

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES DE RADIACION UVB, OZONO ESTRATOSFERICO Y NUBOSIDAD EN LA CIUDAD DE PANAMA

Pino, Alfonso; Sánchez, Néstor; Guerra, Sergio; Maturell, Alvaro; Espinosa, Jorge

Universidad de Panamá
Instituto de Geociencias
Laboratorio de Física de la Atmósfera

Resumen:

En la ciudad de Panamá se registran altos niveles de radiación solar y, en consecuencia, de radiación UVB, a causa de su clima y de su latitud. Por tal razón, un monitoreo continuo, a nivel local, de la radiación UVB, de la columna de ozono estratosférico y de otros parámetros atmosféricos tales como la nubosidad, es de suma importancia para la elaboración de modelos predictivos.

En el presente trabajo se describen los resultados concernientes a la medición de la radiación UVB, registrados a partir del año 1998 hasta lo transcurrido del año en curso. Se comparan los niveles de irradiancia UVB, durante los períodos de estación seca y de estación lluviosa a lo largo de los años 1998, 1999 y 2000. También, se presentan los resultados correspondientes a la evolución de la columna de ozono estratosférico a partir del año 1998 hasta la fecha. En el estudio se describe un modelo matemático elaborado por el Grupo de Estudios Atmosféricos perteneciente al Laboratorio de Física Atmosférica de la Universidad de Panamá, que permite predecir el nivel de la columna de ozono estratosférico para la ciudad de Panamá, conociendo la irradiancia UVB, la nubosidad acumulada y la excentricidad de la órbita terrestre. En adición a lo anterior, se presentan los índices UVB medios mensuales registrados a partir del año 1998. Para la medición de la radiación UVB se está utilizando un radiómetro de banda ancha, modelo 501 UV-Biometer, instalado en la azotea del Edificio del Instituto de Geociencias, mientras que para la medición de ozono estratosférico se está utilizando un ozonómetro, modelo Microtops – II.

La columna de ozono estratosférico, en la ciudad de Panamá, oscila entre 215 DU y 300 DU. El valor promedio de la columna de ozono hasta la fecha asciende a 248 DU.

Introducción

El ozono es un gas esencial para la protección y el mantenimiento de la vida en cualquier planeta habitable. Este gas se encuentra distribuido en la atmósfera de nuestro planeta, desde el nivel del mar hasta una altura de 50 km. No obstante, alcanza su máxima concentración entre los 19 y 27 km de altura. Esta zona en donde dicho gas alcanza tal concentración máxima es lo que comúnmente se denomina **capa de ozono**.

Es importante aclarar que la adquisición de la capa de ozono por nuestro planeta fue un proceso muy lento, que tomó, aproximadamente, 3000 millones de años. La atmósfera primitiva de nuestro planeta carecía de oxígeno. Sin embargo, poseía grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Hace 3500 millones de años surgió la vida bacteriana y las primeras cianobacterias. Estas eran capaces de efectuar el proceso de

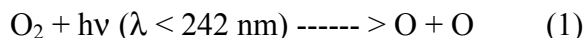
fotosíntesis (la utilización de la radiación solar para convertir el dióxido de carbono y el agua en componentes del tejido celular). Las cianobacterias producían pequeñas cantidades de oxígeno durante el proceso de fotosíntesis, pero, dicha producción era muy lenta. Hace unos 1500 millones de años surgieron las primeras células con núcleos, como las que ahora existen. Estas células llevaban a cabo procesos químicos más eficientes y eran capaces de efectuar la fotosíntesis más rápidamente. Esto tuvo como consecuencia, la liberación de cantidades apreciables de oxígeno hacia la atmósfera del planeta, con la consiguiente disminución del dióxido de carbono. Al liberarse oxígeno, la propia radiación solar indujo la formación de ozono en un proceso químico conocido como **Ciclo de Chapman**. La acción protectora del ozono en la estratósfera media propició el florecimiento de la vida en forma espectacular y surgieron los primeros seres multicelulares. Hace unos 600 millones de años, al estabilizarse la concentración de ozono en la estratósfera media, la vida sobre el planeta proliferó y se diversificó de manera espectacular. Podría decirse que casi se produjo una explosión de vida.

¿Qué papel juega el ozono como un agente protector de la vida en los planetas habitables? El Sol, nuestra estrella más cercana, envía radiación electromagnética de diversas longitudes de onda. Una de estas bandas de radiación es la ultravioleta. Esta se subdivide en 3 bandas de longitudes de onda: UV - C (200 - 280nm), **UV - B (280 - 320nm)** y UV-A(320 - 400nm). La radiación ultravioleta cuya longitud de onda es inferior a los 280 nm es absorbida completamente por cantidades relativamente pequeñas tanto de O₃ estratosférico como de O₂ atmosférico. Esto significa que sólo las bandas UV- B y UV-A tienen relevancia en lo concerniente a los fenómenos fotobiológicos. La radiación UVB es portadora de una gran cantidad de energía, la cual es fácilmente absorbida por las moléculas orgánicas, entre ellas el ADN. En dicho proceso de absorción, tales moléculas sufren alteraciones con el consiguiente daño a los tejidos. Se ha comprobado que la exposición a la radiación UV - B induce la formación de cánceres de piel (Madronich and De Grujil, 1994), así como también incide en otros fenómenos fotobiológicos tales como la interferencia en el mecanismo de fotosíntesis, daños en el ADN, etc.

Gracias a la capa de ozono, la superficie de nuestro planeta sólo recibe el 10% de la radiación UVB que nos envía el Sol. El ozono se encarga de absorber el 90% restante. Sin la capa de ozono, los procesos biológicos no podrían llevarse a cabo. Si perdiésemos la capa de ozono, la vida sobre el planeta estaría condenada a desaparecer en pocas centurias. Esta es la razón por la cual el proceso de deterioro que sufre la capa de ozono causada, fundamentalmente, por la actividad de los clorofluorocarburos (CFC), ha generado un creciente interés a nivel mundial por el estudio y la caracterización de los niveles de radiación ultravioleta en diversas latitudes. Si bien es cierto que el deterioro antes mencionado es más agudo en el hemisferio sur, otras latitudes no están exentas de esta situación. Se estima que la capa de ozono para todo el planeta ha sufrido un adelgazamiento promedio del orden del 3% desde principios de la década del 60.

Radiación UV y Procesos Fisicoquímicos Relativos al Ozono Estratosférico

El ozono es un gas cuyas moléculas están constituidas por tres átomos de oxígeno. Se forma en la estratósfera media y superior, mediante la disociación fotoquímica del oxígeno molecular, generada por radiación UV de longitud de onda inferior a 242 nm, tal como lo establece la siguiente reacción:

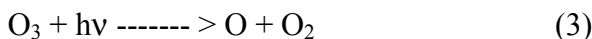


El átomo de oxígeno se recombina con una molécula de oxígeno para formar ozono:



Este proceso está determinado por la cantidad de radiación UV incidente. En consecuencia, la tasa de producción de ozono es más alta sobre el ecuador que a latitudes mayores, puesto que los niveles de radiación UV en la zona ecuatorial son más elevados. La distribución de ozono en el planeta es el resultado de la combinación de procesos químicos y de procesos de transporte. El ozono producido en la zona ecuatorial, es eficientemente transportado a latitudes altas por el sistema de vientos. Cabe señalar que la columna de ozono puede variar substancialmente de un día a otro, debido a procesos dinámicos en la atmósfera (Watson, Robert T., 1989).

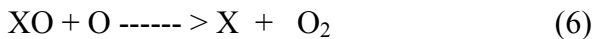
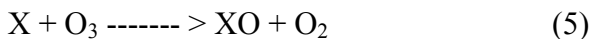
La radiación UV-B genera la fotodisociación del ozono estratosférico e invierte la reacción (2):



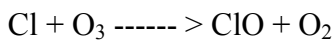
El ozono es sumamente reactivo y es destruido al reaccionar con el oxígeno atómico, tal como se establece en la siguiente ecuación:

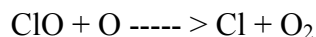


Las reacciones (1), (2) y (4), que describen los procesos de producción fotoquímica y de pérdida de ozono se denominan **ciclo de Chapman**. Este ciclo es mucho menos eficiente que los ciclos catalíticos representados en las reacciones siguientes:



Donde el catalizador X puede ser uno de los radicales estratosféricos OH, H, NO, Cl, Br. En el caso del cloro, liberado en la estratósfera por los clorofluorocarbonos (CFC), el ciclo catalítico anterior, asume la forma siguiente:





Después de la absorción descrita por la reacción (3), la cual se verifica en la estratósfera media y superior, la radiación UV-B remanente sufre un proceso de difusión en la atmósfera inferior. Dicho proceso, causado por partículas de aerosoles y gotas de agua en las nubes, determina cuánta radiación UV-B llega finalmente a la superficie del planeta. La radiación UV incide sobre moléculas y partículas, las cuales la difunden de manera tal que una parte es devuelta, nuevamente, al espacio. Como consecuencia de este hecho, un porcentaje significativo de la radiación UV que se recibe en la superficie terrestre, está constituida por radiación difusa.

La intensidad de la radiación UV que se registra en la superficie depende de los parámetros siguientes:

1. Altura solar
2. Columna total de ozono
3. Estación del año
4. Nubosidad
5. Albedo
6. Turbiedad

Los procesos fotobiológicos y fotoquímicos responden de manera distinta a diferentes zonas del espectro UV. Usualmente, dicha respuesta se determina experimentalmente y se representa como un espectro de acción (Caldwell et al., 1986). Este no es más que la respuesta relativa correspondiente a diferentes longitudes de onda. Para la mayoría de las plantas y animales, el espectro de acción muestra mayor sensibilidad a las longitudes de onda más corta de la radiación en el rango UV-B (Karoly, 1996). La irradiancia ultravioleta biológicamente ponderada, **E**, o tasa de dosis (exposición), se encuentra dada por:

$$\mathbf{E} = \int F(\lambda)B(\lambda)d\lambda$$

Donde $B(\lambda)$ es la función de ponderación, conocida también como espectro de acción para un efecto biológico o químico específico y, $F(\lambda)$, es la irradiancia espectral incidente sobre la superficie horizontal a nivel del mar (Madronich et al, 1994).

Por otro lado, la dosis UV biológica o químicamente ponderada se define como:

$$\mathbf{D} = \int \int F(\lambda,t)B(\lambda)d\lambda dt$$

Algunos radiómetros han sido calibrados por los fabricantes de modo tal que repliquen la respuesta eritémica de las personas de piel blanca. Para tal efecto, se ha recomendado

internacionalmente que se utilice el Espectro de Acción CIE, también denominado Espectro de Acción de Eritema (Mckinley y Diffley, 1987).

La integral de la multiplicación cruzada del flujo irradiante en $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ y el Espectro de Acción de Eritema corresponde a la potencia efectiva o irradiancia UVB biológicamente ponderada.

Instrumentación y Unidades

Para la medición de la radiación UV-B se utilizó un radiómetro de banda ancha, modelo 501 UV-Biometer, manufacturado por la Solar Light Co. En esencia, este instrumento consta de un detector diseñado para operación externa y un registrador electrónico (Data Logger) que efectúa todas las funciones de control y almacenamiento de datos. La señal del sensor es amplificada y convertida a frecuencia dentro del detector y luego, transmitida al registrador. La cubierta metálica del detector se encuentra herméticamente sellada y presurizada con un gas neutro para la protección adicional del sensor y los circuitos. El detector lleva acoplado un desecador que remueve la humedad residual y sirve como indicador de ésta.

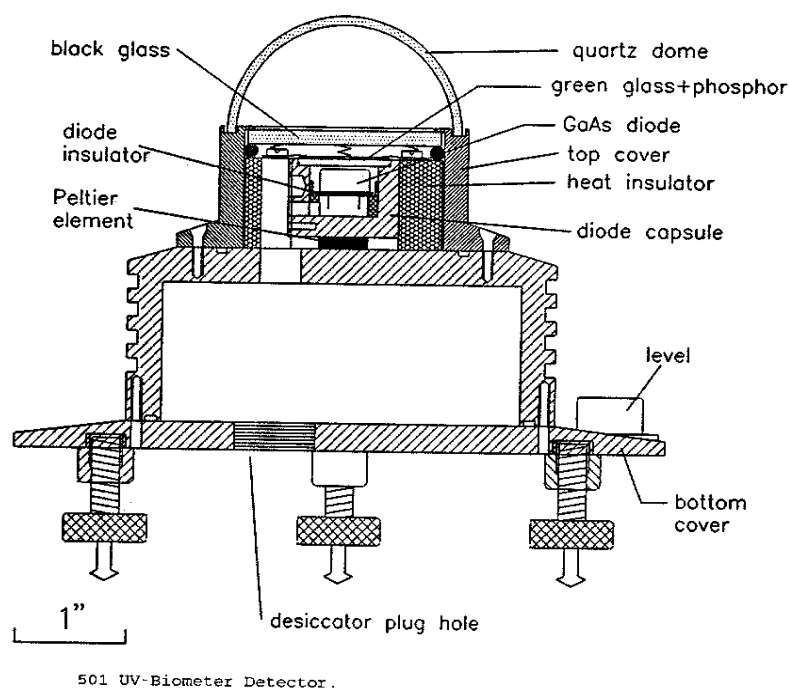


FIGURA N° 1

El sensor del detector consta de una combinación de filtros de absorción, fósforo y un diodo de GaAsP termicamente controlado para asegurar su estabilidad. El conjunto de estos

componentes suministra una respuesta espectral muy próxima a la del espectro de acción de Eritema. Las lecturas de irradiancia UVB se dan en MED/h en donde 1 **MED** (Minimum Erythemat Dose) se define como la **dosis de radiación UVB capaz de causar un eritema mínimo en personas de piel tipo I o tipo II** (Josefsson, 1996). El detector se encuentra instalado horizontalmente en la azotea del edificio del Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá, cuyas coordenadas son:

Latitud	Longitud	Elevación
8° 58' N	79° 32' W	50 m

El clima para el sitio de medición , está dominado primordialmente por una temporada seca que va desde mediados de diciembre a finales de abril y una temporada lluviosa entre mayo y mediados de diciembre, siendo los meses de octubre y noviembre los más lluviosos. Según la clasificación de Koeppen (Critchfield, H., 1974), estas condiciones corresponden a un clima tropical de sabana (Awi); el cuál se caracteriza por tener una precipitación anual menor que 2500 mm; una estación seca prolongada (meses con lluvia menor de 60 mm) en el invierno del hemisferio norte; temperatura media del mes más fresco superior a 18 °C y una diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y el mes más fresco inferior a los 5 °C (Instituto Geográfico Nal., 1988).

Las mediciones de la columna de ozono y agua precipitable se realizaron utilizando un fotómetro solar portátil de cinco canales MICROTOPS II (Solar Light Company, Inc.), el cual mide la radiación solar directa a 300, 305.5, 312.5, 940 y 1020 nm. El ozono absorbe las longitudes de onda menores de radiación ultravioleta solar mucho más que las longitudes de onda mayores. Esto significa que la cantidad de ozono presente entre un observador y el sol es proporcional a la razón de dos longitudes de onda de la radiación ultravioleta solar. El MICROTOPS II utiliza esta relación para derivar la Columna Total de Ozono (el espesor equivalente de una capa de ozono puro a presión normal) a partir de mediciones de tres longitudes de onda en la región UV. De manera similar que en el instrumento Dobson tradicional, la medición a una tercera longitud de onda adicional permite la corrección por dispersión de partículas y luz espúrea. El campo de visión de cada uno de los canales ópticos es 2.5°. La columna de agua precipitable es determinada en base a mediciones realizadas a 940 nm (pico de absorción del agua) y 1020 nm(muy poca absorción por agua).

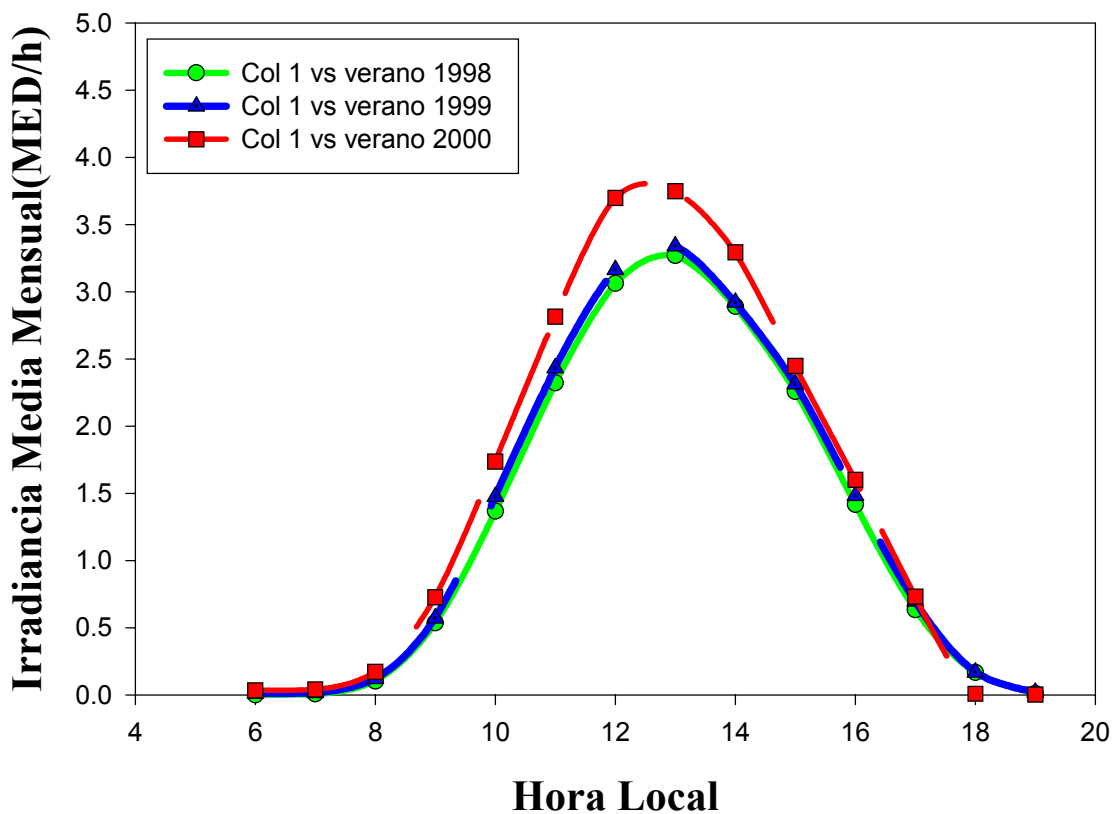
Ambos cálculos, de la columna de ozono y agua precipitable, requieren del conocimiento de la masa real de aire. Este parámetro es calculado por el MICROTOPS II en base al tiempo proporcionado por un reloj interno y las coordenadas del sitio de medición, introducidas por el usuario.

Resultados y Discusión

La gráfica N° 1 muestra las curvas de irradiancia media mensual vs hora local correspondientes a las estaciones secas de los años 1998, 1999 y 2000. Se observa que la estación seca más benigna en lo concerniente a los niveles de radiación UVB fue el año 1998. La estación seca con mayor irradiancia máxima media fue la del año 2000 en el que se registró un valor medio de 3,75 MED/h y la de menor irradiancia máxima media fue la del año 1998, en el que se registró un valor medio de 3,27 MED/h. Como se podrá observar posteriormente, este comportamiento tiene su causa en los niveles de nubosidad que se registraron en las estaciones secas de cada uno de estos años.

Irradiancia Media Mensual vs Hora Local

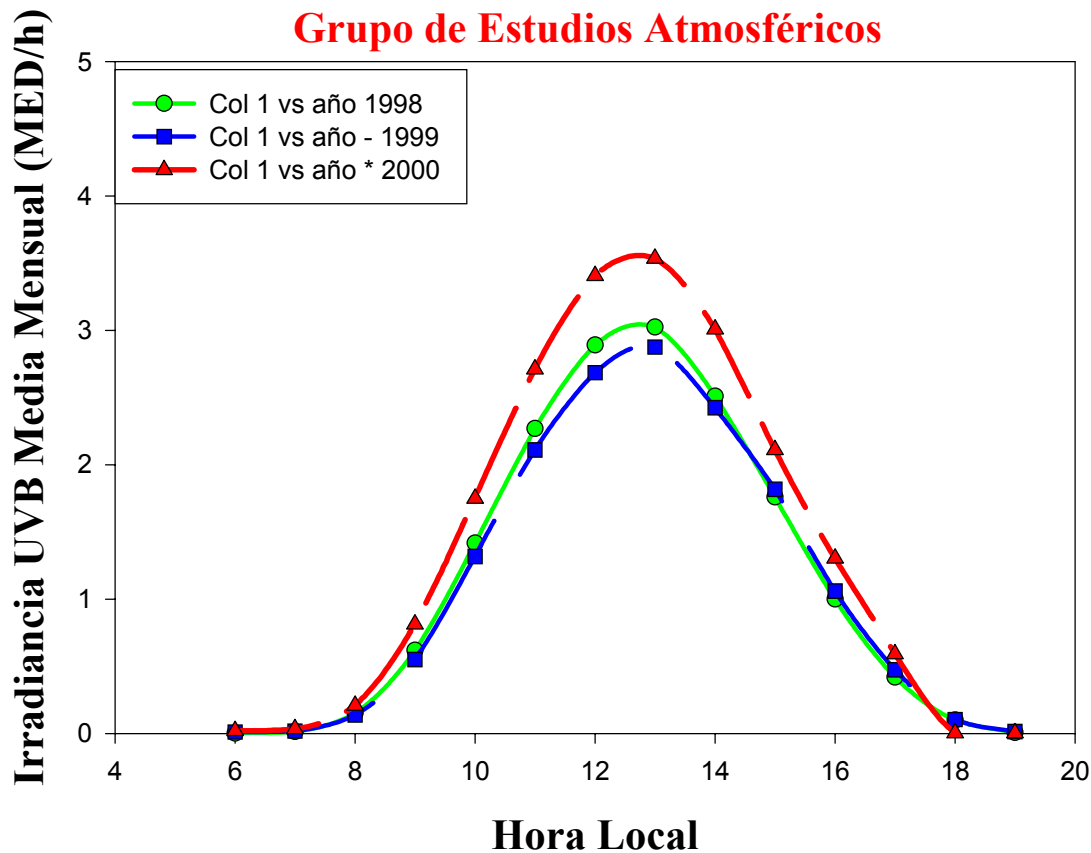
Grupo de Estudios Atmosféricos



GRAFICA N° 1

La gráfica N° 2 muestra las curvas de irradiancia media mensual vs hora local para el período completo de estación seca más estación lluviosa correspondiente a los años 1998, 1999 y 2000. Las irradiancias máximas medias registradas durante los años 1998, 1999 y 2000 correspondieron a 3,02 MED/h, 2,88 MED/h y 3,53 MED/h, respectivamente. Esto significa que el año en el que se registraron niveles de radiación UVB más bajos fue 1999, seguido por el 1998 y el año actual, en el que se han registrado los niveles más altos.

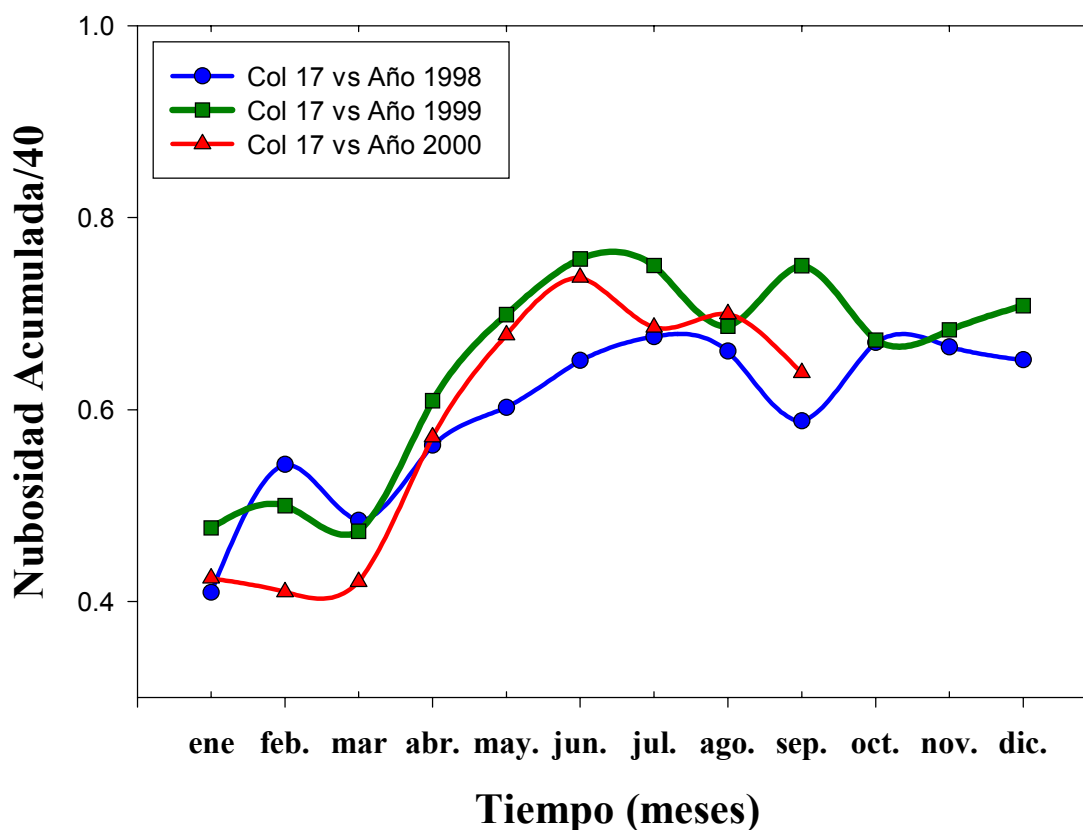
Irradiancia UVB Media Mensual vs Hora Local



GRAFICA N° 2

Como se mencionó anteriormente, uno de los parámetros que tiene mayor incidencia en los niveles de radiación UVB que se registren en la superficie, es la nubosidad. Por tal razón, a lo largo de los años de monitoreo de la radiación UVB y de la columna de ozono estratosférico se han hecho mediciones diarias de la fracción de nubosidad, en **oktas**, en el sitio en donde se encuentra ubicado el radiómetro UVB. Se han estado efectuando cinco mediciones diarias de la nubosidad, así como también de la morfología de las nubes. La nubosidad incide, de manera significativa, en la atenuación de la radiación UVB. Mediante el monitoreo efectuado diariamente, se ha logrado establecer el factor de atenuación de la radiación antes citada, debido a la nubosidad. La gráfica N° 3 muestra los niveles de nubosidad media mensual acumulada vs tiempo, correspondientes a los años 1998, 1999 y 2000.

Nubosidad Acumulada vs Tiempo



GRAFICA N° 3

La estación seca en la que se registraron menores niveles de nubosidad acumulada media correspondió al año 2000 mientras que aquella en la que se registraron máximos niveles de nubosidad acumulada media correspondió al año 1998. Como se podrá apreciar, durante la estación seca de mayor nubosidad (año 1998) se registraron los niveles más bajos de irradiancia máxima mensual media, mientras que durante la estación seca del año 2000

se registraron los niveles más altos de irradiancia máxima mensual media. La gráfica anterior muestra también que los máximos niveles de nubosidad media acumulada para el período completo de estación seca más estación lluviosa se observaron en el año 1999 y los niveles mínimos se registraron en el año 1998. En todas las gráficas se puede observar que la fracción de nubosidad acumulada alcanza su valor máximo durante los meses de junio y julio.

La Tabla N° 1 muestra los valores medios mensuales de la fracción de nubosidad para los años 1998, 1999 y 2000.

TABLA N° 1
NUBOSIDAD ACUMULADA MEDIA MENSUAL

	1998	1999	2000
Enero	0.41	0.48	0.42
Febrero	0.54	0.50	0.41
Marzo	0.48	0.47	0.42
Abril	0.56	0.61	0.57
Mayo	0.60	0.70	0.68
Junio	0.65	0.76	0.74
Julio	0.68	0.75	0.69
Agosto	0.66	0.69	0.70
Septiembre	0.59	0.75	0.64
Octubre	0.67	0.67	0.67
Noviembre	0.67	0.68	
Diciembre	0.65	0.71	

En la Tabla N° 2 se observa la correlación negativa existente entre la irradiancia UVB y la nubosidad acumulada.

TABLA N° 2
IRRADIANCIA Y NUBOSIDAD

	1998		1999		2000	
	Est. seca	Est. Lluv.	Est. seca	Est. Lluv.	Es. seca	Es. Lluv.
Irrad.	3,27	2,90	3,34	2,64	3,75	3,29
Nubos.	0,50	0,65	0,51	0,71	0,46	0,68

En la Tabla anterior, la irradiancia UVB se encuentra expresada en MED/h. Como se puede apreciar en aquellos períodos en los que la nubosidad disminuyó, la irradiancia aumentó.

Los Organismos Internacionales han establecido un índice que cuantifica la intensidad de la Radiación UVB. Dicho índice es un cociente entre la irradiancia en mW/m^2 y 25 mW/m^2 para el mediodía local. Cuando la irradiancia se encuentra dada en MED/h, el índice se obtiene del modo siguiente (Josefsson, 1996):

$$\text{Indice} = (40) * (210/3600) * \text{Irrad}(\text{MED/h})$$

$$\text{Indice} = 2,33 \text{ Irrad} (\text{MED/h})$$

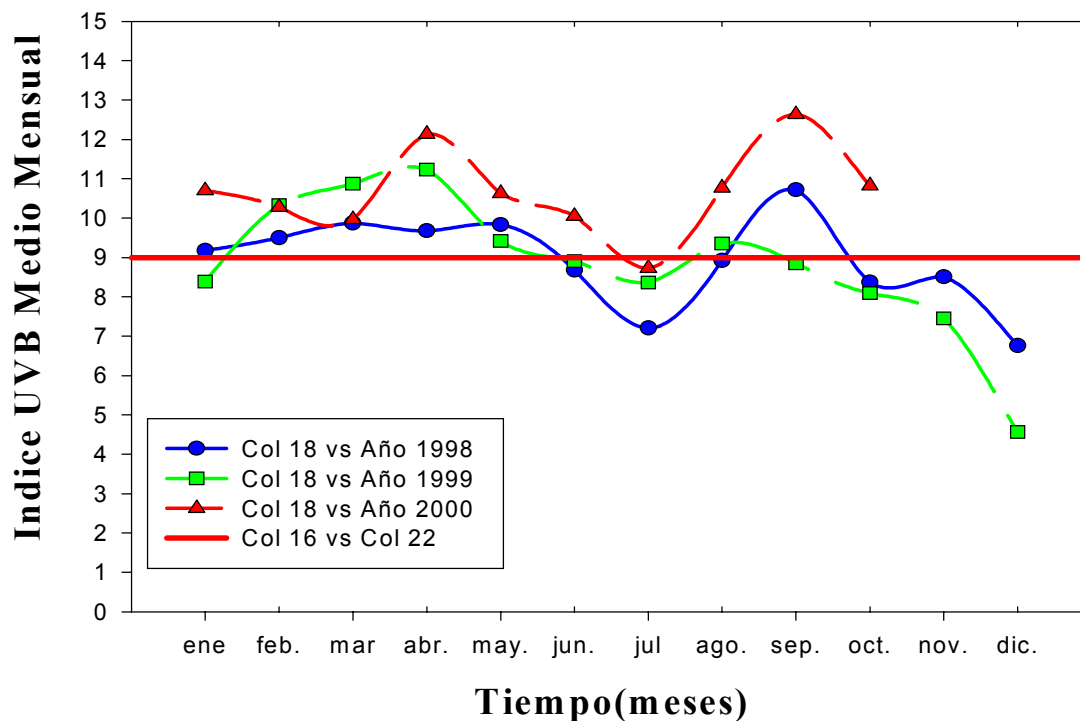
Este parámetro representa el potencial de daño que puede provocar la radiación UVB que está llegando a la superficie. Dicho potencial de daño se encuentra representado por el tiempo que requeriría la radiación antes mencionada para producir un enrojecimiento o eritema de la piel.

Los índices UVB se clasifican de la manera siguiente:

Nivel de Exposición		Tiempo requerido para un eritema
• 0-1-2	Mínimo	60 minutos
• 3-4	Bajo.	40 minutos
• 5-6	Moderado	25 minutos
• 7-8 -9	Alto	15 minutos
• 10 o más:	Extremo	5 minutos

Este parámetro que es de gran utilidad para información a la comunidad, ha sido monitoreado diariamente mediante el radiómetro 501 UV-Biometer. La gráfica N° 4 muestra los índices medios mensuales para los años 1998, 1999 y 2000.

Indice UVB Medio Mensual vs Tiempo



GRAFICA No. 4

Como puede observarse, a lo largo de los tres años de monitoreo, los índices medios mensuales se han mantenido en niveles altos (por encima de 9) tanto durante el período de estación seca como durante el período de estación lluviosa. Los índices máximos se registran durante los meses de abril, en la estación seca y septiembre, en la estación lluviosa. Ello se puede explicar considerando que para la latitud a la que se encuentra la ciudad de Panamá, la irradiancia extraterrestre es máxima, precisamente en los meses de abril y septiembre. En todas las curvas se observa un decrecimiento de los índices durante los meses de junio, julio y agosto. Esto tiene su explicación en el hecho de que la nubosidad alcanza niveles máximos durante estos meses, lo cual incide en la atenuación de la irradiancia UVB y, en consecuencia, en la disminución de los índices. Se observa también que los índices correspondientes al año 2000 han sido más altos que los registrados en los años 1998 y 1999.

Otro de los parámetros medidos es la columna de ozono estratosférico, cuya medición se inició en el mes de febrero de 1998, utilizando un ozonómetro Microtops II, fabricado por la empresa Solar Light, Inc. La Tabla No. 3 muestra los valores medios de la columna de

ozono, en Unidades Dobson, para los años 1998, 1999 y 2000.

TABLA No. 3

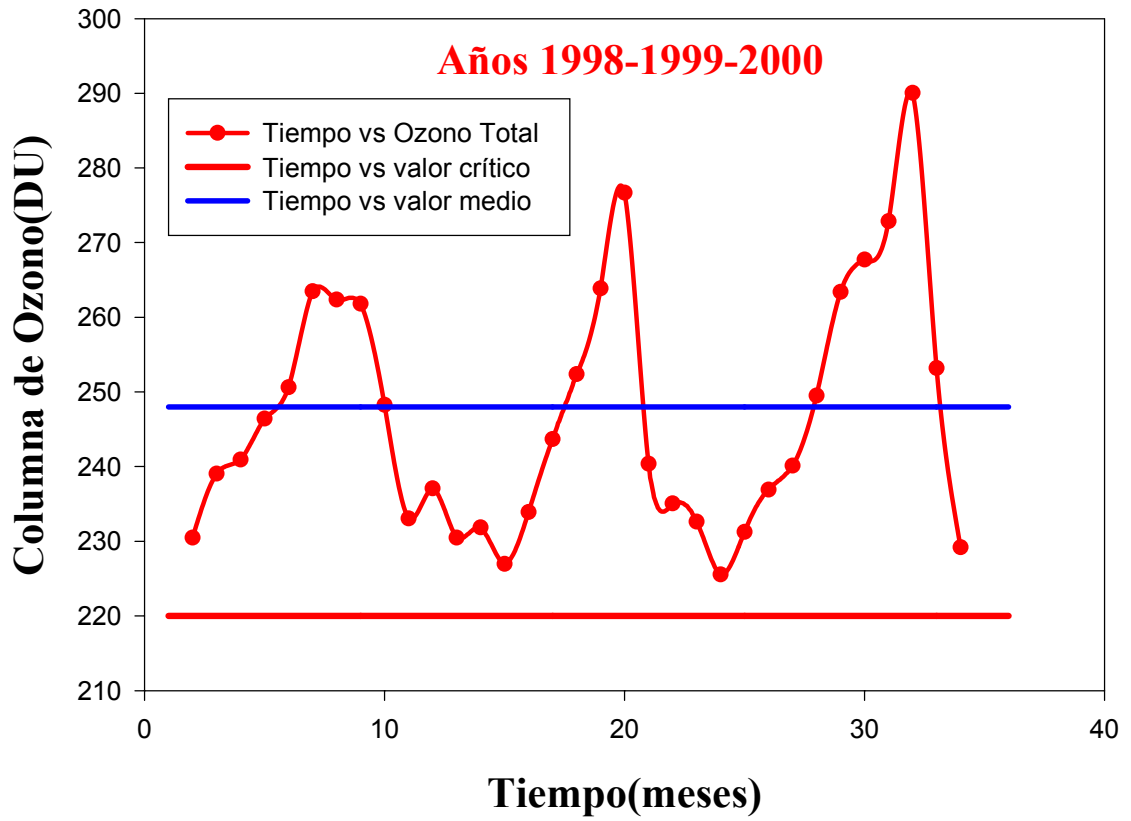
	1998	1999	2000
Enero		230.44	231.26
Febrero	230.49	231.57	236.89
Marzo	239.06	227.65	240.09
Abril	240.92	233.34	249.52
Mayo	246.43	244.03	263.37
Junio	250.62	254.08	267.72
Julio	263.48	263.65	275.29
Agosto	262.34	275.27	290.07
Septiembre	261.79	240.18	253.17
Octubre	248.24	235.02	229.18
Noviembre	233.05	232.40	213.69
Diciembre	237.06	225.32	218.37

Como puede observarse los valores medios más bajos se registran durante la estación seca, particularmente durante los meses de enero y febrero. Los valores de la columna de ozono ascienden hasta alcanzar su valor máximo en el mes de agosto para luego comenzar a descender a partir del mes de septiembre. A lo largo de los tres años de monitoreo, se ha observado que los valores diarios de la columna de ozono fluctúan entre 215 DU y 300 DU. A partir del mes de diciembre y durante parte de los meses de estación seca, la columna de ozono descende con frecuencia por debajo del valor crítico de 220 DU. El valor medio de la columna de ozono registrado hasta la fecha es de 248 DU.

La gráfica No. 5 muestra cómo han evolucionado los valores medios de la columna de ozono a partir del año 1998.

Columna de Ozono Media vs Tiempo

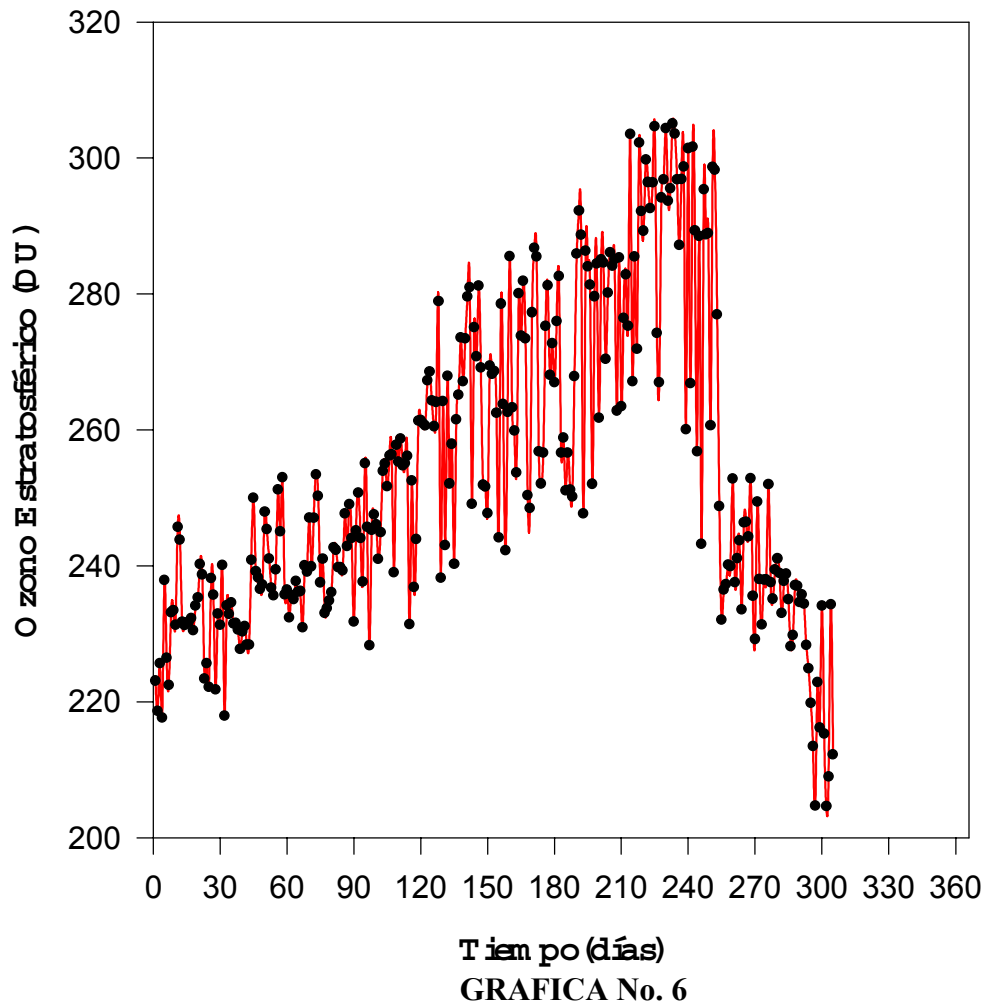
Grupo de Estudios Atmosféricos



GRAFICA No. 5

La gráfica No. 6 muestra los valores diarios de la columna de ozono para el año 2000.

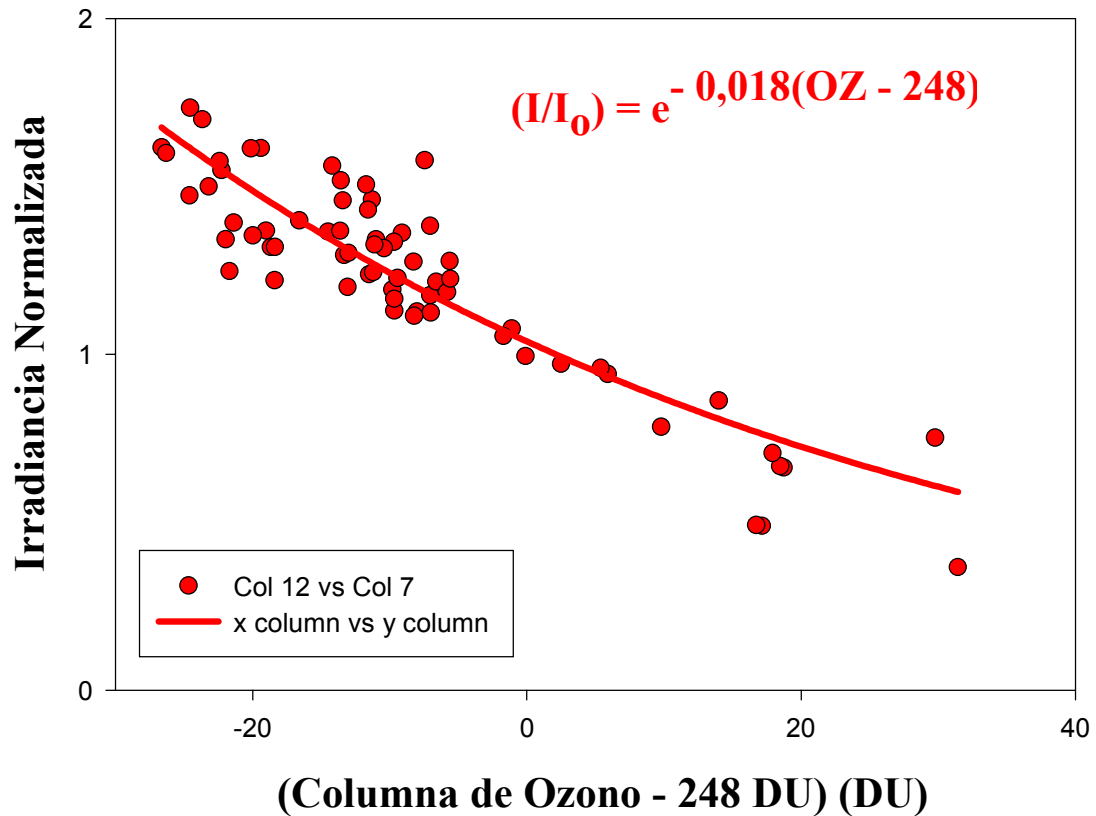
Columna de Ozono vs Tiempo Grupo de Estudios Atmosféricos



Otro de las metas alcanzadas por el Laboratorio de Física Atmosférica es el desarrollo de un modelo matemático que permite correlacionar la irradiancia UVB para horas del mediodía local con los parámetros siguientes: columna de ozono, fracción de nubosidad y día del año. Para tal efecto se tomó como referencia el día 15 de septiembre de 1998. Se utilizó esta referencia fundamentado en el hecho de que la nubosidad a lo largo de dicho día fue muy baja (menos de 2 oktas) y de que para esta época del año, el factor de excentricidad de la órbita terrestre en la ecuación para el cálculo de la irradiancia es, aproximadamente, uno. Para este día la columna de ozono tuvo un valor de 250 DU. Luego se midieron las irradiancias normalizadas correspondientes a días de baja nubosidad (inferior a 2 oktas) y se graficaron tales irradiancias en función de la columna de ozono. De este modo se obtuvo la gráfica No. 7, mostrada a continuación.

Irradiancia Normalizada vs Columna de Ozono

Grupo de Estudios Atmosféricos



GRAFICA N° 7

Como puede apreciarse la irradiancia UVB normalizada varía exponencialmente con la columna de ozono, tomando como referencia el valor medio de 248 DU. La ecuación obtenida es la siguiente:

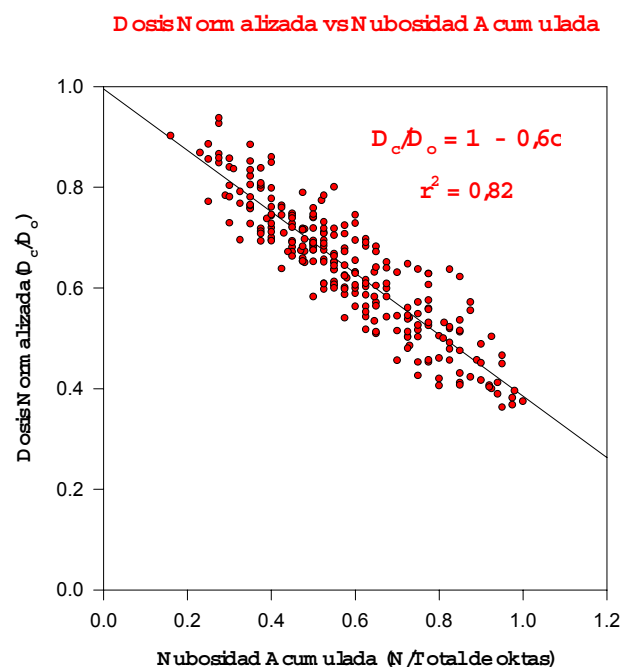
$$\frac{I}{I_o} = e^{-0,018(OZ-248)}$$

donde I_o es la irradiancia media para horas del mediodía local, la cual corresponde a 4,1 MED/h. La función exponencial mostrada en la ecuación anterior representa el factor de atenuación de la radiación UVB debido a su absorción por parte de la columna de ozono.

Esta ecuación da el valor aproximado de la irradiancia UVB para un día de baja nubosidad si la columna de ozono difiere de 248 DU. Ecuaciones similares han sido obtenidas por otros investigadores en diversas latitudes (Josefsson, 1996) pero con coeficientes distintos al obtenido en la ciudad de Panamá y con otros valores medios de la columna de ozono.

La presencia de nubes y aerosoles puede modificar substancialmente los valores de irradiancia y dosis que se registrarían bajo condiciones de cielo despejado. Frederick y Snell estudiaron las mediciones obtenidas mediante una red de radiómetros Robertson-Berger en los Estados Unidos y encontraron que en promedio los niveles de radiación se reducían entre un 22 y un 38% relativos a los niveles correspondientes a un día con cielo despejado (Frederick y Snell, 1990). También encontraron que la variabilidad debido a cambios en la cobertura de nubes y aerosoles era mucho mayor que la debida a la variabilidad en el ozono estratosférico. Relaciones similares fueron encontradas en la investigación desarrollada por el Laboratorio de Física Atmosférica de la Universidad de Panamá. Wang y Lenoble (Wang y Lenoble, 1994) encontraron que la radiación que emerge de la parte inferior de las nubes es difusa, a menos que el espesor óptico sea muy pequeño. Además encontraron que la cantidad de radiación transmitida a través de las nubes es casi independiente del ángulo de cenit solar y de la altura de la nube. Las nubes con un mismo espesor óptico tienen la misma influencia independientemente de su altura.

Debido a la importancia del factor de variabilidad de los niveles de radiación UVB causados por la cubierta de nubes, también se investigó la correlación entre la dosis normalizada y la fracción de nubosidad, c . Ello se logró mediante la medición de las dosis UVB diarias para aquellos días con una misma columna de ozono (250 DU) y su posterior comparación con la dosis del día de referencia. Luego se graficó la dosis normalizada en función de la fracción de nubosidad acumulada diaria. De este modo se obtuvo la gráfica N° 8, mostrada a continuación:



GRAFICA No. 8

La gráfica que se obtuvo por regresión es una función lineal con un coeficiente de correlación de 0,82. Puede observarse que la dosis normalizada decrece linealmente al aumentar la fracción de nubosidad acumulada diaria. La ecuación que se obtuvo es la siguiente:

$$\frac{D_c}{D_o} = (1 - 0,6c)$$

Puesto que:

$$\frac{D_c}{D_o} = \frac{I}{I_o}$$

De lo anterior se deduce que para aquellos días con igual columna de ozono, el factor de atenuación de la irradiancia UVB debido a la nubosidad se encontraría dado por la siguiente expresión:

$$\frac{I}{I_o} = (1 - 0,6c)$$

A las ecuaciones anteriores podemos incorporar el factor de modulación de la irradiancia UVB debido a la excentricidad de la órbita terrestre, el cual se encuentra dado por la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \right]$$

Por consiguiente la irradiancia UVB correspondiente al mediodía local se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$I = 4,1(1 - 0,6c) \left\{ 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right\} e^{-0,018(OZ - 248)}$$

La ecuación anterior nos permite calcular la irradiancia UVB para el mediodía local, si se conoce la fracción de nubosidad, c , el día del año d_n y la columna de ozono OZ . Esto significa que si se determinan las condiciones meteorológicas para días subsiguientes, en lo que a nubosidad se refiere y se conoce el valor de la columna de ozono, se puede predecir la irradiancia UVB en horas del mediodía local y, en consecuencia, el índice UVB.

Conclusiones

Las conclusiones del presente trabajo se pueden puntualizar del modo siguiente:

- La irradiancia máxima media diaria que se ha registrado en horas del mediodía local asciende a 6,51 MED/h.
- La irradiancia máxima media durante la estación seca del año 2000 fue 14,7 % más alta que la del año 1998 y 12,3 % más alta que la del año 1999.
- La nubosidad media durante el año 1999 fue 8,4% más alta que durante el año 1998 y 10,6% más alta que lo transcurrido del año 2000.
- Durante el 76,7 % de los días de la estación seca, se presentan índices de riesgo para la salud.
- Durante el 52 % de los días de la estación lluviosa, se presentan índices de riesgo para la salud.
- La columna de ozono alcanza valores cercanos a 220 DU durante los meses de diciembre, enero y febrero. Estos valores se encuentran dentro del margen de variabilidad estacional correspondiente a la latitud en la que se encuentra ubicada la ciudad de Panamá.
- Para el año 2000 la columna de ozono ha registrado un descenso significativo a partir del mes de octubre.
- El valor promedio de la columna de ozono es 248 Unidades Dobson.

- Para condiciones de cielo despejado, se reciben dosis de *17a 20 MED* entre las 10:00 a.m y las 2:00 p.m.
- Para condiciones de cielo totalmente nublado, la dosis se atenúa entre un 60 y un 80%.
- Para cielo parcialmente nublado, la dosis se atenúa en un 41%.

La ecuación que permite calcular la irradiancia UVB en horas del mediodía es:

$$I = 4,1(1 - 0,6c) \left\{ 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right\} e^{-0,018(OZ - 248)}$$

Donde c es la nubosidad y OZ es el valor de la columna de ozono.

Despejando el valor de la columna de ozono, OZ, de la ecuación anterior, se puede predecir el valor de dicha columna si se mide la irradiancia UVB en horas del mediodía local. Esto significa que mediante las lecturas del radiómetro 501 UV-Biometer podemos determinar, indirectamente, el valor de la columna de ozono mediante la siguiente ecuación:

$$OZ = 248 - 55,6 \ln \left\{ \frac{UV}{(4,1) \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right] (1 - 0,6c)} \right\}$$

REFERENCIAS

1. **CALDWELL, M.; CAMP, L. B.; WARNER, C. Y FLINT, 1986.** Action Spectra and their key role in assesing biological consequences of solar UVB Radiation; Stratospheric Ozone Reduction, Solar Ultraviolet Radiation and Plant. Life, Springer – Verlag, **87 – 111**, Berlin, Germany
2. **CRITCHFIELD, HOWARD J., 1974.** General Climatology, p. 446. Prentice-Hall International, Inc., London, Third Edition.
3. **FREDERICK, J. E.; SNELL, H. E., 1990.** Tropospheric influence on solar Ultraviolet radiation: the role of clouds. Journal of Climate, 3 (1990), 373-81.
4. **JOSEFSSON, WEINE, 1996.**Solar Ultraviolet Radiation in Sweden: Reports in Meteorology and Climatology, Swedish Meeteorological and Hydrological Institute, **No. 53**, Norrkoping, Sweden.
5. **JOSEFSSON, WEINE, 1996.** Five Years of Solar UV- Radiation Monitoring in Sweden; Reports in Meteorological and Hydrological Institute, **No. 71**, Norrkoping, Sweden.
6. **KAROLY D.** Physics of Stratospheric Ozone and UV-B Radiation, Cancer Forum, **Vol. 20, No. 3**, Special Edition, 1996.
7. **MADRONICH, S. Y DE GRUIJL, F., 1994.** Stratospheric Ozone Depletion Between 1979 and 1992: Implications for Biological Active Ultraviolet-B Radiation and Non-Melanoma Skin Cancer Incidence; Photochemistry and Photobiology, **Vol. 59, No. 5**, 541-546, United States.
8. **MADRONICH. S., McKENZIE, M. M., CALDWELL Y BJORN, L.O., 1994** Changes in Ultraviolet Radiation Reaching the Earth's Surface, United Nations Environment Programme (UNEP), Chapter 1, Nairobi, Kenya.
9. **McKINLAY, A. Y DIFFEY, B. L., 1987.** A Reference Action Spectrum for Ultraviolet induced erythema in human skin. In Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations (Editado por W. F. Passchier y B. F. M. Bosnajakovic), **p. 83 – 87**, Elsevier, Amsterdam.
10. **PINO, A. -** Modelo Empírico para estimar el nivel de la columna de ozono Estratosférico a partir de Parámetros Atmosféricos - IV Reunión Técnica de la Comisión de Geofísica del IPGH (Tucumán, Argentina - Septiembre de 1999).
11. **WANG, P.; LENOBLE, J., 1996.** Influence of clouds on UV irradiance at ground Level and backscattered exittance. Advances in Atmospheric Science, 13 (1996),

217-28.

- 12. WATSON, ROBERT T.,** Present State of Knowledge of the Ozone Layer;
Ozone Depletion: Health and Environmental Consequences; editado por R. Russell
Jones and T. Wigley; 1989, John Wiley & Sons Ltd.