

## Aplicación del Método Dobson a la estimación del ozono total utilizando un radiómetro ultravioleta

J. C. Gonzalez Navarrete

*Fundación Universitaria Los Libertadores, Dirección de investigación,  
Carrera 16 No 63A-18, Bogotá-Colombia,  
e-mail: jucegonza3@hotmail.com*

J. Salamanca

*Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Grupo de Física e Informática,  
Carrera 3 No 26A-40, Sede Macarena A, Bogotá-Colombia,  
e-mail: jasalamanca@udistrital.edu.co*

Recibido el 17 de mayo de 2012; aceptado el 11 de septiembre de 2012

Se presenta un procedimiento para hacer estimaciones del ozono total utilizando un radiómetro ultravioleta global de tipo GUV2511 de Biospherical Instruments, aplicando el método de Dobson a cuatro de las radiaciones del rango UV-B, detectadas en dicho instrumento. Este procedimiento involucra una propuesta para la estimación de las componentes directa y difusa de la radiación ultravioleta espectral global que recibe el radiómetro. Se presenta un análisis de los resultados obtenidos al aplicar este procedimiento durante el lapso de casi dos meses de observaciones. El perfeccionamiento de este modelo de estimación del ozono total puede proporcionar también elementos para estudiar el comportamiento de las nubes en las zonas tropicales de alta montaña, afectadas además por las condiciones de la zona de confluencia intertropical.

*Descriptor:* Ozono total; radiación ultravioleta solar; método de Dobson; radiómetros UV.

A procedure to compute total ozone estimation by applying Dobson method, with a data set obtained from a global ultraviolet radiometer -GUV2511 Biospherical Instruments- is presented here. Dobson method is applied by using four different spectral lines in the UV-B range that are measured by the radiometer. This procedure involves a proposal for a calculation of direct -and diffuse-spectral radiation from a global spectral radiation measurement. The enhancement of this total ozone calculation model can also provide elements to study clouds behavior in tropical high mountain zones. In our case, it is affected furthermore by the intertropical confluence zone.

*Keywords:* Total ozone; solar ultraviolet radiation; Dobson method; UV radiometers.

PACS: 92.60.-e; 07.60.Rd; 93.30.Jg; 92.10.am.

### 1. Introducción

No son muchas las investigaciones reportadas en la zona tropical Andina en latitudes comprendidas entre 20°S a 20°N, que den cuenta de resultados reales de niveles de radiación ultravioleta B (UV-B) y de su posible dependencia de variables geo-atmosféricas, como la altura sobre el nivel del mar. Dentro de estas investigaciones se destaca una realizada en el Observatorio de Huancayo Perú [21] que reporta incrementos de la radiación UV-B entre un 10% a un 20% por cada mil metros de ascenso sobre el nivel del mar, coincidiendo en parte con investigaciones y proyecciones más recientes [13,18]. Las publicaciones anteriores refuerzan conclusiones teóricas [11] que concuerdan además con investigaciones experimentales acerca de la dependencia que tienen los niveles de la radiación UV-B que llegan a la superficie terrestre, de variables tales como: el ángulo de incidencia de la radiación solar en relación con la atmósfera, la columna total de ozono y la nubosidad, entre otras.

El presente artículo se enmarca dentro de los resultados del proyecto de investigación “*Valoración de las condiciones atmosféricas que determinan riesgo por exposición a la radiación ultravioleta solar en la Sabana de Bogotá-Colombia*” que se realiza en la Fundación Universitaria Los Libertado-

res, y cuyo objetivo general es determinar los niveles de radiación UV-B y estudiar el nivel de riesgo por exposición a dicha radiación en las condiciones de la Sabana de Bogotá. Para tal propósito, es importante determinar el ozono total, que a su vez está directamente relacionado con los niveles de radiación UV-B.

Para efectos del presente trabajo se puntualizan las siguientes consideraciones:

1. El ángulo de incidencia de la radiación UV-B solar en la atmósfera está implícito en el ángulo cenital, el cual para las latitudes tropicales permanece en rangos bajos (latitud de Bogotá: 4° 40' Norte). Esto garantiza mayor contribución a los niveles de la radiación solar y en particular a mayores valores de radiación UV-B. Cabe mencionar que para Bogotá, el ángulo cenital varía entre 0° y 19° cuando la declinación es positiva (Norte), y entre 0° y 25° cuando la declinación es negativa (Sur).
2. La nubosidad presenta complicadas interacciones con la radiación solar; no todas suficientemente conocidas, y menos aún, su efecto sobre las características y las intensidades de la radiación UV-B que alcanza la superficie terrestre. La Sabana de Bogotá está intensamente

afectada por esta condición, ya que solamente alrededor de veinte días al año están completamente exentos de nubosidad.

3. Las estimaciones terrestres del ozono total en localidades como las de zona Andina en conjunción con nubosidad y contaminación, incrementan su incertidumbre, debido a que la radiación UV-B espectral está conformada por la suma de las componentes difusa más directa. Este hecho justifica que en localidades como las que predominan en la Sabana de Bogotá se utilicen radiómetros operativos UV del tipo global antes que espectrofotómetros del tipo Dobson cuyo diseño es especial para radiación espectral directa. Desde hace varios lustros se han esgrimido razones que justifican el uso de los radiómetros UV globales [3] en diversas circunstancias.

En este artículo se presenta una metodología para estimar el ozono total en las condiciones de la Sabana de Bogotá; es decir, en localidad ecuatorial Andina (cercana a la alta montaña), en condiciones de nubosidad y contaminación. Aunque se aplica en alta montaña, corresponde a una primera aproximación asumir condiciones de cielo despejado, que desafortunadamente no se dieron en el período de medición, y que fueron agravadas por el apareamiento del fenómeno de la Niña. El método consiste en lo siguiente:

- \* Utilizar un radiómetro ultravioleta que mide espectralmente la radiación UV-B en forma global (p. ej., suma de las componentes de radiación espectral directa y difusa del rango UV-B solar) que llega a la superficie terrestre.
- \* La magnitud de la componente de radiación espectral directa se obtiene de restar la magnitud estimada de la componente de la radiación UV-B difusa de la medición de la radiación espectral global.
- \* Una vez estimada la magnitud de la radiación UV-B directa, se aplica el método desarrollado por Dobson [8] para los espectrofotómetros que llevan su nombre y así determinar el ozono total.

Este método potencia la utilidad de los radiómetros UV-B tipo global, ya que permite estimar la componente de la radiación UV-B directa, componente para la cual no están diseñados. Entre los radiómetros que miden en estación terrestre la radiación UV-B directa, además de los espectrofotómetros de Dobson [8, 9] están los de Brewer, que además de su alto costo, las condiciones experimentales para hacer mediciones y las rutinas de operación y calibración resultan engorrosas.

## 2. Instrumentación y condiciones experimentales

El lugar de medición es el Laboratorio de Radiometría Solar ubicado en la terraza de la sede Santander de la Funda-

ción Universitaria Los Libertadores (FULL) en la localidad de Barrios Unidos en Bogotá-Colombia. Las características del sitio son:

1. Ubicación geográfica: latitud: 4° 40' Norte; longitud: 73° 04' Oeste; altura sobre el nivel del mar: 2608±5 m (datos obtenidos por GPS).
2. Las características climáticas son propias de la Zona Andina con afectación ocasionada por la zona de confluencia Inter-tropical [1, 7]. Algunas de las variables meteorológicas características de la zona de medición son [19]: la presión barométrica muestra un promedio anual de 750 ± 2 hPa, promedio representativo y típico de la altura sobre el nivel del mar; la precipitación anual de la Sabana de Bogotá fluctúa entre 785 mm y 866 mm; para el lapso de medición que se reporta (10 de Mayo a 30 de Junio de 2010), los valores mensuales están alrededor de los 100 mm que coinciden con los promedios de uno de los dos períodos de mayor precipitación durante el año, y por lo tanto, de mayor nubosidad. La temperatura media anual de la Sabana de Bogotá es de 13,5°C y la del sitio de medición en FULL es de 13,9°C. Igualmente, el promedio anual de la humedad relativa de la Sabana de Bogotá es de 70 %.
3. El instrumento utilizado es un radiómetro del tipo GUV (por la sigla en idioma Inglés: Ground Ultraviolet) de alta velocidad (aproximadamente 200 mediciones por minuto en cada canal) con referencia 2511 de Biospherical Instruments Inc., y calibración vigente de fecha 28-08-2009, según procedimientos del National Institute of Standards and Technology (NIST). Su diseño es propio para detectar irradiancia espectral global ( $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{nm})$ ) en los canales monocromáticos de 305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm y 395 nm, con anchos de banda de 10 nm FWHM. Incluye también un canal de banda ancha para PAR (de la sigla en idioma Inglés de Photosynthetically Active Radiation).

## 3. El Método

### 3.1. Estimación de la componente de la radiación directa espectral Incidente en el radiómetro

El punto de partida es el conocimiento del coeficiente espectral de dispersión molecular del aire puro,  $k_{d\lambda}$ , para el cual se han utilizado las mediciones reportadas por Murad y Tabocchini [14] que se muestran en la Tabla I.

Los valores subrayados corresponden a los obtenidos por interpolación (Fig. 1), para ser utilizarlos en los canales elegidos del radiómetro GUV-2511, y con ellos aplicar el método. Las longitudes de onda escogidas fueron: 305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm (dentro del conjunto de las disponibles, son las que interactúan más intensamente con el ozono).

TABLA I. Coeficiente espectral de dispersión molecular del aire puro,  $k_{d\lambda}$ , para el rango entre 305.5 nm y 340 nm. Los valores subrayados se obtuvieron por interpolación según la Fig. 1; los demás fueron tomados de Murad y Tabocchini [14].

$\lambda$ (nm)	$k_{d\lambda}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
305.5	0.491
308.8	0.47
311.4	0.453
313.0	<u>0.439</u>
317.6	0.416
320.0	<u>0.41</u>
325.4	0.375
329.1	0.357
332.4	0.343
339.8	0.312
340.0	<u>0.3099</u>

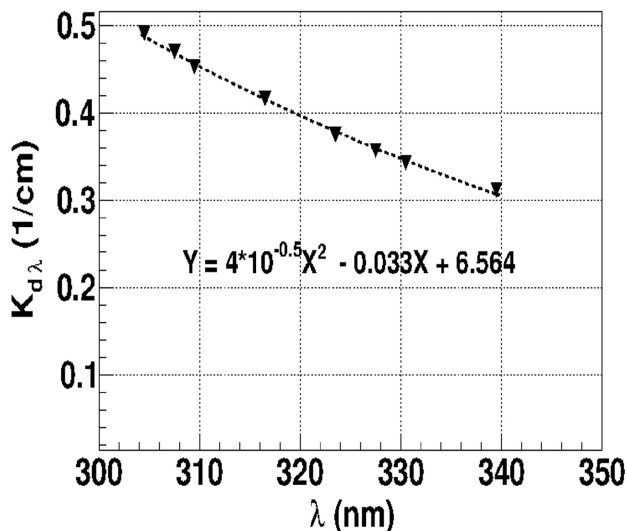


FIGURA 1. Coeficiente espectral de dispersión molecular del aire puro,  $k_{d\lambda}$ , como función de la longitud de onda en el rango mostrado, según las medidas reportadas por Murad y Tabocchini [14]. La curva de tendencia -polinomio de grado 2- ilustra un excelente ajuste a los datos.

Dando al coeficiente espectral de dispersión,  $k_{d\lambda}$  la interpretación que se puede deducir del tratamiento expuesto por Yavorski y Detlaf [22], de ser un indicador de la fracción de la intensidad de radiación monocromática que se dispersa con respecto de la total que llega al detector, se aplica entonces este indicador al valor medido por el instrumento  $I_{G\lambda}$ , que justamente corresponde al valor de la irradiancia global para una determinada longitud de onda. Así, la irradiancia difusa  $I_{d\lambda}$ :

$$I_{d\lambda} = k_{d\lambda} I_{G\lambda} \tag{1}$$

Debe tenerse en cuenta que lo que está detectando el medidor es la radiación monocromática UV,  $I_{G\lambda}$  que logró atra-

vesar la capa de ozono y que sin ser absorbida por el aire puro, llegó a la superficie terrestre. Estimada de esta forma  $I_{d\lambda}$ , la radiación directa  $I_{D\lambda}$  se obtiene de:

$$I_{D\lambda} = I_{G\lambda} - I_{d\lambda} = I_{G\lambda}(1 - k_{d\lambda}) \tag{2}$$

### 3.2. Estimación del ozono total $\Omega$

Aplicando el método de Dobson en la forma de Murad y Tabocchini [14]

$$\Omega = \frac{\log \frac{I_{o\lambda c}}{I_{o\lambda l}} - \log \frac{I_{D\lambda c}}{I_{D\lambda l}}}{m_o(k_{oc} - k_{ol})} - \frac{m_r(k_{dc} - k_{dl})}{m_o(k_{oc} - k_{ol})} \tag{3}$$

se tiene que,  $I_{o\lambda c}$  es la irradiancia extraterrestre de la longitud de onda monocromática  $\lambda$  correspondiente a la más corta del par escogido, medida en unidades de  $\mu\text{W}/(\text{m}^2\text{nm})$ ,  $I_{o\lambda l}$  es la irradiancia extraterrestre de la longitud de onda monocromática  $\lambda$  correspondiente a la más larga del par escogido, medida en unidades de  $\mu\text{W}/(\text{m}^2\text{nm})$ ,  $I_{D\lambda c}$  es la irradiancia directa medida de la longitud de onda monocromática  $\lambda$  correspondiente a la más corta del par escogido, medida en unidades de  $\mu\text{W}/(\text{m}^2\text{nm})$ ,  $I_{D\lambda l}$  es la Irradiancia directa medida de la longitud de onda monocromática  $\lambda$  correspondiente a la más larga del par escogido,  $k_{oc}$  y  $k_{ol}$  son los coeficientes espectrales de absorción por ozono de las radiaciones correspondientes a las longitudes corta y larga del par elegido,  $k_{dc}$  y  $k_{dl}$  son los coeficientes espectrales de dispersión molecular por aire puro de las radiaciones correspondientes a las longitudes corta y larga del par elegido en  $1/\text{cm}$ , y,  $m_o$  y  $m_r$  son las masas ópticas relativas del ozono y del aire puro respectivamente.

Para los parámetros  $m_o$  y  $m_r$ , que intervienen en la Ec. (3), se utilizarán algunos de los modelos desarrollados y probados en la siguiente década al trabajo de Murad y Tabocchini [14]. Para los coeficientes de absorción se utilizarán valores experimentales obtenidos en la última década del siglo XX. De acuerdo a Robinson (citado por Iqbal [6]):

$$m_o = \frac{(1 + z_3/r_e)}{[\cos^2 \theta_z + 2(z_3/r_e)]^{1/2}} \tag{4}$$

con  $z_3$ , la altura sobre el nivel del mar del sitio de medición,  $r_e$  el radio medio de la Tierra y  $\theta_z$  el ángulo cenital correspondiente al sitio y hora de la medición, e igualmente, la expresión de Kasten y Young [12]:

$$m_r = [\cos \theta_z + 0, 50572(96, 07995 - \theta_z)^{-1.6364}]^{-1} \tag{5}$$

En cuanto a las irradiancias espectrales a nivel extraterrestre se tendrán en cuenta las referenciadas en WMO (1986), que corresponden a las reportadas por Brasseur y Simon [4] para longitudes de onda entre 200 nm y 310 nm, por Arvesen *et al.*, (1969), para longitudes de onda entre 310 nm y 330 nm, y finalmente, las reportadas según Neckel and Labs (1984), para longitudes de onda entre 330 nm y 869 nm (ver Tabla II).

La Tabla II muestra los respectivos valores de interés, donde se incluye el factor de corrección para cada día del

TABLA II. Irradiancia espectral extraterrestre ( $I_{sc}$ ) de las longitudes de onda que constituyen los pares A y B escogidos. Valor promedio entre los correspondientes: 304.5 nm y 305.5 nm (\*), 312.8 nm y 313.2 nm (\*\*) y 339.5 nm y 340.5 nm (\*\*\*)

$\lambda$ (nm)	305	320	313	340
$I_{sc}$ (W/m <sup>2</sup> nm)	0.595	0.712	0.686	0.964
	*		**	***

año, factor que se determina teniendo en cuenta el modelo de Spencer (citado por Iqbal [6]) y que se aplica así:

$$I_{o\lambda}(R_o/R)^2 = I_{o\lambda}_{\text{corregida}} \tag{6}$$

$$(R_o/R)^2 = 1,00011 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \tag{7}$$

siendo R la distancia Tierra-Sol,  $R_o$  el semieje mayor de la elipse (1 U.A aproximadamente), y  $\Gamma$  la posición angular de la tierra en la órbita, o ángulo diario definido como:

$$\Gamma = 2\pi(n - 1)/365 \tag{8}$$

donde  $n$  es el número de orden del día durante el año.

Para los propósitos de este trabajo y siguiendo el método mencionado [14] se escogieron dos pares espectrales conformados por longitudes de onda larga y corta respectivamente de 305 nm a 320 nm (par A) y 313 nm a 340 nm (par B), para calcular el valor total de ozono  $\Omega$  estimado a partir de (ver Tabla III):

$$\Omega = \frac{(N_A - N_B) - m_r[(k_{rc} - k_{rl})_A - (k_{rc} - k_{rl})_B]}{m_o[(k_{oc} - k_{ol})_A - (k_{oc} - k_{ol})_B]} \tag{9}$$

donde

$$N_A = [\log(I_{o\lambda c}/I_{o\lambda l}) - \log(I_{D\lambda c}/I_{D\lambda l})]_A$$

con los respectivos valores del par A,

$$N_B = [\log(I_{o\lambda c}/I_{o\lambda l}) - \log(I_{D\lambda c}/I_{D\lambda l})]_B$$

con los respectivos valores del par B, y,  $k_{rc}$  y  $k_{rl}$  son los coeficientes espectrales de dispersión molecular por aire puro de las radiaciones correspondientes a las longitudes corta y larga del par elegido (en unidades de 1/cm).

TABLA III. Constantes características de interacción atmosférica para cada una de las longitudes de onda que intervienen en los pares escogidos para el método de Dobson. \*Promedio de los cálculos realizados por Bernhard *et al.*, y reportados en Journal of Geophysical Research, (2005), vol. 110, D10305. Dichos cálculos se hicieron asumiendo una temperatura de -46.3 °C al nivel de la máxima concentración de ozono en la estratosfera.

PAR	$\lambda$ (nm)	$k_{oc}$ $k_{ol}$	$k_{rc}$ $k_{rl}$	$k_{oc} - k_{ol}$	$k_{rc} - k_{rl}$
A	305	1,914*	0,491	1,64	0,081
	320	0,274	0,41		
B	313	0,742	0,439	0,727	0,129
	340	0,015	0,310		

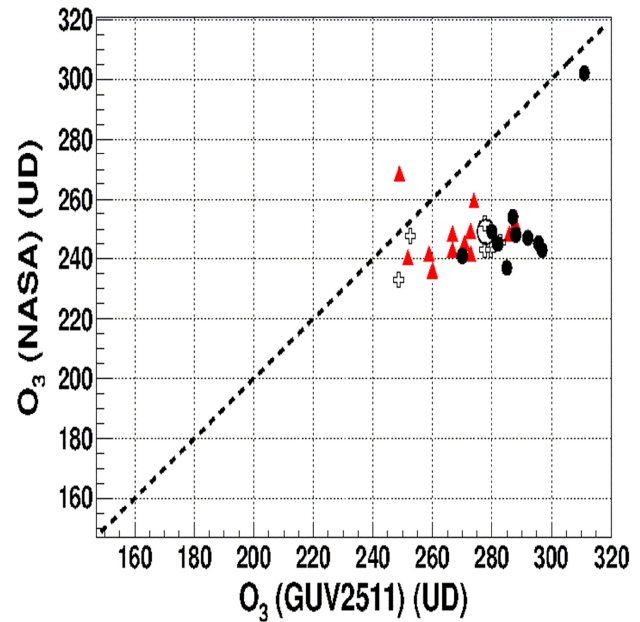


FIGURA 2. Resultados obtenidos en la estimación del ozono total para el periodo de tiempo comprendido entre el 12 de Mayo y el 25 de Junio de 2010 y los correspondientes valores reportados por la NASA (OMI, Aura Spacecraft, 2010). La línea punteada indica la tendencia ideal de los datos reportados por NASA y la medición en tierra. Convenciones para el cielo: círculo vacío (despejado), triángulo (Semi-despejado), cruz vacía (nublado) y círculo lleno (muy nublado).

#### 4. Resultados y Comparación con Datos Satelitales

La Fig. 2 ilustra los resultados obtenidos en la estimación del ozono total para el periodo de tiempo comprendido entre el 12 de Mayo y el 25 de Junio de 2010 y los correspondientes valores reportados por la NASA [15], además de la humedad relativa (HR) en el periodo de medición y algunas observaciones generales.

Con respecto a los datos reportados es necesario tener en cuenta que:

- a) Por eventualidades logísticas y del comportamiento del microclima Bogotano, las condiciones experimentales de medición en cuanto a tiempo y lugar, se apartan seriamente de aquellas que recomienda la World Meteorological Organization [16, 23] para la evaluación del ozono total en estación terrestre, por las siguientes razones:

1. La WMO recomienda realizar [17] las mediciones en época seca y de cielo despejado, que difiere de las condiciones existentes para la época en que fue posible realizar las mediciones (12

de Mayo a 25 de Junio de 2010). Sin embargo, en la literatura científica se reportan mediciones realizadas en condiciones de nubosidad leve, que muestran que con un instrumento similar al aquí utilizado (radiómetro GUV-2511) es posible obtener valores muy precisos del ozono total [20], aplicando un método que involucra la medición de la radiación ultravioleta global espectral.

2. Para procesos de determinación del ozono total, sería deseable ubicar los equipos de medición en un sitio de baja contaminación, con el objeto de evitar los errores que pueden inducir contaminantes como el SO<sub>2</sub> cuyo efecto es incrementar el valor del ozono total hasta en un 2 % de ozono ficticio [23]. Igualmente, otros contaminantes como

los NO<sub>x</sub>, de no ser conocidos sus niveles reales, sesgan las mediciones del ozono total.

3. Existe el agravante que para el periodo analizado, además de la condición de alta nubosidad, era ya evidente la presencia del fenómeno de la Niña.
- b) Todos los datos de la serie están afectados por alta nubosidad ya sea la nubosidad estable, variable o creciente, situaciones que ocasionaron la radiación solar fluctuante. Esta circunstancia se evidencia en la Fig. 2, donde la mayor parte de los datos estimados estan por debajo de la línea punteada. Se concluye entonces que la nubosidad es un factor determinante para dicha estimacion (este análisis es conocido como análisis de varianza con observaciones repetidas [24]).

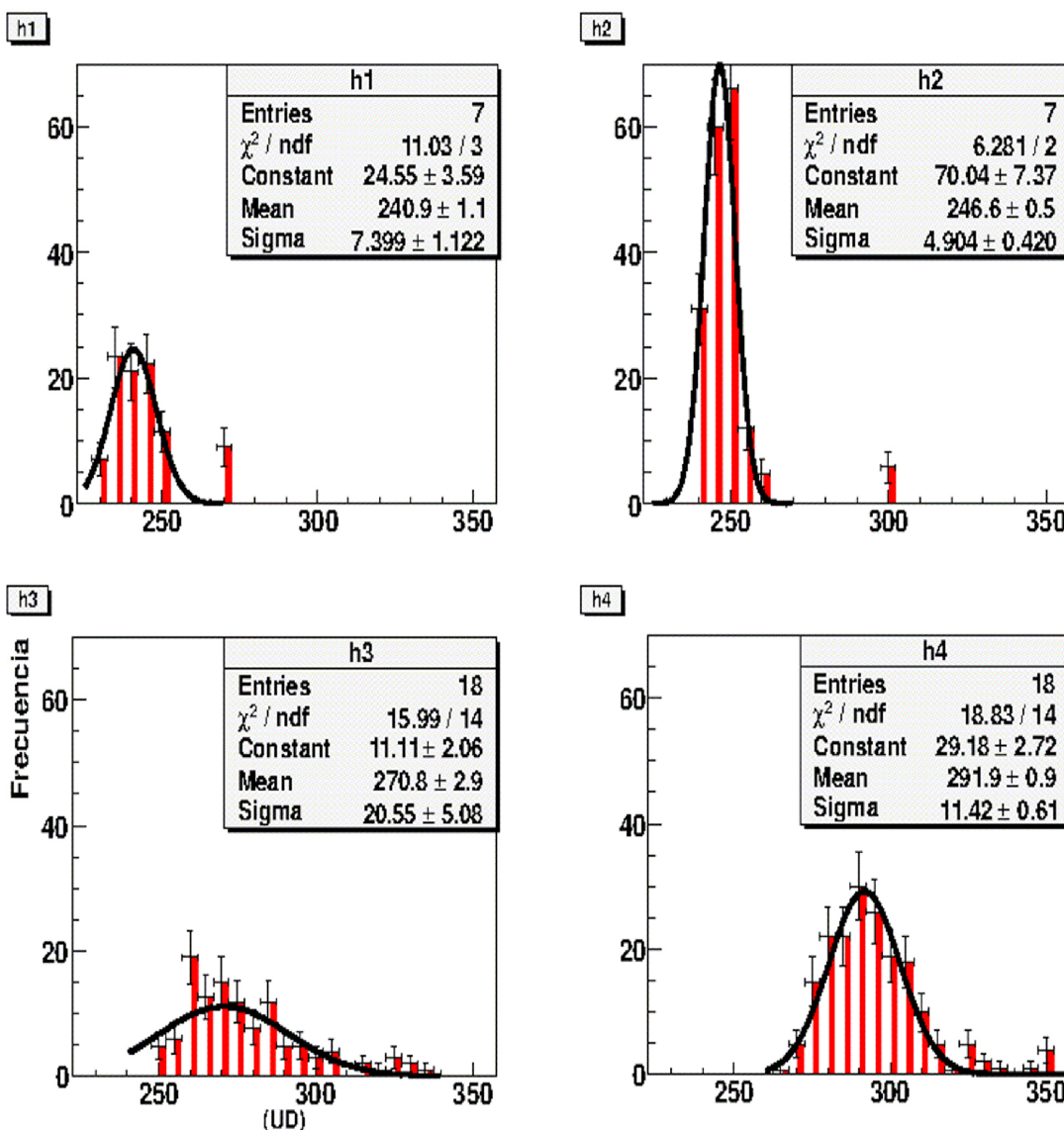


FIGURA 3. Histogramas de los datos de ozono total correspondientes a los meses de Mayo (panel izquierdo) y Junio (panel derecho) de 2010. Arriba: datos de ozono total satelitales reportados por NASA [15]. Abajo: estimaciones a partir de los datos de radiación UV-B tomados en el Laboratorio de Radiometria de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Los barras de error corresponden a errores estadísticos.

- c) Los errores por días nublados en la determinación del ozono total pueden llegar hasta 20 % y en altura, el dato satelital no discrimina la disminución troposférica. Para la latitud de Bogotá y su altura sobre el nivel del mar se esperaría que el dato medido en estación terrestre fuese entre 10 UD y 12 UD menor que el valor satelital [5], realizado en una estación subtropical.
- d) Los valores del ozono total fueron evaluados en el lapso comprendido entre las 11:00 A.M. y la 1:00 P.M., pero los mejores ajustes con los valores satelitales se logran en el lapso entre las 11:00A.M. y las 12:15 P.M., lo que resulta coherente con las recomendaciones de la OMM [16]. La radiación UV medida se tomó minuto a minuto y se promedió en lapsos de 10 minutos; también se analizó el promedio horario pero este condujo a resultados del ozono total estimado con dispersión en los datos entre 2 % y 7 % mayores con respecto al dato satelital, es decir, que los datos obtenidos al promediar cada diez minutos se aproximan mejor entre un 2 % y un 7 % al valor satelital.
- e) En el conjunto total de las observaciones registradas, la radiación UV-B de 305 nm mostraba su máximo valor diario en el momento de la medición.

## 5. Análisis y Observaciones

El mes es un factor discriminante para la medición del ozono y por tanto, las comparaciones y pruebas estadísticas deben tener en cuenta ese hecho. Durante el periodo de medición se evidencia, tanto en los datos satelitales como en las estimaciones objeto de estudio, una tendencia a aumentar entre los meses de Mayo y Junio; en el caso de las estimaciones del ozono total, su valor medio fue 17,61 unidades mayor en Junio, mientras el ozono total satelital medio fue 5,42 unidades mayor en Junio, como puede deducirse de la Fig. 3 (arriba: datos satelitales; abajo: estimaciones de este trabajo).

Aunque estos resultados coinciden con el comportamiento histórico reportado en otros estudios [2], las diferencias encontradas en este trabajo son mayores que las históricas, lo cual podría relacionarse con fenómenos naturales como el de La Niña. Todos los análisis que involucren estas variables deben considerarse por meses separados, pues estadísticamente se evidencia la presencia de diferencias importantes en los valores de esas variables para los meses observados. La mayor dispersión de los datos estimados del ozono total es muy razonable, dado que las mediciones en la estación terrestre están afectadas por las complejas condiciones arriba anotadas, mientras que los datos satelitales ya han sido objeto de depuraciones y reprocesamientos a través de los diferentes niveles y versiones que se han llevado a cabo en varios lustros de rigurosa investigación y experiencia [10].

En condiciones ideales, es decir, con cielo despejado y sin contaminación, los resultados estimados con el método propuesto, deberían mostrar valores de ozono total alrededor de

5 % por debajo del valor satelital; sin embargo, las condiciones predominantes en el lapso en cuestión, tienden a mostrar valores mayores, como era de esperar, según los estudios de Camacho *et al.*, (2004), que sugieren, deberían estar hasta en un 20 % por encima del valor real o alrededor de 15 % por encima del valor satelital. Para nuestro caso, se estima que la diferencia entre la media estimada del ozono total y la satelital es aproximadamente 11 %, estando la estimada por encima de la satelital.

Con la cantidad de datos de tiempo y lugar disponibles, no es posible evidenciar desde el punto de vista estrictamente estadístico, que la diferencia entre el valor del ozono total estimado según el método propuesto y el valor reportado por el satélite [15] no es significativa. Es decir, no se puede afirmar que los valores estimados del ozono total son iguales (o cercanamente iguales sin muestra de diferencia significativa) a los valores reportados por el satélite. Sin embargo, las conclusiones de las pruebas estadísticas afirman que efectivamente la variable HR es significativa para el modelo que explica el valor del ozono total estimado. Se pasa de un modelo que solo mostraba un ajuste entre el ozono total estimado y el satelital de un 25.09 %, a un modelo que los ajusta a un 44.25 % cuando se tiene en consideración la magnitud de la influencia de los valores de HR como fuente de variabilidad. Los valores de ajuste mejoran cuando se tratan separadamente por meses (especialmente en el mes de Junio donde el ajuste alcanzo 73.44 % de determinación y un coeficiente de variación tan solo del 2.24 %), asegurando que existen aproximadamente un 2 % de errores debidos a fuentes de variabilidad aun no consideradas, pero que si se controlan, mejorarían o corregirían el desempeño de los valores estimados de la variable ozono total.

## 6. Conclusiones

El análisis de la tendencia de los resultados coincide tanto en los datos estimados, como en los satelitales, con el comportamiento histórico obtenido en otros estudios; esto sugiere la necesidad de realizar mediciones en unas condiciones más cercanas a las ideales.

Desde la perspectiva del rigor estadístico, la correlación obtenida entre los datos estimados y los satelitales no se corresponde a la línea ideal de la Fig. 2 (como se esperaba), debido a las adversas condiciones atmosféricas durante el período de medición. Es conveniente entonces, realizar mediciones durante periodos más prolongados de manera que su cubrimiento abarque toda la estacionalidad del clima Bogotano y registrar otras variables meteorológicas, radiométricas y de calidad del aire para determinar las dependencias que estas generan sobre la determinación de la columna total de ozono.

Por otro lado, además de estimar el ozono total, este método abre una ventana de estudio a uno de los aspectos más complicados de la radiación UV-B solar que llega a la superficie terrestre, y es el de hacer un acercamiento a la caracterización de su interacción con las nubes. Estas determinan los

niveles de radiación difusa UV-B que finalmente llegan a la superficie terrestre, los cuales contribuyen de manera importante a las dosis que generan eritema en los seres humanos.

Es absolutamente importante y necesario, como se menciono anteriormente, involucrar todas las variables meteorológicas, radiométricas y de calidad del aire, medidas simultáneamente con las de radiación UV-B, para desarrollar modelos que permitan tener un panorama real de la capa de ozono en la Sabana de Bogotá, de los riesgos que genera la radiación UV-B y de la calidad de aire. Para tal caso, las series de datos deben cubrir al menos dos años continuos, pero se recomienda que iniciado el esfuerzo de tener una estación radiométrica, esta se constituya en una entidad permanente que pueda reportar datos confiables a las organizaciones in-

ternacionales de vigilancia atmosférica y así generar investigaciones sobre el análisis de las nubes predominantes en las condiciones de la Sabana de Bogotá.

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a la Fundación Universitaria los Libertadores y particularmente a su Dirección de Investigación por el soporte financiero al proyecto, “*Valoración de las Condiciones Atmosféricas que Determinan el Riesgo por Exposición a la Radiación Solar Ultravioleta en la Sabana de Bogotá*”, proyecto del cual surge el presente artículo.

1. P. Aceituno, *Monthly Weather Review* **116** (1988) 505-524.
2. UPME-IDEAM, *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. (Bogotá, 2005).
3. Sh. A. Bezvermhnii, A. L. Osberovick, and S. F. Rodionov, *Photoelectric Ozonometers. USSR. (1960)* (Distributed by Office of Technical Services U. S. Department of Commerce Washington D.C, 1994).
4. G. Brasseur, P. C. Simon, P.C., *J. Geophys. Res.* **86** (1981) 7343.
5. J. L. Camacho, J. A. López, A. Labajoa and I. Gómez, *Análisis de Veinticinco Años de Datos de Total de Ozono en Columna Sobre la Península Ibérica (1978-2002)* ( Serie A No. 4 El Clima Entre el Mar y la Montaña. Santander, España, 2004).
6. M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation* (Academic Press, Vancouver-Canadá, 1983). p. 377.
7. X. Jiang, C. D. Camp, R. Shia, D. Noone, C. Walker, Y. L. Yung, *J. Geophys. Res.*, **109** (2004) D16305.
8. G. M. B. Dobson, *Handbook for the Ozone Spectrophotometer* (Pergamon Press, Ann. Int. Geophys, 1957).
9. W. D. Komhyr, *Operations Handbook - Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer (Prepared for the World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project* (NOAA/ESRL Global Monitoring Division, revised by Robert Evans, 2006).
10. J. C. González y O. Simbaqueva, *Evolución del Arsenal Científico para la Vigilancia de la Capa de Ozono* (Universidad Nacional de Colombia (Revista Momento), Bogotá, 2009).
11. R. M. Goody y J. C. G. Walker, *Las atmósferas* (Ediciones Omega, Barcelona, 1975). pp. 150.
12. D. Mateos y M.Sc. thesis, *Medida, Análisis Climatológico y Modelización de la Radiación Solar Ultravioleta Total en Valladolid*, (Laboratorio de Atmósfera y Energía, Grupo de Óptica Atmosférica, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Valladolid, España. 2008).
13. R. L. McKenzie, L. O. Björn, A. Bais y M. Ilyasd, *Photochem. Photobiol. Sci.* **2** (2003) 5-15.
14. A. Ch. Murad y H. L. Tabocchini, *Variaciones del Espesor de la Ozonósfera sobre Buenos Aires y su Relación con las Condiciones Meteorológicas de la Troposfera y la Estratosfera* (Buenos Aires, 1976). pp. 48.
15. OMI, *Ozone Monitoring Instrument on the Aura spacecraft*, <http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone.html>.
16. OMM, *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (Organizacion Meteorologica Mundial, Ginebra, 1994), Cap. 16.
17. Report to the Commission on Instruments and Methods of Observation OPAG on Surface Observation Technology (OPAG-Surface), (Expert Team on Meteorological Radiation and Atmospheric Composition Measurements On Ultra-Violet Radiation Measurements, 2007).
18. M. Rivas, E. Rojas y S. Madronich, *Revista Chilena de ingeniería* **16** (2008) 383-388.
19. RMCAB, *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá* (Secretaría del Ambiente, 2009); (Informe Anual de la Calidad del Aire, Bogotá, 2008).
20. K. Starmnes, J. Slusser, M. Bowen, *Applied Optics* **30** (1991) 4418-4426.
21. L. F. Suárez, *El Estudio de la Capa de Ozono en el Observatorio de Huancayo* (Revista de Trabajos de Investigación, Lima, 2000). pp. 15-22.
22. B. M. Yavorski, A. A. Detlaf, *Manual de Física* (Editorial MIR, Moscú, 1972). pp. 961.
23. OMM, WMO, *World Climate Research Programme* (World Meteorological Organization, WCRP, Publications Series No. 7. WMO/TD No. 149, 1986).
24. J. H. Zar, *Biostatistical Analysis* (Prentice Hall, New Jersey, USA, 1999). pp. 960.