

OZONO TOTAL EN SALAMANCA, ESPAÑA (NIMBUS TOMS/NASA) Y SU RELACIÓN CON LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL

J. SECO SANTOS
M. EGIDO MANZANO
A. CALVO REDONDO
M. GIL OJEDA
E. S. KAZIMIROVSKY
M. NAVARRO COMAS

RESUMEN.— En este trabajo se presenta un análisis estadístico de las variaciones del contenido total de ozono sobre Salamanca, comparándolo con la radiación solar global.

Los datos de ozono se han obtenido a través del instrumento Total Ozone Mapping Spectrometer, embarcado en el satélite «NIMBUS» (TOMS/NASA), para el período 1979-1991. Los datos de Radiación Solar Global se han obtenido con medidas actinométricas realizadas desde tierra en el observatorio de Matacán, (Salamanca): 40°56' N; 5°28' W. Elevación 789.8 m.

También se presenta una comparación de datos TOMS para «la cadena meridional de observatorios» en la Península Ibérica (El Arenosillo, Salamanca, Zaragoza, Andorra).

SUMMARY.— The statistical analysis of the total ozone content variations over Salamanca area is presented in comparison with global solar radiation.

The ozone data were obtained by Total Ozone Mapping Spectrometer on board «NIMBUS» satellite (TOMS/NASA) for the period 1979-1991. The global solar radiation data were obtained by actinometric measurements on horizontal surface at Observatory Matacán (Salamanca): 40°56' N; 5°28' W. Height 789.8 m.

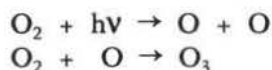
The comparison of TOMS data for the meridional chain of observatories in Iberian Peninsula (El Arenosillo, Salamanca, Zaragoza, Andorra) was presented too.

PALABRAS CLAVE: Meteorología / ozono / radiación solar / Salamanca.

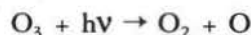
1. INTRODUCCIÓN

El ozono es una molécula relativamente inestable, compuesta por tres átomos de oxígeno, que se encuentra en la atmósfera terrestre. La mayor parte del ozono está concentrado por debajo de los 48 km de altura. A pesar de que representa sólo una pequeña fracción en la atmósfera, el ozono es esencial para la vida en la tierra. El ozono estratosférico actúa como un filtro que protege la superficie de la Tierra de la perjudicial radiación ultravioleta del Sol. Sin esta capa protectora, estaríamos más expuestos a contraer cáncer de piel (Mackie & Rycroft, 1980) y lesiones oculares. Sin embargo, en la troposfera, especialmente en la zona límite, el ozono es un contaminante perjudicial que causa daños al tejido pulmonar y a las plantas.

En la estratosfera, alrededor de los 24 km de altura, el ozono se crea y se destruye principalmente por acción de la radiación ultravioleta del Sol. Cuando rayos ultravioletas de alta energía alcanzan las moléculas de oxígeno ordinario (O_2), separan esta molécula en dos átomos de oxígeno. Un átomo libre de oxígeno puede chocar con una molécula de oxígeno (O_2), formando la molécula de ozono (O_3):



La característica del ozono que lo hace tan valioso, es su capacidad de absorber rayos ultravioletas. Cuando una molécula de ozono (O_3) absorbe radiación ultravioleta, incluso de baja energía, se desdobra otra vez en una molécula de oxígeno y un átomo libre.



Además, el ozono puede absorber parte de la radiación solar del espectro visible (Handbook US Air Force, 1968). La Fig. 1 muestra el espectro de radiación solar electromagnética que alcanza la superficie de la tierra y la atmósfera. También se muestra la curva de radiación del cuerpo negro para 5900 K.

Las fuerzas naturales también afectan a la concentración de ozono en la atmósfera. Debido a que el ozono es una molécula altamente inestable como consecuencia de su gran poder oxidante, reacciona muy fácilmente, donando su oxígeno «extra» a nitrógeno, hidrógeno y cloro, familias que siempre han existido en la atmósfera, y que proceden de fuentes como la tierra, vapor de agua y de los océanos.

Las erupciones volcánicas pueden inyectar materiales en la atmósfera que también pueden destruir el ozono. Es por lo que la distribución espacial del ozono puede resultar complicada. Además, los niveles de ozono varían periódicamente.

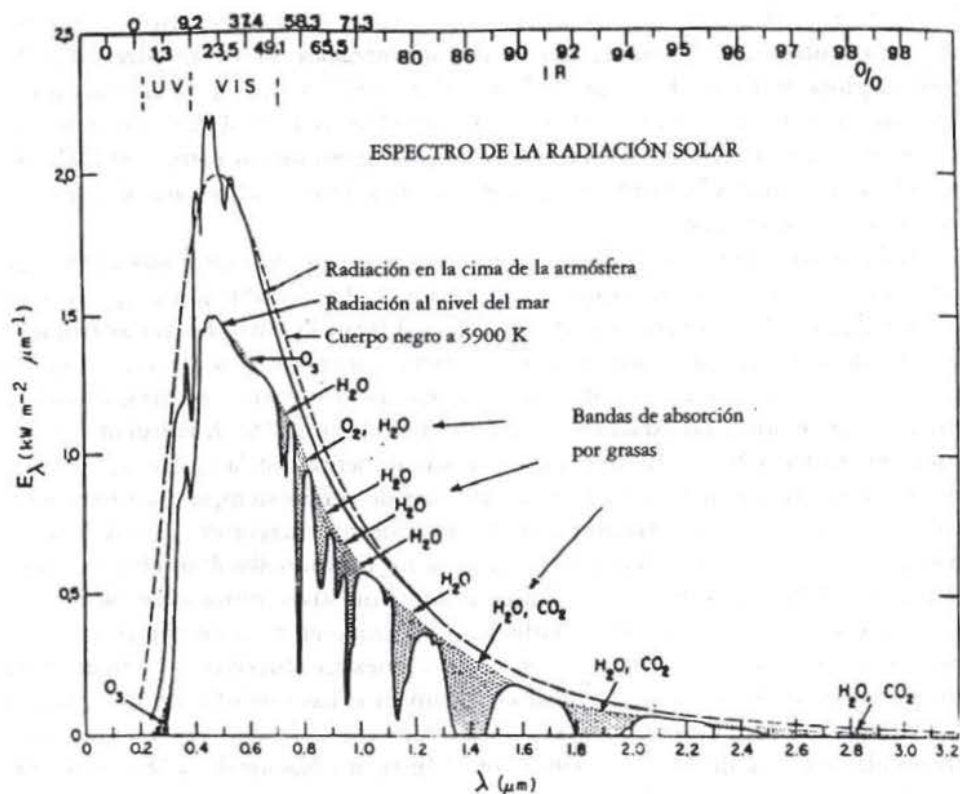


Fig. 1. Distribución espectral de la irradiancia extraterrestre y al nivel del mar para una atmósfera limpia, correspondientes a un ángulo cenital de 0° (masa de aire relativa unidad) a la distancia media Tierra-Sol. Se señalan las principales bandas de absorción de los gases atmosféricos. Los porcentajes de la escala superior indican el % de irradiancia extraterrestre para una longitud de onda inferior a la indicada en el eje de abscisas. (Adaptada del Handbook of Geophysics and Space Environments, Air Force Cambridge Laboratories, U.S. Air Force, 1965).

camente como parte de ciclos naturales como pueden ser el cambio de estaciones, vientos y ciclos de actividad solar.

En las últimas dos décadas, se ha puesto en evidencia que las actividades humanas están influyendo en el balance de ozono. La producción humana de cloro, que contiene sustancias químicas como clorofluorocarburos (CFCs), se añade como una causa adicional que destruye el ozono. Si la pérdida que se produce supera la cantidad de ozono que se crea, estamos ante una reducción del O_3 y, en consecuencia, la capa de ozono que nos protege de la radiación ultravioleta disminuye. Esto se ha detectado en un área específica, La Antártida, donde se forman nubes estratosféricas que contienen partículas de hielo. Las reacciones que se producen en la superficie de estas partículas de hielo aceleran

la destrucción del ozono causada por el cloro en la estratosfera. Además, se ha observado una ligera disminución en la concentración de ozono alrededor de todo el globo terrestre. En la segunda mitad de 1992, se han detectado los niveles más bajos de ozono hasta entonces medidos (NASA Facts 1993). De momento, es necesario determinar la influencia de esta disminución como resultado de actividades humanas, y también de fluctuaciones de los ciclos naturales, incluyendo la actividad solar.

Toda la atmósfera evoluciona a través de complejas interacciones entre: las radiaciones solar y terrestre, química, y dinámica. La distribución geográfica de la cantidad total de ozono muestra una clara diferencia entre las zonas tropicales, donde la misma se mantiene prácticamente constante y rara vez es afectada por perturbaciones de la atmósfera, y entre las zonas medias y polares, donde el ozono varía debido a las estaciones y la latitud (Robinson, 1969; Khrgian, 1975). En el Hemisferio Norte, la cantidad de ozono aumenta con la latitud (en latitudes medias). La variación anual de la cantidad de ozono siempre ha interesado, ya que es distinta a la variación de otros parámetros meteorológicos. La cantidad de ozono en el Hemisferio Norte alcanza un máximo absoluto en primavera (alrededor del equinoccio) y decae hasta alcanzar un suave mínimo en otoño.

El estudio de las variaciones estadísticas del ozono en relación con otros parámetros meteorológicos es muy interesante y nuestro objetivo es comparar las mismas con la radiación solar global en Salamanca. Las medidas de la radiación solar (450-750 nm) en el Observatorio de Matacán, se llevan realizando ininterrumpidamente desde Mayo de 1966 por el Instituto Nacional de Meteorología. Las medidas desde tierra de ozono en Salamanca, son muy recientes, por lo cual hemos tomado los datos del Total Ozone Mapping Spectrometer, del satélite «NIMBUS» (TOMS/NASA), durante el período 1979-1991 para diversas áreas—El Arenosillo (37.1°N; 6.7°W); Salamanca (40.9°N; 5.5°W); Zaragoza (41.5°N; 1.0°W); Andorra (42.4°N; 1.5°E).

Presentamos a continuación el análisis estadístico de las variaciones del contenido total de ozono sobre Salamanca, en comparación con la radiación solar global. Además, comparamos las variaciones de ozono en áreas situadas en diferentes zonas climáticas de la Península Ibérica.

2. INSTRUMENTACIÓN Y DATOS

Los datos de Radiación Solar han sido obtenidos a través de un piranómetro SIAP, de tipo bimetálico, instalado en el observatorio de Matacán (Salamanca), perteneciente a la Red radiométrica Española y que cumple con la normativa internacional.

Los datos de ozono nos han sido facilitados por la NASA medidos por el satélite Nimbus/TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). Estos datos cu-

SALAMANCA. VALORES DIARIOS DE OZONO. PERIODO 1979-1991

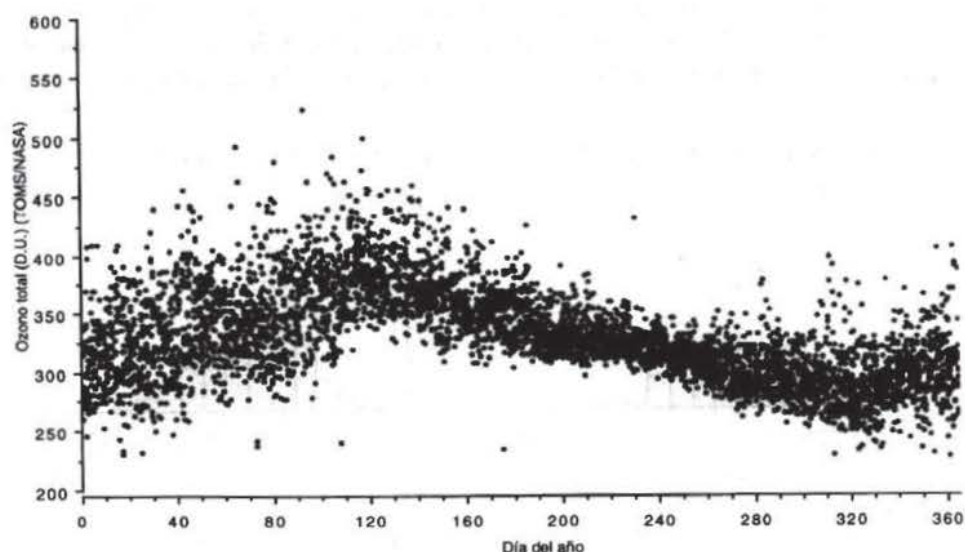


Fig. 2. Valores diarios del contenido total de ozono (D.U.), (TOMS/NASA) sobre Salamanca, 1979-1991.

bren la totalidad del globo cada día (exceptuando las zonas oscuras). Por supuesto, los datos no son simultáneos, ya que el satélite realiza distintas órbitas en tiempos distintos, barriendo diferentes áreas. Esto debe ser tenido en cuenta cuando se realicen estudios con escalas pequeñas de tiempo. Nosotros disponemos de un disco láser con datos TOMS/NASA. Unos programas especiales, CD-ROM y propio pregunta al usuario por la latitud y longitud de la zona, y por el primer y último día del período a estudiar (User's Guide, 1991). El programa lee y expone los datos de ozono para esa zona determinada y en ese rango de tiempo, obteniéndose datos diarios o datos medios mensuales. Las medidas realizadas por el satélite, nos muestran que la precisión del instrumento TOMS es comparable con la de una estación Dobson. Variaciones diarias y estacionales medidas por satélite sobre estaciones seleccionadas Dobson, coinciden totalmente con las medidas tomadas desde tierra (e.g. Keating et al. 1990; Mc Peters & Kohmyr, 1991).

3. RESULTADOS

La fig. 2 muestra la variación anual de valores día a día del contenido total de ozono para todo el período 1979-1991. Es evidente que la dispersión de los

datos es bastante alta, especialmente en invierno y primavera, pero se observa un máximo agudo en primavera y un suave mínimo en otoño. Los meses de otoño se caracterizan por tener unas condiciones más estables, la dispersión de ozono es mínima. La distribución de la cantidad total de ozono de cada año (histogramas) se muestra en la fig. 3, y en la fig. 4, el histograma para todo el

SALAMANCA. DATOS DIARIOS DE OZONO. HISTOGRAMAS (1979-1991)

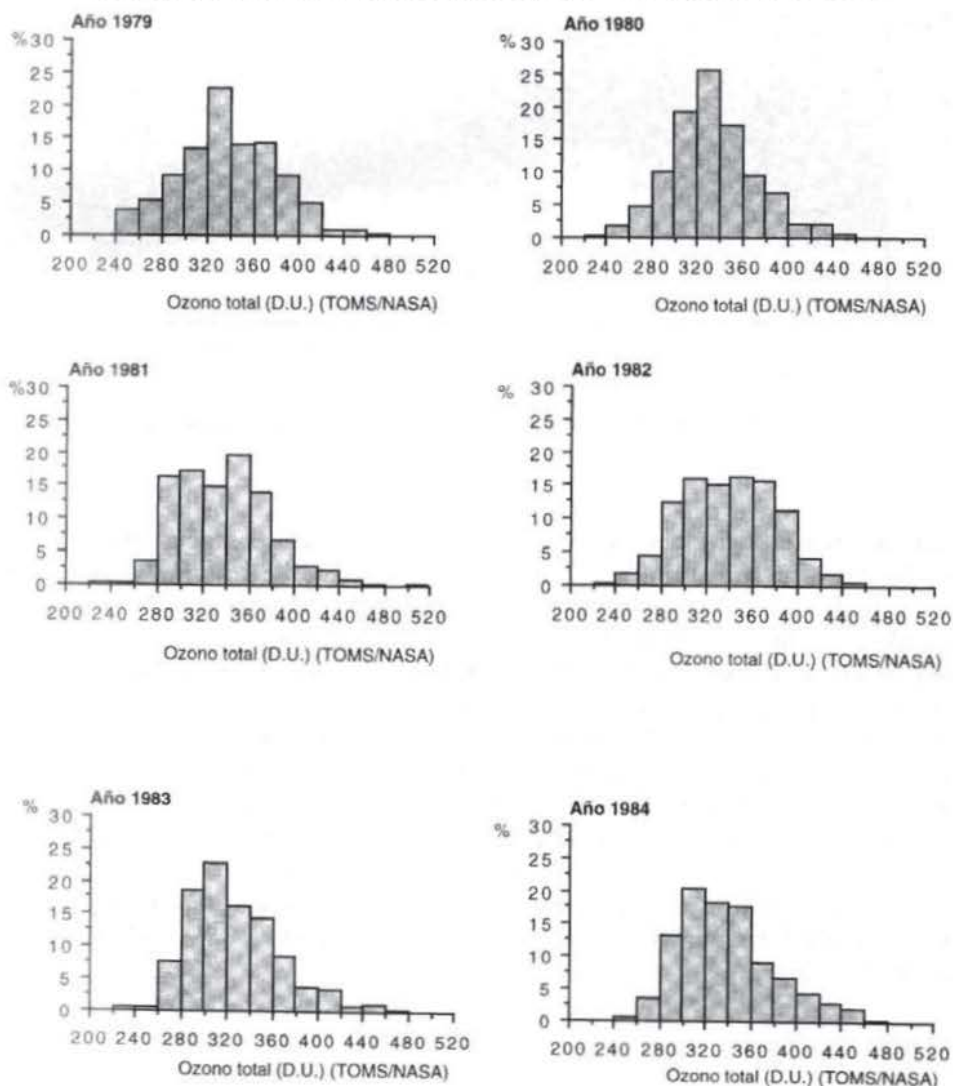
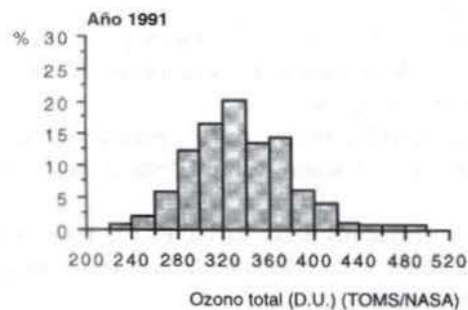
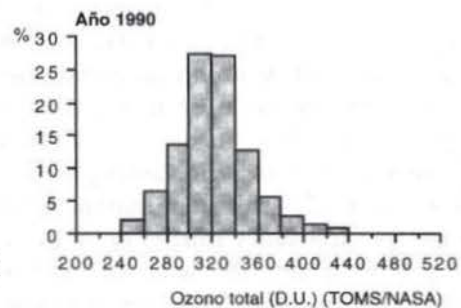
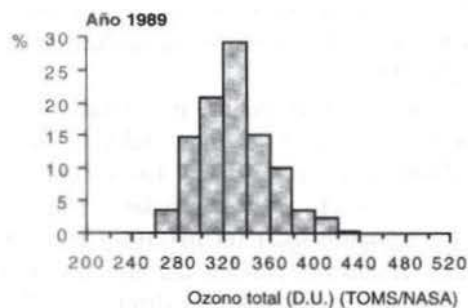
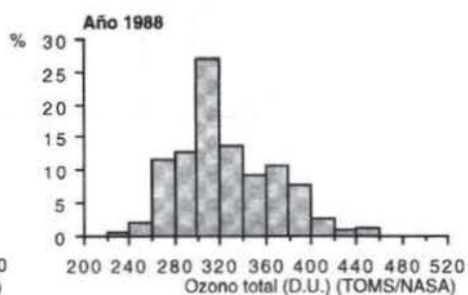
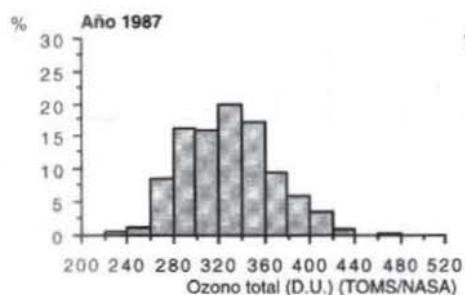
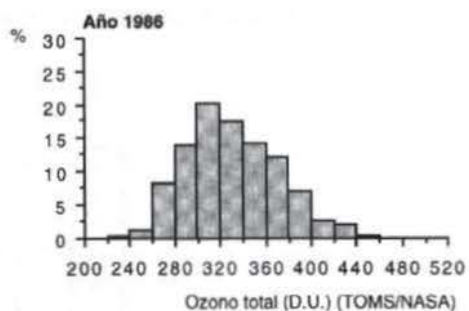
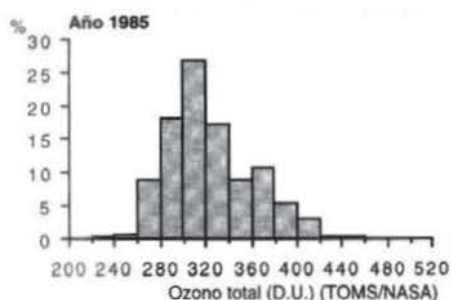


Fig. 3. Valores diarios del contenido total de ozono (D.U.), (TOMS/NASA) sobre Salamanca. 1979-1991. Histogramas para cada año.



DATOS DIARIOS DE OZONO. SALAMANCA (1979-1991)

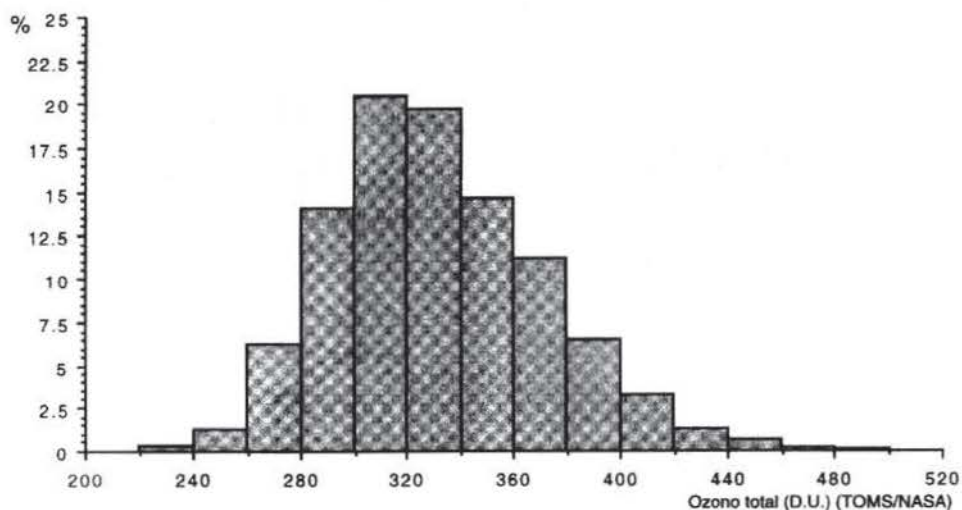


Fig. 4. Valores diarios del contenido total de ozono (D.U.), (TOMS/NASA) sobre Salamanca. 1979-1991. Histogramas para todo el periodo.

periodo (1979-1991). Es evidente que la cantidad de ozono de mayor probabilidad sobre Salamanca está entre las 300 y 340 D.U., aunque haya días en las que la cantidad de ozono sea menor que 240 D.U.

Posteriormente, operamos con valores medios mensuales. En la tabla 1 se exponen los valores medios mensuales de la cantidad de ozono total (Unidades Dobson) y de la radiación solar global ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$) o ($\text{ly}\cdot\text{día}^{-1}$). Las variaciones de ambos parámetros se muestran en las fig. 5 y 6. Es posible señalar un desfase entre las variaciones anuales de ozono y la radiación solar (el máximo de ozono precede al máximo de radiación), pero estos desfases dependen del año. Las suaves tendencias negativas en la variación de ambos parámetros durante 1979-1991 se exponen separadamente. Las líneas de regresión han sido calculadas mediante el método de mínimos cuadrados.

Las fig. 7a y 7b muestran las variaciones medias estacionales para ambos parámetros, el desfase es evidente. Las rectas de regresión y coeficientes de correlación para distintos desfases se muestran en la fig. 8.

En el presente trabajo hemos aplicado el análisis de Fourier para el cálculo de los desfases entre las variables ozono y radiación solar (Bendat & Pier-sol, 1966).

Estos ajustes senoidales (Carson 1963), aplicados a las variables O_3 y G , nos han permitido, determinar de una forma sencilla la relación de fase entre estas variables. Hemos empleado ecuaciones del tipo:

Tabla 1. Valores medios mensuales del contenido total de ozono (Unidades Dobson), TOMS/NASA y radiación solar global ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$). Salamanca/Matacán, 1979-1991.

Ozono (D.U.)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media Anual
1979	344	356	375	388	393	362	342	329	320	315	271	304	342
1980	313	333	359	369	381	362	337	323	308	297	295	317	333
1981	315	358	342	392	392	352	343	338	311	296	289	316	337
1982	343	365	361	386	385	356	351	326	314	300	294	289	339
1983	294	338	329	383	371	347	349	330	301	298	286	304	328
1984	336	332	386	357	406	362	332	328	307	294	305	300	337
1985	310	331	325	359	371	337	331	312	298	286	293	323	323
1986	333	352	345	400	369	346	330	320	296	285	311	289	331
1987	302	330	342	378	371	364	345	334	304	304	283	297	330
1988	300	350	321	359	379	380	327	317	308	295	276	296	326
1989	323	326	339	372	366	352	333	325	313	295	303	307	330
1990	323	307	324	376	351	342	323	319	313	291	281	304	321
1991	332	369	371	388	378	353	341	328	308	308	278	281	336
media	321	342	348	377	378	355	337	325	308	297	290	302	332
Ozono (D.U.)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media Anual
1979	140	223	315	454	537	594	574	567	389	261	234	138	369
1980	162	242	351	448	473	616	616	527	453	296	198	187	381
1981	202	284	332	397	526	592	610	521	424	336	240	123	382
1982	167	227	400	467	539	562	584	560	383	272	167	108	370
1983	186	226	393	393	451	576	597	470	447	308	146	158	363
1984	142	252	312	412	372	507	624	530	429	287	143	128	345
1985	156	218	370	430	491	559	571	565	419	327	174	124	367
1986	174	194	356	399	532	633	640	539	351	292	190	158	372
1987	162	224	403	459	577	574	518	487	400	223	188	113	361
1988	152	236	425	385	400	470	562	547	430	300	197	130	353
1989	179	251	367	366	576	560	545	495	389	287	127	107	354
1990	148	243	378	394	488	531	548	485	381	216	179	132	344
1991	154	204	274	432	492	580	521	505	389	256	170	136	343
media	163	233	360	416	493	566	578	523	406	282	181	134	361

SALAMANCA. DATOS MEDIOS MENSUALES

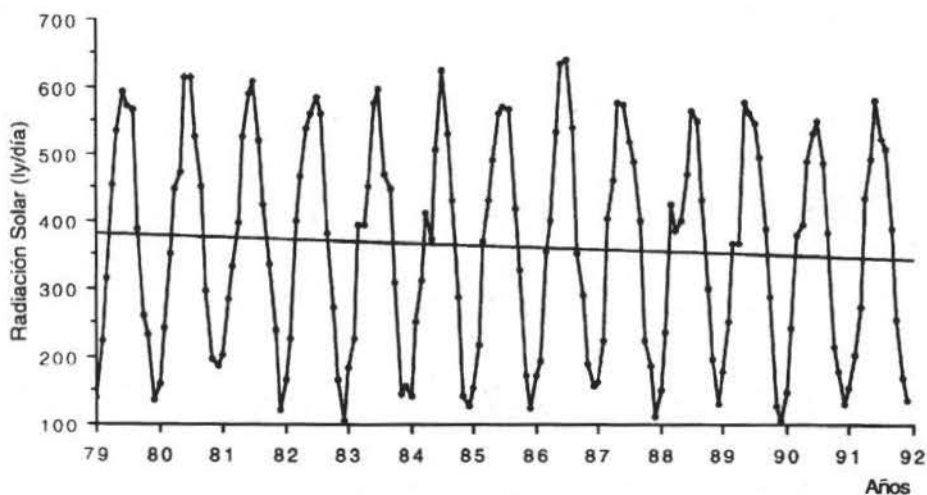
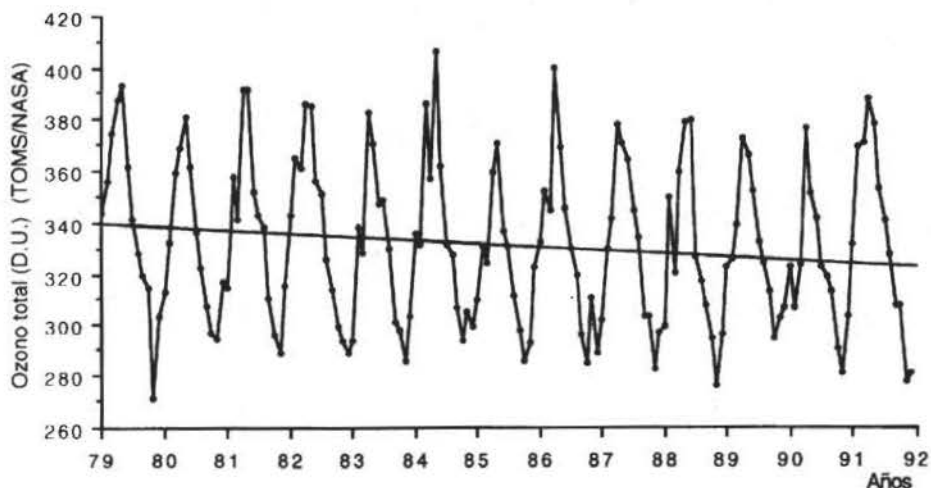


Fig. 5 y Fig. 6. Variación de los valores medios mensuales del contenido total de ozono y la radiación solar global. 1979-1991. Salamanca/Matacán.

SALAMANCA. DATOS MEDIOS MENSUALES

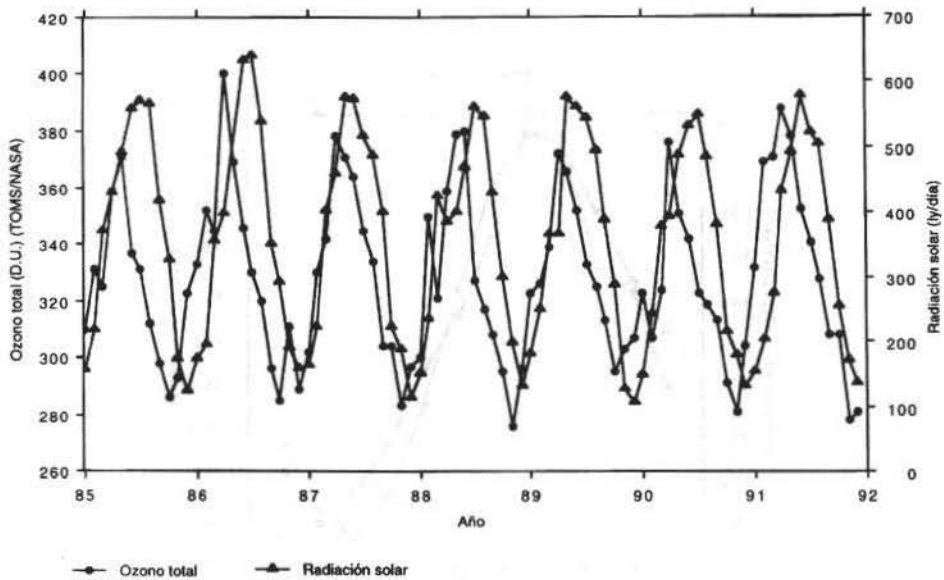
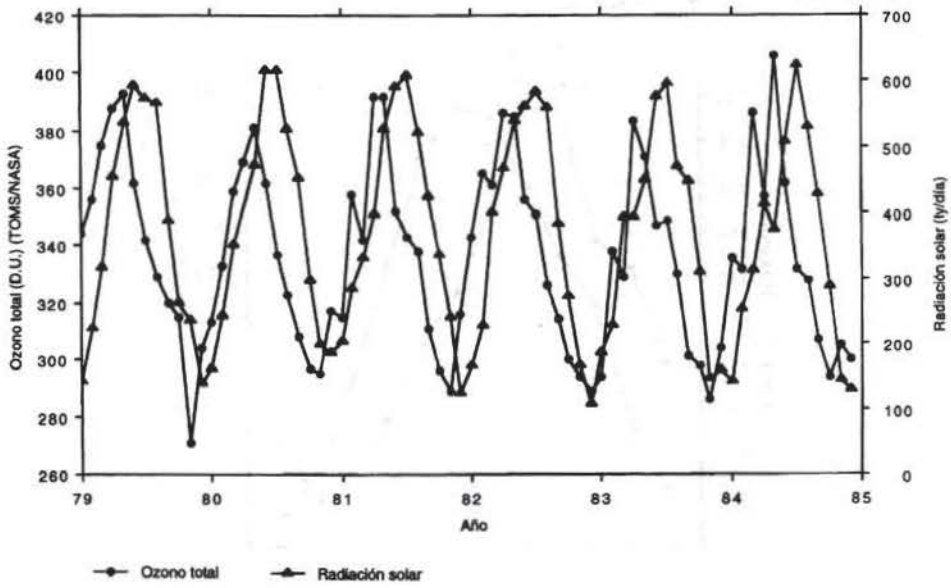


Fig. 5 y Fig. 6. Variación de los valores medios mensuales del contenido total de ozono y la radiación solar global. 1979-1991. Salamanca/Matacán.

SALAMANCA. MEDIA PARA EL PERIODO 1979-1991

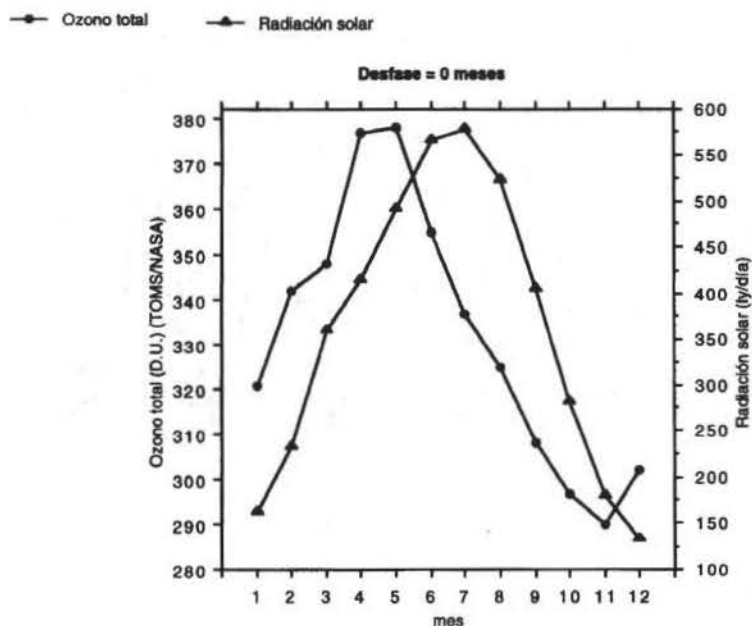


Fig. 7a. Ozono y radiación solar global en Salamanca, para todo el periodo 1979-1991.

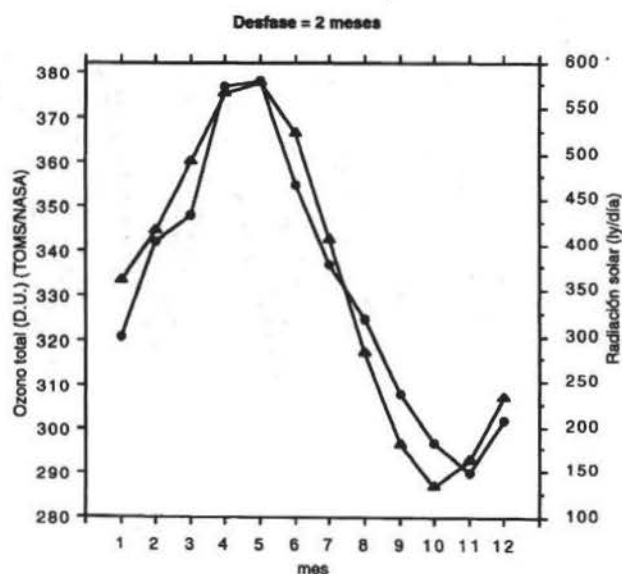


Fig. 7b. Lo mismo que la fig. 7, pero con un desfase de dos meses.

SALAMANCA. MEDIA PARA EL PERÍODO 1979-1991
RECTAS DE REGRESIÓN OZONO TOTAL/RADIACION SOLAR

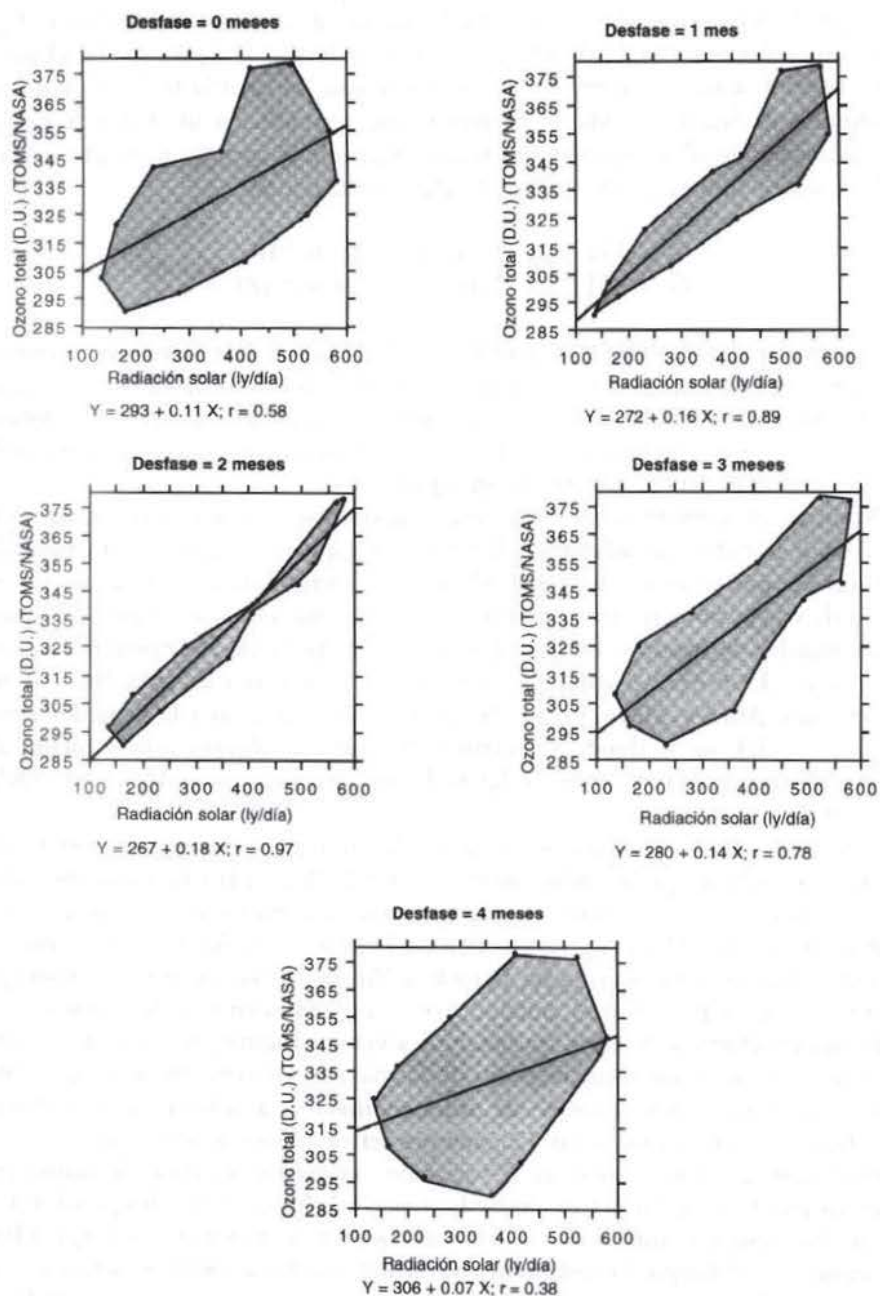


Fig. 8. Rectas de regresión ozono/radiación solar con diferentes desfases.

$$Y = C + C_0 \text{ sen } (\omega t + \phi)$$

en la que C representa el valor promedio de la variable correspondiente, C_0 la amplitud, y ϕ es el ángulo de fase medido en radianes. Una vez hecho el ajuste de la ecuación a las dos variables que se comparan, se calcula la diferencia entre sus ángulos de fase (obtenida en radianes), que se traduce a unidades de tiempo (generalmente en días), quedando así determinado el correspondiente desfase.

En nuestro caso las ecuaciones ajustadas resultaron ser:

$$\begin{aligned} O &= 331.67 + 39.47 \text{ sen } (\omega t - 0.74) \\ G &= 361.67 + 216.27 \text{ sen } (\omega t + 0.18) \end{aligned}$$

que supone una diferencia de fase O-G de 53.4 días, lo que significa en nuestro caso que, la onda radiativa lleva un retraso de fase respecto de la onda de ozono de 53.4 días considerando los datos de ambas variables globalmente. En futuros trabajos analizaremos el cálculo de estas diferencias de fase año a año para poder estudiar con más detalle las anomalías registradas.

Nosotros no pensamos que haya una relación directa entre el contenido total de ozono y la radiación solar global, pero, por supuesto, parte de esta radiación es absorbida por el ozono de la atmósfera, y es normal que el máximo en el contenido de ozono no coincida con el máximo en radiación solar global. Las variaciones anuales de ozono y radiación solar no dependen de los mismos mecanismos físicos. La cantidad total de ozono sobre Salamanca alcanza los mayores valores entre Abril y Mayo, porque Salamanca está próximo a la zona del cinturón tropical del norte, donde el máximo de ozono se observa más o menos dos meses después que en la zona de latitud comprendida entre 45° y 65° (Khrigian, 1975).

A la vista de las gráficas que acabamos de citar podemos emitir nuestro juicio en el sentido de que la radiación solar, cuando llega a la ozonosfera (se entretiene), comienza a transformar el oxígeno molecular en oxígeno atómico y este produce finalmente el ozono; en ese tiempo la concentración de ozono aumenta, pero la radiación solar aún no ha llegado a Tierra, lo hace con un retraso que, en nuestro caso y para valores anuales, hemos calculado en casi dos meses.

Si esta experiencia anual la trasladamos a valores diarios, supone cuatro horas de retraso, la radiación solar, respecto de la máxima de concentración de ozono.

Resumiendo, la concentración de ozono es máxima a la ocho de la mañana y la radiación en tierra lo es a las 12, siempre refiriéndonos a hora solar.

Finalmente, la fig. 9 muestra la variación del contenido total de ozono para 4 puntos en el territorio del rango de latitud 37.1°N - 42.2°N y longitud 1.5°E - 6.7°W . No tenemos suficiente información acerca de la variación longitudinal del ozono, sin embargo, la sistemática variación con la latitud (creciendo el contenido total de ozono de sur a norte) para este territorio es obviamente de Enero a Junio.

MEDIA PARA EL PERIODO 1979-1991

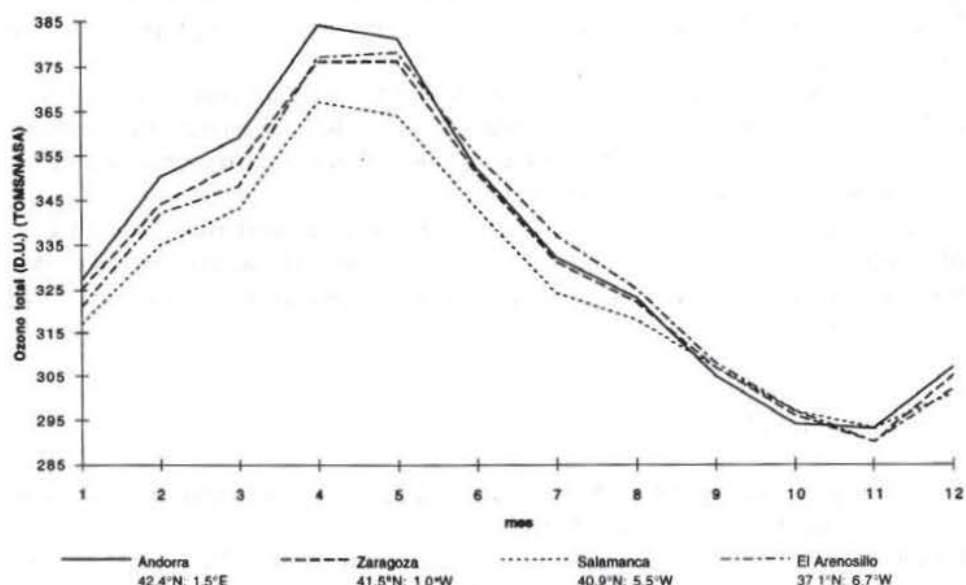


Fig. 9. La variación media anual del contenido total de ozono sobre El Arenosillo, Salamanca, Zaragoza, Andorra. TOMS/NASA. 1979-1991.

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado por primera vez información preliminar acerca de las características estadísticas del contenido total de ozono sobre Salamanca, España, para un largo período de tiempo (13 años). Se ha encontrado que la cantidad de ozono más probable está entre 300 y 340 D.U., aunque hay algunos días en los que esta cantidad es menor que 240 D.U.

La variación media anual tiene su máximo en Abril-Mayo.

La variación media diaria tiene su máximo a las 8 horas y la radiación tiene su valor máximo a las 12, hora Z (hora solar).

Hemos encontrado una alta y positiva correlación entre variaciones anuales de ozono y radiación solar global, con un desfase de dos meses. La cantidad total de ozono varía proporcionalmente con la latitud; de modo que un aumento de la latitud se corresponde con una mayor cantidad de ozono, hecho que concuerda con los resultados de investigaciones previas sobre este mismo tema realizadas en el Hemisferio Norte.

La investigación está dirigida a acumular y generalizar evidencias experimentales de la relación entre el ozono y otros parámetros meteorológicos, especial-

mente en el área de la Comunidad de Castilla y León. Casi todo nuestro trabajo está basado en datos empíricos y en correlaciones entre distintos parámetros. Una alta correlación, aunque estadísticamente significativa, no proporciona una prueba física.

Para formarse una idea de la relación entre diferentes fenómenos, es necesario mostrar mecanismos físicos convincentes que no sólo cualitativa, sino también cuantitativamente permitan predicciones fiables. Todavía existen en esta área un gran número de problemas sin resolver.

Agradecimiento: Los autores quieren agradecer al Instituto Nacional de Meteorología haber puesto a su disposición los datos de Radiación Solar. Así mismo a NSSDC/NASA el habernos proporcionado los datos de ozono del Satélite Nimbus VII.

5. BIBLIOGRAFÍA

- BENDAT, J. S. and PIERSOL, A. G., 1966, *Measurement and Analysis of Random Data*. John Wiley and Sons, U.S.A.
- CARSON, J. E., 1963, Analysis of Soil and air Temperatures by Fourier techniques. *Journal of Geophysical Research*, 68, nº 8 April 15.
- KEATING G. M., M. C. PITTS, YOUNG D. F., 1990, Ozone reference models for the middle atmosphere, *Adv. Space Res.*, 10, nº 12, 317.
- KHRGIAN A. KH., 1975, *The physics of atmospheric ozone*. Israel Program for Scientific Translation (Translation from Russian), Jerusalem.
- MACKIE R. M. and M. J. RYCROFT, 1988, Health and the ozone layer-skin cancers may increase dramatically, *British Medical Journal*, 297, 369-270.
- Mc PETERS, R. D. and KOHMYR W. D., 1991, Long-term changes in SBUVS/TOMS relative to World Primary Standard Dobson Spectrometer 086, *Journal of Geophysical Research*, v. 96, 2987-2994.
- NASA Facts, National Aeronautics and Space Administration, Goddard space Flight Center, Document NF-198, December 1993.
- The «NIMBUS-7» User's guide, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 1991.
- ROBINSON, N., 1969, *Solar Radiation*, Elsevier Publishing Company, New York.