corresponden casi exactamente con el inicio de los niveles no nulos en la radiación solar. Esta relación se justifica además teniendo en cuenta que, durante la noche, los procesos de formación de ozono se detienen en tanto que los de destrucción siguen su curso normal. También se vincula el mínimo a los niveles de NO que aumentan en las primeras horas de la mañana y que contribuyen a la destrucción del ozono [13].

Respecto al comportamiento de los valores máximos, sucede habitualmente que las mayores intensidades de radiación solar se producen durante el mediodía y los máximos de ozono en cambio aparecen desplazados a horas posteriores; esto es debido a que aunque la radiación solar disminuya, ésta es aún suficiente para permitir que las reacciones de formación de ozono continúen produciéndose y éste se acumula. De esta manera se produce un desplazamiento temporal en los máximos de ozono. Nos fijamos en la radiación de agosto en la figura 11, vemos que la radiación solar es muy intensa durante un amplio periodo horario lo que explicaría el gran desplazamiento del máximo de ozono detectado durante este mes. Resultados similares son obtenidos en otras estaciones y también por otros autores [12].

#### Máximos y mínimos nocturnos de ozono

Volvamos de nuevo a la figura 10 que muestra las concentraciones de ozono y la temperatura y radiación solar de las medias horarias diarias de BU4 durante el año 2002. En dicha figura se destaca una zona de mayores concentraciones de ozono durante el mes de marzo entre las dos y las tres de la madrugada así como zonas de menores concentraciones de ozono entre las 19:00 y 20:00 horas en octubre y también durante el mes de enero. A estos episodios nos referimos cuando hablamos de máximos y mínimos nocturnos, éstos al contrario que los máximos y mínimos diarios no se presentan todos los meses, o al menos no son detectados, y los valores alcanzados son generalmente de menor cuantía. Se pueden detectar pequeños máximos y mínimos en la mayoría de las estaciones, y la figura 10 es una muestra de estos resultados.

En nuestro caso suele coincidir este tipo de eventos con los meses más fríos del año de igual manera que en otros estudios, [12] quienes dan la existencia de un máximo y un mínimo diario y otro máximo y mínimo nocturno de modo que además del periodo típico de 24 horas característico existiría otro de 12 horas que explicaría los máximos nocturnos y que sería más importante en los meses invernales donde éste máximo puede incluso superar en concentración al producido durante el día.

El mínimo localizado en las últimas horas del día se puede tratar de explicar en términos de radiación solar, ya que su ausencia hace cesar los procesos de formación de ozono mientras que los de destrucción siguen su curso normal. Más difícil de explicar es que después de este mínimo la concentración de ozono aumente y es que sin radiación solar no puede haber formación de ozono, y las explicaciones se basan según los autores, en la suma de varios factores adversos, [14], entre otros el transporte de contaminantes.

### Superaciones de los umbrales

En este apartado exponemos las superaciones de los diferentes umbrales registradas en las estaciones de medida, de acuerdo a los valores umbral de las tablas 1 y 2. Para el conjunto de datos disponibles en este estudio, se muestra en la tabla 5 el número de superaciones entre los años 2001 y 2005 para los siguientes umbrales: en rojo, las superaciones del umbral de protección a la salud (incluyendo la nueva legislación desde enero de 2004) y en amarillo, las superaciones del umbral de información a la población ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como valor medio en una hora). En verde, se muestran las superaciones del umbral de protección a la vegetación ( $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como valor medio en veinticuatro horas), sin incluir los dos últimos años, en los que se han utilizado los valores de la tabla 2.

estación/año	2001	2002	2003	2004	2005
BU2	110	123	109		
BU2	39	43	35		
BU3	2	17			
BU3	0	2			
BU4	51	139	91		
BU4	5	61	67	17	47
MI1			34		
MI1			35	3	8
MI2			13		
MI2			4	1	20
MI3			47		
MI3			46		
AR1			106		
AR1			29	2	5

3 superaciones umbral de información a la población

**Tabla 5. Superación de umbrales de ozono**

Los resultados obtenidos en 2001, indican que el umbral de protección a la vegetación fue ampliamente superado durante muchos días del año, y así por ejemplo en Teología, BU2, se detectaron más de 100 casos. Las superaciones en la estación BU4 correspondieron a: 12 ocasiones tanto en el mes de abril como en el de septiembre, 10 en mayo y 7 en octubre con algunas superaciones más repartidas a lo largo del año. En las otras estaciones de medida nuevamente la mayor cantidad de casos se da en primavera y en mayo, resultando raro el día en el que el umbral no ha sido superado, siendo el número de días totales con superación de 25 en Teología. 25 superaciones se detectan también durante el mes de junio en Teología y cerca de este número con 20 se queda abril. En verano se producen también un importante número de casos en la

estación de Teología 14, 7 y 10 en los meses de julio agosto y septiembre respectivamente, en cambio las superaciones son más escasas durante el resto del año reduciéndose su número progresivamente en otoño e invierno hasta llegar a cero.

Durante el año 2002, el mayor número de superaciones del umbral a la vegetación se localiza en BU4 durante el mes de mayo con 26 casos y con registros cercanos desde marzo, 21 casos hasta julio con 20 disminuyendo hasta 15 en agosto. De esta manera el año 2002 y en particular la estación de Fuentes Blancas es la que registra más superaciones del umbral de protección a la vegetación durante todo el periodo de estudio, detectándose en total 139 casos. De las 123 detecciones que se produjeron en la estación BU2 se distribuyeron principalmente entre los meses de abril y agosto con 24 casos como valor máximo en abril seguido de los 23 casos de agosto y 21 en mayo.

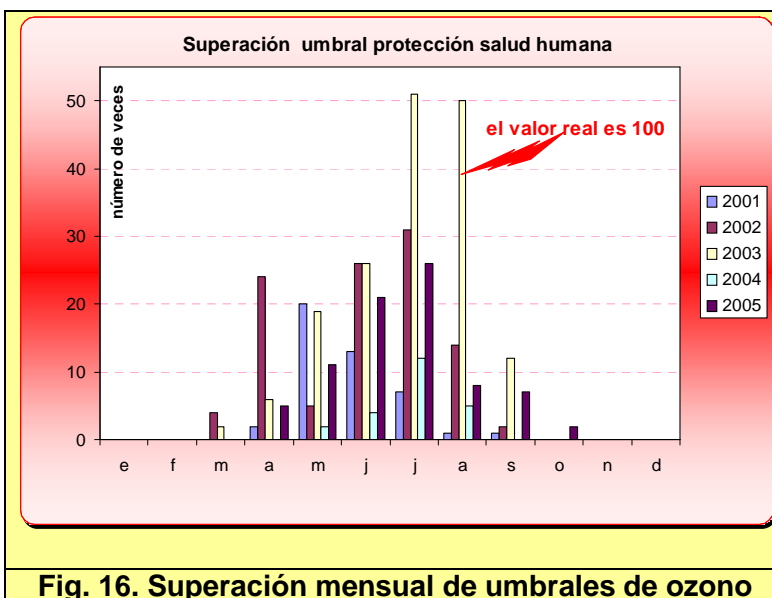
El umbral de protección a la vegetación durante el año 2003 fue superado principalmente durante el mes de agosto, con 25 en BU4, las 18 superaciones de BU2 muestran un comportamiento algo diferente en esta estación en la que los meses de abril mayo y junio con 22, 21 y 20 superaciones del umbral son los más destacados. En Fuentes Blancas 19 superaciones fueron detectadas en julio; no obstante cabe decir que los resultados de junio y julio han sido probablemente afectados por los datos perdidos ya que los resultados de porcentajes de días con superación/datos disponibles son similares para las dos estaciones en estos meses.

Para los años 2004 y 2005 hemos utilizado la nueva legislación, encontrando que el umbral de protección a la vegetación (AOT 40 6000 ug/m<sup>3</sup>h Objetivo a largo plazo) se ha superado en las estaciones AR1 y BU4 en el año 2004, y además en las estaciones BU2 y BU3 en el año 2005. El umbral de protección a la vegetación (AOT 40 18000 ug/m<sup>3</sup>h de promedio en un periodo de 5 años Valor objetivo) se ha superado en el año 2005 en la estación BU4. El umbral de protección a los bosques (AOT 40 20000 ug/m<sup>3</sup>h) ha sido también superado en esa última estación durante los dos años en que se viene utilizando estos indicadores.

Respecto a las superaciones del umbral de protección a la salud humana, la figura 16 completa los valores que aparecen en la tabla 5 porque el número de superaciones del umbral se da en cada mes. Si se analiza año a año la evolución de este indicador, se observa que:

Durante el 2001 en las estaciones 3 y 4 de Burgos se produjeron relativamente pocas superaciones comparadas con las 39 de BU2; se detectaron en total 5 casos, repartidos entre los meses de mayo, junio, julio y

septiembre, siendo el mes de mayo en el que se detecta el mayor número de superaciones de este umbral con 2. En Teología las superaciones están más diseminadas, el mayor número de casos se detecta al igual que en las otras dos



**Fig. 16. Superación mensual de umbrales de ozono**



estaciones de medida en mayo con 18 casos seguida por el mes de junio con 12 casos, y el de julio con 6, el resto se reparten entre abril y agosto.

Durante el año 2002 se detecta un mayor número de superaciones también en la estación BU4 en los meses de junio y julio con 18 casos cada uno seguidos de los 10 casos registrados durante los meses de abril y agosto mientras que sólo se detectan 3 casos en el mes de mayo y 2 más en marzo. El número de superaciones detectadas de este umbral fue inferior en Teología donde se produjeron 13, 12 y 8 situaciones de este tipo durante los meses de julio, abril y junio respectivamente como hechos más destacables. No hemos hecho referencia hasta ahora a los resultados de la estación BU3 debido al escaso número de datos disponibles, como ejemplo representativo diremos que durante el mes de abril de este año se registran los dos únicos casos de superaciones del umbral de protección a la salud detectados en esta estación de todo el periodo de estudio.

El año 2003 es el que ofrece, de todo el periodo de estudio, más registros en la superación del umbral a la salud. Los resultados de BU2 son bastante diferentes a las otras estaciones y durante el mes de agosto solo se detectan 10 superaciones del umbral, número inferior a las 15 detectadas en julio. Los resultados de BU4 muestran que durante el mes de agosto se concentran 33 de los 67 casos registrados. Otros valores de interés son los de las estaciones AR1, MI1 y MI3, con 9, 29 y 16 superaciones en el mes de agosto, y con 8, 2 y 8 en el mes de julio, respectivamente.

Durante los años 2004 y 2005, se dan pocos casos de superación del umbral de protección a la salud. Hay que recordar que a partir del año 2003 cambia la normativa y que ello influye en el valor de los índices. Por ejemplo, aplicando la nueva fórmula a los datos de agosto de 2003 supone que el número total de días con superación de los umbrales se reduciría a 17 en BU4 y 9 en BU2, mientras que si hubiésemos utilizado la nueva fórmula habríamos obtenido 14 en Fuentes Blancas y 8 en Teología. Así el número de superaciones disminuye ligeramente.

En cuanto al umbral de información a la población, ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como valor medio de una hora), en el año 2001 no se han registrado superaciones en ninguna de las estaciones. Las mayores concentraciones horarias fueron de  $159 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en BU2 en tanto que las máximas de BU4 fueron de  $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valores registrados todos ellos el 30 de mayo, los valores de BU4 llegaron a alcanzar valores cercanos a los de mayo con  $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el 20 de septiembre.

Tampoco fue superado durante el año 2002 siendo los registros más cercanos de  $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en BU4 el 19 de julio y  $157 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en BU2 el 22 de abril.

Durante 2003 se ha registrado la superación de este umbral en Miranda de Ebro hasta en tres ocasiones en la estación MI1 durante el día 13 de agosto llegando a alcanzar una máxima concentración horaria de  $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, el umbral no fue superado en las estaciones de medida de la capital burgalesa, siendo los valores más cercanos de  $173 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el 11 de agosto en BU4 y de  $162 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el 11 de julio en BU2.

En el año 2005 se dan dos superaciones de este umbral en la estación de Fuentes Blancas de Burgos, el 20 de junio y el 14 de julio con  $186$  y  $181 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

En general, puede decirse que la combinación de altos índices de radiación solar y elevadas temperaturas durante un intervalo temporal, junto a las emisiones de contaminantes primarios procedentes de las fuentes móviles, ofrecen las condiciones idóneas para la formación de contaminantes secundarios, en particular el ozono. De hecho, como hemos visto en este apartado en los cuatro últimos años se han superado en bastantes ocasiones los umbrales legales establecidos para el ozono en aire el



ambiente de nuestra provincia. En el apartado siguiente describimos varios episodios de altas concentraciones de ozono.

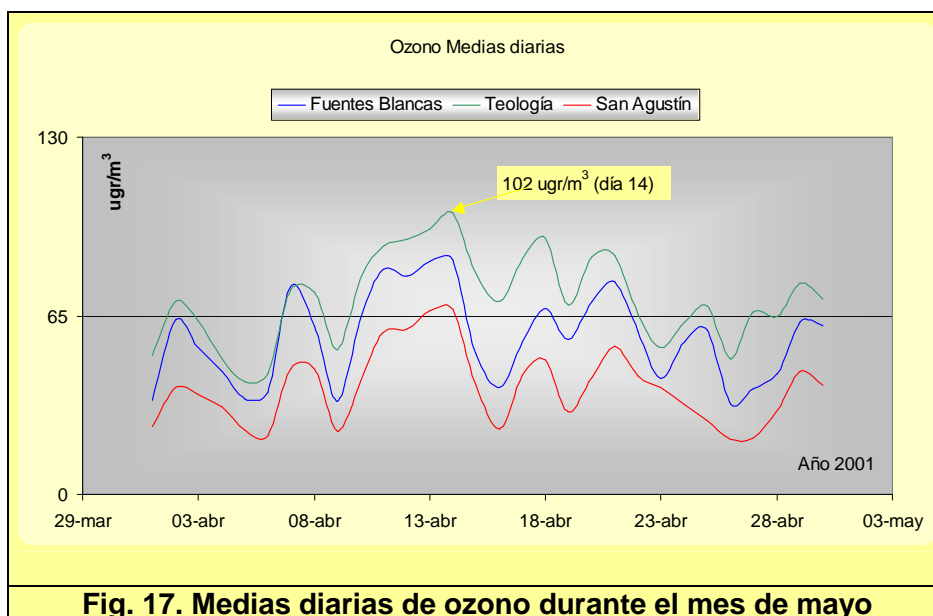
### **Evolución del ozono para altas concentraciones**

En general, los periodos de altas concentraciones de ozono se observan con sistemas meteorológicos de baja movilidad y alta presión que dan lugar a tiempo soleado, altas temperaturas y aire estancado. Los vientos asociados con estas altas presiones son generalmente débiles lo que aumenta las oportunidades de que los contaminantes se acumulen. Finalmente las condiciones de escasez de nubosidad asociadas a estos sistemas son favorables a la producción fotoquímica de ozono [5]. Los resultados pueden variar sensiblemente en función de las condiciones meteorológicas específicas de cada lugar.

Para los promedios mensuales, recordemos que muestran ciclos anuales con máximos que se distribuyen a lo largo de la primavera y el verano (ver figura 8) y que se encuentran diferencias según las estaciones. Por ejemplo, para el año 2002, en la estación BU2 las mayores concentraciones de ozono se detectan en abril con  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y en BU4 en mayo con  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los resultados de en nuestro estudio, son característicos de latitudes medias siendo más típicas las altas y prolongadas concentraciones del verano en áreas pobladas e industrializadas, estos máximos son generalmente atribuidos a fenómenos de producción fotoquímica locales, mientras que por otro lado los máximos de primavera son más típicos de regiones remotas y asociados a condiciones de fondo y las teorías más aceptadas los atribuyen bien a intrusiones estratosféricas causadas por movimientos en la tropopausa o bien por la acumulación de precursores durante el periodo invernal (44).

En este apartado centramos la atención en la evolución del ozono cuando se dan altas concentraciones que se han producido ocasionalmente, especificando algunos episodios de contaminación acontecidos en cortos periodos en cada uno de los años de estudio.

En el año 2001, hemos seleccionado los altos valores medios obtenidos en los días de mitad de la primavera. La figura 17 muestra los valores medios diarios calculados para tres estaciones de medida durante el mes de abril de 2001.



**Fig. 17. Medias diarias de ozono durante el mes de mayo**

Se observa una clara semejanza entre los registros de BU2 y BU4.

La evolución de BU3, aunque presenta un perfil muy similar, su valor medio es inferior a las otras dos durante el tiempo representado. Se ha trazado la línea del valor umbral de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , viéndose claramente que fue superada numerosos días en Teología (con  $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media en el día 14 de abril), bastantes en Fuentes Blancas, mientras que solamente en dos ocasiones en el caso de San Agustín.

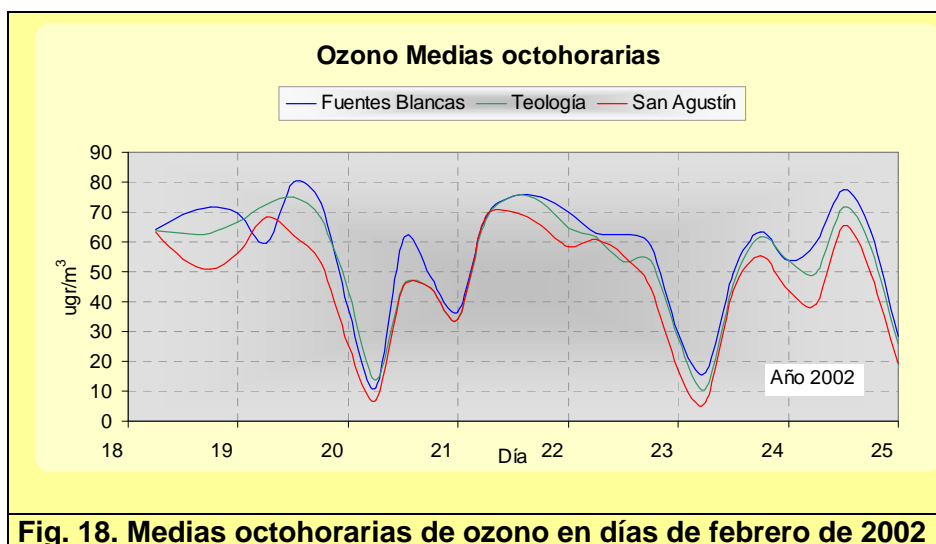
El 2002 ha sido un año sin acontecimientos significativos en cuanto a altos niveles de la contaminación por ozono en nuestras ciudades, como se puede apreciar en las figuras 7, 8 y 9 en cuanto a las medias mensuales, y en la figura 10 en cuanto a medias horarias diarias. Sin embargo hemos incluido en este apartado resultados obtenidos en algunos días del mes de febrero por el comportamiento tan similar que tuvieron todas las variables, tanto de contaminación como meteorológicas.

	BU4	BU4	BU4	BU2	BU3
Día	Ozono ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	Radiación ( $\text{w}/\text{m}^2$ )	Ozono ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ozono ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
18	68	4	105	64	58
19	59	4	182	64	52
20	36	4	142	31	29
21	71	6	156	69	66
22	52	6	218	48	44
23	40	8	207	37	31
24	55	7	138	49	41
25	53	7	220	36	33

**Tabla 6. Valores medios diarios en días de febrero de 2002**

La tabla 6 muestra valores medios diarios obtenidos para los días seleccionados, entre el 18 y el 24 de febrero. La concentración de ozono es la calculada en varias estaciones de medida y la temperatura y radiación solar es la calculada en Fuentes Blancas, estación BU4.

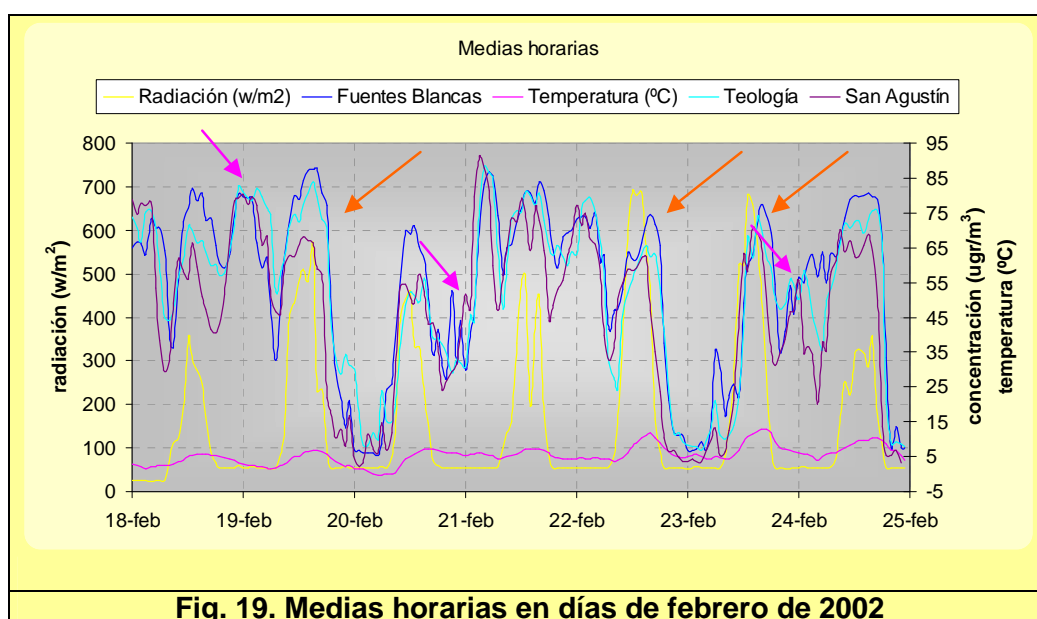
En la gráfica 18 los cuatro valores diarios de las medias octohorarias han sido distribuidos uniformemente a lo largo del eje X para mayor comodidad y correspondiendo el valor de las abscisas de día exactamente con el último dato del día anterior (el de 16-24 horas).



**Fig. 18. Medias octohorarias de ozono en días de febrero de 2002**

Si bien los valores están por debajo del umbral  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en dicha figura se observa una gran homogeneidad entre las curvas de BU2 y BU4 aparentemente mayor que en la figura 17 llegando incluso a superponerse las curvas de ambas estaciones, mientras la curva evolución de BU3 permanece en casi todo momento por debajo de las otras dos aunque mantiene una forma muy similar. Los perfiles han cambiado y es ahora la estación BU4 la que presenta en general valores superiores a los de BU2.

La figura 19 muestra los valores medios horarios calculados durante los mismos días de febrero de 2002, y refuerza el comportamiento citado. Destacan los picos de los días 19, 22 y 23 de febrero con máximos muy agudos y estrechos en todas las variables. Se pueden observar en la misma figura otros tres picos de los días 19, 21 y 24 correspondientes a episodios nocturnos ocurridos durante las mismas fechas, el del día 21 dando el máximo absoluto de esos días ( $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación BU3).



El año 2003 ha sido, (ver tabla 5), el de mayor número de superaciones del umbral de protección a la salud siendo agosto el mes de mayor incidencia y el de niveles de temperatura más altos, (ver figura 9), de todo el periodo de estudio.

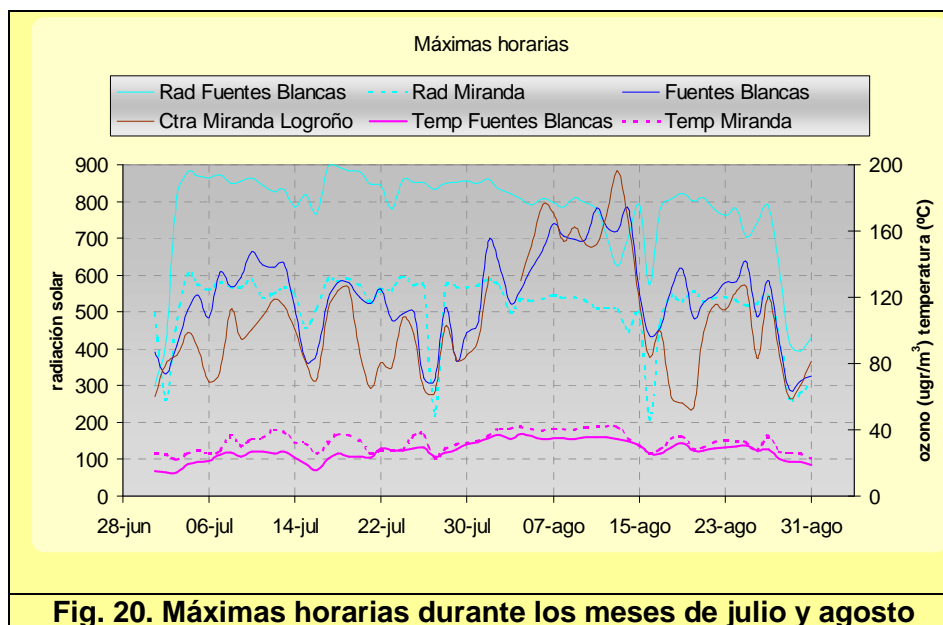
En la tabla 7 todos los días seleccionados muestran las más altas concentraciones horarias de ozono, a partir del día 15 de agosto los niveles en las áreas de estudio descendieron. Los máximos de concentración se alcanzaron en los días 12, 13 y 14 de agosto. En tres ocasiones del día 13, (ver tabla 5) la estación MI1 superó el umbral de información a la población, a las 13:00 (184 ugr/m³), a las 14:00 (183 ugr/m³) y a las 18:00 (197 ugr/m³) horas.

Día/Lugar	BU2	BU4	MI1	MI2	MI3	AR1
5-VIII-03	113	137	152	112	129	91
6-VIII-03	140	148	176	125	135	97
7-VIII-03	143	165	171	130	151	126
8-VIII-03	147	157	154	127	139	132
9-VIII-03	150	155	162	118	138	141
10-VIII-03	137	155	152	114	145	147
11-VIII-03	142	174	152	127	143	127
12-VIII-03	153	163	170	175	164	139
13-VIII-03	152	160	187	129	172	139
14-VIII-03	143	173	165	107	132	150
15-VIII-03	103	122	116	77	80	120
16-VIII-03	74	97	84	52	54	72

**Tabla 7. niveles de ozono durante la ola de calor**

Entre los meses de julio y agosto se han dado unas características atmosféricas muy peculiares: altos índices de radiación solar y elevadas temperaturas durante varios días de estos meses. La figura 20 muestra los máximos horarios de concentración, temperatura y radiación solar alcanzados durante julio y agosto en dos de las estaciones de muestreo que muestran los máximos valores de los máximos de dos ciudades, Burgos y Miranda. Durante ese intervalo temporal, los valores de las variables que se

representan mantienen altos niveles y a finales de julio se produce un aumento del máximo horario de ozono, cuyos valores están recogidos en la Tabla 7.



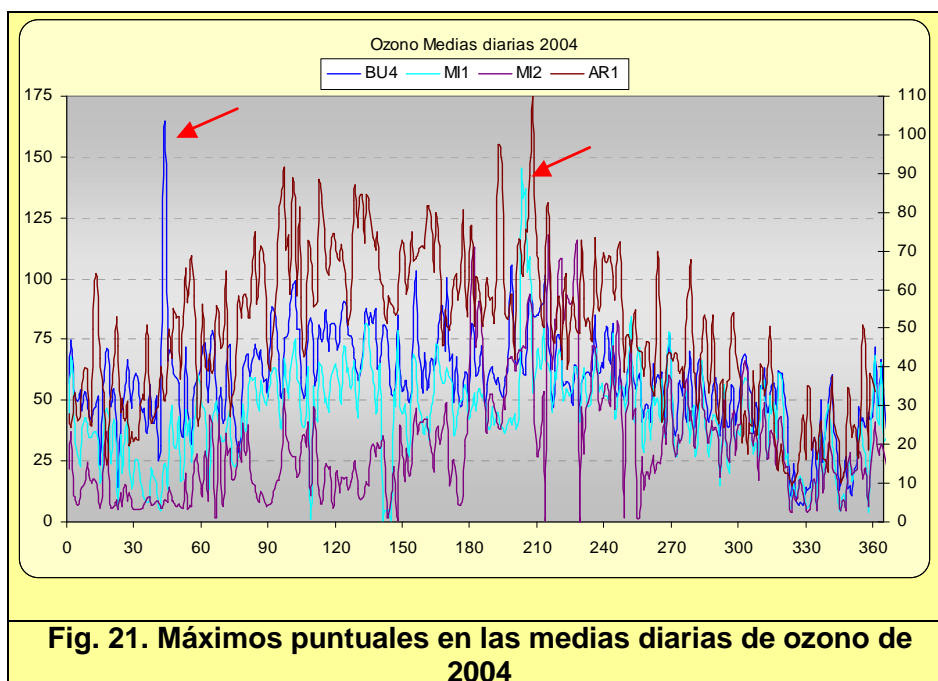
Las curvas de radiación solar y temperatura mantienen un perfil muy similar en ambas estaciones, pero con una diferencia de valor de unos  $300 \text{ w}/\text{m}^2$  para la radiación y para la temperatura de unos  $5^{\circ}\text{C}$ . Los resultados de radiación solar de las estaciones de Burgos que no han sido presentados en la gráfica son prácticamente idénticos a los registrados en BU4, no sucede así con los resultados de temperatura, [15], [16].

Resultados de altas temperaturas fueron registrados también en la mayor parte de España e incluso de Europa. La ola de calor se manifestó principalmente en los meses de julio y agosto y ocasionó un aumento importante en los niveles de contaminación, [14]; la suma de más contaminación y más temperatura se tradujo en un incremento del número de muertes durante ese periodo vinculadas con estos episodios.

Episodios muy puntuales y de otras características distintas a los analizados anteriormente se han encontrado en el 2004.

A partir de los valores calculados para la concentración media diaria de ozono, se ha representado en la figura 21 la evolución del ozono a lo largo de todo el periodo de estudio de varias estaciones de medida (en el eje secundario, MI2 y AR1). Se trata de máximos muy agudos, muy distribuidos en el periodo y no coincidentes en el tiempo para las distintas estaciones de medida.

Los máximos absolutos de dichos valores, junto con algún máximo relativo, se han indicado en la Tabla 8 para cuatro de las estaciones. Tanto los niveles de radiación como los de temperatura para esos días del año no son ni elevados ni persistentes, por lo que estos episodios de máximos se distinguen de los anteriores estudiados e indican que deben su existencia a otras influencias aquí no consideradas.



Estación medida	Ozono (ugr/m <sup>3</sup> )	Temp. (°C)	R solar (w/m <sup>2</sup> )	Día del año
BU4	115	6	148	44
	164			45
	144			204
MI1	133	26	31	205
	137			206
	102			207
MI2	108	27	31	208
	72			229
AR1	112	27	31	214
	90			215

**Tabla 8. niveles de ozono en algunos días de 2004**

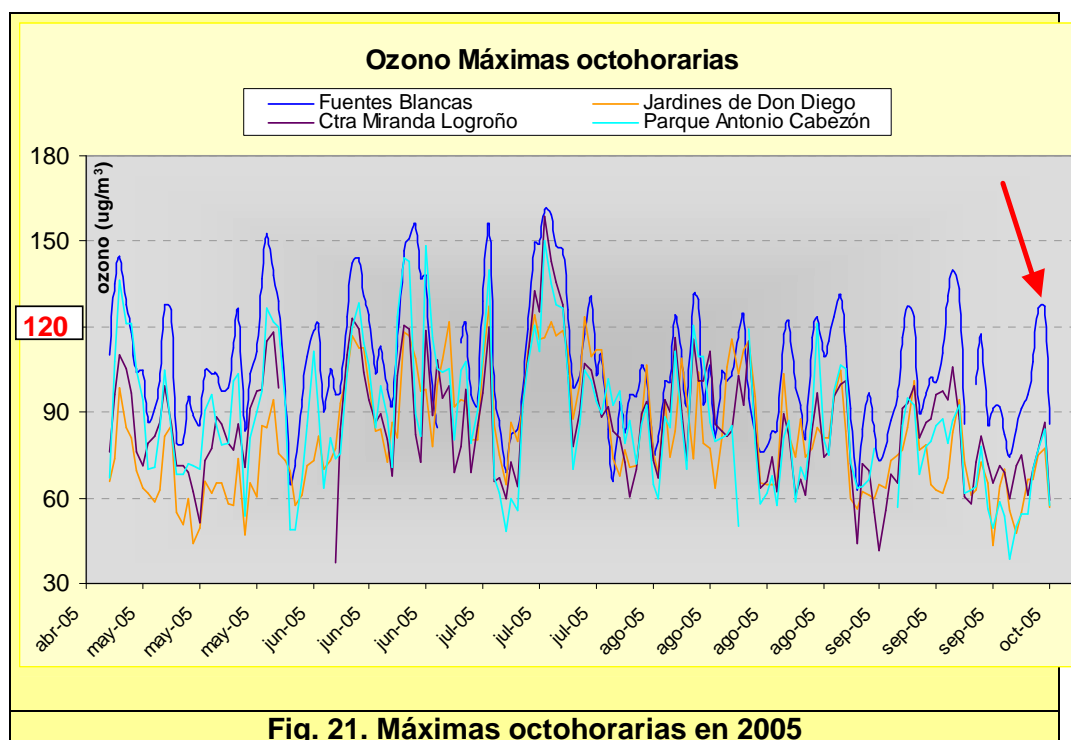
Se da la circunstancia de que los días 44, y 45 son los días 13 y 14 de febrero de ese año, que coinciden con viernes y sábado, respectivamente. Los días 204, 205 y 206 son el 22, 23 y 24 de julio, del jueves al sábado de la semana. En ambos casos se ha observado, por tanto, un determinado comportamiento semanal, con concentraciones más elevadas durante el fin de semana que han supuesto hasta un 40% más de ozono en el primer caso.

Mientras que el día 214 es 1 de agosto, domingo y el día 229 es 16 de agosto, martes. En estos casos podemos hablar de un determinado comportamiento vacacional, con concentraciones más elevadas durante el inicio o fin de vacaciones que también han supuesto un elevado % de ozono.

Durante el 2005 se dan algunas características generales que le distinguen de los otros años. Tomado como referencia la estación BU4, para esta estación se encuentran:

- Medias mensuales altas y con altos valores prolongados en varios meses. Máximo valor de medias mensuales (ver figura 8), con una diferencia de valor en comparación con el siguiente máximo de  $6.77 \text{ ugr/m}^3$ .
- Año con los valores más altos en la concentración media horaria diaria, con mayor franja horaria por mes y mayor franja mensual en los valores (ver figura 15).
  - La franja del intervalo entre  $40$  y  $60 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ , ocupa la mayor parte de las horas nocturnas del año.
  - Hay tres valores del mes de junio que alcanzan el intervalo entre  $120$  y  $140 \text{ ugr/m}^3$  ( $121$ ,  $122$  y  $121 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ , a las 14:00, 15:00 y 16:00 horas respectivamente. El siguiente año de altos valores es el 2003, (aquí no representados), en el que también se dan valores por encima de  $120 \text{ ugr/m}^3$  como media horaria diaria en el mes de agosto ( $122$ ,  $122$  y  $120 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ , a las 14:00, 15:00 y 16:00 horas respectivamente)
  - La siguiente franja de valor ( $100$ - $120 \text{ ugr/m}^3$ ) ocupa más extensión en el diagrama de superficie que en cualquier otra estación y año.
- Durante el mes de octubre se dan superaciones del umbral de protección a la salud humana, sin embargo no es el año de mayor número de superaciones del umbral de protección a la salud, ni en valor absoluto ni mensualmente, (ver tabla 5 y figura 16).

De esta manera, para este año 2005 hemos seleccionado un periodo continuado que frecuentemente tiene superaciones del valor que se toma para el nuevo índice de protección a la salud (tabla 2), y hemos calculado por tanto la media móvil octohoraria sin recuperación máxima de cada día durante todo el periodo de estudio.



**Fig. 21. Máximas octohorarias en 2005**

Representamos en la figura 22 la evolución temporal de las máximas octohorarias para varias estaciones durante un amplio intervalo temporal. Los resultados muestran que la estación de medida donde se produce la mayor parte de las superaciones al umbral es la de Fuentes Blancas. El periodo abarca desde 29 de abril hasta 9 de octubre que son las fechas donde empiezan a aparecer superaciones del umbral; fuera de ese intervalo



temporal no se alcanza el valor de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo los dos más cercanos de 114 y  $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondientes a la estación BU4 los días 13 y 26 de marzo respectivamente. En la figura se indican las superaciones del umbral, que también se producen en la estación de Fuentes Blancas los días 8 y 9 del mes de octubre, 126 y  $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de máximas octohorarias.

## REFERENCIAS

- [1] Valores estacionales de ozono en una zona urbana y sus alrededores. V. Tricio, R. Vitoria, A. Minguito. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Madrid XI, 2002
- [2] Estudio de la estabilidad atmosférica mediante una torre meteorológica. Ramón E. Vitoria Raymundo y Verónica Tricio Gómez. IV Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid, XI 1998
- [3] Estudio del comportamiento del ozono en Burgos. Documento privado para optar a la suficiencia investigadora. Alberto Minguito Llorente. Universidad de Burgos. Julio 2005
- [4] Juan J. Burastero. El ozono en la contaminación del aire ambiente. Acad. Ing. Quím. Centro de Investigaciones Tecnológicas ANCAP. Disponible en:  
<http://www.artech.com.uy/aniu/conburas.htm>
- [5] John H. Seinfeld, Spyros N. Pandis 1997. Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-17815-2
- [6] Tropospheric Ozone Measurements and Meteorological Data in Burgos (Spain). Ramón Vitoria and Verónica Tricio. Proceedings of the conference "A Changing Atmosphere". 2001.
- [7] Red de contaminación atmosférica en Castilla y León.  
[http://www.jcyl.es/jcyl/cmaot/dgca/datos\\_atmosfera/redcontamin.htm](http://www.jcyl.es/jcyl/cmaot/dgca/datos_atmosfera/redcontamin.htm)
- [8] Dasibi Environmental Corporation 1990. Series 1008 U.V. Photometric Ozone Analyzer. Operating and Maintenance Manual.
- [9] WHO Regional Office for Europe, 2000. Air Quality Guidelines 2<sup>nd</sup> Edition. Chapter 7.2 Ozone and other photochemical oxidants. Disponible en:  
<[http://www.euro.who.int/document/aicq/7\\_2ozone.pdf](http://www.euro.who.int/document/aicq/7_2ozone.pdf)>
- [10] Directiva 92/72/CEE, traspuesta en el Real Decreto 1494/1995
- [11] Directiva 2002/3/CEE traspuesta al Real Decreto 1793/2003.
- [12] Demetrios Danalatos, Sotirios Glavas 1996. Diurnal and seasonal variations of surface ozone in a Mediterranean coastal site, Patras, Greece. Science of The Total Environment 177, 291-301.
- [13] K. L. So and T. Wang 2003. On the local and regional influence on ground-level ozone concentrations in Hong Kong. Environmental Pollution, 123 307-317
- [14] R. San José, A. Stohl, K. Karatzas, T. Bohler, P. James and J. L. Pérez 2005. Modelling study of an extraordinary night time ozone episode over Madrid domain. Environmental Modelling ) Software 20, 587-593.
- [14] John R. Stedman 2004. The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave. Atmospheric Environment, 38, 1087-1090.
- [15] V. Tricio, R. Vitoria, A. Minguito, 2004. Measurement and correlation of tropospheric ozone and solar radiation levels at semi-urban sites in northern Spain. Ozone, Volume II, 1165-1166. ISBN: 960-630-105-2
- [16] V. Tricio, R. Vitoria, A. Minguito, 2005. Temporal variability of ozone air pollution near Burgos city (Spain) during three years measurements. Acid Rain 2005 Conference Abstracts, 196. ISBN 80-86690-25-3.

*Agradecimientos: A la Junta de Castilla y León que participa en la financiación parcial (proyecto BU020A05). A la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León, por los datos cedidos para nuestra investigación en este trabajo.*