

# LA RADIACION SOLAR UVB INCIDENTE SOBRE BUENOS AIRES Y SU RELACION CON PERFILES DE OZONO ESTRATOSFERICO OBTENIDOS CON UN SISTEMA DIAL

R. D. Piacentini<sup>1</sup>, E. Crinó<sup>2</sup>, A. Cede<sup>3</sup>, M. Lavorato<sup>4</sup>, A. Pazmiño<sup>4,5</sup>, E. Quel<sup>4</sup>, P. Ristori<sup>4,5</sup>, E. Wolfram<sup>4,5</sup>, S. Godin<sup>6</sup> y G. Mégie<sup>6</sup>.

<sup>1</sup>IFIR (CONICET-Univ. Nacional de Rosario)-2000 Rosario- Argentina. *piacent@ifir.ifr.edu.ar*

<sup>2</sup>Dpto de Física, Univ. Nacional de San Luis-5700 San Luis- Argentina.

<sup>3</sup>Universitat Innsbruck- Innsbruck- Austria.

<sup>4</sup>CEILAP (CITEFA-CONICET)- Zufriategui 4380-1603 Villa Martelli- Pcia. Aires de Buenos -Argentina.

<sup>5</sup>Universidad Nacional de San Martín- San Martín- Pcia. De Buenos Aires -Argentina

<sup>6</sup>Institut Pierre Simon Laplace. Université Paris VI. Paris. Francia.

Usando un lidar de Absorción Diferencial (DIAL) ubicado en el laboratorio CEILAP en Villa Martelli, Prov. de Buenos Aires, Argentina, se determinaron perfiles de ozono estratosférico durante 1999. Los datos se comparan con el perfil de la atmósfera estándar de USA, normalizado a la misma columna total de ozono del día considerado y con los perfiles satelitales SAGE II y del algoritmo TOMS/NASA. Los perfiles medidos y de la atmósfera estándar de USA son incorporados en el algoritmo computacional de Madronich empleado para la obtención de la solución de la ecuación de transferencia radiativa atmosférica. Las irradiancias solar ultravioleta y eritémica son calculadas y la influencia de estos perfiles sobre la irradiancia espectral es determinada.

Using a Differential Absorption Lidar (DIAL) placed in the CEILAP laboratory at Villa Martelli, Prov. of Buenos Aires, Argentina, stratospheric ozone profiles were determined during 1999. The data are compared with the US standard atmosphere one, normalized at the same total ozone column of the considered day and with the satellite SAGE II and TOMS/NASA algorithm profiles. The measured and US standard profiles are included in the Madronich code employed for the solution of the atmospheric radiative transfer equation. The corresponding solar ultraviolet and erytemal irradiances are calculated and the influence of these profiles on the spectral irradiance is determined.

## I. INTRODUCCIÓN

Las radiaciones solares ultravioletas B (rango 280-320 nm) son fuertemente atenuadas por el ozono y los aerosoles (partículas en suspensión). Desde diciembre de 1998 y durante el año 1999 se realizaron mediciones de

perfiles de ozono mediante un sistema DIAL (Differential Absorption Lidar)<sup>(1)</sup> ubicado en los alrededores de la ciudad de Buenos Aires (34.6° S, 58.5° W). En el presente trabajo se analiza la influencia de estos perfiles sobre las irradiancias solares en el rango UV (280-400 nm).

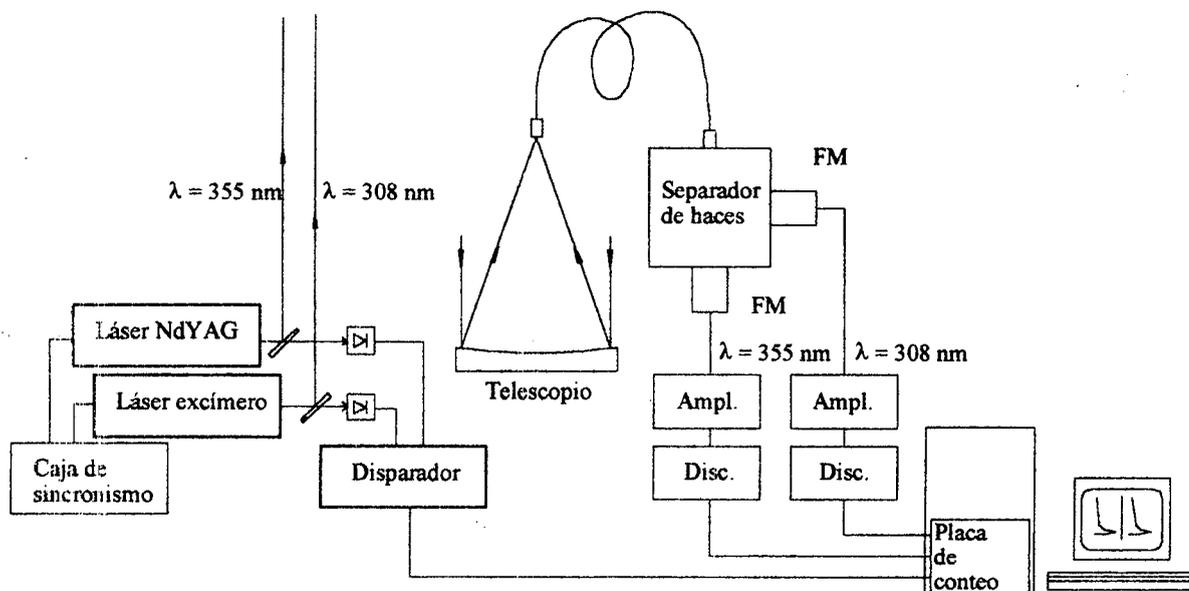


Figura 1. Esquema del lidar de absorción diferencial (DIAL) para la medición de ozono estratosférico instalado en el CEILAP, Villa Martelli, Gran Buenos Aires.

## II. SISTEMA DIAL

Este sistema (figura 1) requiere la emisión de dos láseres a distintas longitudes de onda, uno que emite pulsos a  $\lambda_{on} = 308$  nm (de absorción por el ozono) y el otro a la de referencia (prácticamente sin absorción)  $\lambda_{off} = 355$  nm. La elección de estos valores se basa en el compromiso de minimizar los errores estadístico y sistemático en la baja estratosfera<sup>(2)</sup>.

Las señales retrodifundidas por la atmósfera son colectadas por un telescopio y detectadas por fotomultiplicadores. Mediante un sincronismo óptico externo, estas señales se adquieren en forma alternada en una placa de conteo de fotones. La información es tratada numéricamente para determinar la concentración de ozono. Para este procesamiento, se consideran los datos de temperatura y presión obtenidos por el Servicio Meteorológico Nacional junto al modelo dado por el CIRA para nuestra latitud y el mes correspondiente. Para mayor detalle del instrumental y del tratamiento de las señales utilizados, véase *Pazmiño et al.*, 1999<sup>(3)</sup>.

La ecuación Dial que determina la concentración de ozono en función de la altura está compuesta por dos términos<sup>(4)</sup>

$$n_{O_3} = n_{O_3}^{mod} + \delta n_{O_3} \quad (1)$$

donde

$$n_{O_3}^{mod}(z) = \frac{1}{2 \cdot \Delta\sigma_{O_3}} \cdot \frac{d}{dz} \ln \frac{N(\lambda_{off}, z)}{N(\lambda_{on}, z)} \quad (2)$$

siendo: el  $N(z, \lambda_i)$  número de fotones retrodispersados a la longitud de onda  $\lambda_i$  por una capa atmosférica  $\Delta z$  situada a una distancia  $z$ , durante el tiempo de integración  $\Delta t$  y  $\sigma_{O_3}(\lambda_i)$  la sección eficaz del ozono para  $\lambda_i$ .

$$\delta n_{O_3} = (\epsilon_{diff}(z) + \epsilon_m(z) + \epsilon_p(z) + \epsilon_e(z)) \cdot n_{O_3}$$

donde:  $\epsilon_{diff}(z)$ ,  $\epsilon_m(z)$ ,  $\epsilon_p(z)$ ,  $\epsilon_e(z)$  son los términos que involucran la difusión atmosférica, la atenuación por moléculas, por partículas y por otros constituyentes de la atmósfera (excluyendo el ozono)<sup>(5)</sup>.

## III. PERFIL VERTICAL DEL OZONO

Mediante esta técnica se han obtenido perfiles de la capa de ozono sobre Buenos Aires durante 1999. En la figura 2, presentamos perfiles típicos medidos los días 23 de marzo de 1999 (cerca del mínimo del espesor de la capa y del equinoccio de otoño) y 20 de septiembre de 1999 (cerca del máximo y del equinoccio de primavera) alrededor de los 20 a los 34 km de altura.

Para poder emplear estos perfiles en el cálculo de la transferencia radiativa atmosférica, los mismos deben extenderse a bajas y grandes alturas, para lo cual consideramos el perfil standard de USA a 45° N que emplea Madronich en su código computacional<sup>(6)</sup> correspondiente a una columna total de 349.8 DU (Unidad Dobson = 0.01 mm) y normalizado a la columna total de ozono para el día considerado. Así, dado que el 23 de marzo de 1999 el equipo satelital TOMS/EP registró un valor de columna total de ozono de 270.3 DU, la curva

standard debe multiplicarse por el factor 270.3/349.8. Para obtener el perfil estándar de ese día en la zona de la alta tropósfera y baja estratosfera (entre los 10 y 18 km de altura), es preciso además completar la curva medida, para dar continuidad razonable al perfil correspondiente. En forma similar se opera con los datos del perfil medido el 20 de setiembre de 1999, al que corresponde una capa de ozono de 302.5 DU.

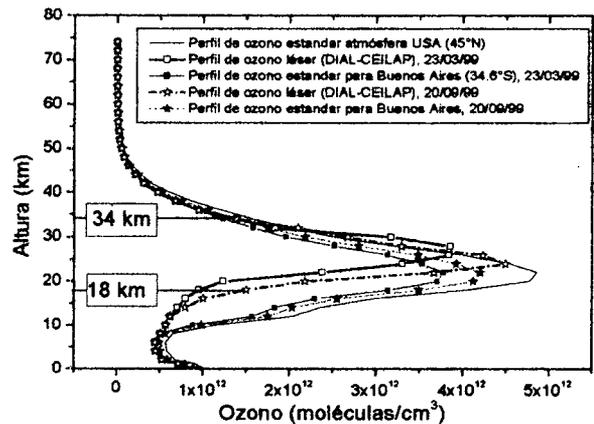


Figura 2. Perfiles de ozono sobre Buenos Aires: medido con láser (técnica DIAL) en el CEILAP entre los 18 y 34 km de altura, el resto extraído del perfil estándar de atmósfera USA empleado en el programa TUVR de solución de la ecuación de transferencia radiativa<sup>(6)</sup> (símbolo abierto), perfil estándar USA 1976, para 45°N y capa de ozono = 349.8 DU (línea continua) y perfil obtenido normalizando el anterior para capa de ozono de 270.3 DU (23/3/99), con el factor 270.3/349.8 = 0.773 (cuadrado lleno con línea) y para capa de ozono de 302.5 DU (20/9/99), con el factor 302.5/349.8 = 0.865 (estrella llena con línea). Las líneas continuas con símbolo corresponden al día 23/3/99 y las de trazos con símbolo al día 20/9/99.

Estos perfiles se compararon con los obtenidos desde el espacio exterior con satélite, por el SAGE II en zonas cercanas a Buenos Aires los días 28, 29 y 30/3/1999 durante la salida y puesta del Sol y con los empleados por el algoritmo TOMS para derivar la columna total de ozono, a partir de mediciones de reflectividad UV solar. Se comprueba que los perfiles láser (DIAL) pueden ser una opción importante de referencia en investigación espacial de la atmósfera.

La integración de la ecuación de transferencia radiativa permite obtener la irradiancia espectral que se indica en la figura 3, tanto en el rango UVA (320 – 400 nm) como en el UVB (280 – 320 nm) para los días cercanos a los equinoccios de otoño (23/3/1999), cuando la capa tiene aproximadamente el mínimo valor y de primavera (20/9/1999), cuando llega a su máximo. Para ello se ha adoptado el perfil medido en CEILAP con láser (DIAL) según se indica en la figura 2, con los siguientes parámetros atmosféricos: coeficientes de atenuación de aerosoles  $\alpha = 1$  y  $\beta = 0.1$ , reflectividad de suelo (albedo) = 0.1, cielo claro, presión correspondiente a la altura de 15 m (prácticamente la normal). Se observa el

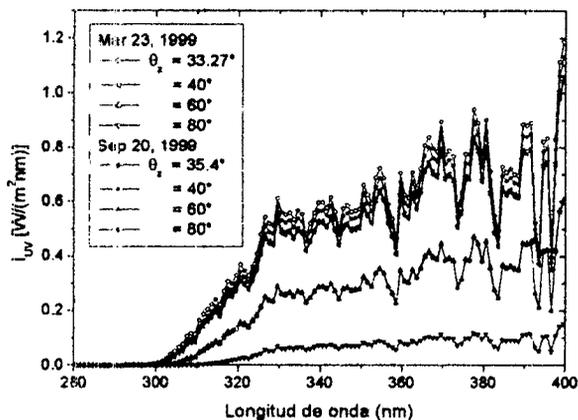


Figura 3: Irradiancia espectral solar UV incidente sobre Buenos Aires (34.6° S, 58.5° W) para distintos ángulos zenitales solares, empleando perfil láser (técnica DIAL) medido en CEILAP el 23/3/1999 (símbolos abiertos) y 20/9/1999 (símbolos sólidos). Cálculos efectuados con el programa TUVR<sup>(6)</sup>.

típico crecimiento de la irradiancia a bajas longitudes de onda (rango UV) por efecto del Sol comportándose como cuerpo negro emisor de temperatura 5770 K y las variaciones bruscas debidas a absorciones de gases en las atmósferas del Sol y la Tierra. Las diferencias en las irradiancias determinadas para los dos días, a ángulos zenitales no muy grandes y a mismo ángulo zenital, se deben a la diferente capa y perfil de ozono considerados.

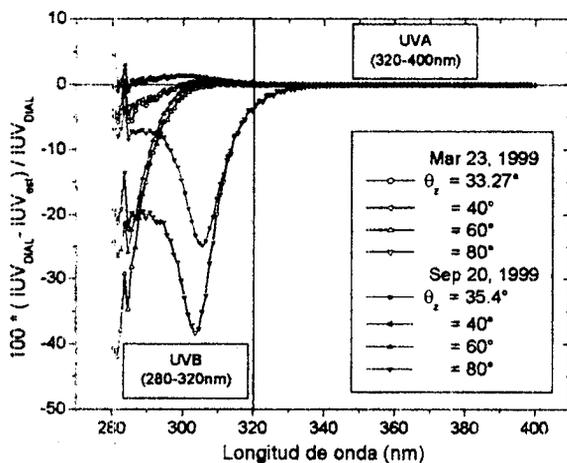


Figura 4. Diferencia porcentual relativa entre las irradiancias espectrales incidentes sobre Buenos Aires el 23/3/1999 (símbolos abiertos) y el 20/9/1999 (símbolos cerrados) calculadas con perfil de ozono medido con láser (DIAL) y con perfil estándar de atmósfera USA.

En la siguiente figura 4, se dan las diferencias relativas porcentuales entre la irradiancia espectral total obtenida con perfil láser (DIAL) y la obtenida considerando el perfil estándar de atmósfera USA normalizado. Se observa que en el rango UVA (320 - 400 nm) prácticamente no hay diferencias, lo que está de acuerdo con el hecho de que el coeficiente de foto-absorción del ozono decrece

rápidamente a medida que la longitud de onda aumenta en este rango. En el UVB la diferencia comienza a incrementarse, llegando a ser del orden de 2% alrededor de 300 nm, para ángulos zenitales hasta unos 60° y del orden de 40%, para longitudes de onda cercanas a 300 nm y ángulo de 80°.

Se efectuaron cálculos de prueba con perfiles SAGE II y del algoritmo TOMS y con método DISORT de solución de la ecuación de transferencia radiativa, más elaborado y por consiguiente que demanda más tiempo de cálculo. Los resultados son similares a los obtenidos con los otros perfiles (dentro de algunos porcentos), salvo cuando dichos perfiles difieren mucho entre sí.

Tabla 1. Irradiancias solares ultravioleta y eritémica (indicadora de riesgo solar) calculadas resolviendo la ecuación de transferencia radiativa empleando el perfil medido con láser (DIAL) en CEILAP, Buenos Aires el 23/3/99 y el de la atmósfera estándar de USA y su diferencia porcentual relativa.

$\theta_z$ (°)	Perfil láser (DIAL-CEILAP)		Perfil estándar atmós. EUA		$\Delta I_{UV}$ / $I_{UV,l}$ (%)	$\Delta I_{ert}$ / $I_{ert,e}$ (%)
	$I_{UV,l}$ W/m <sup>2</sup>	$I_{ert,l}$ W/m <sup>2</sup>	$I_{UV,e}$ W/m <sup>2</sup>	$I_{ert,e}$ W/m <sup>2</sup>		
33.27	55.24	0.223	55.24	0.223	0	0
40	48.97	0.178	48.96	0.178	≈0	0
60	26.89	0.061	26.90	0.061	≈0	0
80	6.51	0.0069	6.53	0.0073	4	5.8

En la tabla 1, se dan las irradiancias solares eritémicas (directamente relacionadas con el Índice de riesgo solar a través del factor 40), para distintos momentos del día (distintos ángulos zenitales, correspondiendo el valor menor al mediodía solar del día considerado). Se observa que los valores integrados muestran muy poca diferencia entre sí (últimas dos columnas) salvo para el mayor ángulo zenital considerado de 80°, cuando el Sol se encuentra cercano al horizonte y su intensidad es muy baja.

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos son:

- Perfiles de ozono estratosféricos medidos por primera vez sobre Buenos Aires en diferentes épocas del año 1999 con láser (técnica DIAL)
- Irradiancias solares espectrales y totales UV calculadas resolviendo la ecuación de transferencia radiativa e incluyendo los perfiles medidos y el de la atmósfera estándar de USA. Para detectar diferencias en las irradiancias espectrales deberá emplearse un espectrorradiómetro de precisión en el rango UVB.
- Relación entre las irradiancias calculadas con diferentes perfiles para determinar el efecto que tienen dichos perfiles sobre estas irradiancias.
- Irradiancias eritémicas indicadoras del riesgo de exposición al Sol.

## V. APENDICE. Irradiancia solar ultravioleta

La intensidad de radiación que incide sobre una dada superficie está compuesta de dos términos

$$I_{UV,Dir}(\lambda, \zeta) \quad (A1)$$

que representa la componente directa de fotones UV que llegan del Sol sin ser desviados y

$$I_{UV,Dif}(\lambda, \zeta) \quad (A2)$$

la componente difusa de fotones que inciden desde todas direcciones. La variable  $\zeta$  incluye los factores que caracterizan el lugar geográfico (coordenadas y altura del lugar y reflectividad del suelo), el ángulo zenital solar ( $\theta_z$ ) y las componentes atmosféricas que afectan a la radiación considerada (aerosoles, ozono y demás gases). La primera está dada por la ley de atenuación exponencial y la segunda (transformando la variable longitud de onda en frecuencia) a través de la solución de la ecuación de transferencia radiativa

$$\frac{1}{\beta_v(s)} \frac{dI_v(s, \Omega)}{ds} + I_v(s, \Omega) = S_v(s) \quad (A3)$$

donde  $s$  es la trayectoria en la dirección del haz incidente de radiación y  $\Omega$  el ángulo sólido asociado con dicha radiación y el punto considerado.  $\beta_v(s)$  es el *coeficiente de extinción espectral* y  $S_v(s)$  la *función fuente espectral*, dados por:

$$S_v(s) \equiv (1 - \omega_v) I_{vb}(T) + \frac{1}{4\pi} \omega_v \int_{4\pi} p(\Omega' \cdot \Omega) I_v(s, \Omega') d\Omega' \quad (A4)$$

$$\beta_v(s) \equiv k_v(s) + \sigma_v(s) \quad (A5)$$

$$\omega_v \equiv \frac{\sigma_v(s)}{\beta_v(s)}, \quad 1 - \omega_v \equiv \frac{k_v(s)}{\beta_v(s)} \quad (A6)$$

$$I_{vb}(T) \equiv \frac{2hv^3}{c^2 [\exp(hv/kT) - 1]} \quad (A7)$$

siendo  $p$  la *scattering phase function*,  $k_v(s)$  y  $\sigma_v(s)$  los *coeficientes espectrales de absorción y dispersión*, respectivamente y  $\omega_v$  el *albedo (reflectividad) espectral*. La fórmula (A7) expresa la muy conocida ley de Planck del cuerpo emisor ideal (cuerpo negro).

La *irradiancia espectral solar en el rango UV (280 - 400nm)* se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$I_{UV}(\lambda, \zeta) = I_{UV,Dir}(\lambda, \zeta) \cdot \cos(\theta_z) + I_{UV,Dif}(\lambda, \zeta) \quad (A8)$$

La *irradiancia total solar UV* resulta de integrar la fórmula anterior (A8)

$$I_{UV}(\zeta) = \int_{280}^{400} I_{UV}(\lambda, \zeta) d\lambda \quad (A9)$$

La irradiancia eritémica se obtiene afectando con un

*factor de peso*, denominado *espectro de acción eritémica* (o de *señal de alarma de la piel*)<sup>(7)</sup>  $B(\lambda)$ , a la irradiancia espectral UV dada por (A8)

$$I_{Erit}(\zeta) = \int_{280}^{400} I_{UV}(\lambda, \zeta) \cdot B(\lambda) d\lambda \quad (A10)$$

Expresada en unidades del Sistema Internacional y multiplicada por el factor 40, da el Índice de Riesgo Solar (UV Index) en cada momento del día.

En las figuras 3 y 4 y en la tabla 1 se presentan resultados obtenidos empleando las formulas (A8 - A10) para distintos días y perfiles de ozono.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. Jim Russell del equipo SAGE II y a los miembros del Laboratory for Atmosphere, Goddard Space Flight Center/NASA, por los interesantes intercambios de información relativos a perfiles de ozono SAGE II y del algoritmo TOMS respectivamente, a Pablo Garcia del Observatorio Astronómico de Rosario por su colaboración computacional y al Ing. M. Ginzburg del SMN por los datos de ozono total del espectrómetro Dobson. El presente trabajo cuenta con apoyo parcial de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, el CONICET y las Universidades Nac. de Rosario, San Martín y San Luis.

## REFERENCIAS

1. Megie, G., Menzies, R. T. Complementary of UV and IR Differential Absorption Lidar for Global Measurements of Atmospheric Species. *Appl. Opt.*, **19**, 1173 (1980).
2. Godin, S. Etude Expérimentale par Télédétection Laser et Modélisation de la Distribution Verticale d'Ozone dans la Haute Province, Thèse d'Etat, Paris (1987).
3. Pazmiño A. F., Lavorato M. B., Fochesatto G. J., Ristori P. R., Cesarano P. A., Quel E. J., Godin S., Megie G. Sistema DIAL para la medición del perfil de ozono estratosférico, *Anales AFA99*, **11**, 338 (1999).
4. Measures R. M. "Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications", Wiley, Interscience (1984).
5. Labitzke, K., Barnett, J. J., Edwards, B. "Middle Atmosphere Program. Handbook for Map", **16** (1985).
6. Madronich S. Comunicación privada (1998).
7. McKinlay, A. F. y Diffey B.L., "Human Exposure to UV Radiation: Risk and Regulations" Ed. Elsevier (1987).