

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**“CLIMATOLOGÍA DE LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA  
“B” PARA LA REPÚBLICA MEXICANA DERIVADA DEL USO DE  
SATÉLITES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO”.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

**PRESENTA:**

**JOSÉ ISMAEL VELÁZQUEZ MENDOZA**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. MAURO VALDÉS BARRÓN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS.

A mi papá y a mi mamá por su eterno e incondicional amor.

A mis hermanos y mi sobrina por los buenos momentos que compartimos y por los malos que nos han enseñado a ser mejores personas.

Al Dr. Mauro Valdés por su inagotable paciencia y su sincera amistad.

Al Instituto de Geofísica y al personal del Observatorio de Radiación Solar por las facilidades otorgadas.

A mis amigos que día con día han enriquecido mi vida.

## **ÍNDICE.**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **CAPITULO I. LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA “B”.**

I.1. Radiación Solar. ....	1
I.2. La Radiación Solar Ultravioleta .....	3
I.3. La Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”. ....	5
I.3.a Impactos negativos de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”. ....	7
I.4. Índice Ultravioleta (IUV). ....	8
I.4.a. Breve historia del inicio del Índice Ultravioleta. ....	10
I.5. Instituciones encargadas del monitoreo de la Radiación Solar Ultravioleta. ....	12
I.5.a. CIE (International Commission On Illumination). ....	13
I.5.b. TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). ....	14
I.5.c. Observatorio de Radiación Solar. (ORS). ....	16
I.5.d. SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico). ....	18

#### **CAPITULO II. LA MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA “B”**

II.1. Instrumentos para medir la Radiación Solar.. ....	22
II.1.a. Sensores para del registro de la Radiación Solar Ultravioleta. ....	24
II.1.b. Dificultades del monitoreo de la Radiación Solar Ultravioleta en el País. ....	26
II.2. Funcionamiento básico del Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS).. ....	28
II.2.a. El algoritmo utilizado en el Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) ...	31
II.2.b. Obtención de la información del TOMS. ....	35
II.2.c. Formato de los datos. ....	36
II.3. Manejo de la información proporcionada por el TOMS. ....	37

#### **CAPITULO III. CLIMATOLOGÍA DE LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA “B”, PARA LA REPÚBLICA MEXICANA.**

III.1. Distribución mensual .....	58
III.2. Distribución estacional .....	65
III.3. Diferencias entre mapas mensuales-estacionales. ....	66

## **CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

IV.1. Interpretación de los resultados. ....	68
IV.1.A Información satélite-superficie. ....	68
IV.2. Comparación de datos satélite-superficie. ....	71

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b> .....	75
--	----

<b>BIBLIOGRAFÍA.</b> .....	78
----------------------------	----

<b>ANEXOS</b> .....	80
---------------------	----

Anexo 1. Procedimiento para el cálculo del Índice Ultravioleta. ....	81
--	----

Anexo 2. Principales definiciones Radiométricas. ....	86
---	----

## **INTRODUCCIÓN.**

La radiación solar juega un importante papel en la Tierra, ya que es el principal aporte de energía, prácticamente sin ella, todos los fenómenos meteorológicos y biológicos no podrían ocurrir, por lo tanto se puede considerar como el principal motor para el funcionamiento de este planeta.

Así mismo, la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, es necesaria para que el ser humano pueda sintetizar la vitamina “D” y pueda fijar el calcio en los huesos; sin embargo, también tiene efectos negativos por sobre-exposición, algunos de éstos son las carnosidades en los ojos (cataratas) y el melanoma cutáneo (cáncer de piel), éste último de singular interés en la actualidad, debido a la disminución de concentración de ozono en la estratosfera que se ha traducido en una elevación de la radiación UVB en superficie, en algunos puntos de la Tierra (Galindo, 1988).

Durante las últimas décadas, las concentraciones de ozono en la estratosfera, se ha visto radicalmente disminuida en las regiones polares, especialmente en la región Antártica, razón por la que diferentes organismos internacionales (entre ellos la Organización Mundial de la Salud y la Organización Meteorológica Mundial), han implementado programas globales para el monitoreo de las concentraciones de ozono estratosférico y de la radiación solar ultravioleta en superficie.

Estos programas por mayor importancia que representen para el bienestar de la humanidad, por lo general son bastante cortos en su presupuesto, y si bien en algún momento dado cuentan con recursos, éstos no son asignados de acuerdo a las necesidades de los diferentes países y mucho menos alcanzan para lograr los objetivos planteados.

En el caso específico de México, nos enfrentamos a un grave problema, la falta de puntos de medición de este parámetro, sumado a las condiciones físicas de nuestro país,

que no son favorables para poder contar con una red de medición de éste o cualquier otro parámetro meteorológico ya que se vuelve casi imposible por razones tanto de carácter económico como por razones operativas.

México cuenta con un relieve muy abrupto, una estación meteorológica en muchos casos no puede considerarse representativa del área mínima recomendada por la OMM (WMO, 1996), pues en distancias muy cortas, las variaciones en la altitud son considerables, ocasionando que los elementos climáticos se comporten de manera diferente; con base a lo anterior contar con una red de superficie que garantice un monitoreo constante y eficaz podría con seguridad superar las mil estaciones, el costo de estas estaciones meteorológicas con sensores de radiación solar es verdaderamente prohibitivo, pero por otra parte, contar con un sistema de mantenimiento preventivo, correctivo y de calibración para los sensores, implicaría otro gasto exorbitante, el cual tendría que ser periódico.

Sin embargo ante tal situación, se cuenta con técnicas probadas que nos pueden ayudar a medir los niveles de Radiación Solar Ultravioleta Banda "B" en superficie, dichas técnicas van desde el desarrollo de modelos de transferencia de radiación, hasta el uso de satélites meteorológicos, los cuales han sido una buena alternativa, ya que en la mayoría de los casos se pueden evaluar diferentes parámetros meteorológicos con un solo satélite reduciendo los gastos antes mencionados.

Un caso específico es un satélite de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), que se encuentra a cargo del departamento del TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), tiene un monitoreo constante de la Radiación Solar Ultravioleta desde 1978 hasta la actualidad, por lo que ha generado una base de datos de bastante confiabilidad para el caso de realizar una climatología del parámetro como trata el presente trabajo.

Gracias a este satélite existen actualmente posibilidades para contar con una evaluación de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” en superficie que juega un importante rol en la vida de los seres vivos y las plantas. Así se podrá conocer el régimen de Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” y de esta manera ejecutar programas de concientización y prevención a la población para una exposición administrada.

### **Objetivo.**

Objetivo principal:

Evaluar el comportamiento espacio-temporal de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” al medio día solar para la República Mexicana, con información proveniente de un Satélite Meteorológico.

Objetivos secundarios:

Evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos a partir de la información de un satélite meteorológico por medio de una comparación con sensores en superficie.

Conocer la distribución espacio-temporal de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” para la República Mexicana.

### **Hipótesis**

El empleo de modelos de transferencia de radiación, alimentados por la información obtenida de los satélites meteorológicos y cotejada con un sensor en superficie para respaldar la veracidad de ésta, representa una excelente opción para el conocimiento del comportamiento espacial-temporal de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, debido al escaso margen de error que existe entre ambas fuentes de información, como alternativa al no contar con una red de estaciones en superficie que registre el comportamiento de este parámetro.

## **Breve descripción del Trabajo.**

Capítulo I. Se ha incluido la información básica para entender que es la Radiación Solar y sus principales componentes, particularmente que la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” tema central de este trabajo, se mencionan los impactos negativos que pueden suceder por una inadecuada sobre-exposición; se presenta una introducción al Índice Ultravioleta, así como una breve historia desde su creación hasta la situación actual tanto a nivel mundial como en el país, también se incluye una reseña de las instituciones más importantes que se encargan de la regulación y monitoreo del parámetro, con especial atención en las instituciones nacionales. A lo largo de este capítulo, se describe la problemática que enfrenta México en el monitoreo de tan importante componente radiacional.

Capítulo II. En este capítulo se describen los instrumentos utilizados para la medición y el registro de la radiación solar en cualquiera de sus parámetros, se presenta un inciso específico acerca de los sensores dedicados al monitoreo de la radiación solar UVB, explicando la problemática que existe en la actualidad con el monitoreo de dicho parámetro, posteriormente se abordan temas relacionados con el satélite meteorológico utilizado para la medición de la UVB, desde su operación mecánica hasta la aplicación del algoritmo mediante el cual son derivadas las medidas de radiación UVB y ozono, posteriormente se presenta la estructura de los datos que nutrieron la presente investigación; finalizando en la metodología para el manejo de la información proporcionada por el satélite.

La obtención de los datos para la realización de este trabajo, se hizo del sitio de internet <ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/>, que pertenecen al TOMS dependencia de la NASA, así como del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, la

primer fuente permitió conocer la distribución espacio-temporal de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” en el país mientras la segunda dio lugar a la validación de la misma.

Capítulo III. Se presentan los mapas y el análisis de la distribución de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” para la República Mexicana de forma mensual y estacional, al igual que una discusión producto de los resultados encontrados.

Capítulo IV. Se realiza un análisis global del trabajo y se incluye la comparación con una estación en superficie al igual que un breve análisis del comportamiento del satélite en función de las medidas realizadas en la superficie.

Se presenta un capítulo para las conclusiones y otro para la bibliografía consultada.

Al final del trabajo se encuentra un anexo, en donde se explica con detalle el funcionamiento del Índice Ultravioleta, se presentan en el mismo, un ejemplo del cálculo y su empleo para llevar a cabo una exposición controlada.

En un segundo anexo se presentan las principales definiciones radiométricas utilizadas, y elaboradas por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE).

## **CAPITULO I**

### **Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”.**

#### **I.1. RADIACIÓN SOLAR.**

La radiación solar es la energía emitida por el Sol que recibe la Tierra en forma de ondas electromagnéticas, además de partículas de luz en escasa proporción (fotones), ambos forman lo que se conoce como espectro electromagnético. El 99% de esta energía se encuentra de los 0.20  $\mu\text{m}$  a los 4.0  $\mu\text{m}$ , mientras el 1% restante está en los extremos donde se localizan los rayos gamma, rayos X, inferiores a los 0.2  $\mu\text{m}$  y microondas, ondas de radio, mayores a los 4.0  $\mu\text{m}$ , como las más importantes (Iqbal, 1983).

Esta energía está compuesta por bandas que se pueden generalizar para fines prácticos en Infrarrojo, Visible y Ultravioleta. Donde el infrarrojo cubre longitudes de onda que van de los 0.77  $\mu\text{m}$  a los 4.0  $\mu\text{m}$ , se caracterizan por ser longitudes de onda de bajo contenido energético; la Banda visible como su mismo nombre lo indica, se refiere a las únicas longitudes de onda que el ojo humano puede apreciar y va de los 0.40  $\mu\text{m}$  a los 0.77  $\mu\text{m}$ , se puede desglosar de una manera más precisa, ya que nuestro ojo capta esta Banda como luz blanca, pero en realidad se compone de seis colores que van desde el violeta hasta el rojo, siendo el rojo la porción de la Banda que menos energía proporciona mientras que el violeta es la porción más energética.

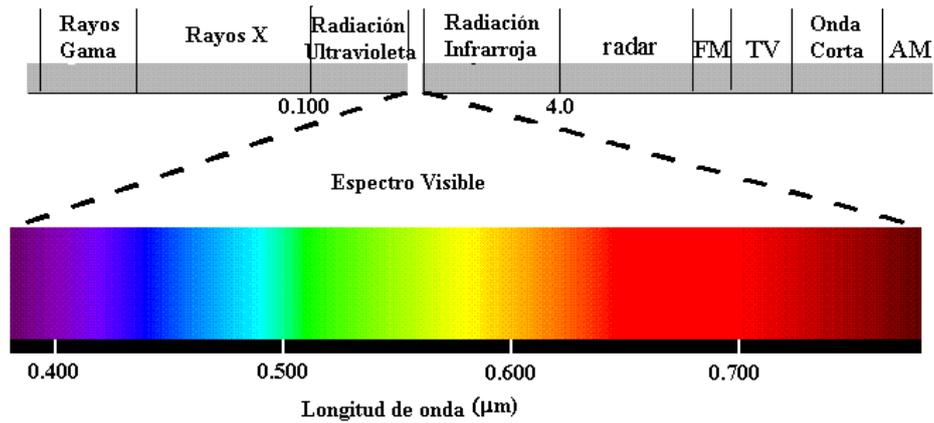


Figura1. Espectro Electromagnético

La última de las Bandas es la radiación solar ultravioleta, comprende longitudes de onda que van desde los 0.280  $\mu\text{m}$  hasta los 0.400  $\mu\text{m}$ , representan sólo el 8.3% del flujo total de energía y de ésta solo el 10% logra llegar a la superficie, el 90% restante es dispersado y/o absorbido principalmente por el ozono estratosférico ( $\text{O}_3$ ) (Simon, 1997), además la nubosidad y/o la contaminación también impiden su llegada a la superficie terrestre. Aún así esta Banda espectral es de fundamental importancia ya que se encuentra relacionada con procesos que ocurren desde la termosfera hasta la troposfera, dentro de éstos se pueden situar procesos biológicos como la activación y destrucción de células que tienen un importante rol en el inicio de la fotosíntesis, el principal motor de vida en la Tierra, sin embargo estas longitudes de onda, también representan peligro potencial para la vida ya que se encuentran asociadas a daños en los seres vivos.

De esta manera la radiación solar es el motor de toda la dinámica terrestre y atmosférica. Esto conduce a resaltar la importancia de su estudio en el cambio climático global, considerándola como un eje vertebral.

## **I.2. LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA.**

La radiación solar ultravioleta (UV) se puede definir como la radiación electromagnética con longitudes de onda menores a la radiación visible y mayores a los rayos-x. Su amplitud espectral se puede situar según la Comisión Internacional de Iluminación (CIE, por sus siglas en francés) (Matthes, 1998) en un rango de los 0.280  $\mu\text{m}$  a los 0.400  $\mu\text{m}$ . La forma de dividir el espectro electromagnético que corresponde a la región del Ultravioleta está en función de la aplicación que se le vaya a dar a los resultados, respuesta biológica de los seres vivos, otra de las formas obedece principalmente a su composición física, la cual se explica a continuación (Huffman, 1992).

*Ultravioleta Cercano (NUV)*. Esta región se extiende de longitudes de onda que tienen límite con la porción visible del espectro electromagnético hasta longitudes de onda que logran alcanzar la superficie de la Tierra, los límites se encuentran aproximadamente de los 0.400  $\mu\text{m}$  a los 0.300  $\mu\text{m}$ .

*Ultravioleta Medio (MUV)*. El Ultravioleta Medio cubre una región de 0.300  $\mu\text{m}$  a 0.200  $\mu\text{m}$ , lo cual se encuentra aproximadamente entre el límite de la onda corta que incide en la superficie y la porción de mayor absorción de oxígeno molecular. La mayoría de esta radiación solar es absorbida por el ozono ( $\text{O}_3$ ) estratosférico.

*Ultravioleta Lejano (FUV)*. Esta región se extiende a partir de la zona de mayor absorción de oxígeno molecular hasta el límite de transmisión de longitudes de onda del fluoruro de litio.

*Ultravioleta al Vacío (VUV)*. Esta región incluye longitudes de onda entre los 0.200  $\mu\text{m}$  y 0.010  $\mu\text{m}$ . El término al vacío es el nombre que se usa para referirse al factor que los instrumentos de superficie usan para obtener suficiente luz en la región del ultravioleta.

*Ultravioleta Extremo (EUV)*. El ultravioleta extremo algunas veces abreviado XUV, es definido entre 0.100  $\mu\text{m}$  y 0.010  $\mu\text{m}$ . la diferencia entre el FUV y el EUV está frecuentemente considerada como la más baja ionización que sufre el oxígeno molecular a los 0.1028  $\mu\text{m}$ . La Radiación Solar EUV es responsable por la fotoionización de la ionosfera.

Existen en la literatura algunos términos que son utilizados con cierta regularidad para explicar el comportamiento de la radiación solar ultravioleta, aunque se limitan especialmente a pruebas de laboratorio, son considerados importantes para mencionarlos en este trabajo.

El primero de ellos es el “*ciego solar*”. Este término se refiere usualmente a longitudes de onda que se encuentran en el rango de 0.300  $\mu\text{m}$  a 0.100  $\mu\text{m}$ . Término que se emplea en pruebas de laboratorio donde es utilizada la radiación ultravioleta de manera artificial. El ciego solar cuenta con mayor magnitud que el ultravioleta solar. La región del ciego solar define principalmente el MUV y el FUV, aunque el término es usado únicamente para identificar la MUV.

El siguiente término es el “*Ultravioleta no especificado*”, se refiere específicamente a delgadas ventanas espectrales localizadas entre 0.105  $\mu\text{m}$  a 0.400  $\mu\text{m}$ , son utilizadas para pruebas de laboratorio, la disponibilidad de selección está limitada a longitudes de onda mayores a los 0.105  $\mu\text{m}$ , que corresponde al límite de transmisión del fluoruro de litio.

Por ultimo el término “*Ultravioleta Profundo*”, el cual es usado en la descripción de aplicaciones de microscopía y micro litografía. El rango del “*Ultravioleta Profundo*” es aproximadamente de 0.350  $\mu\text{m}$  a 0.190  $\mu\text{m}$ . El límite de la longitud de onda corta de este rango es el mismo límite que usa el ultravioleta en transmisión de distancias pequeñas usadas en pruebas de laboratorio y algunas otras aplicaciones industriales.

Como se explicó con anterioridad las divisiones que puede recibir la ventana del ultravioleta obedecen a aplicaciones específicas, la siguiente clasificación es utilizada con base a la respuesta biológica y química y para propósitos médicos.

En ésta se puede dividir a la radiación solar ultravioleta en tres principales Bandas electromagnéticas, (Iqbal, 1983) el Ultravioleta Banda “C” (UVC) que tiene una ventana espectral menor a los  $0.280 \mu\text{m}$ , es completamente absorbido por la atmósfera superior debido a las altas concentraciones de ozono (Estratosfera), hasta el momento no tiene incidencia en superficie y no tiene ningún efecto en la salud de la población por su ausencia.

Una segunda región espectral del Ultravioleta es la Banda “B” (UVB) que va de los  $0.280 \mu\text{m}$  a los  $0.320 \mu\text{m}$ ; con base a algunas observaciones se ha determinado que la radiación UVB se podría reducir hasta los  $0.315 \mu\text{m}$  debido a algunas respuestas biológicas importantes que tienen lugar en esta mínima ampliación espectral, pero por fines prácticos se tomará la clasificación del CIE que corresponde a la región que va de los  $0.280 \mu\text{m}$  a los  $0.320 \mu\text{m}$ ; por último el Ultravioleta Banda “A” (UVA) con una ventana que va de los  $0.320 \mu\text{m}$  a los  $0.400 \mu\text{m}$ , en términos generales cualquiera de las Bandas del Ultravioleta son altamente energéticas.

### **I.3. LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA “B”.**

La Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” (UVB) es una pequeña ventana del espectro electromagnético, que va de los  $0.280 \mu\text{m}$  a  $0.320 \mu\text{m}$  es lo suficientemente energética para romper cadenas de los principales componentes atmosféricos, tales como el Ozono ( $\text{O}_3$ ), Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), Peróxido de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), Formaldehídos ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), Ácido Nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) dentro de los más importantes. Así la UVB se encuentra

muy ligada a todos o la mayoría de los procesos fotoquímicos que ocurren en nuestra atmósfera.

En la estratosfera ocurren diversas reacciones fotoquímicas en las que intervienen el ozono y el oxígeno molecular, ya que buena parte de las longitudes de onda situadas entre los 0.210  $\mu\text{m}$  y los 0.300  $\mu\text{m}$  son absorbidas por el ozono, mientras que las longitudes de onda menores a los 0.200  $\mu\text{m}$  son absorbidas en su totalidad por el oxígeno molecular, impidiendo su incidencia en la superficie terrestre. Longitudes de onda más cortas como lo son los rayos gamma y rayos x, son absorbidos en los niveles atmosféricos superiores

La disminución de ozono ( $\text{O}_3$ ) en la estratosfera sobre latitudes medias y altas es el problema más grave en la actualidad (WMO, 1996), relacionado estrechamente con un severo aumento de la radiación solar ultravioleta (en cualquiera de sus Bandas) tanto en niveles bajos de la atmósfera como en la superficie terrestre, aumentando las reacciones fotoquímicas y favoreciendo la formación de nuevos compuestos químicos que pueden causar daño a la sociedad, tales como el ozono troposférico. Sin embargo los problemas con la disminución del ozono estratosférico no se limitan a lo explicado con anterioridad, ya que los daños sobre la salud de los humanos e inclusive sobre la de todos los seres vivos, deben considerarse con especial atención. Uno de los principales efectos en los seres humanos es el cáncer de piel, aunque cabe destacar que existen otros problemas de menor frecuencia pero de mayor importancia como son las alteraciones en el sistema inmunológico, éste juega un rol esencial en la defensa del cuerpo contra cualquier tipo de organismos invasores y proporciona resistencia en contra de cualquier tipo de desarrollo cancerígeno. La mayoría de los efectos que tiene la radiación UVB en los humanos tienen inicio en la piel, pues es el primer órgano que tiene contacto con el medio ambiente, de esta manera los cambios que ocurren ahí son rápidamente

comunicados a la piel, en el caso de las sobre exposiciones pueden alterar el sistema inmunológico.

### **I.3.a Impactos negativos de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”**

Las personas que tienen la piel clara están más expuestas a una rápida degeneración de los tejidos y al cáncer en la piel, a diferencia de las que tienen la piel más oscura, por sobre-exposición a la radiación solar; el UVB es absorbido por los cromosomas en el núcleo de las células afectando el DNA en donde se conserva el contenido genético.

La melanina que protege nuestra piel es de color pardo, (ennegrecida cuando absorbe la radiación solar), tiene la misma función que el ozono en nuestra atmósfera, ya que se encarga de filtrar e impedir el paso de la radiación solar ultravioleta Banda “B” a niveles inferiores donde el daño puede ser mayor (WMO, 1994).

El grado del daño que el UVB produce en la piel depende de la intensidad y la longitud de onda que contenga y la profunda penetración de éstas. El eritema es un enrojecimiento de las células de la piel, por exposición a la radiación solar ultravioleta (quemaduras de sol), éstas pueden ser desde leves hasta severas, las primeras no presentan ningún riesgo ya que las células se regeneran de manera normal; cuando llegan a ser severas pueden dar como resultado ampollas y destrucción de la superficie externa de la piel, con infecciones y efectos secundarios similares a las quemaduras por fuego de primer grado. La ventana eritemagénicamente activa se refiere a la porción que va de los  $0.290 \mu\text{m}$  a los  $0.400 \mu\text{m}$  correspondiendo a la UVB y UVA y está en relación con la curva propuesta por McKinlay y Diffey (McKinlay-Diffey, 1987) adoptada por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) para representar la respuesta en la piel por la radiación solar ultravioleta.

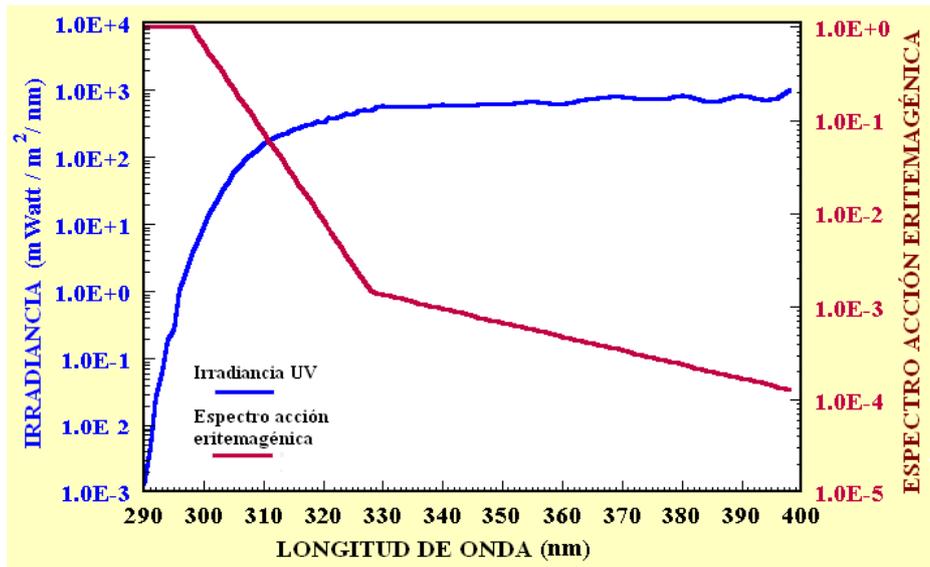


Figura 2. Curva de respuesta Eritemagénica propuesta por McKinlay y Diffey

Otro de los principales efectos en la salud ocasionados por la exposición a la radiación solar ultravioleta, es la presencia de cataratas, fotoqueratosis, daños en el epitelio de la córnea, y diferentes efectos en la retina, por el contrario a los sistemas de defensa que se presentan en la piel, los ojos no presentan ningún sistema de defensa, de esta manera son mucho más vulnerables y sus efectos son de igual importancia (Gavilanes, 1994).

#### I.4. ÍNDICE ULTRAVIOLETA (IUV)

Como se ha mencionado con anterioridad una elevada exposición a la radiación UV en cualquiera de sus Bandas, representa un peligro notable para la salud de la población, ante esto se han creado programas encargados de mantener informada de manera oportuna a la población en general, uno de los más importantes es el Índice Ultravioleta (IUV); se puede definir como un pronóstico de la cantidad de radiación solar ultravioleta potencialmente dañina para la piel, que pueden alcanzar la superficie terrestre cuando el Sol se encuentra en su punto más alto, (medio día solar). De esta

manera la creación del IUV, es una manera rápida y entendible de dar a conocer la intensidad de la radiación ultravioleta del Sol al público general.

La cantidad de radiación solar ultravioleta que incide en la superficie terrestre está principalmente determinada por la elevación del Sol en el cielo, la cantidad de ozono que se encuentre en la Estratosfera y la cantidad de nubosidad que se encuentre presente y en menor grado, la cantidad de contaminantes y partículas suspendidas en la atmósfera. El Índice Ultravioleta puede tener un rango que va de 0 (cuando es la noche), hasta los 16 (en los trópicos o altas elevaciones con cielos muy despejados) (Carreño, 2001).

Los valores más altos del IUV son los que representan mayor peligro en piel y ojos, con estos mismos valores pueden ocasionarse daños en un tiempo muy corto debido a la gran cantidad de UV que incide en ese momento. El comportamiento diurno de la radiación solar ultravioleta presenta los mayores valores cuando el sol se encuentra en su máxima elevación, y disminuye rápidamente cuando el sol se acerca al horizonte.

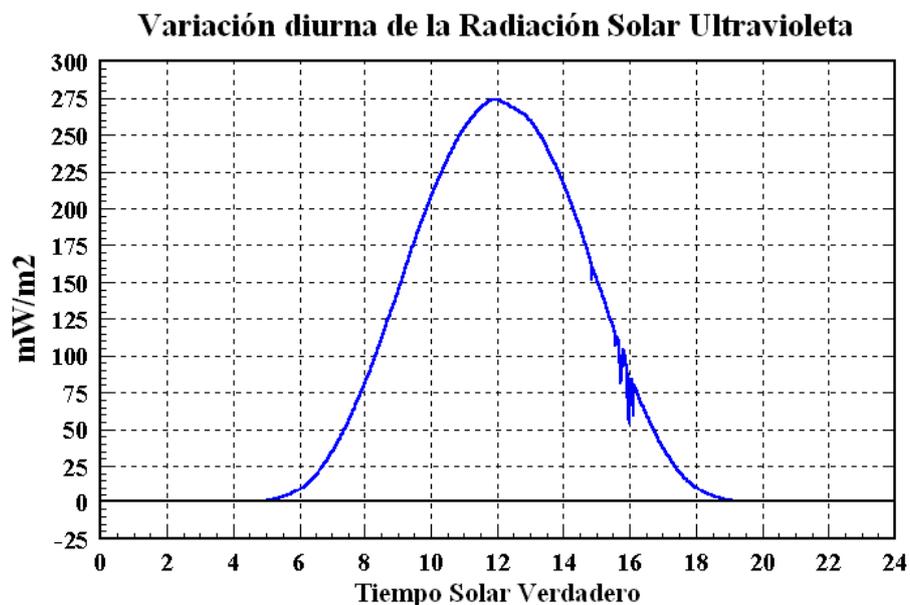


Figura 3. Marcha Diurna de la Radiación Solar Ultravioleta

La sobre-exposición a la radiación solar ultravioleta tiene principalmente dos consecuencias en la piel del cuerpo humano, la primera son quemaduras severas producto de cortos episodios de exposición (fines de semana, vacaciones, paseos), la segunda es el desarrollo de serios cánceres en la piel después de largos periodos de exposición. El melanoma es el más mortal de los cánceres en la piel, ocurre cuando la persona ha sido expuesta a periodos cortos pero de gran intensidad de soleamiento durante mucho tiempo, el otro tipo de cáncer de piel es 100% curable, ocurre en personas que son sobre-expuestas por muy largos periodos de tiempo pero en dosis menores de soleamiento, se encuentra presente en personas como trabajadores de la construcción, campesinos, pescadores, etc., por el contrario a esto se ha vinculado que los largos tiempos de exposición dan pauta a la formación de cataratas en los ojos.

#### **I.4.a. Breve historia del inicio del Índice UV**

EL IUV fue desarrollado gracias a esfuerzos internacionales encabezados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en cooperación con el Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas (UNEP, United Nations Environment Programme), por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), por la Comisión Internacional de Protección a la Radiación No-Ionizante (ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) y por la Oficina Federal Alemana para Protección de Radiación. A continuación se escriben los pasos más significativos dentro del desarrollo del IUV (Matthes, 1998).

- 1982. Los laboratorios australianos miden la radiación UV, y la difunden, en las noticias de la noche, como dosis eritemagénica mínima (MED) en las principales ciudades.

- 1987. Nueva Zelanda emite los tiempos para asolearse cada hora en la radio.
- 1992. El Atmospheric Environmental Service (AES) de Canadá comienza a emplear el índice UV en una escala de 1 a 10. Este esfuerzo y la educación pública mostraron su eficacia para aumentar la atención sobre la exposición solar y modificar los hábitos de exposición.
- 1992. La Environmental Protection Agency (EPA) colabora con el National Weather Service (NWS) para desarrollar un IUV similar al canadiense. La EPA y el Center for Disease Control and Prevention (CDC) se proponen realizar una campaña informativa sobre los riesgos de la radiación UV. El índice se implementa en varios países.
- 1994. El IUV se emite diariamente, desde el National Weather Service, para las 58 principales ciudades de EE.UU.

Desde su publicación inicial en 1994 (Matthes, 1998), muchos países han estado usando el IUV para promover la protección a la radiación solar ultravioleta, junto con un pronóstico de la situación que se presentará en determinado periodo de tiempo, dándolo a conocer en los principales medios de comunicación tales como periódicos, TV, radio e Internet. Sin embargo, la mayor parte de personas no han entendido totalmente su sentido y/o utilidad, por el contrario, su desconocimiento ha provocado confusión en la población.

En el caso de México, su implementación fue en 1995, (Muhlia, 2000) cuando la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, utilizó la Red de Monitoreo de Radiación Solar Ultravioleta que instaló la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) en la Zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), planteando como objetivo principal, mantener informada a la población de los IUV para

evitar la sobre-exposición, lamentablemente esta información se limita única y exclusivamente a esta región, dejando al resto del país desinformado de la situación de la radiación solar ultravioleta por falta de infraestructura.

En el anexo I se incluyó el procedimiento para el cálculo del IUV, al igual que algunos ejemplos de sus aplicaciones.

## **I.5. INSTITUCIONES ENCARGADAS DEL MONITOREO DE LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA.**

Resulta evidente la necesidad de tener una coordinación a escala nacional para poder entender el comportamiento espacial y temporal de la radiación solar ultravioleta en el país, inclusive esta necesidad obliga a invitar no solamente a las ciencias geofísicas sino también a las sociales, debido a que los cambios de este parámetro afectan toda la biosfera y los procesos que en ella ocurren.

El conocimiento espacial y temporal del UVB podría poner en claro cuáles son los principales problemas que puede generar al igual que las zonas de mayor riesgo por exposición, para que así puedan ser abordados más específicamente por ciencias interesadas, garantizando una completa evaluación del parámetro tomando todo tipo de acciones informativas y preventivas.

Las instituciones que se mencionan en las siguientes páginas se encuentran estrechamente relacionadas con la investigación de la radiación UV; la primera institución se encarga de la regulación de los programas internacionales, además de normalizar todo tipo de detalles que tienen que ver con la radiación solar.

El resto de las instituciones mencionadas se encargan del monitoreo del parámetro, y aunque existen otras, solamente se han incluido las que tienen estrecha relación con el

presente trabajo; por ejemplo, el Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), de cuya institución se obtuvieron los datos del satélite para la República Mexicana; el Observatorio de Radiación Solar de la UNAM, de ésta se obtuvieron las medidas de superficie para compararlas con las del satélite al igual que del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), el cual es mencionado también por ser la única red que monitorea la radiación solar ultravioleta en el país.

#### **I.5.a. CIE (International Commission on Illumination)**

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) es una organización internacional dedicada a la cooperación e intercambio de información entre todos los países miembros interesados en la investigación de la radiación solar ultravioleta y las ciencias de la iluminación. Ésta se encuentra formada por un Comité Nacional de 39 países y 11 miembros identificados de manera individual.

Los principales objetivos del CIE son (Matthes, 1998):

- Realizar un foro internacional de discusión en todos los temas que se encuentren relacionados con la radiación solar incluyendo cortes científicos, tecnológicos e iluminación, para intercambio de información entre cada uno de los países miembros.
- Desarrollar estándares básicos y procedimientos petrológicos en los campos de luz e iluminación.
- Proveer una guía de aplicación de principios y procedimientos en el desarrollo de estándares nacionales e internacionales en los campos de luz e iluminación.
- Mantener contacto e interacción técnica con otras organizaciones internacionales, teniendo como principal objetivo prevenir a la población de posibles daños ocasionados por la exposición a la radiación solar.

La CIE es una institución encargada en impulsar el estudio y monitoreo de la radiación UV, además de ser un reconocido organismo internacional con uno de los principales gabinetes de investigación dedicados al estudio de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” incluyendo los daños que ocasiona en toda la biosfera y principalmente a los seres humanos.

La CIE se encuentra organizada en varios departamentos, cada uno de estos con responsabilidades muy específicas, a continuación se da una breve explicación del más importante para este trabajo:

Uno de los principales departamentos de la CIE, es la División 6, se encuentra dedicado a las aplicaciones y efectos del espectro de radiación solar, los rangos que se cubren tiene que ver con los efectos fotoquímicos y fotobiológicos, se encarga de desarrollar estándares de seguridad para lámparas fotobiológicas, además de algunos métodos de prueba para las pantallas solares y otros productos que se hayan desarrollado con objetivos afines.

Uno de los más importante trabajos de la CIE en conjunto con las principales organizaciones meteorológicas y de salud, fue la formación del índice ultravioleta.

#### **I.5.b. Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS).**

El TOMS es una dependencia de la Goddard Space Flight Center (GSFC), del gobierno de los Estados Unidos de América, cuya misión es difundir el conocimiento de los fenómenos que suceden en la Tierra y en todos sus ecosistemas a diferentes escalas, desde una cobertura global hasta puntualizar en pequeñas regiones. Ésta dependencia se especializó en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan tener un monitoreo exacto de fenómenos tanto terrestres como atmosféricos, y que éstos dos se complementen para asegurar su confiabilidad.

De esta manera esta dependencia se encarga de:

- Conducir un programa de investigación en ciencias espaciales y de la Tierra usando medidas realizadas desde el espacio, complementado por otras suborbitales, en superficie y de laboratorio, además de investigaciones teóricas, para complementar la información y darle mayor validez.
- Desarrollar y hacer funcionar una amplia gama de vuelos orbitales para cubrir las necesidades de la comunidad científica.
- Proveer y operar las búsquedas de información satelital y de vuelos espaciales, además de la adquisición de datos de las redes mundiales o nacionales.
- Desarrollar tecnología innovadora e instrumentos precisos que permitan alcanzar el objetivo del departamento.
- Desarrollar y mantener los sistemas de información con la más avanzada tecnología para permitir su demostración, análisis, almacenamiento, y distribución.
- Desarrollar los sistemas satelitales de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), que proporcionan los datos ambientales para pronóstico e investigación.

El TOMS mediante el satélite Nimbus 7 proveía mediciones globales de la columna total de ozono de manera diaria, además de proveer una completa gama de valores de irradiancia en distintas longitudes de onda, dentro de ellas se sitúa la Radiación Solar Ultravioleta Banda "B". El satélite mantuvo un correcto funcionamiento de noviembre de 1978 a mayo de 1993 (McPeters, 1996). A partir de esta fecha los datos se encontraban fuera de rangos aceptables, por lo que se trató de dar una respuesta a este comportamiento, inclusive se aceptó durante un periodo que los datos eran reales y que desconocidas fuentes terrestres habían estado ocasionado estos problemas, después de

un periodo se observaron algunas anomalías que eran producto de la “descalibración” y el desgaste que los sensores habían recibido en su largo periodo de funcionamiento, ambos satélites en la actualidad ya dejaron de dar servicio.

Durante el periodo junio del 1993 a julio de 1996, no existió ningún satélite monitoreando dichos parámetros, pero para el 2 de Julio de 1996 fue lanzado un nuevo satélite, el cual comenzó a funcionar y proveer datos desde el 17 de Agosto del 1996 (McPeters, 1998). El segundo y nuevo satélite llamado Earth Probe TOMS, ha estado funcionando de manera correcta desde esa época y en la actualidad es el encargado de proveer los datos.

El TOMS y la GSFC, representan una excelente oportunidad para conocer más a detalle la situación actual de la atmósfera ya que cuenta con una extensa base de datos de los más importantes fenómenos meteorológicos, con programas de monitoreo de escala global que permiten tener información de lugares que no cuenten con una estación de monitoreo en superficie, como lo es la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”.

### **1.5.c. Observatorio de Radiación Solar. (ORS)**

El Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), localizado en el sur de la Ciudad de México (19° 20′ Norte, 99° 11′ Oeste), inició sus actividades como parte de la Red Actinométrica Mundial durante el año Geofísico Internacional en 1956 (Valdés, 1996). Durante el inicio de sus labores únicamente se contaba con tres componentes de la radiación solar: radiación solar directa, radiación solar difusa y radiación solar global, además de contar con el registro de los principales parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa, insolación, nubosidad y presión).

Los parámetros de radiación solar con anterioridad mencionados, se monitorean con sensores recomendados por la OMM (Organización Meteorológica Mundial) (WMO, 1996), ya que sus especificaciones cubrían las necesidades requeridas para poder incorporarse a la Red Actinométrica Mundial, estos sensores tienen un elemento sensible termoeléctrico, el cual está referido a una Escala Radiométrica Mundial, para que las observaciones realizadas con ellos, puedan ser comparadas con las realizadas en cualquier otro lugar donde se utilicen sensores referenciados, estandarizados y avalados finalmente por la Organización Meteorológica Mundial.

En la ciudad de Davos, Suiza, se encuentra la sede de los instrumentos estándar mundiales, los que cada 4 años se utilizan para calibrar los pirheliómetros estándar de nuestro país, y estos últimos sirven para calibrar anualmente los pirheliómetros y piranómetros de trabajo diario. Con el fin de mantenerse dentro de los lineamientos que marca la OMM para el monitoreo de la radiación solar en sus diferentes componentes, el ORS a lo largo de su historia adquirió algunos otros sensores que complementaban todos los parámetros radiacionales, la radiación solar ultravioleta y la emisión atmosférica o mejor conocida como infrarrojo cercano. Además el ORS se ha prevenido con instrumentos que monitorean parámetros auxiliares que extinguen, dispersan o atenúan la radiación solar, algunos de estos son el ozono troposférico, aerosoles y la columna total de ozono.

Para el monitoreo de la radiación ultravioleta se cuenta con dos tipos de radiómetros, el primero que mide especialmente en la región espectral correspondiente al UVA y segundo mide la región del UVB, aunque actualmente se cuenta con diferentes sensores dedicados a esta tarea se puede destacar que son dos las principales marcas, el UV-Biometer construido por Solar Light los cuales miden las dos componentes, y los Radiómetros marca Kipp y Zonen que miden UVA, UVB y UVD.

La veracidad de la información está en parte basada en el mantenimiento que los sensores e instrumentos reciben de manera anual, este proceso se lleva a cabo con radiómetros patrones nacionales y a su vez éstos se calibran contra patrones estándar internacionales, de tal manera que los datos obtenidos tengan validez internacional.

Es muy importante hacer notar que estos procesos de modernización, mantenimiento y sobre todo la formación de personal especializado, tuvo recompensa en el año de 1985, cuando la Organización Meteorológica Mundial considero al ORS como Centro Regional Mundial de la Región Cuarta (Norteamérica, Centroamérica y el Caribe) (Valdés, 1996).

#### **I.5.d. SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico)**

El SIMAT es una organización encargada del monitoreo atmosférico, con el objetivo de vigilar y evaluar la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), como medida de prevención para protección de la salud de sus habitantes. En la actualidad cuenta con varias redes que le permite cumplir con dicho objetivo, dentro de las más importantes y representativas están la RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico), la REDMA (Red Manual de Monitoreo Atmosférico) y la REDMET (Red Meteorológica) (Figura 4).

La RAMA es la encargada del monitoreo de la atmósfera de la ZMCM, se encuentra formada por 36 estaciones automáticas de monitoreo ubicadas en puntos estratégicos de la Ciudad de México, 24 están localizadas en el Distrito Federal y 12 en el Estado de México, como complemento la REDMA cuenta con 14 estaciones distribuidas en la ZMCM, 9 se localizan en el Distrito Federal y 5 en el Estado de México. Las estaciones de monitoreo cuentan con criterios técnicos para su ubicación, como la densidad de población o la distribución de fuentes de emisión y relieve. Cabe destacar el crecimiento

de la red de monitoreo respondiendo a los problemas que vive la Ciudad de México, pues esto ha propiciado que día a día se tenga un mejor monitoreo, con el objetivo de mantener informada a la población de dichos problemas y se puedan tomar las medidas necesarias de prevención.

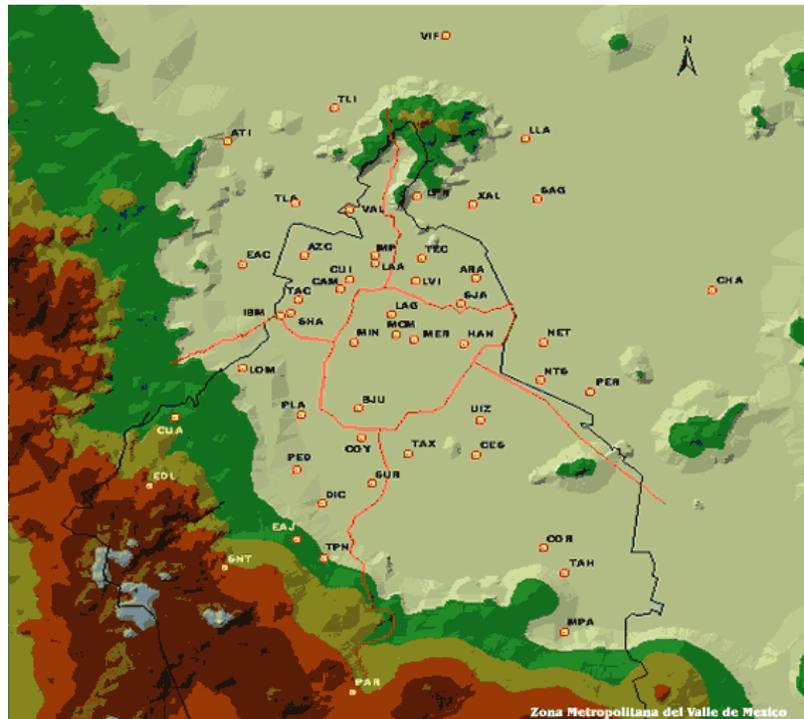


Figura 4. Red del SIMAT. (SIMAT, 1998)

En estas estaciones se realizan mediciones continuas y permanentes de ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) y ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) (SIMAT, 1998). La información que proporciona esta red es primordial en la evaluación oportuna de la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y su difusión mediante el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).

La rapidez con que se envía y recibe la información, permite la instrumentación inmediata del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en situaciones de riesgo para la salud de la población.

Los equipos de medición con los que cuenta la RAMA son analizadores para gases específicos, cada uno opera con base a las propiedades fisicoquímicas que identifican a cada contaminante. Estos equipos realizan mediciones minuto a minuto las 24 horas del día los 365 días del año. La información de las estaciones de monitoreo se transmite a un sistema central donde se procesa y valida para generar promedios horarios. Esta información se almacena para integrar las bases de datos que están a disposición de quien lo desee.

La RAMA, preocupada por el monitoreo de la radiación solar ultravioleta, puso en operación en 1997, una red formada por 10 puntos dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, para el monitoreo de la Radiación Ultravioleta Banda “A” y “B”, sin embargo en la actualidad sólo se cuenta con 8 sensores debido a problemas técnicos que existieron en el funcionamiento de las dos estaciones, existen planes para reubicar estas estaciones aunque por el momento no funcionan.

Las estaciones pertenecientes a la RAMA que cuenta con monitoreo de UVB en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son:

- **Cuajimalpa**, localizada en Escuela Primaria “Belisario Domínguez”. Calle Monte Encino s/n esquina con Avenida Jesús del Monte, Colonia Jesús del Monte, Delegación Cuajimalpa. D.F.
- **Chapingo**, localizada en Colegio de Posgraduados de la Universidad de Chapingo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Colonia Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México.
- **Acatlán**, localizada en ENEP-Acatlán UNAM. Avenida Alcanfores s/n esquina con San Juan Totoltepec, Colonia Santa Cruz Acatlán, Municipio de Naucalpan, Estado de México.

- **Hangares**, localizada en Centro Internacional de Adiestramiento de Aviación Civil (CIAAC). Boulevard Hangares No. 235, Colonia Federal, Delegación Venustiano Carranza. D.F.
- **Merced**, localizada en Centro de Salud “Luis E. Ruiz”. Avenida Congreso de la Unión No. 148, Colonia Merced Balbuena, Delegación Venustiano Carranza. D.F.
- **Pedregal**, localizada en Escuela Primaria “John F. Kennedy”. Calle Cañada No. 370 esquina con Avenida Cráter, Colonia Pedregal de San Ángel, Delegación Álvaro Obregón. D.F.
- **San Agustín**, localizada en Centro de Salud Comunitario “San Agustín”. Calle Sur 88 esquina con Calle Sur 90, Col Nuevo Paseo de San Agustín, Municipio Ecatepec de Morelos, Estado de México.
- **Tlalnepantla**, localizada en Glorieta de Atlacumulco. Avenida Toluca s/n, Glorieta Atlacumulco, Colonia Tlalmex, Municipio de Tlalnepantla, Estado de México.

## **CAPITULO II**

### **La Medición de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”**

#### **II.1. INSTRUMENTOS PARA MEDIR LA RADIACIÓN SOLAR.**

Mantener un registro adecuado de la radiación solar ultravioleta y en especial de la UVB, resulta mucho más complicado que tener un monitoreo constante de la radiación solar (ya sea el caso de la difusa, directa o global), esta complicación tiene origen a partir de las necesidades de la sociedad, dicho de otra manera, la radiación solar en la totalidad del espectro electromagnético fue la primera necesidad, respondía probablemente a preguntas tales como, ¿Cuánto se recibe?, ¿De que manera se recibe?, ¿Cómo es el comportamiento diario, mensual, anual?, etc., ante tal necesidad la comunidad científica dio inicio a una larga e interminable caminata por el desarrollo tecnológico del instrumental científico, así los primeros instrumentos apenas lograban cubrir sus necesidades, con el paso del tiempo se pudieron realizar mejoras que certificaban un correcto monitoreo de los parámetros meteorológicos, con la unión y cooperación internacional se lograron crear estándares de calidad para mantener un registro correcto que pudiera ser comparado y utilizado por el resto de los países que estuvieran interesados en dicha información.

Una de las cosas que cabe destacar para comprender el funcionamiento de los sensores dedicados al monitoreo de la radiación solar UV, es el mecanismo de operación de los sensores dedicados al registro de las principales componentes de la radiación solar, directa, difusa y global; para el monitoreo de éstas se utilizan los pirheliómetros en el caso de la primera y los piranómetros para las dos últimas, el funcionamiento de estos

instrumentos puede ser de dos tipos; con sensores termoeléctricos (termopilas), o con sensores fotovoltaicos (Blumthaler, 1989).

El elemento fundamental de los sensores termoeléctricos es el termopar, con los termopares se construyen termopilas. Un termopar consiste de dos diferentes conductores con los que se hace un par de juntas alternando los conductores formando un circuito cerrado, si las juntas se ponen en contacto con diferentes contenedores de calor a diferente temperatura (reservorios), en este circuito se genera una fuerza electromotriz térmica, una termopila es un conjunto de termopares conectados en serie, de tal manera que la fuerza electromotriz total será la suma de las fuerzas electromotrices de sus elementos. El arreglo de los termopares se realiza de tal forma que se configuran áreas de “juntas frías” (a temperatura ambiente) y áreas de “juntas calientes” (calentados por radiación). El área de “juntas calientes” es la que constituye realmente el sensor de radiación, es por esta razón, que además de ser altamente absorbente, debe ser no selectivo a la radiación de diferentes longitudes de onda, es decir, que su absorción espectral sea constante para todas las radiaciones de longitudes de onda del espectro (de  $0.3\mu\text{m}$  a  $4.0\mu\text{m}$ ) y sea lo más próximo al 100%. Si bien los sensores termoeléctricos como los que se han descrito son hasta la fecha los mejores instrumentos para medir los flujos de energía de radiación, éstos deben calibrarse respecto de instrumentos que por sus características físicas y de diseño sean capaces de medir en forma absoluta estos flujos con un alto grado de exactitud de tal manera que se les puedan considerar instrumentos estándar de referencia.

El segundo tipo de instrumentos mencionados, basa su funcionamiento en sensores del tipo fotovoltaicos, en años recientes se han estado utilizando sensores del tipo fotovoltaico (fotodiodo de silicón) los cuales por sus características físicas han resultado ser unos buenos “simuladores” de piranómetros, esto porque las comparaciones con

piranómetros de primera clase a las que se han sometido bajo diferentes condiciones de cielo (despejados, nublados, etc.) dan como resultado un alto grado de correlación estadística lo cual permite decir que las mediciones pueden tener una precisión dentro de un  $\pm 2\%$  en días despejados y hasta un  $\pm 5\%$  en días nublados. Uno de los principales problemas que presentan este tipo de sensores fotovoltaicos se deriva del manejo de energía entrante, dicho de otra manera, existe un momento en el cual los sensores llegan al límite de su capacidad de registro, si existe un flujo mayor no lo pueden mostrar de manera correcta y provoca un limitado monitoreo del flujo de radiación solar.

Sin embargo, a pesar de que son dos funcionamientos diferentes se puede mantener un registro de confiabilidad con cualquiera de los dos tipos de sensores. En la actualidad existen un buen número de instrumentos fabricados por diferentes marcas que pueden cubrir las necesidades del monitoreo de estos componentes de la radiación solar.

### **II.1. a. Sensores para el registro de la Radiación Solar Ultravioleta.**

En el caso de la radiación solar ultravioleta, el instrumental necesario para el registro de este parámetro no es tan abundante en comparación con los instrumentos que se dedican al registro de la Radiación Solar Directa, Difusa o Global, a pesar de esto en el mercado existen por lo menos 3 marcas que son reconocidas por cumplir de manera eficaz los requisitos mínimos marcados por los patrones internacionales, la primera es Solar Light, la segunda es Kipp and Zonen, la última es Yanke Enviromental System (YES).

Si bien hemos descrito de manera breve el funcionamiento de los sensores encargados del monitoreo de la radiación solar directa, difusa y global, para entender el funcionamiento de los sensores encargados de la radiación UV se tendrá que dar especial atención a la selectividad en las longitudes de onda, que estos instrumentos deben de tener.

Para lograr dicha selectividad, los desarrolladores de instrumentos tuvieron que realizar una extensiva investigación en materiales que fueran sensibles a longitudes de onda específicas, a continuación se describe el funcionamiento de uno de estos sensores.

La luz solar entra a través de un domo de cuarzo y atraviesa un primer filtro negro que absorbe la radiación visible e infrarroja. La radiación resultante, dependiendo del sensor, para la Banda "B" permitirá el flujo de longitudes de onda de 0.280 a 0.320  $\mu\text{m}$  y en caso de la Banda "A", el flujo será entre las longitudes de onda 0.320 a 0.400  $\mu\text{m}$ , dichos flujos inciden sobre un sensor de fósforo que es excitado y produce una luz. La luz emitida por el fósforo se detecta por medio de un fotodiodo de GaAsP (Arseniuro de Galio con un filtro para impurezas positivas). El diodo y el fósforo están montados dentro de una cápsula que está regulada termostáticamente por un elemento Peltier. La corriente producida por el diodo GaAsP es convertida a tensión y amplificada mediante circuitos electrónicos. La temperatura del sensor es igualmente convertida a tensión (Solar Light, 2000).

Con ambos voltajes, y la constante instrumental del sensor, es posible calcular la Radiación Solar Ultravioleta Banda "B", corregida por la temperatura del sistema de monitoreo.

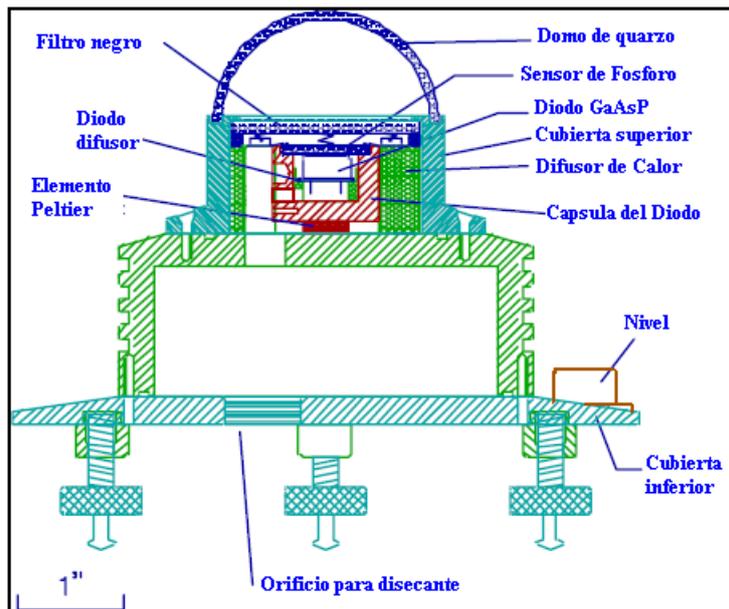


Figura 5. Perfil de un Instrumento de la marca Solar Light. (Solar Light, 2000)

### II.1. b. Dificultades del monitoreo de la Radiación Solar Ultravioleta en el País

En el país los sensores de radiación solar ultravioleta se localizan casi todos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, a excepción de un sensor en la ciudad de Colima, Col., el cual a la fecha, no se cuenta con la certeza que se encuentre en funcionamiento.

Diferentes fenómenos que se hacen presentes en la ZMCM, como los problemas de contaminación ambiental, el excesivo crecimiento del área urbana, de la población, el número de vehículos automotores, la escasez de áreas verdes y la propia geomorfología donde se ha desarrollado la ciudad, han facilitado de cierta manera el interés por el monitoreo de dicho parámetro, en la actualidad en esta zona se cuenta con 8 estaciones en operación, las cuales cumplen con los requerimientos que marca la OMM para este tipo de instrumentos; la instalación y mantenimiento de estas estaciones se encuentra a cargo de la RAMA, organización que depende del gobierno del Distrito Federal con la asesoría directa del Observatorio de Radiación Solar.

Dentro del Distrito Federal, se localiza también la estación Ciudad Universitaria del Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica de la UNAM, que pertenece a la Red Actinométrica Mundial, el ORS es un Centro Regional de radiación solar y la medición de todos los parámetros radiacionales que se realizan en el observatorio cumplen con los requerimientos que marca la OMM. Cabe destacar que pueden existir sensores en distintas partes del país pero no pertenecen a ninguna red y su correcto funcionamiento está en duda, por lo que sólo se puede considerar que existen 9 sensores dedicados al monitoreo de UV en el país, agregando que son parte de una microrred, Ciudad de México, presentando una concentrada distribución, en comparación con el resto del país donde existen extensas porciones del terreno sin monitorearse, en este último caso, no sólo se limita a la radiación solar ultravioleta, pues también se llega tener deficiencia en el registro de las componentes básicas de la radiación como lo son la global, difusa y directa.

El principal impedimento para contar con una red de monitoreo a nivel nacional, es en primer lugar, el elevado costo de los instrumentos, pues de acuerdo a las normas de la Organización Meteorológica Mundial para la instalación de estaciones de monitoreo, en la República Mexicana, se necesitarían más de 1000 estaciones, pero aún en el caso de que los fondos permitan este monitoreo, surgen otros problemas a raíz del comportamiento del parámetro y de la situación geográfica del territorio; uno de los primeros es la accesibilidad de las estaciones, existen vastas porciones de superficie que no cuentan con población y su acceso es difícil, lo cual impide que se pueda tener una estación vigilada para cualquier complicación que pudiera surgir o bien para el frecuente mantenimiento que se le debe dar, como la limpieza de domos, la depuración del sistema de adquisición, la limpieza de los paneles solares, la revisión de baterías de respaldo, etc., todos estos problemas impiden el registro correcto de la información.

Otro aspecto importante es el complicado relieve del país, los grandes contrastes de altitud, modifican fuertemente la cantidad de radiación UV, ya que en una corta distancia horizontal, se pueden tener diferencias altitudinales de más de un kilómetro, lo cual deriva en la necesidad de un aumento de estaciones en superficie, incrementando los costos mencionados con anterioridad.

Sin embargo, aunque estos son los problemas más importantes, no son los únicos que existen en cuanto al correcto registro de la radiación UV, debido a que las normas internacionales exigen por lo menos una calibración al año de estos sensores, lo cual se traduce en un elevado costo en el mantenimiento de estas redes, que tendría que ser constante, volviéndose prohibitivas al presupuesto de un país en desarrollo.

## **II.2. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL TOTAL OZONE MAPPING SPECTROMETER (TOMS).**

El TOMS es un instrumento que puede medir la cantidad total de la columna de ozono, desde la superficie de la Tierra hasta el tope de la atmósfera, bajo cualquier condición geográfica y atmosférica. Las observaciones se efectúan en la región del UV, donde la radiación solar es parcialmente absorbida por el ozono, se realizan tanto para la radiación solar que entra como para la radiación solar reflejada, misma que ha penetrado hasta la superficie de la Tierra o partes bajas de la atmósfera y es retrodispersada al espacio por las moléculas de aire y por las nubes hasta alcanzar los sensores del satélite.

La precisión del TOMS es estimada en  $\pm 5\%$ , con una resolución espacial de  $1^\circ$  latitud X  $1^\circ$  longitud, realiza 35 medidas cada 8 segundos y la cobertura es de 50 a 200 kilómetros de ancho sobre la Tierra en función de la latitud y a lo largo de cada

meridiano.. Casi 200,000 medidas diarias cubren la superficie de la Tierra, excepto las áreas cercanas a los polos donde el Sol permanece por debajo del horizonte.

Para el presente trabajo se utilizan los datos correspondientes al medio día solar verdadero, pues es la hora donde la incidencia de la radiación es mayor y se puede ejemplificar el peligro al cual se expone la población, como se explicó con anterioridad. (Figura 3.)

El proyecto dio inicio en octubre de 1978, con el lanzamiento del primer satélite llamado NIMUS 7, el correcto funcionamiento de este satélite se extendió hasta mayo de 1993, traduciéndose en un periodo de vida de poco menos de 15 años. Una vez inhabilitado este satélite se tuvo un periodo sin mediciones que duró hasta 1996.

Durante este tiempo la NASA estudió detenidamente los problemas que había presentado el instrumento, tratando de mejorar y garantizar el correcto funcionamiento de uno próximo, fue hasta Julio de 1996 que se presentó uno nuevo, completamente mejorado y listo para ser lanzado y continuar con el monitoreo de ozono y radiación solar ultravioleta, este fue llamado EP/TOMS, actualmente se encuentra funcionando.

Como ambos instrumentos presentan el mismo funcionamiento, se hicieron pruebas para saber cual era la órbita que garantizaba una completa cobertura global aún en ángulos zenitales altos, la primera fue a 500 km de altura con una inclinación de  $98^\circ$ , presentando deficiencia en la cobertura global y problemas en las altas latitudes, posteriormente se elevó a una altura de 739 km, con una inclinación de  $98.4^\circ$  solucionando dicho problema, actualmente presenta esta configuración.

El instrumento es un sensor monocromático simple que cuenta con ventanas que cubren seis longitudes de onda, además de un espejo de escaneo para muestras de retrodispersión de la radiación solar ultravioleta.

Cuadro 8. Selección de Longitudes de Onda utilizadas en el Instrumento del TOMS. (McPeters, 1996).

LONGITUDES DE ONDA ( $\mu\text{M}$ )
0.3086
0.3135
0.3175
0.3223
0.3312
0.3604

Para obtener las medidas de ozono se utilizan radiancias normalizadas, que se traducen como la retrodispersión de irradiancia solar incidente en la Tierra, por lo que se requieren medidas periódicas de esta componente. Para medir la incidencia de irradiancia solar, el instrumento del TOMS es colocado sobre uno de tres platos de aluminio alojados en un carrusel, logrando que el plato seleccionado refleje la luz del Sol en el sensor. El plato reflejante es el único componente del sistema óptico que no es utilizado para realizar medidas de la retrodispersión de la Tierra o las medidas de irradiancia solar. Los cambios que ocurren en los platos difusores pueden causar cambios en las medidas que se lleven a cabo.

En principio, una caracterización exacta de estos cambios permitirá conocer la variación correcta de esta proporción, y de ahí, una calibración a largo plazo exacta del instrumento. Los tres platos difusores son expuestos en diferentes posiciones, permitiendo una calibración a partir de examinar las diferencias en la degradación de éstos, analizando reflectividad. Además de que está equipado con lámparas UV para supervisar la reflectividad en los difusores solares.

## **II.2.a El Algoritmo utilizado en el Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)**

El principal objetivo del TOMS es conocer la cantidad de ozono en la columna total de la atmósfera. Es decir a partir de las medidas de radiación solar en las 6 diferentes Bandas, la mayoría de éstas en la porción del ultravioleta, se puede derivar la cantidad de ozono. El valor de la columna total de ozono se obtiene de la comparación entre las medidas normalizadas de irradiancia y las irradiancias derivadas de un modelo de transferencia de radiación para diferentes cantidades de ozono y en diferentes condiciones atmosféricas. Los resultados de dicho modelo de transferencia, son generados a partir de conocer la retrodispersión que ocurre a diferentes concentraciones de ozono, utilizando la reflectividad de las superficies, presión superficial y la latitud. Considerando las irradiancias calculadas para determinadas condiciones, el valor de ozono total puede ser obtenido por la interpolación de dicha observación; es también posible invertir este proceso y usar las tablas para obtener las irradiancias que podrían ser dadas para determinada columna de ozono en ciertas condiciones medidas. Las condiciones de la superficie terrestre son caracterizadas por 2 principales componentes, una superficie con baja reflectividad y otra componente de nubosidad caracterizada por una alta reflectividad, comparando las medidas en la longitud de onda de  $0.360 \mu\text{m}$  (ésta la que resulta más insensible al ozono), con la reflectividad de las nubes y de la superficie terrestre, se pueden obtener tablas de corrección que son aplicadas a las seis diferentes longitudes de onda que se utilizan en el cálculo de ozono produciendo un valor correcto (McPeters, 1998). Mediante este algoritmo, se pueden derivar valores de concentración de aerosoles y radiación solar ultravioleta.

La interpretación de las medidas realizadas por el instrumento del TOMS requiere la comprensión de cómo la atmósfera dispersa la radiación solar ultravioleta en función del ángulo cenital solar. La radiación solar entrante a las partes más altas de la atmósfera

experimenta la absorción y la dispersión en la atmósfera por los componentes atmosféricos tales como ozono y los aerosoles, la restante que logra penetrar a la troposfera es dispersada por las nubes y los aerosoles, reduciendo la cantidad que logrará alcanzar la superficie de la tierra, al suceder esto la que incide es absorbida y/o reflejada de nuevo hacia la atmósfera.

Las dos longitudes de onda más cortas usadas en las medidas de ozono del TOMS (0.3086, 0.3135  $\mu\text{m}$ ) fueron seleccionadas porque son completamente absorbidas por el ozono, el resto de las longitudes de onda que se miden en el TOMS sirven para derivar la absorción que sucede debajo de la estratosfera, en estas longitudes de onda, la absorción por otros componentes atmosféricos es insignificante; la cantidad de ozono debajo de la estratosfera es pequeña y se puede estimar con suficiente exactitud para permitir la derivación de la columna total de ozono, la mayor parte del ozono está en la estratosfera, el efecto principal del ozono atmosférico en estas longitudes de onda es atenuar el flujo solar que va a la troposfera y el componente reflejado que es regresado a las partes altas de la atmósfera.

El algoritmo utilizado para solucionar el planteamiento anterior basó su cálculo de reflectividad en el tratamiento de Dave (Dave, 1978), donde se trata la dispersión y retrodispersión por la nubosidad y los aerosoles asumiendo que la radiación está reflejada a determinada presión, llamándola “presión de escena,” con un equivalente de Lambert nombrado “reflectividad de escena”. Cuando este método fue aplicado en las longitudes de onda inafectadas por el ozono, la reflectividad que resultaba exhibió una dependencia de la longitud de onda que estaba correlacionado con situaciones parcialmente nubladas. Para quitar esta dependencia de la longitud de onda, se desarrolló un nuevo tratamiento basado en un modelo físico simple que asume dos superficies de reflejo separadas, una que representa la superficie de la Tierra y la otra la

de las nubes. La contribución fraccionaria de ambos a la reflectividad es obtenida comparando la irradiancia medida con los valores calculados para la superficie terrestre y para la nubosidad. El cálculo de la irradiancia en cada nivel de presión sigue la formulación de Dave (Dave, 1978).

La retrodispersión de irradiancia total que emerge hasta el tope de la atmósfera y que el instrumento del TOMS registra ( $I_m$ ), se encuentra calculada por la dispersión de la irradiancia atmosférica ( $I_a$ ) más la irradiancia reflejada por la superficie terrestre ( $I_s$ ).

$$I_m(\lambda, \theta, \theta_0, \Omega, P_0, R) = I_a(\lambda, \theta, \theta_0, \phi, \Omega, P_0) + I_s(\lambda, \theta, \theta_0, \phi, \Omega, P_0, R)$$

Donde:

$\lambda$  = Longitud de Onda

$\theta$  = Ángulo cenital del satélite observado desde la superficie

$\theta_0$  = Ángulo solar cenital solar zenith angle

$\phi$  = Ángulo azimutal

$\Omega$  = Cantidad Total de Ozono

$P_0$  = Presión de la Superficie Reflejante

$R$  = Reflectividad Efectiva de la Superficie Reflejante

La derivación del ozono es un proceso de dos etapas. En el primer paso, se deriva una estimación inicial usando la diferencia entre los N-valores en un par de longitudes de onda; los N-valores son unidades de dispersión de irradiancia asociados en una escala que depende de la cantidad total de ozono, dicha estimación inicial se encuentra en función de que una longitud de onda es absorbida completamente por el ozono, y la otra es insensible al ozono.

En el segundo paso, se calculan los N-valores usando ésta estimación del ozono. Estos valores calculados no igualarán generalmente los N-valores medidos. Las diferencias, en el sentido  $N \text{ medidos} - N \text{ calculados}$ , se llaman *residuo*; usando el residuo apropiadamente en un trío de valores, es posible solucionar simultáneamente una

corrección a la estimación total del ozono, como una contribución adicional a las otras longitudes de onda, debido a que éstas presentan una fuerte dependencia a la reflectividad superficial, el trío de valores consiste también en dos longitudes de onda, una sensible y las otras insensible al ozono.

El algoritmo es aplicado para cada una de las longitudes de onda, generando las tablas N-valores, sin embargo para el cálculo final de la columna total de ozono deben ser incluidos valores de reflectividad, presión y nubosidad simulando el correcto estado de la atmósfera.

La resolución del satélite es de 1° de latitud por 1° de longitud, realizando la medición en el centro del cuadrante, por ejemplo para las coordenadas 10° Norte, 99° Oeste, la medición se realizó en el 9.5° Norte, 98.5° Sur, de esta manera la cobertura del instrumento se extiende de 89.5° latitud Sur hasta 89.5° latitud Norte, 179.5° Este hasta 179.5° Oeste, dando como resultado una cobertura Terráquea total .

Los datos resultantes de cada una de las mediciones realizadas por el satélite son convertidos en formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange), y publicados en la página de la NASA que se encarga de la distribución de la información conocida como Distributed Active Archive Center (DAAC), listos para que el público en general pueda descargarlos y utilizarlos con cualquier tipo de propósito como trata el presente trabajo, cabe mencionar que los datos son publicados casi en tiempo real, con diferencias máximas de un día.

En la actualidad se cuenta con una base de datos que cubre desde Julio de 1978 hasta la actualidad; para la elaboración de este trabajo se utilizaron los datos que corresponden al medio día, en tiempo solar verdadero.

## **II.2.b. Obtención de la información del TOMS**

Los datos pueden adquirirse desde los distintos protocolos de transferencia en las siguientes direcciones:

[http://toms.gsfc.nasa.gov/ery\\_uv/new\\_uv/ery\\_noon](http://toms.gsfc.nasa.gov/ery_uv/new_uv/ery_noon)

[ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/pub/nimbus7/data/uv\\_ery\\_4\\_wavelengths/ery\\_noon](ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/pub/nimbus7/data/uv_ery_4_wavelengths/ery_noon)

[ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/pub/eptoms/data/uv\\_ery\\_4\\_wavelengths/ery\\_noon](ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/pub/eptoms/data/uv_ery_4_wavelengths/ery_noon)

Los protocolos de transferencia tienen distintas ventajas, por ejemplo en el primero, http, (hypertext transfer protocol) se tienen los datos actualizados con un día de diferencia, lamentablemente la descarga es muy lenta debido a la interfase gráfica y sistema operativo que se utiliza, como se sabe Windows en cualquier versión, es el de mayor dominio, la descarga total de datos utilizando estas características podría extenderse hasta 6 meses. Los protocolos ftp (file transfer protocol) se vuelven mucho más versátiles en cuanto al tiempo de descarga, pero de igual manera si se utiliza una interfase gráfica y el sistema operativo Windows, la descarga de 23 años, de datos aunque reducida significativamente, se vuelve tediosa; sin embargo, existe por lo menos una opción para reducir el tiempo de descarga, el uso de sistemas operativos no convencionales, específicamente Linux, en la presente investigación se opto por el sistema operativo Linux, en su versión Red Hat, y el protocolo ftp, eliminando la interfase gráfica, se ha logrado realizar la descarga de los 23 años de información en tan sólo una vigésima parte del tiempo, resolviendo muchos de los problemas explicados con anterioridad.

## **II.2.c. Formato de los datos.**

Los datos obtenidos corresponden a una cobertura global, a continuación se muestra un ejemplo de cómo vienen los datos.



hasta 179.5°, correspondiendo a 179.5° Este hasta 179.5° Oeste. Las lecturas son expresadas en mili watts por metro cuadrado ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ).

En cada grupo de 3 números significa el primer número corresponde al exponente, los 2 restantes son el valor. Organizados de la siguiente manera:

$$V * 10^E .$$

Donde:

V = Valor

E = Exponente

Por ejemplo, el grupo "342" representa el valor final de  $4.2 * 10^3 \text{ mW}/\text{m}^2$ , existen en los datos grupos de "999", el cual es un código que se utiliza cuando no existen datos para esas coordenadas, funcionando como relleno para no perder el formato del archivo.

Conociendo el formato original de los datos obtenidos para el UVB a medio día, es necesario para lograr los propósitos de esta tesis tener que realizar un filtrado donde sólo se obtendrán los valores correspondientes a las coordenadas del país.

### **II.3.MANEJO DE LA INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL TOMS.**

Los principales problemas que surgen al disponer de una base de datos tan grande y con las características antes mencionadas, son el acotamiento de la información que únicamente se requiere, específicamente la superficie del país, y el procesamiento estadístico que se aplicará a ésta. Se cuenta con 23 años ordenados en archivos diarios, siendo que cada uno de éstos cubre completamente la superficie terrestre, ambas tareas han sido resueltas con varios programas de elaboración propia.

Estos programas se elaboraron con el software "Visual Studio.net" Versión Academic 2003, en el primero lo único que se realiza es la selección de la información que corresponde a la superficie del país (coordenadas extremas), dando como resultado el

mismo número de archivos, únicamente con menor extensión, en este programa se trató de identificar cuáles son los errores que pueden contener los archivos originales, tales como, días sin datos o errores en la organización de los datos. La secuencia del programa identificaba en primera instancia la latitud, si ésta correspondía al país, seguía operado y continuaba con la extracción de la información, si la latitud no correspondía con la del país, se eliminaba el archivo y continuaba con el siguiente día, para verificar el correcto funcionamiento, a través del programa se mostraba en pantalla cuáles son los días omitidos.

Los resultados obtenidos mediante el programa se verificaron de manera manual y aleatoria para cerciorarse de la legitimidad de los datos o bien localizar posibles errores sistemáticos del programa.

El segundo programa se elaboró con el objetivo de facilitar los procedimientos estadísticos al que se someterían los datos, la función de este programa fue organizar los archivos por mes y año, al realizar este proceso se simplificó la elaboración del último programa especialmente en cuanto a tiempo.

De esta manera en el último programa se realizó la estadística básica, obteniendo medias mensuales y medias estacionales de toda la serie, desviación estándar mensual y estacional, así como el número de casos.

Al obtener los archivos finales de este programa, los datos se encontraban listos para poder analizarse y proceder a la elaboración de los mapas que mostrarán de manera gráfica el comportamiento de la Radiación Solar Ultravioleta Banda "B" al medio día solar.

Resulta importante mencionar que en la selección del área donde se incluye el país, se han tomado algunas precauciones que ayudan a complementar de mejor manera el trabajo estadístico y por ende la fabricación de los mapas, en el primer programa que se

elaboró, se dio la instrucción de tomar dos grados más tanto de latitud como de longitud a las coordenadas extremas del país, esta acción ha eliminado posibles problemas en el momento de la interpolación, garantizando un adecuado manejo de los datos en toda la superficie del país.

La elaboración de los mapas, tanto estacionales, como mensuales, fue mediante el programa PV-WAVE versión 7.5. Una de las principales características a considerar en la elaboración de los mapas, fue la proyección que se utilizaría, el principal criterio en el que se basó, tiene origen en la naturaleza de los datos, éstos se encuentran formando una rejilla de 1° de latitud por 1° de longitud, de esta manera la proyección debe tener paralelos y meridianos lo más rectos posible, debido a esto la proyección utilizada fue la Cilíndrica de Mercator, cumpliendo de excelente manera este requisito.

Otro criterio antes de la elaboración de los mapas, fue seleccionar qué tipo de interpolación se utilizaría, así que se eligió el método de interpolación polinómica, una de las ventajas es el suavizado que ofrece en los datos que representan cada una de las isóneas de Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”.

El siguiente paso fue la selección de la escala de las isóneas, en otras palabras la cantidad de información que se deseaba incluir en el mapa, con base a lo extenso del territorio se aceptó que el mapa no podía contar con muchas isóneas, pues en lugar de ser más ilustrativas en la distribución del UVB, la cantidad de isóneas solamente causarían confusión, por lo anterior se seleccionaron isóneas de 20 mW/m<sup>2</sup> siendo una escala que permite la apreciación del comportamiento espacio-temporal del UVB y proporciona un mapa agradable y de fácil manejo para todo tipo de público; por lo que respecta a la paleta de colores utilizada, también se creó una que reafirmara este propósito, se procedió a la elaboración de ésta partiendo de rojos saturados, hasta amarillos con dominancia de blancos.

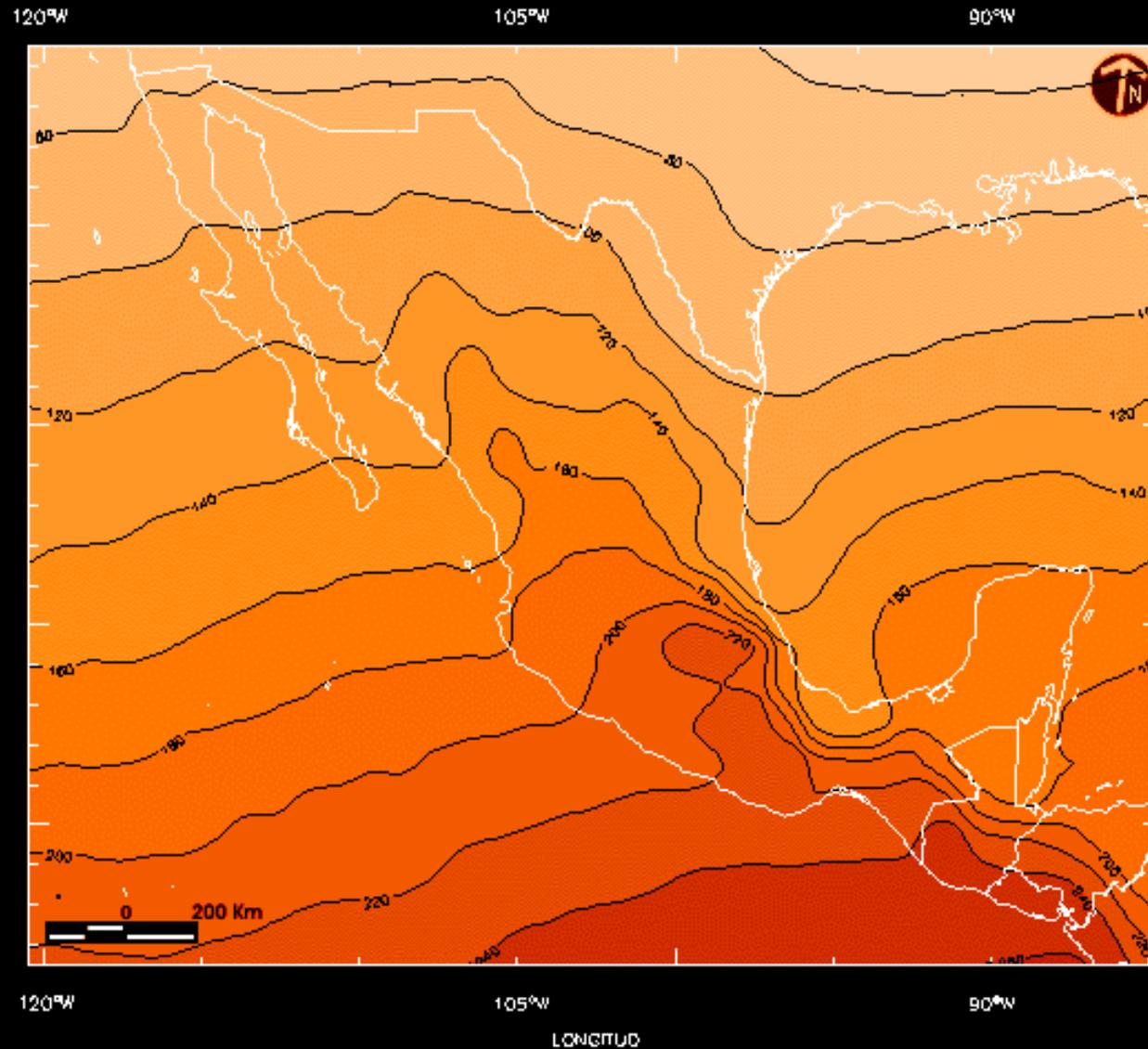
Una vez definidas las variables anteriores, se dio inicio a la elaboración de los mapas, en primer lugar se realizaron las isolíneas trabajando con los datos depurados por el último programa, posteriormente se aplicó la paleta de colores que se había realizado, para al final sobreponer el mapa y la leyenda de explicación de cada uno de los elementos incluidos, obteniendo los mapas que muestran el comportamiento espacio-temporal de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”.

## **CAPITULO III**

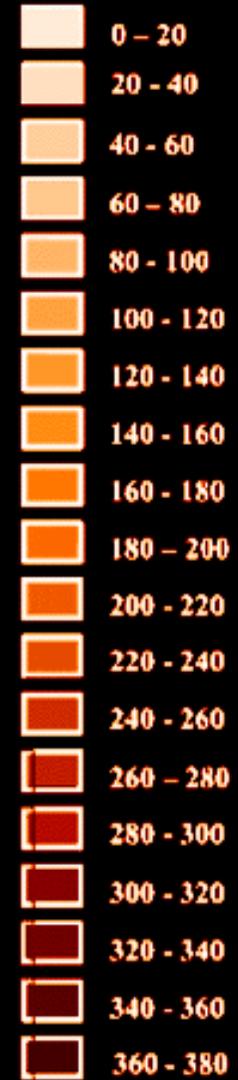
### **Climatología de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, para la República Mexicana**

La conjunción de los parámetros meteorológicos, incluyendo la radiación solar ultravioleta, caracteriza el estado puntual de la atmósfera, mejor conocido como tiempo atmosférico, al conocer este comportamiento y almacenar sus características se logra formar una base de datos que día a día se enriquece, dando pauta para conocer las condiciones de la situación atmosférica media, conocida como climatología, Se puede generar un análisis de todas las componentes de la atmósfera de determinada porción de la superficie terrestre o bien analizar de manera individual cada uno de los parámetros meteorológicos, específicamente en este trabajo, se ha logrado formar una vasta base de datos de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” para todo el país, que permite caracterizar su comportamiento espacio-temporal sobre el país, aunque los datos son únicamente de las 12:00 hrs., tiempo solar verdadero, es en ese momento donde los valores logran alcanzar su máximo (Figura 3), representando de buena manera la situación general del parámetro.

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"



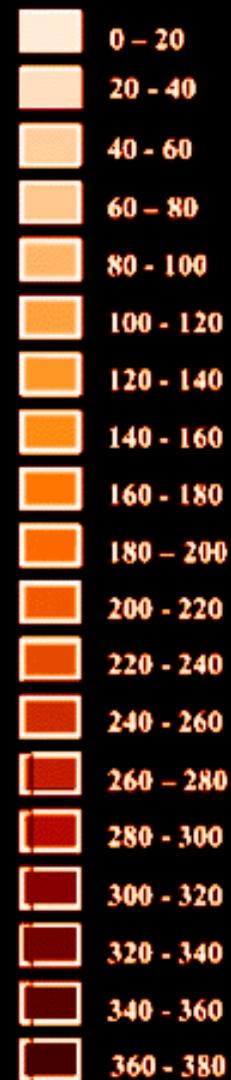
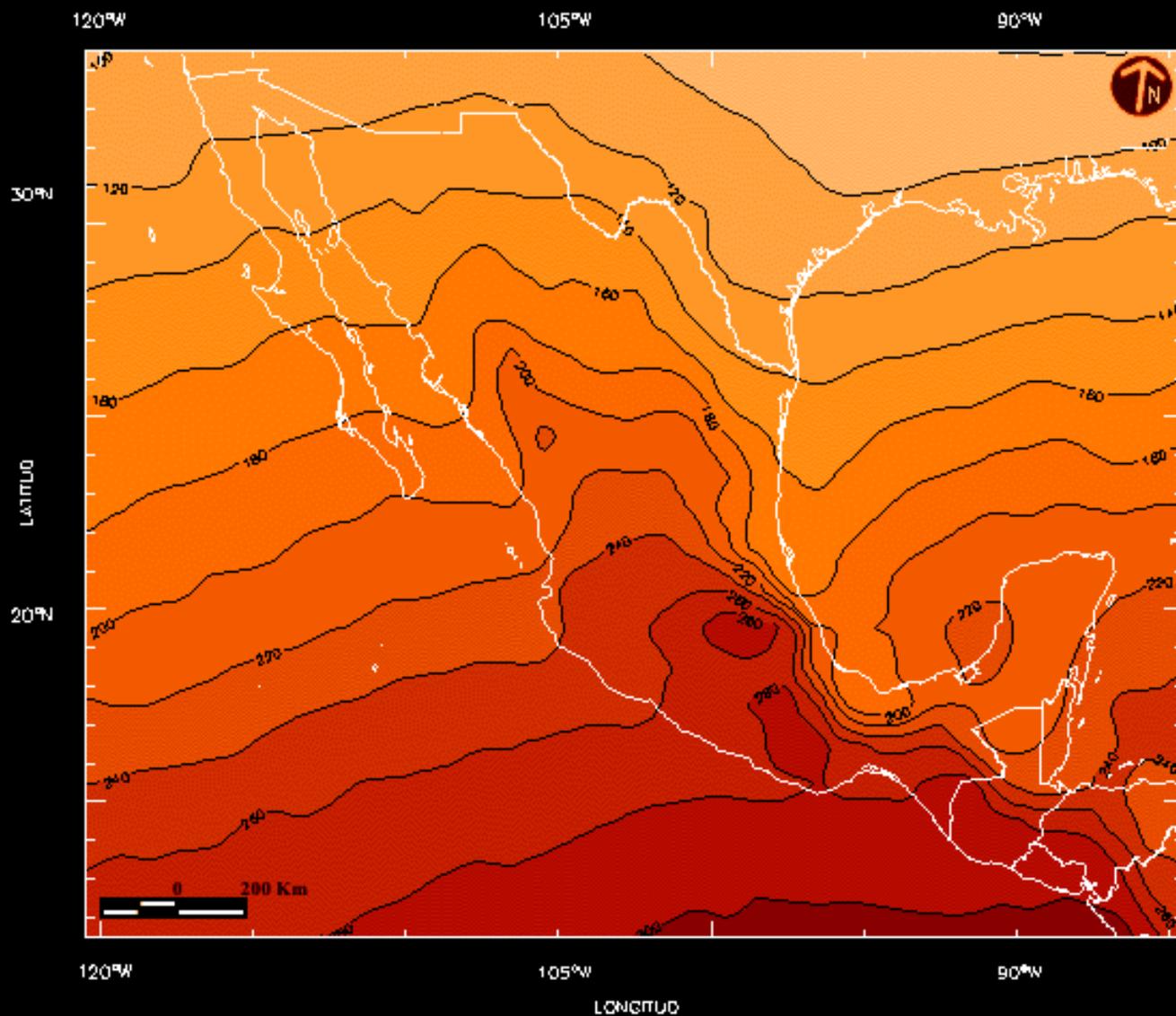
**Enero mW/m<sup>2</sup>**  
Media Mensual (1978-2003)



Elaboró: Ismael Velázquez

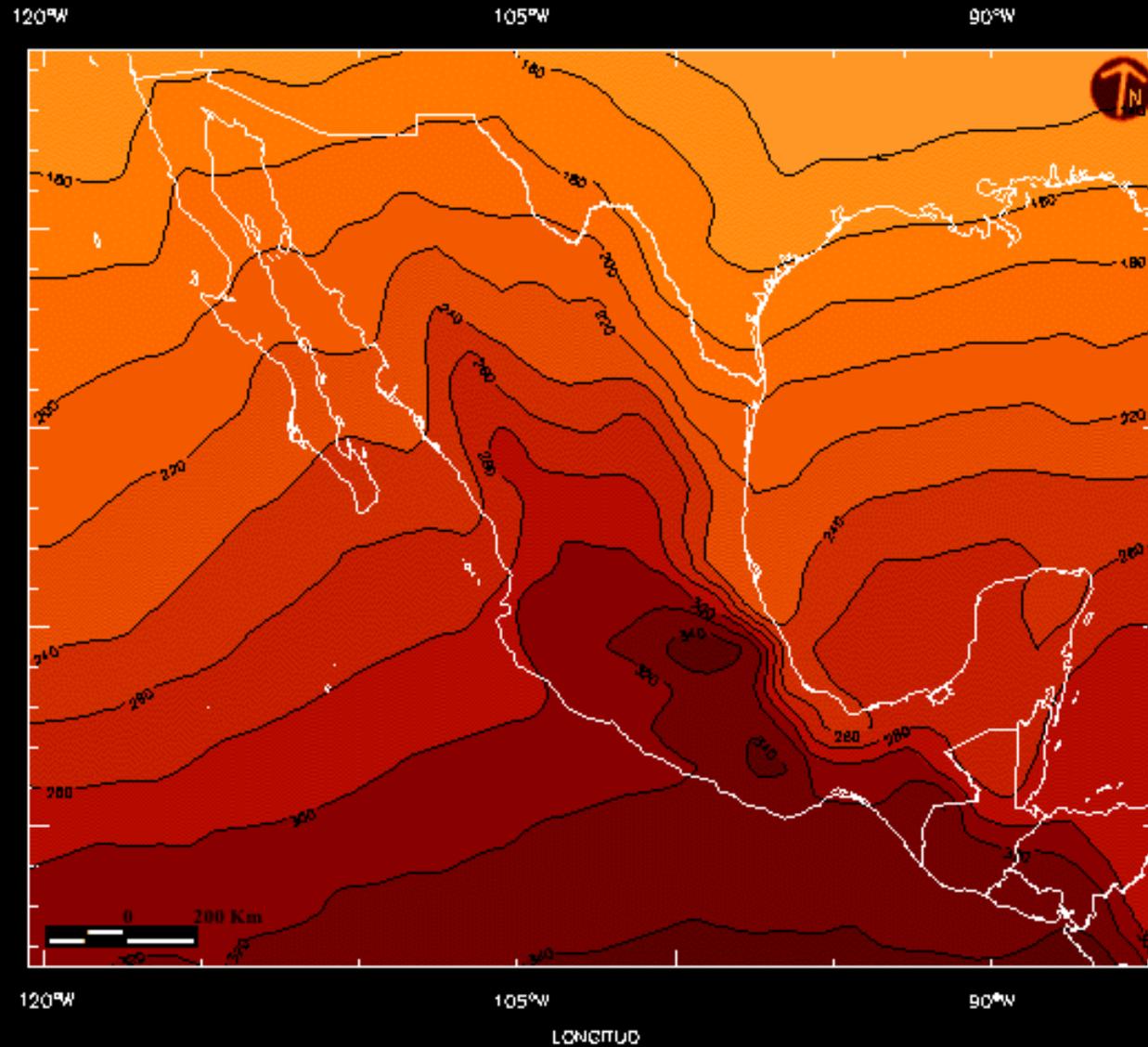
# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

**Febrero mW/m<sup>2</sup>**  
Media Mensual (1978-2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"



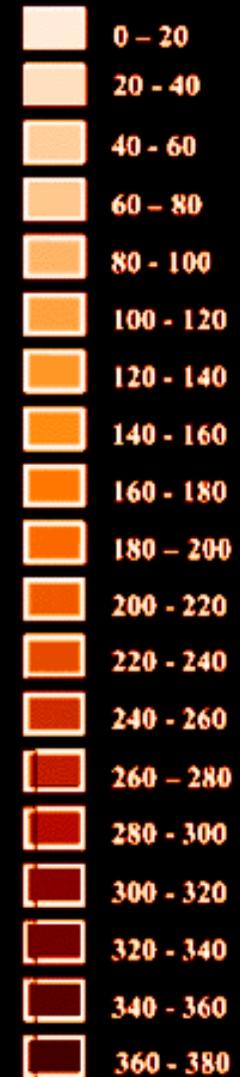
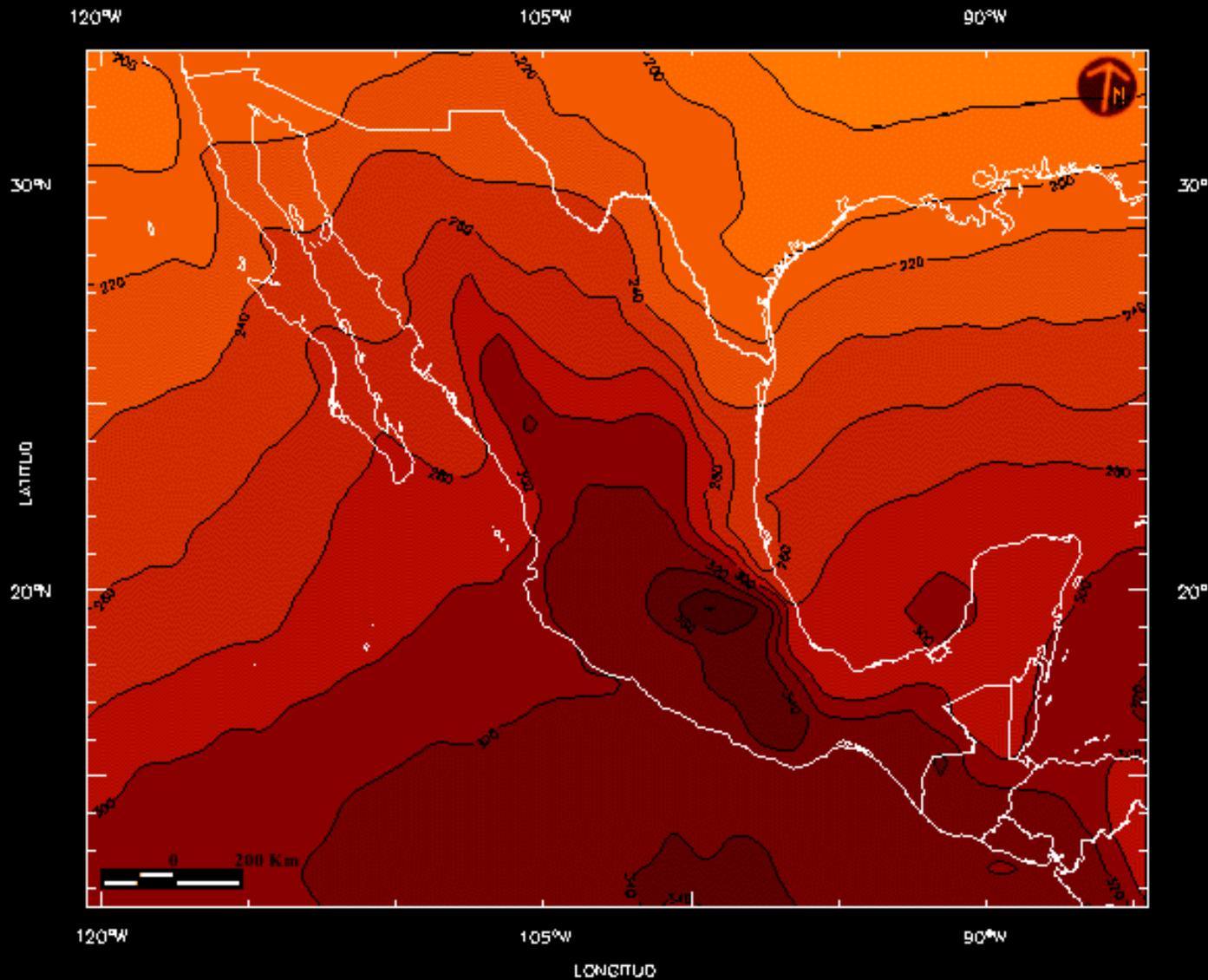
**Marzo mW/m<sup>2</sup>**  
Media Mensual (1978-2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

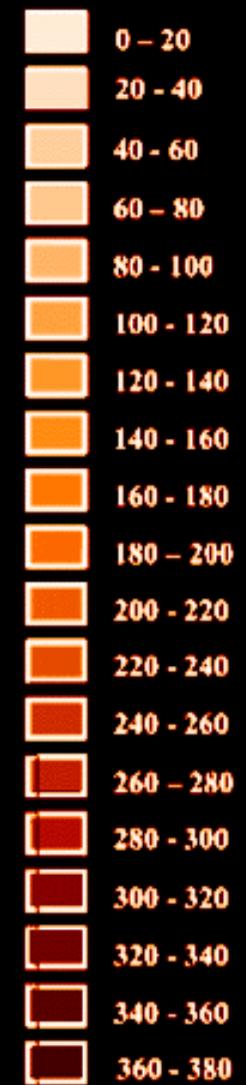
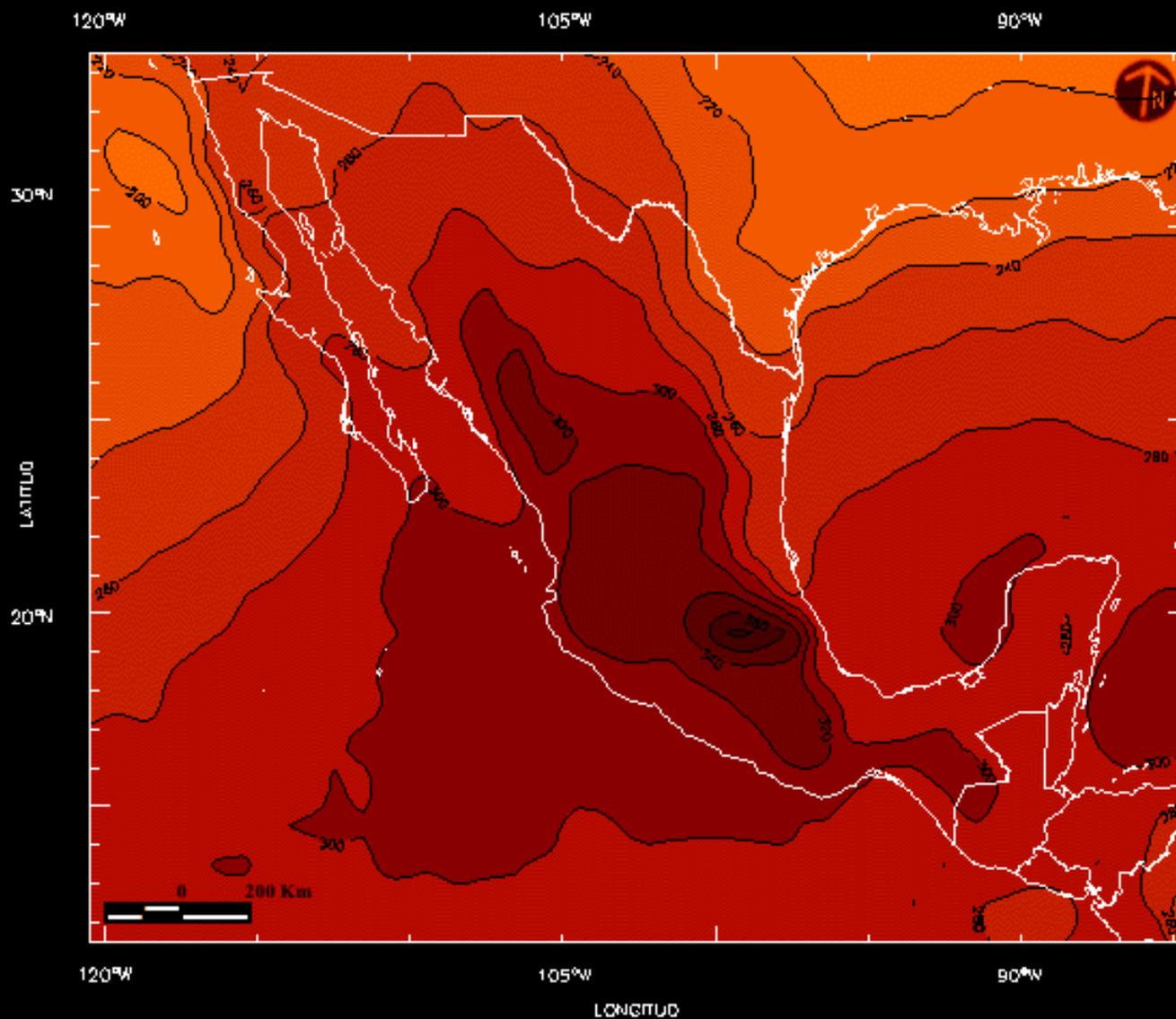
**Abril mW/m<sup>2</sup>**  
Media Mensual (1978=2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

Mayo mW/m<sup>2</sup>  
Media Mensual (1978-2003)

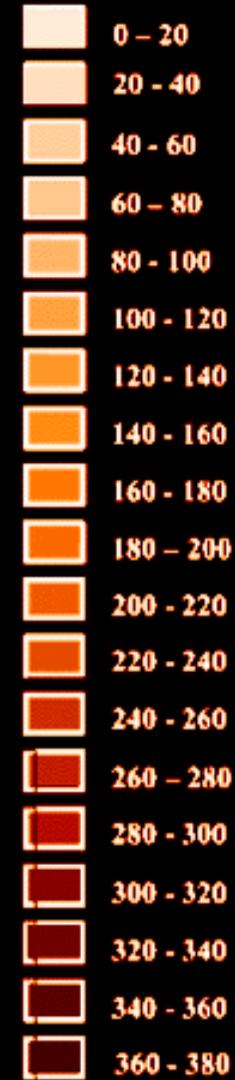
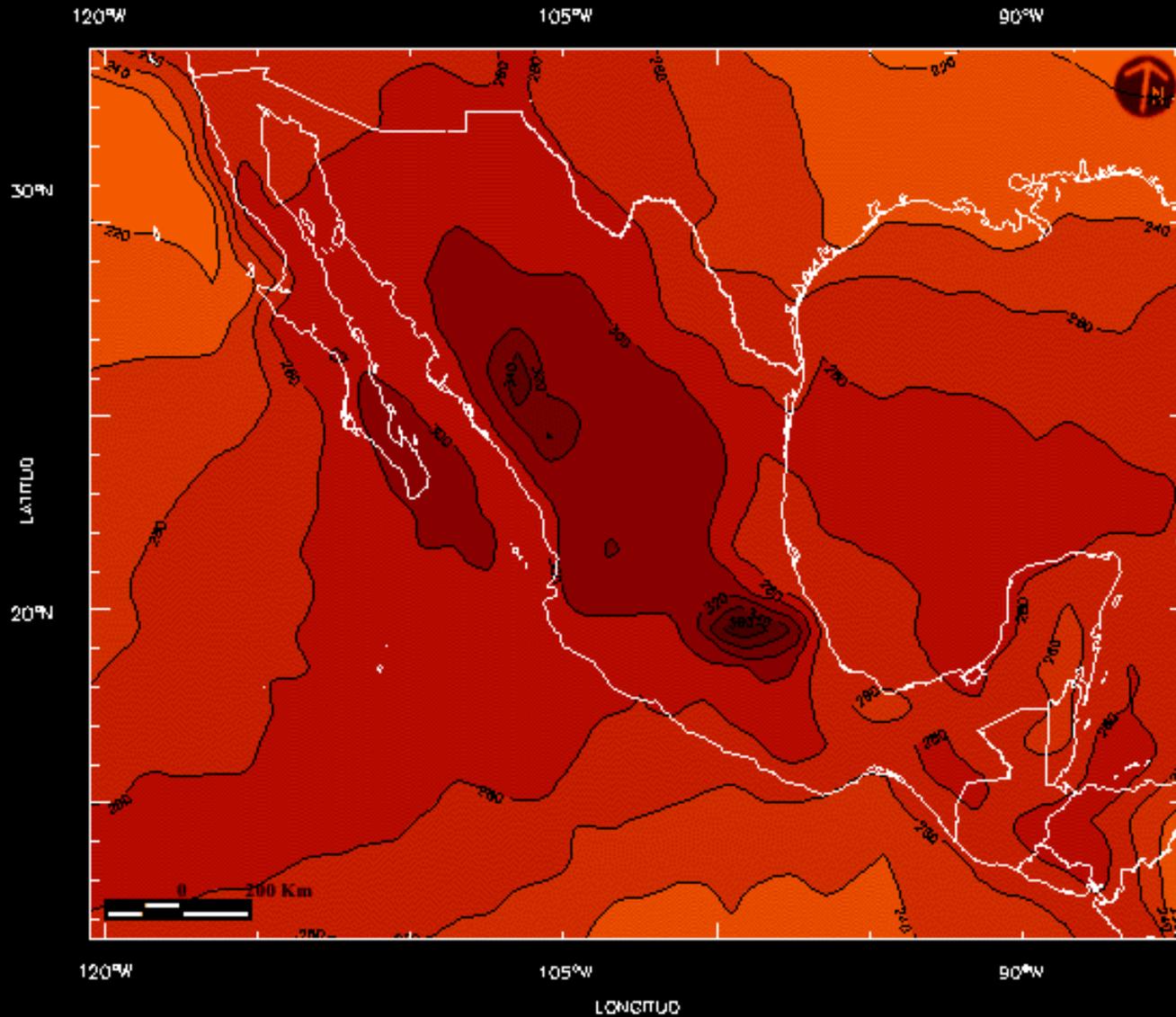


Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

## Junio mW/m<sup>2</sup>

### Media Mensual (1978-2003)

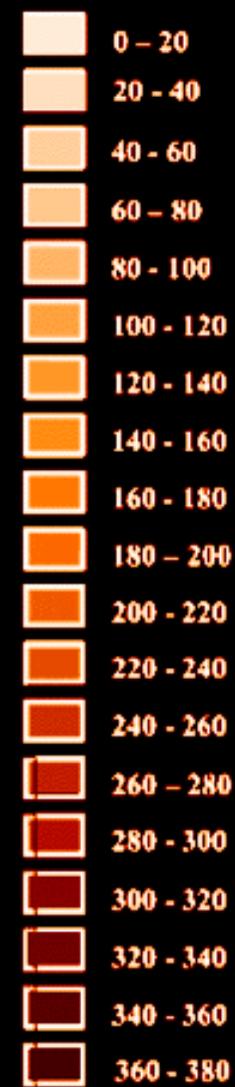
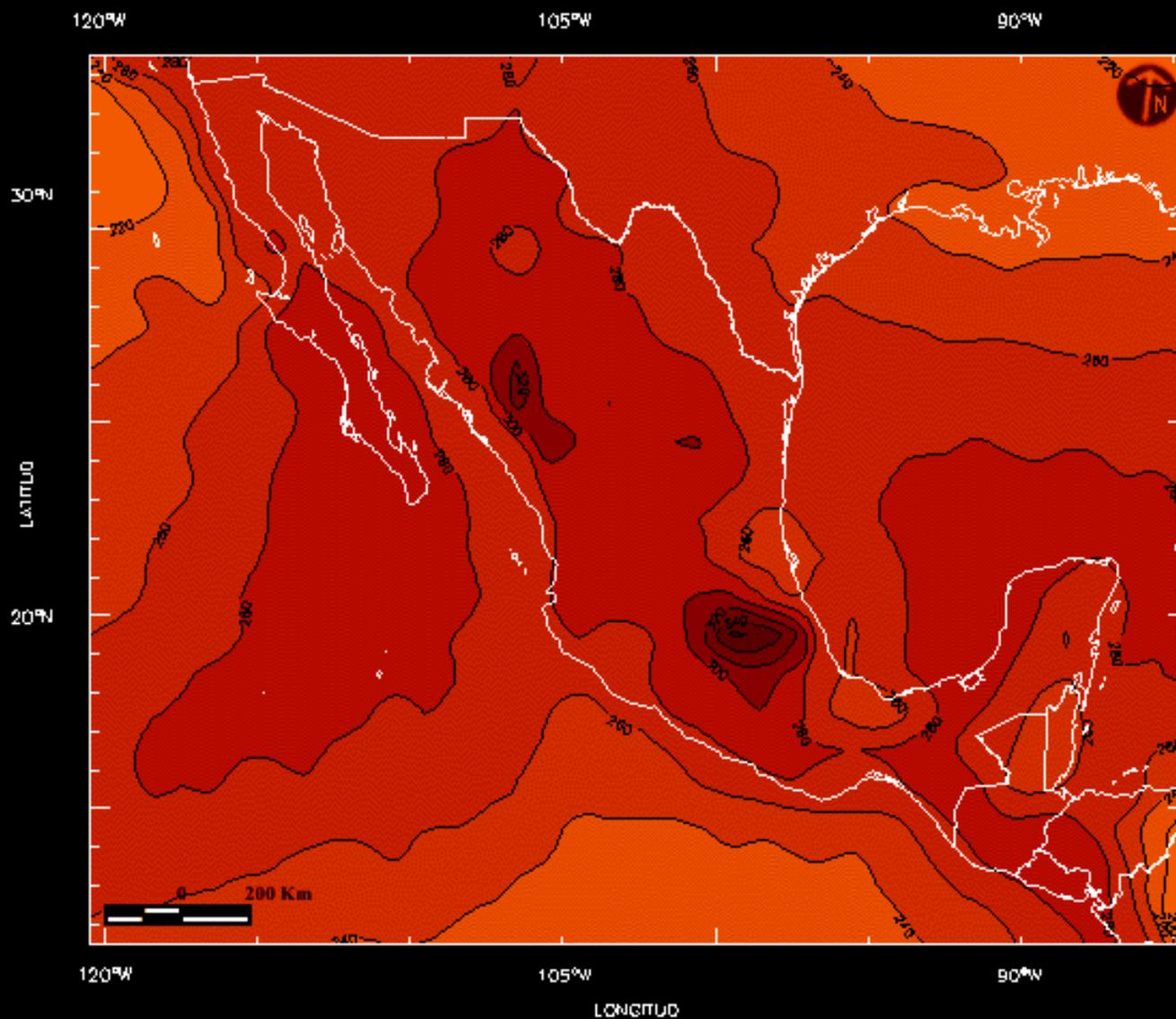


Elaboró: Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

Julio mW/m<sup>2</sup>

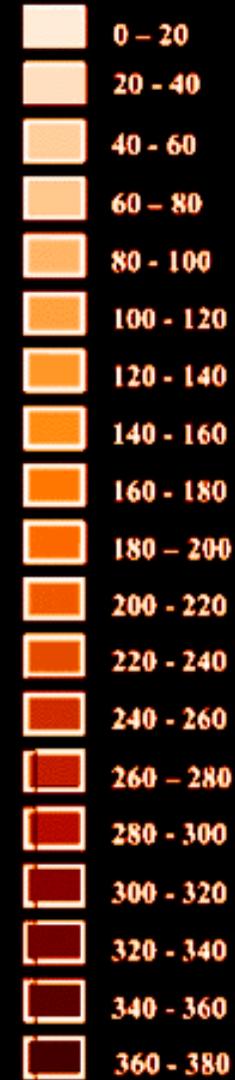
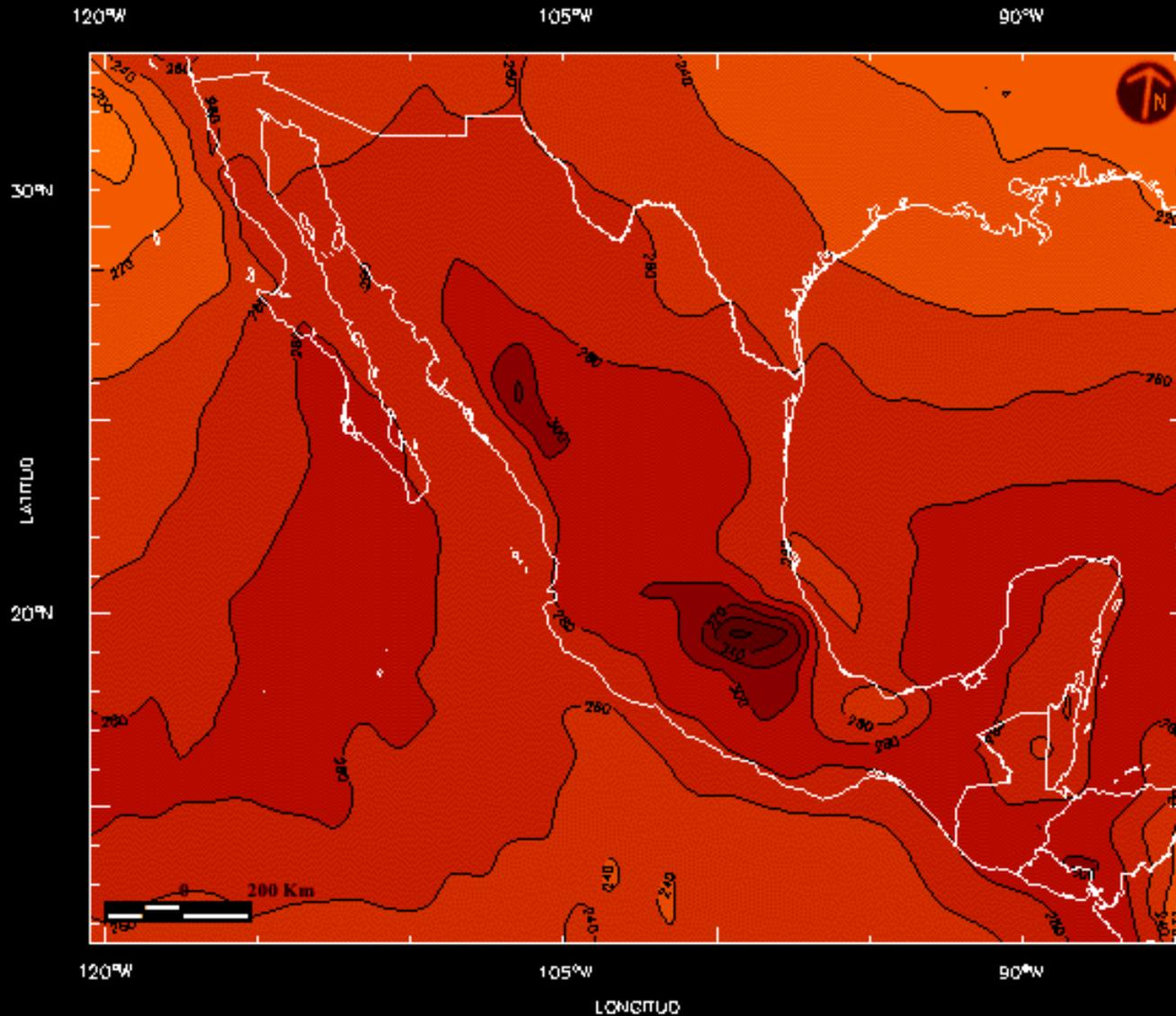
Media Mensual (1978=2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

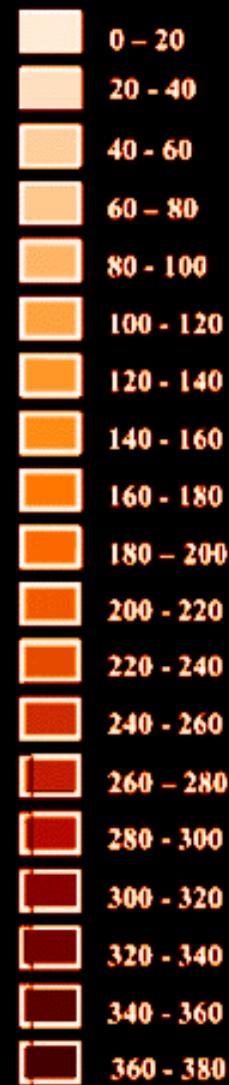
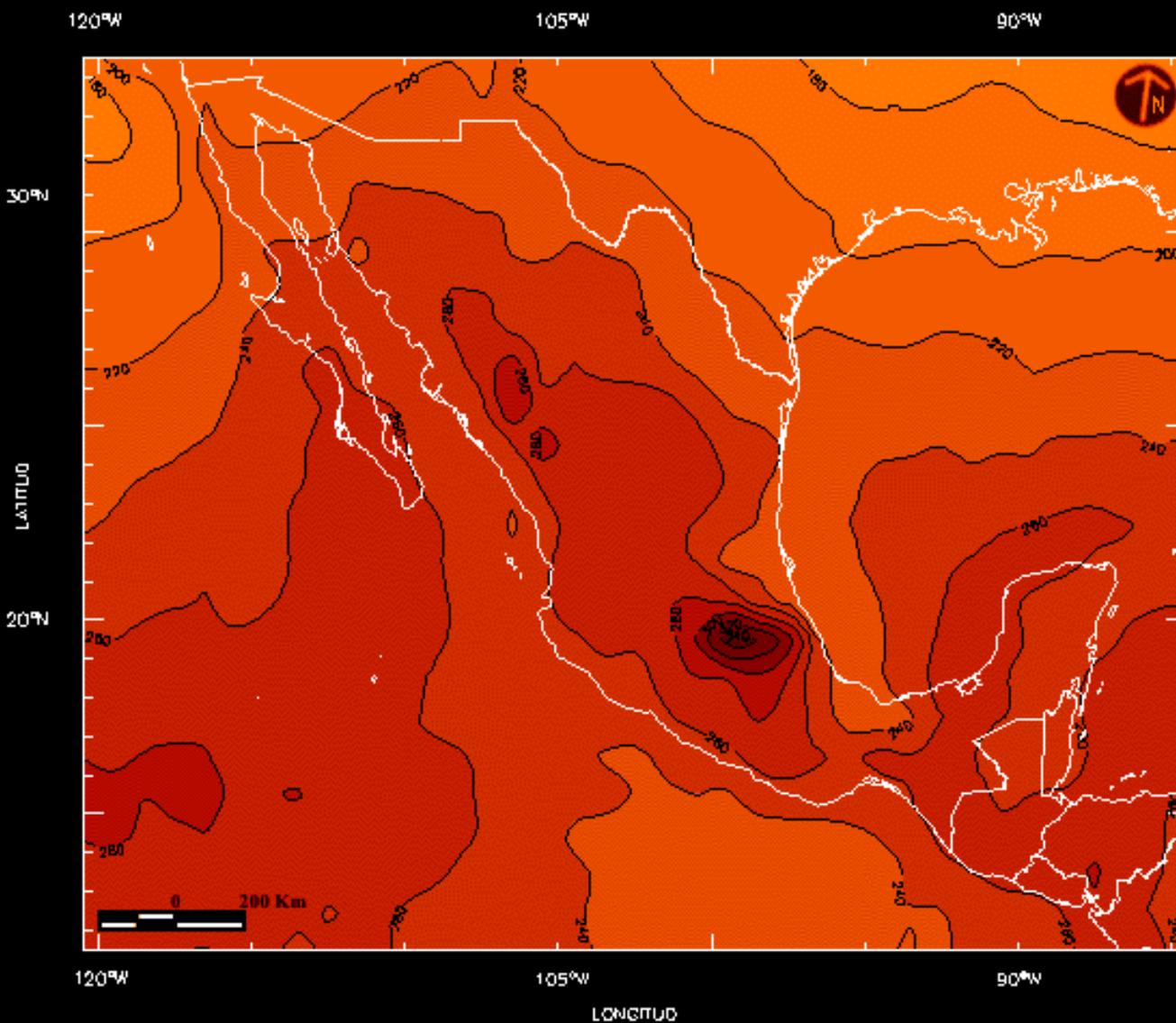
Agosto mW/m<sup>2</sup>  
Media Mensual (1978=2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

Septiembre mW/m<sup>2</sup>  
Media Mensual (1978=2003)

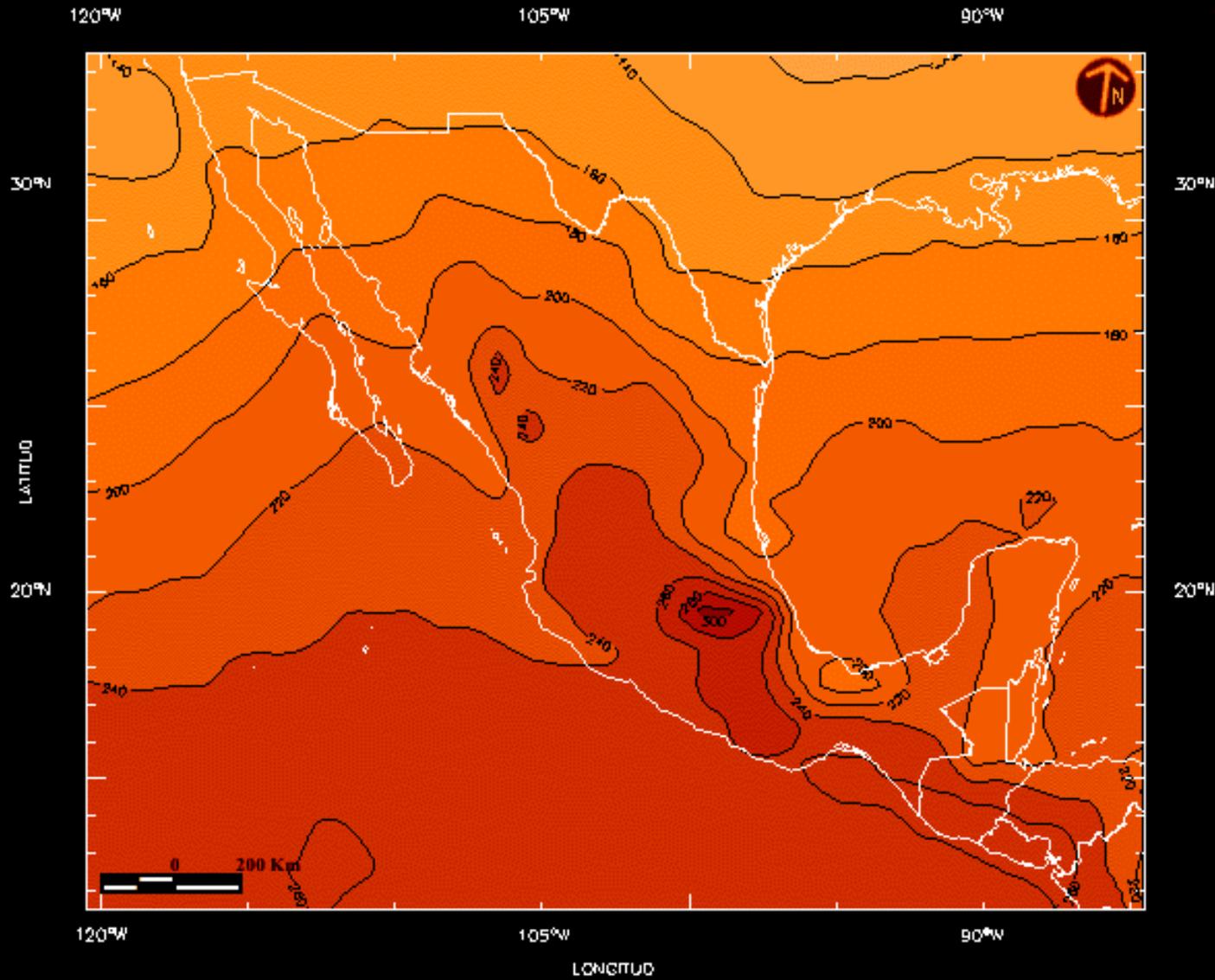


Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

Octubre mW/m<sup>2</sup>

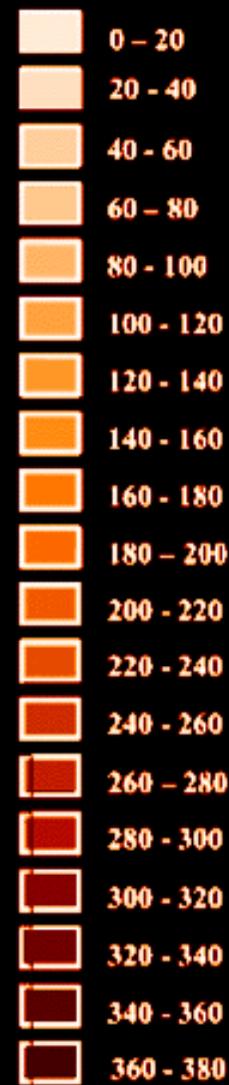
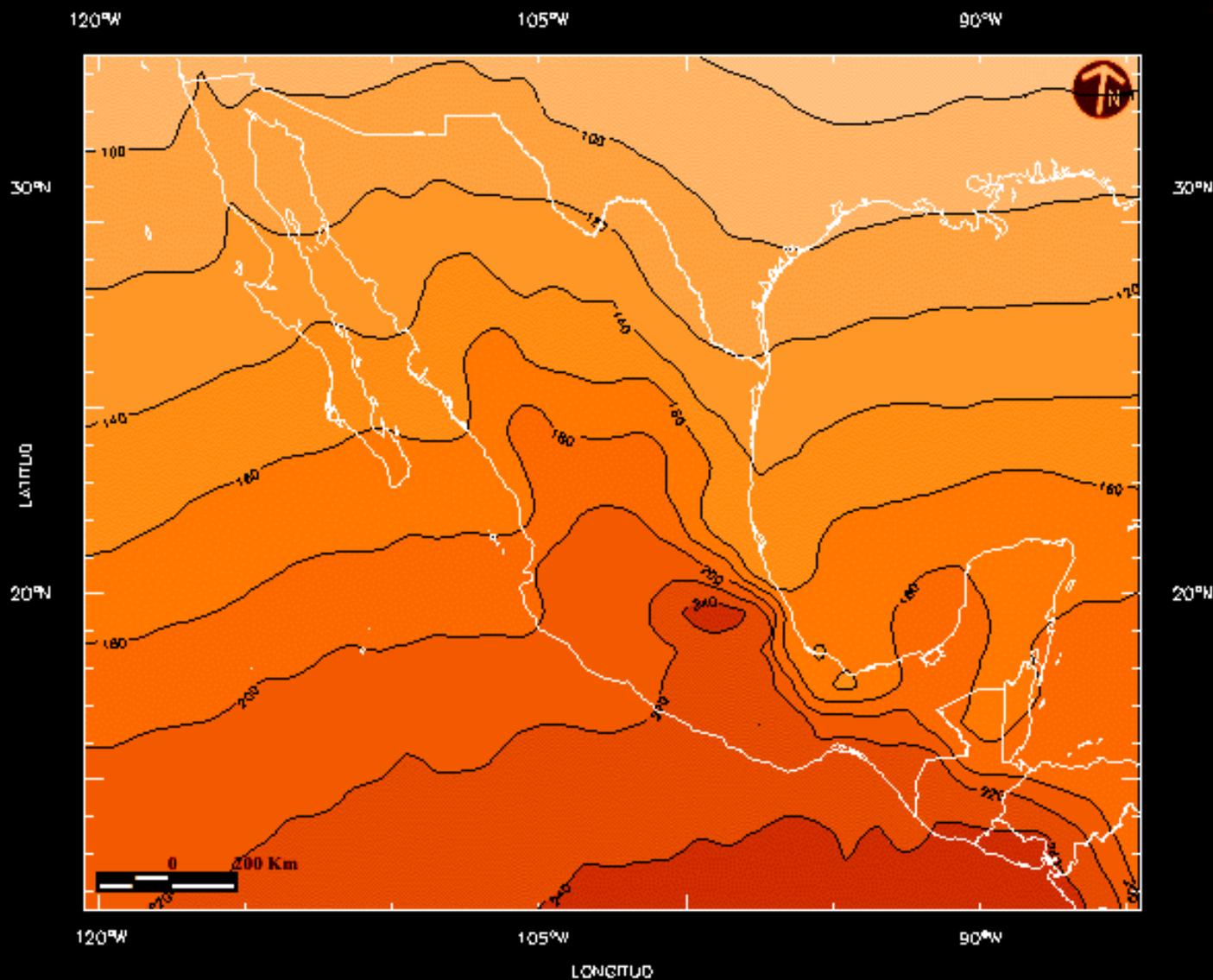
Media Mensual (1978-2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

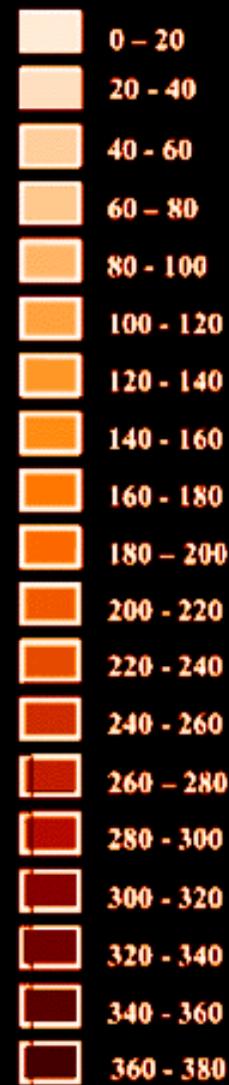
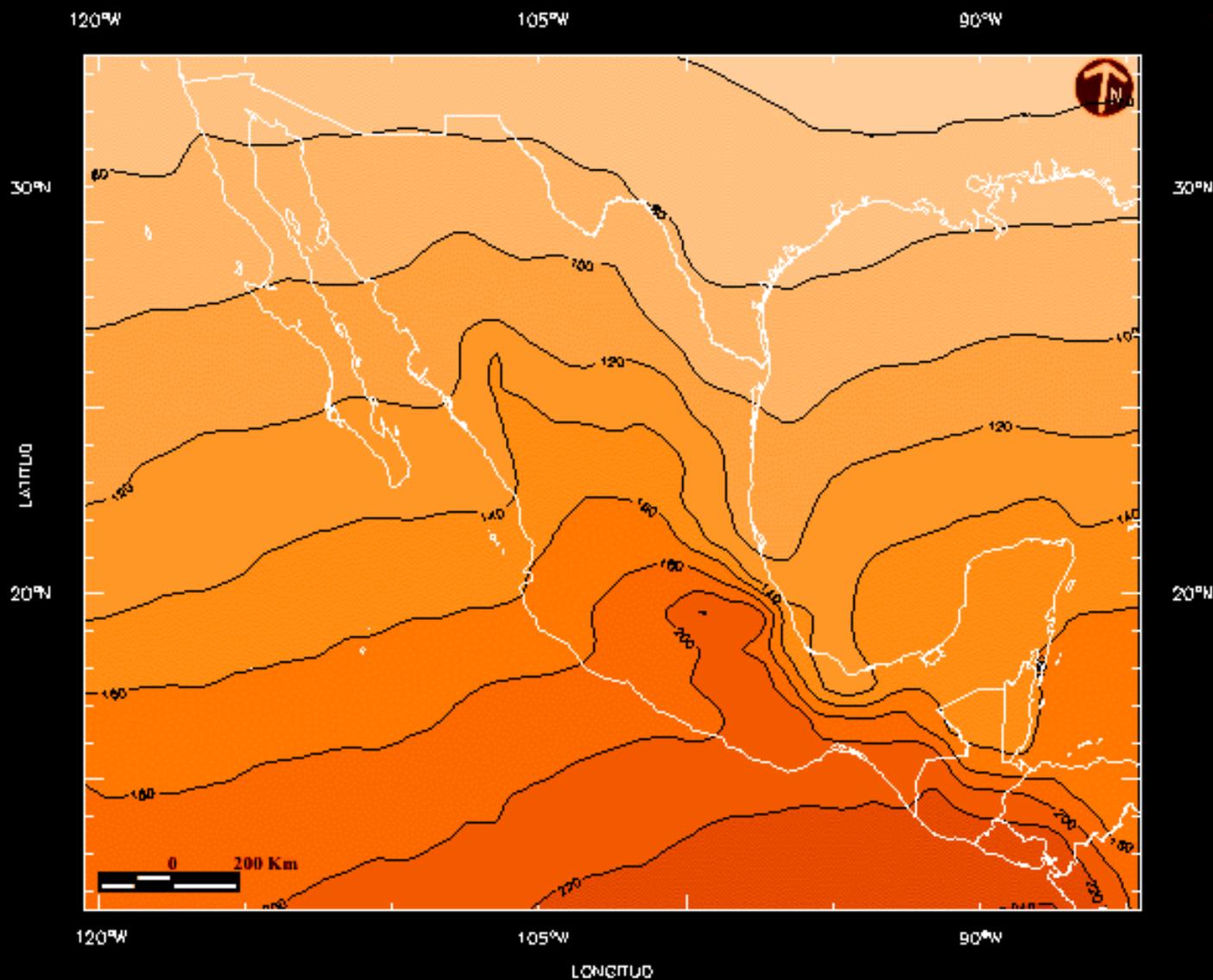
Noviembre mW/m<sup>2</sup>  
Media Mensual (1978-2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

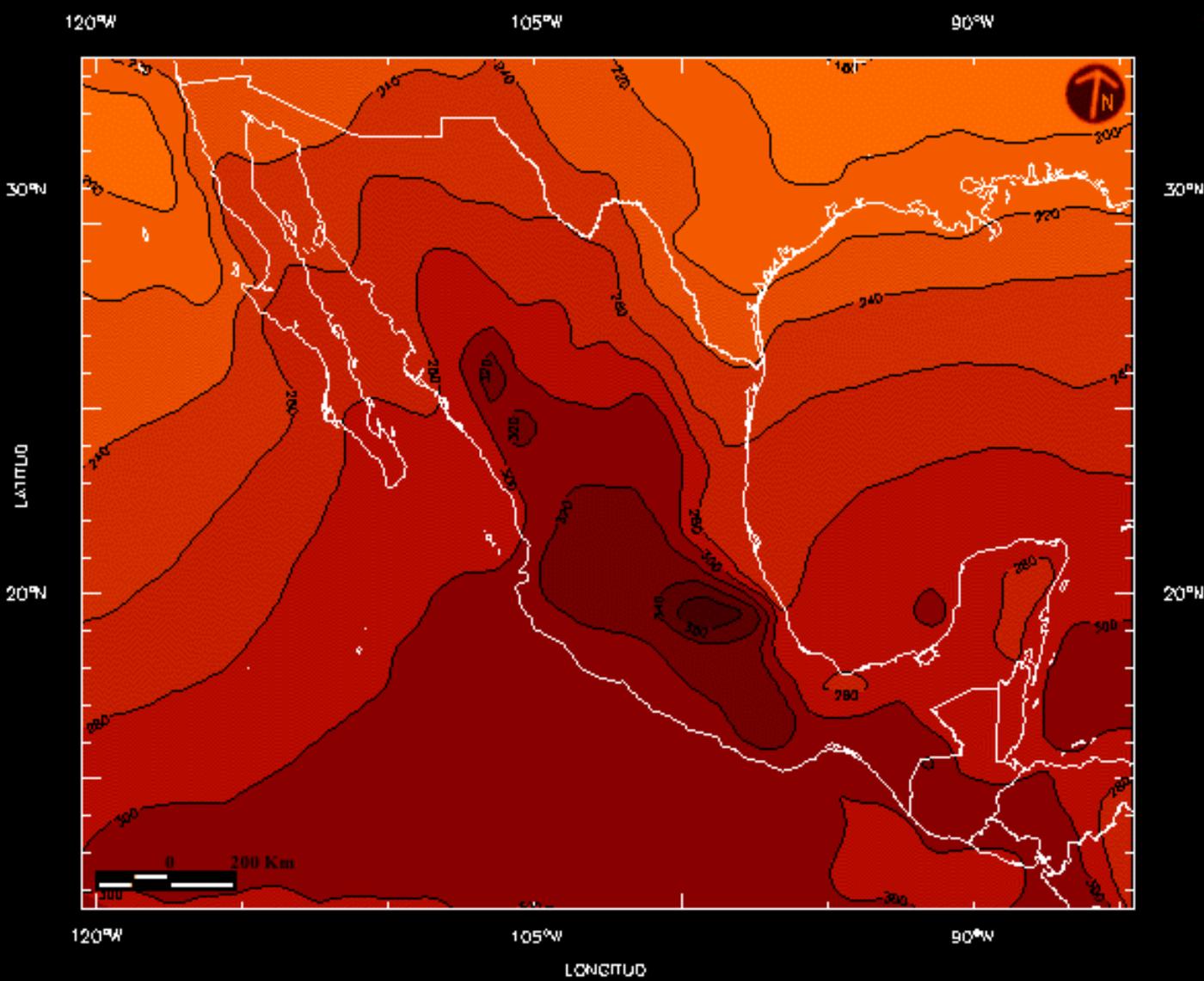
# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

Diciembre mW/m<sup>2</sup>  
Media Mensual (1978-2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"



**Primavera mW/m<sup>2</sup>**  
**Media Estacional (1978-2003)**

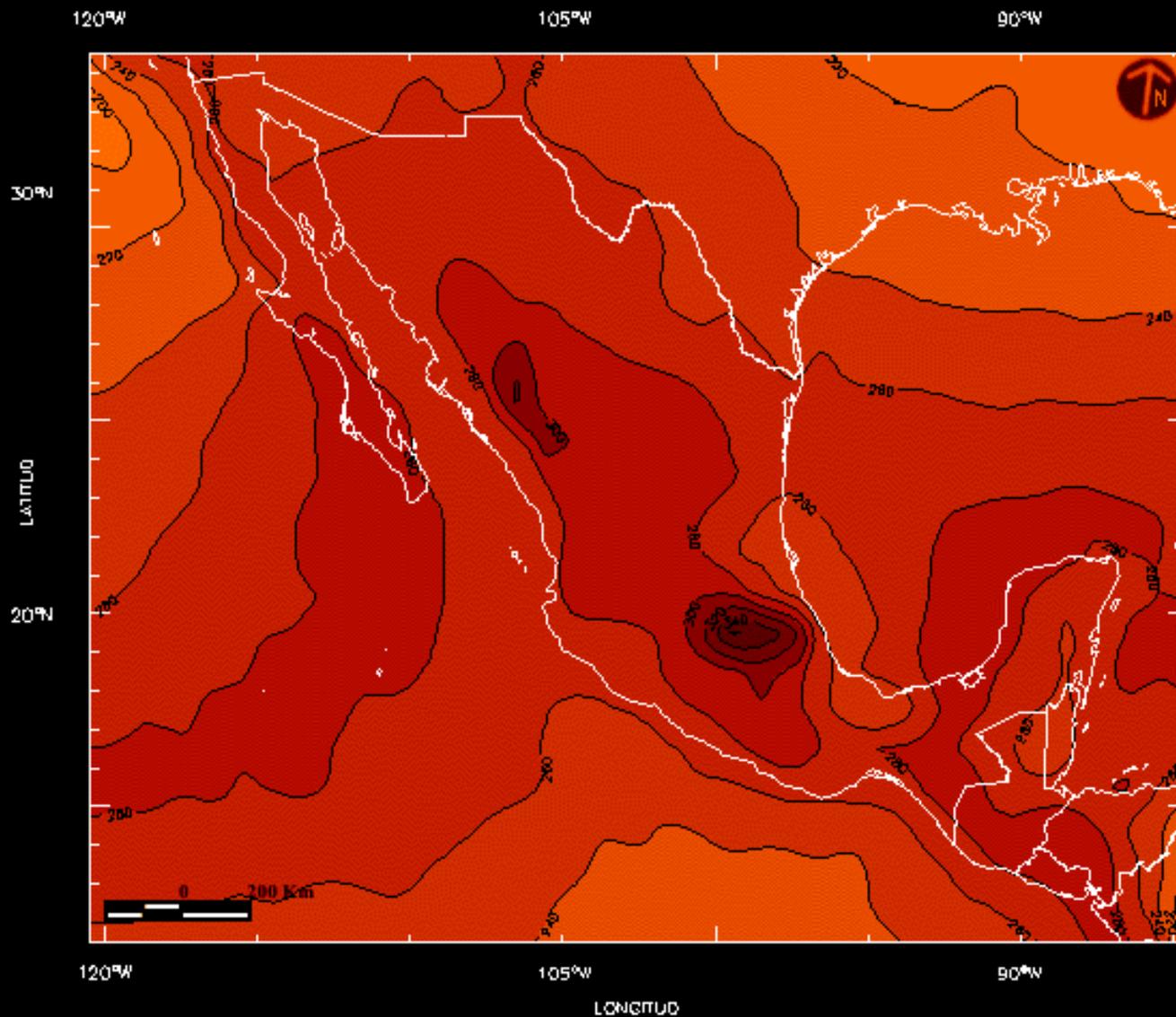
- 0 - 20
- 20 - 40
- 40 - 60
- 60 - 80
- 80 - 100
- 100 - 120
- 120 - 140
- 140 - 160
- 160 - 180
- 180 - 200
- 200 - 220
- 220 - 240
- 240 - 260
- 260 - 280
- 280 - 300
- 300 - 320
- 320 - 340
- 340 - 360
- 360 - 380

Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

Verano mW/m<sup>2</sup>

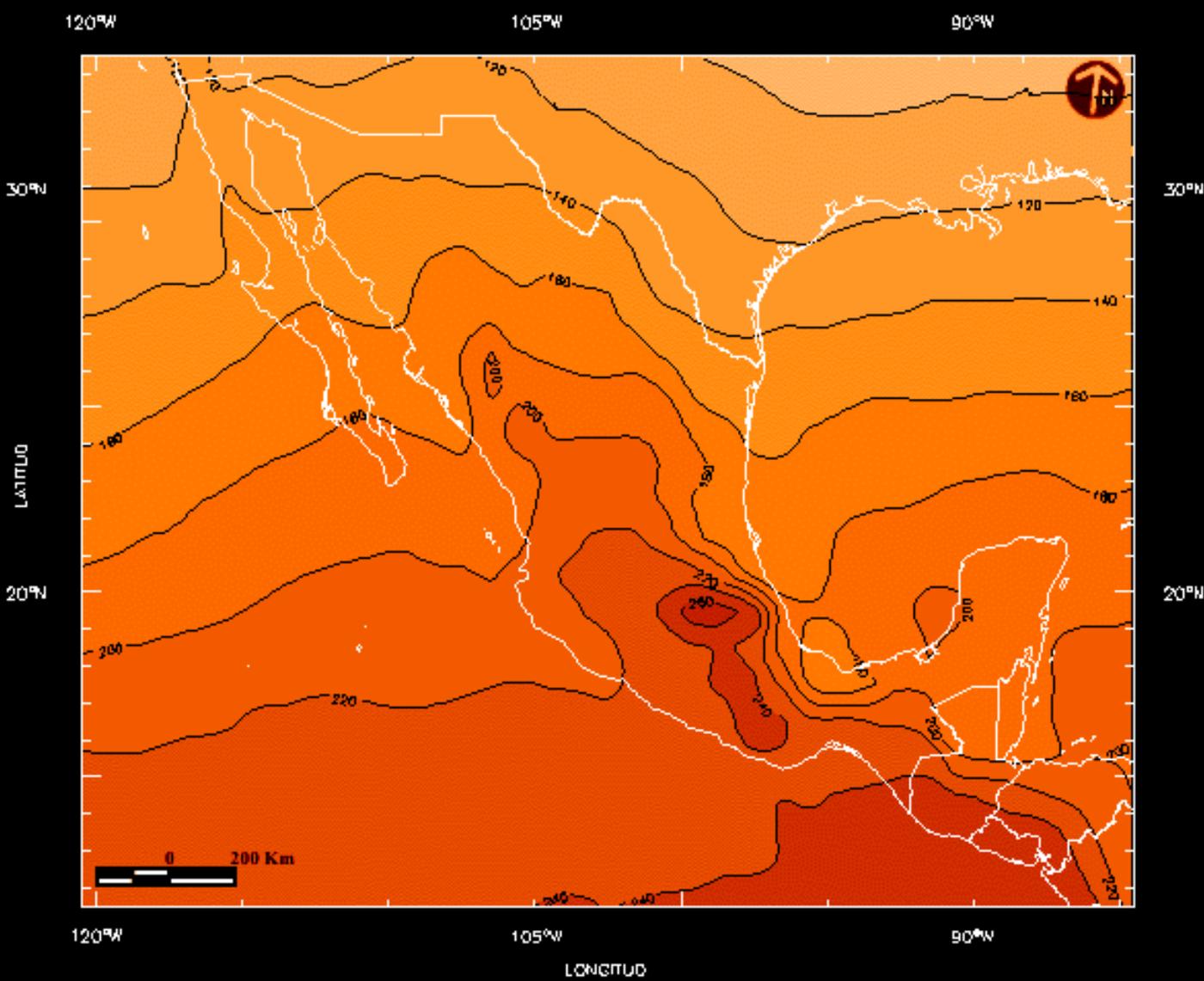
Media Estacional (1978-2003)



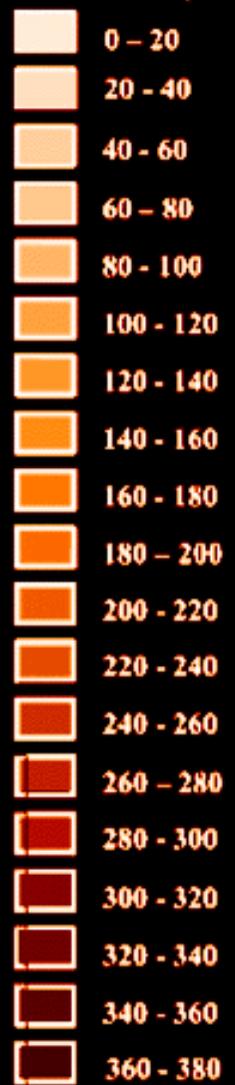
- 0 - 20
- 20 - 40
- 40 - 60
- 60 - 80
- 80 - 100
- 100 - 120
- 120 - 140
- 140 - 160
- 160 - 180
- 180 - 200
- 200 - 220
- 220 - 240
- 240 - 260
- 260 - 280
- 280 - 300
- 300 - 320
- 320 - 340
- 340 - 360
- 360 - 380

Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"

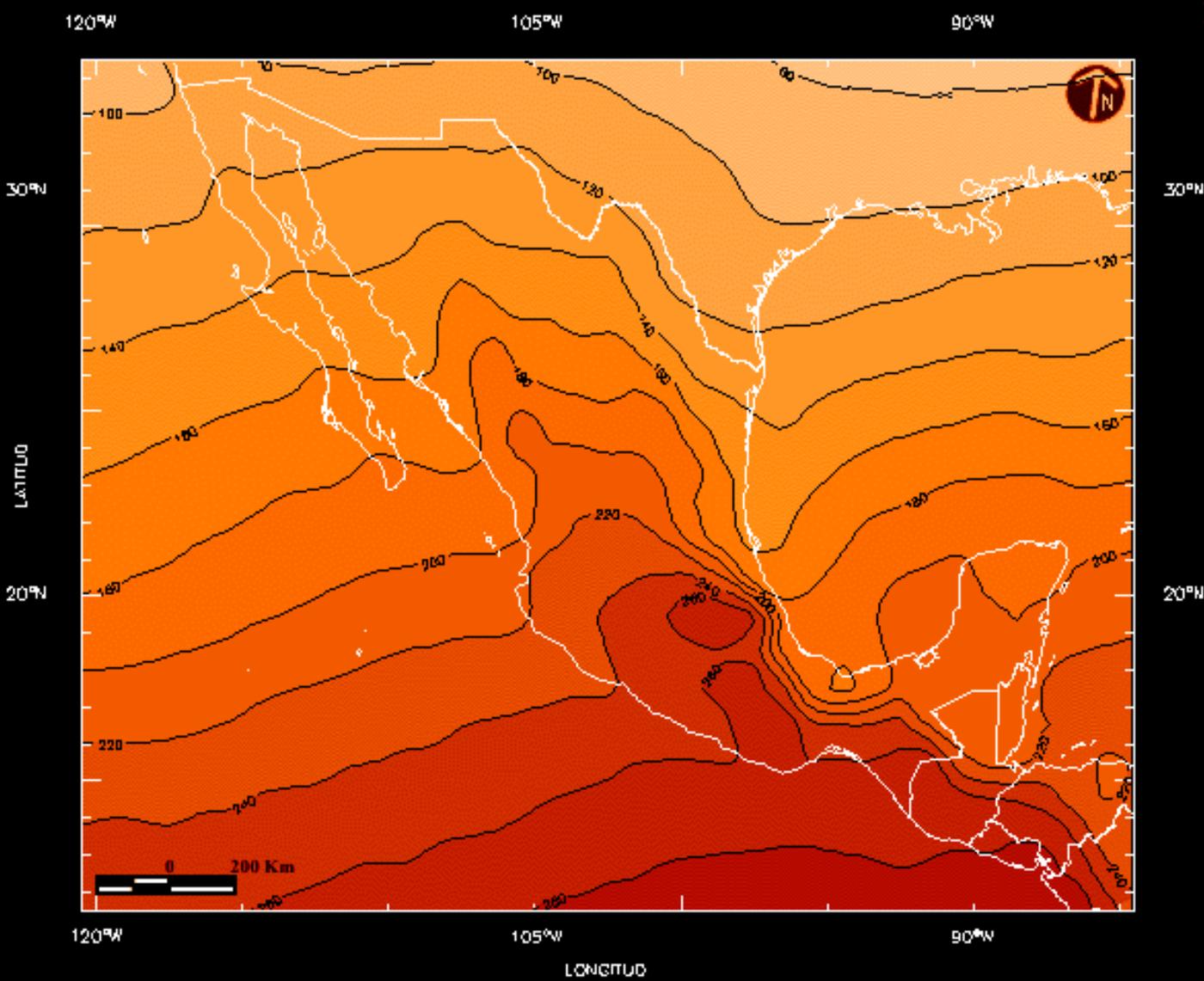


**Otoño mW/m2**  
Media Estacional (1978-2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

# Radiación Solar Ultravioleta banda "B"



**Invierno mW/m<sup>2</sup>**  
Media Estacional (1978-2003)



Elaboró. Ismael Velázquez

### **III.1. DISTRIBUCIÓN MENSUAL**

#### **ENERO.**

La radiación solar ultravioleta se encuentra determinada por dos factores principalmente, la latitud y la altitud, las isóneas del mes de enero muestran el comportamiento latitudinal debido a que sus valores disminuyen de Sur a Norte, específicamente en las porciones marinas, aunque en la porción continental también se presenta este fenómeno. La cantidad de radiación que incide en la superficie del país está determinada, además por el relieve, la nubosidad, la cantidad de aerosoles, presión y factores astronómicos como la declinación solar, esta última se encuentra en relación estrecha con la distribución latitudinal.

El comportamiento espacio-temporal de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” en México, durante el mes de enero se encuentra determinado en gran medida por la latitud y la declinación solar, aunque es alta la influencia de estos factores, el relieve aporta detalles de la configuración del comportamiento, se puede apreciar que las isóneas de irradiancia contornean las grandes cadenas montañosas que existen en el país, específicamente las de mayor altitud, como la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur y el Sistema Volcánico Transversal, donde se encuentran los volcanes de mayor altitud, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Citlaltépetl. La radiación UVB al llegar a la parte alta de la atmósfera no sufre ninguna modificación, pero al ir atravesándola, existen procesos como la dispersión, absorción y reflexión que provocan una disminución de la radiación, de manera general cuando llega a la superficie terrestre se ha perdido a razón del 2% por cada kilómetro de atmósfera (Valdés, 1996), lo que justifica claramente el comportamiento en las grandes cadenas montañosas, provocando mayores valores en la partes mas altas.

En el mes de Enero, el sol se localiza perpendicularmente sobre el hemisferio Sur, casi sobre el Trópico de Capricornio, por lo cual llega a la superficie del país un menor flujo de energía por unidad de área, incluyendo la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, los valores sobre el país van desde los 60 a los 240  $\text{mW/m}^2$ , una diferencia de 180  $\text{mW/m}^2$ , producida básicamente por la declinación solar, la cual alcanzó su valor mínimo en los últimos días del mes anterior.

## **FEBRERO.**

En el mes de febrero, se puede apreciar una distribución similar al mes de enero, aunque el Sol ha tenido un desplazamiento hacia el norte, elevando de manera notable los valores de irradiancia en superficie, éstos aumentan desde los 100  $\text{mW/m}^2$  hasta los 280  $\text{mW/m}^2$ , resultado del mencionado fenómeno astronómico.

El comportamiento de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” en este mes sigue acentuando las principales zonas montañosas, aunque ahora se puede observar cómo las mesetas de mayor altitud también presentan un aumento significativo en relación a lugares de la misma latitud pero de menor altitud, se observa claramente el fenómeno en el área central del país, incluyendo la ciudad de México que se localiza en promedio a 2240 m.s.n.m, las porciones serranas del Estado de Oaxaca también ejemplifican este fenómeno

Las grandes llanuras demuestran un comportamiento contrario al de las zonas montañosas, como en la península de Yucatán, llanura costera del Golfo, llanura costera del Pacífico Norte, éstas presentan valores menores a las áreas vecinas, aunque el modelo fue realizado para evaluar la radiación solar ultravioleta, a nivel del mar es donde tiene su mejor desempeño, los valores de las porciones cercanas a este difieren claramente entre porción marina y porción continental. Es importante mencionar que el satélite tiene una resolución espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$ , por lo que se puede asumir que dicho

comportamiento es resultado de la interpolación de los datos. La llanura costera del Golfo es interrumpida por el Sistema Volcánico Transversal, provocando diferencias de valores elevados en pocos kilómetros. La Mesa del norte acotada por la Sierra Madre Occidental al oeste y por la Sierra Madre Oriental al este, muestra este comportamiento aunque en menor magnitud.

### **MARZO.**

El Sol continúa con su movimiento aparente hacia al norte, elevando considerablemente los valores de irradiancia de UVB sobre el país, si bien en los meses anteriores los valores mínimos se encontraban cercanos a los  $100 \text{ mW/m}^2$ , en el mes de marzo se han disparado desde los  $160 \text{ mW/m}^2$  a poco más de  $320 \text{ mW/m}^2$ , la declinación solar está a punto de alcanzar un valor de 0, por lo que es importante considerar este mes como de transición, la distribución sigue con la misma tendencia de los meses anteriores, sólo que al existir mayor irradiancia se acentúa la influencia de los sistemas montañosos, principalmente en la Sierra Madre Occidental, y en el Sistema Volcánico Trasversal, en este último se pueden observar las grandes diferencias que ocurren en su porción oriental, donde son mayores a  $120 \text{ mW/m}^2$  en una muy corta distancia. En este mes la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Chiapas y las montañas del Norte de Chiapas provocan un claro aumento de la radiación en sus partes más altas afirmando lo explicado con anterioridad para esta época del año, en general el sur del país cuenta con un relieve más abrupto y de mayor altitud, por lo que se muestran mayores valores de Radiación Solar Ultravioleta Banda "B".

En cuanto a la Península de Baja California, los sistemas montañosos ahí presentes, también provocan que los valores sean levemente mayores que en los alrededores, son sistemas que no cuentan con grandes altitudes.

## **ABRIL.**

Los valores de irradiancia de radiación UVB continúan aumentando, para el mes de abril, desde  $200 \text{ mW/m}^2$  hasta poco más de  $380 \text{ mW/m}^2$  en la parte más elevada del país, el Citlaltépetl, presenta un comportamiento muy similar a los meses anteriores, la declinación solar aumenta, el Sol continúa su camino hacia el Trópico de Cáncer, provocando una homogeneidad en el centro y sur del país, mostrando diferencias claras entre las porciones montañosas y las llanuras como es el caso de la península de Yucatán.

## **MAYO.**

En su desplazamiento aparente hacia el norte, el Sol se encuentra perpendicularmente en las latitudes más bajas de la República Mexicana, provocando un diferente comportamiento de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, en el mes de mayo, las diferencias entre el valor máximo  $380 \text{ mW/m}^2$  y mínimo  $240 \text{ mW/m}^2$ , han disminuido, a pesar de dicha diferencia el comportamiento muestra una cierta uniformidad en el territorio nacional, cabe destacar que la declinación solar se encuentra cerca de su máximo valor.

Es de importancia mencionar que el comportamiento observado en los meses anteriores ha desaparecido para el mes de mayo, la uniformidad de las isolíneas sobre los océanos e inclusive sobre el norte del país ha desaparecido por completo, dando a conocer un comportamiento muy distinto que obedece principalmente a la elevada cantidad de radiación que se empieza a recibir en esta época del año, en función de los valores de declinación solar.

Sin embargo aún se puede apreciar lo determinante que es la altitud en los valores de Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, los sistemas montañosos siguen acentuándose

en relación a sus áreas vecinas, las partes más elevadas presentan valores mucho mayores creando diferencias no observadas en los meses anteriores, claro ejemplo de ello, son las partes serranas del estado de Chiapas.

En mayo se pueden encontrar los mayores niveles de irradiancia del año y ocurren en el Sistema Volcánico Transversal sobre la cumbre del volcán Citlaltépetl y áreas vecinas, ascienden a poco más de  $380 \text{ mW/m}^2$ , siendo altamente perjudiciales para la salud humana.

## **JUNIO.**

La declinación solar ha llegado a su máximo valor en el mes de junio, el Sol se localiza en el cenit del paralelo  $23^\circ 27'$ , favoreciendo una mayor pero homogénea distribución de Radiación Solar Ultravioleta Banda "B", los valores que se pueden encontrar como mínimo  $240 \text{ mW/m}^2$  y un máximo ligeramente inferior a los  $360 \text{ mW/m}^2$ , aunque la diferencia entre estos valores es un poco menor que en el mes anterior, es importante mencionar que casi todo el país se encuentra estable en dos rangos de irradiancia.

En contraste con los primeros meses del año, las zonas serranas como el Sistema Volcánico Transversal no están bien delimitados en el mapa, pero las zonas más elevadas se han contorneado con mayor diferencia a su áreas vecinas, obteniendo los mayores niveles de radiación solar ultravioleta, el mismo comportamiento se observa en la Sierra Madre Occidental y en las montañas del norte de Chiapas.

Cabe mencionar que la península de Yucatán, ha mantenido un comportamiento muy estable y similar a lo largo de estos seis meses, siendo la única diferencia el aumento de la cantidad de Radiación que incide en ella.

## **JULIO.**

En relación con el mes de junio, el comportamiento espacial de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” es muy similar, la situación astronómica ha cambiado, el Sol ha iniciado su desplazamiento aparente hacia el Sur, traduciéndose en una disminución de los valores de la irradiancia que se verán reflejados en meses posteriores, la distribución continúa muy homogénea, gran parte del territorio recibe más de  $260 \text{ mW/m}^2$ , los mayores valores se localizan sobre las partes más elevadas, en la Sierra Madre Occidental y Sistema Volcánico Transversal.

## **AGOSTO.**

Los valores de irradiancia han empezado a disminuir, el Sol se ha alejado de latitudes mexicanas, aunque los cambios de valor se han mantenido constantes con un máximo de  $360 \text{ mW/m}^2$  y un mínimo de  $240 \text{ mW/m}^2$ , el comportamiento de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” en los dos meses anteriores es muy similar al del mes de agosto, sin presentar cambios de gran importancia, pero si se nota una disminución en cuanto al área ocupada por valores superiores a los  $280 \text{ mW/m}^2$ .

## **SEPTIEMBRE.**

El Sol se encuentra a punto de alcanzar declinaciones igual a 0, los valores de radiación han disminuido notablemente en la mayor parte del país, éste mes se puede considerar como de transición, la configuración del comportamiento de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, no ha cambiado considerablemente en comparación con los meses anteriores, en cambio los valores sí han disminuido, las isolíneas del extremo noreste han empezado a suavizarse, denotando una distribución que tiende a ser parecida a la de primeros meses del año.

Los valores que podemos localizar en este mes son de  $200 \text{ mW/m}^2$  como mínimo en el norte del país, hasta poco más de  $340 \text{ mW/m}^2$  en las partes elevadas del territorio localizadas en el Sistema Volcánico Transversal y los valores altos que se presentaban en la Sierra Madre Occidental comienzan a desaparecer.

### **OCTUBRE.**

El comportamiento de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, de nuevo se encuentra determinado en función de la latitud, nuevamente comienza a existir una distribución latitudinal de la radiación UVB en las porciones oceánicas y en la parte norte del país, los sistemas montañosos vuelven a tener diferencias claras con las zonas aledañas mostrando siempre niveles más elevados, los valores máximos que se pueden encontrar cercanos a los  $300 \text{ mW/m}^2$ , siendo los mínimos ligeramente mayores a  $140 \text{ mW/m}^2$ , la distribución de la radiación se encuentra muy ligada a factores astronómicos como la declinación solar y también determinada por las diferentes altitudes.

### **NOVIEMBRE.**

Los valores continúan descendiendo y las isóneas continúan suavizándose en gran parte del norte del país, el Sol se encuentra muy cerca de su mínima declinación, el territorio cuenta con valores que van desde los  $80 \text{ mW/m}^2$  hasta los  $220 \text{ mW/m}^2$  son muy bajos con respecto a los meses de mayo, junio y julio, destacan las porciones montañosas por los valores de irradiancia.

### **DICIEMBRE.**

El sol se encuentra en su mínima declinación al igual que los valores de irradiancia UVB, en el norte del país hay  $60 \text{ mW/m}^2$  siendo este el valor más bajo encontrado a lo

largo del año, la porción sureste, cuenta con sólo  $220 \text{ mW/m}^2$  favoreciendo las grandes diferencias y marcando la influencia de la latitud en la distribución de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”.

## **III.2. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL.**

### **PRIMAVERA.**

La primavera (21 de marzo – 21 de junio), es considerada como una estación de transición, entre verano e invierno, los factores astronómicos no se encuentran en los máximos puntos (mínima o máxima declinación Solar), dando características muy especiales a los valores de irradiancia van desde los  $220 \text{ mW/m}^2$  hasta poco más de los  $360 \text{ mW/m}^2$ , las zonas montañosas marcan la fuerte influencia que existe entre la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” y la altitud-latitud, de igual manera el rango que se puede encontrar en el territorio refuerza la relación que existe entre los factores astronómicos y la cantidad que incide sobre la superficie terrestre.

### **VERANO.**

En la época de verano (21 de junio – 21 de septiembre) se presenta un comportamiento muy estable, con valores que van desde los  $260 \text{ mW/m}^2$  hasta poco más de  $360 \text{ mW/m}^2$  en la cima de la montaña más alta, el Citlaltépetl. La situación en esta época resulta muy estable, gran parte del territorio se encuentra bajo los  $260\text{-}280 \text{ mW/m}^2$ , la Sierra Madre Occidental y el Sistema Volcánico Transversal, presentan los mayores valores de irradiancia, a diferencia de los mapas mensuales representativos para esta época se puede observar una mayor estabilidad, con un rango muy reducido de  $100 \text{ mW/m}^2$ .

## **OTOÑO.**

Al igual que la primavera la época que corresponde al otoño (21 de septiembre – 21 de diciembre), es de transición, la declinación solar se encuentra en el Ecuador, este factor astronómico, en conjunto con la altitud y la latitud funcionan como determinantes, provocando gran oscilación de los valores de irradiancia que se pueden encontrar en la superficie, con un mínimo de  $120 \text{ mW/m}^2$  hasta un máximo mayor a los  $260 \text{ mW/m}^2$ , a pesar de ser meses con situaciones muy similares, en el otoño, la distribución muestra una dirección este-oeste más definida, los sistemas montañosos se encuentran bien limitados por cada una de las isolíneas que muestran valores siempre mayores a los de las áreas contiguas, localizadas en la misma latitud.

## **INVIERNO.**

En la época de invierno, la declinación solar logra alcanzar su mínimo valor; por la influencia que ejerce la latitud y altitud, la distribución de la radiación UVB sigue un patrón de Sur-Norte, sufriendo modificaciones por los sistemas montañosos de mayor altitud.

Los valores que se pueden encontrar durante esta época son un máximo mayor a los  $260 \text{ mW/m}^2$  hasta un mínimo de  $100 \text{ mW/m}^2$  localizándose el primero en las zonas de mayor altitud y la región sur del país, mientras que los mínimos en el extremo norte.

### **III.3. DIFERENCIAS ENTRE MAPAS MENSUALES-ESTACIONALES.**

Las diferencias que pueden existir entre los mapas mensuales y estacionales es clara, el primero muestra con mucho mayor detalle el comportamiento espacio-temporal, los

sucesos provocados por los distintos factores geográficos que determinan la cantidad de Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”.

En el caso de los mapas estacionales los valores se encuentran muy suavizados por influencia de los factores que se han explicado con anterioridad, por la relación entre la latitud y la altitud, que son determinantes en la cantidad de irradiancia que incide en la superficie terrestre.

Es importante mencionar que el análisis estacional con base a los desplazamientos astronómicos del sol, no son de utilidad para el estudio de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”. De los mapas mensuales, se ha podido deducir que la estacionalidad de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, se puede dividir en los siguientes períodos:

Noviembre – Abril

Mayo (Transición)

Junio – Septiembre

Octubre (Transición)

El primer periodo de noviembre a abril es caracterizado por bajos niveles de irradiancia, el segundo periodo de junio a septiembre es caracterizado por los valores altos; mayo y octubre como periodos de transición entre los máximos y mínimos valores.

## **CAPÍTULO IV**

### **Análisis de Resultados.**

#### **IV.1. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.**

El comportamiento espacio-temporal de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” para el medio día solar en la República Mexicana, se presentó en el capítulo anterior a través de mapas de promedios mensuales y estacionales, que indican un comportamiento “lógico”; su distribución en superficie mantiene fuerte relación con los dos principales factores climáticos determinantes, latitud y altitud, es difícil asegurar con estos resultados que las cifras correspondan con la verdadera irradiancia en superficie y aceptarlas como correctas para utilizarse con completa seguridad no es conveniente.

La forma más fiable y segura de comprobar que los datos del satélite son confiables, resulta ser la comparación con una estación de superficie, de esta manera se podrá conocer el grado de correlación que existe (satélite-superficie).

#### **IV.1.a INFORMACIÓN SATÉLITE-SUPERFICIE.**

Para realizar dicha comparación surge el principal problema al que se enfrenta nuestro país en este sector de la ciencia, la escasez de estaciones en superficie, y las que existen se encuentran en una área reducida como la Ciudad de México, debido a que el único preocupado por el impacto en la salud de la población por este parámetro meteorológico, es el Gobierno del Distrito Federal, es aquí donde se localizan las únicas estaciones de monitoreo de la radiación UVB. La comparación se realizó con la estación del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, debido exclusivamente a que ésta es parte de la Red Actinométrica Mundial, sin embargo

cualesquiera de las estaciones existentes en la ZMCM (Observatorio de Radiación Solar y Red Automática de Monitoreo Atmosférico), pudieron cumplir con este papel, debido básicamente a que todas cubren los requisitos marcados por la Organización Meteorológica Mundial para ser consideradas como estaciones con un alto grado de confiabilidad.

Para poder cumplir con este objetivo, se necesitó obtener la base de datos Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” al igual que el registro de Insolación con el objetivo de conocer la nubosidad existente diaria.

El procedimiento para llevar a cabo la comparación, inició con la recopilación de los datos de superficie del monitoreo de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, el cual dio inicio en el país de manera continua desde 1997 a la fecha, desde ese año se cuenta con información. Es importante mencionar que la base de datos tanto del satélite como de superficie cuentan con información durante este mismo periodo, se comparará desde 1997 hasta 2003, traduciéndose en un periodo de 7 años muy representativo.

Los datos de superficie proporcionados son asumidos como correctos y reflejan la verdadera cantidad de irradiancia que incide en el país, debido a que el sensor del Observatorio de Radiación Solar es constantemente calibrado, y a partir de éste, se calibran los sensores de la Red Automática de Monitoreo Ambiental del gobierno del Distrito Federal, por lo que se pueden aceptar como información de alta calidad.

El registro de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” se realiza minuto a minuto y es presentada en tiempo solar verdadero, para los fines de este trabajo se necesitan únicamente los valores del medio día solar verdadero (12:00), y como el satélite puede variar algunos segundos o inclusive un minuto en el momento que realiza la medición, se optó por tomar un minuto mas y uno menos a las 12:00 hrs., para posteriormente

calcular un promedio entre los 3 valores y obtener el valor final que se utilizó en la comparación.

El único criterio que se eligió como soporte en la selección de los datos de superficie fue la nubosidad, como se ha explicado en algunos de los capítulos anteriores, la nubosidad es otro determinante en la cantidad de Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” que incide sobre la superficie terrestre, por lo que se procuró trabajar con datos que tuvieran cero nubosidad durante las 11:00, 12:00 y 13:00 hrs., tiempo solar verdadero, es importante mencionar que la mejor comparación se logra con cielos completamente despejados.

A pesar de que los datos de superficie fueron comparados con la insolación para evitar posibles alteraciones del flujo radiacional a causa de la nubosidad, los días resultantes, también fueron revisados manualmente, la principal razón se deriva del funcionamiento e imprecisión del Heliógrafo, aun con cielos con poca nubosidad o con nubosidad principalmente de gran altura (Cirrus), el registro es igual que el de los cielos completamente despejados. Dicha revisión se llevó a cabo directamente en los registros de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” y se procedió a eliminar los días que tenían oscilaciones entre el periodo de las 11:00 a 13:00 hrs., quedando fuera cualquier fuente de error que impidiera una excelente comparación.

Al disponer de las tres fuentes de información, satélite, de superficie, e insolación, se formó una base de datos con la intención de homogenizar los mismos días en cada uno de los tres parámetros, reduciendo ligeramente la cantidad de días a comparar, a razón de que algunos días de los datos superficiales y de insolación no presentaban información, y en la del Satélite fueron muy pocos los días faltantes. Cabe destacar que los datos de insolación sólo fueron de referencia en la selección de los días a comparar.

Es importante mencionar que muchas de las tareas realizadas y explicadas en los párrafos anteriores se facilitaron por la ayuda de programas desarrollados de manera personal en Microsoft Visual Studio.net Versión 2003.

## **IV.2. COMPARACIÓN DE DATOS SATÉLITE-SUPERFICIE**

Antes de publicar la información, el TOMS ha sometido a pruebas los datos obtenidos por el Satélite, la NASA cuenta con estaciones en superficie que respaldan dicho proceso, sin embargo, las características bajo las que se efectuaron dichas comparaciones pueden variar, una de las principales razones es la declinación solar, el territorio de los E.U.A. nunca tiene el Sol en el cenit, a diferencia de los países localizados entre los Trópicos, como México, esta diferencia puede ocasionar errores no contemplados dando grandes diferencias entre cada uno de los valores.

A pesar de que el satélite cuenta con un sistema de calibración, éste se limita a la alineación de cada una de las partes que lo componen, por lo que las comparaciones con las estaciones en superficie son de vital importancia, el resultado de estas son constantes de calibración o bien modificaciones al propio algoritmo, que garantizan un adecuado registro de la radiación en la superficie, algunos de los factores que pueden modificar los valores de irradiancia son la latitud, altitud, nubosidad, reflectividad de las superficie, aerosoles, etc.

De esta manera los valores aunque han mostrado de manera correcta el comportamiento en superficie, es difícil saber si los valores de irradiancia que se localizan en el país son reales, surgiendo la necesidad de una comparación con una estación en superficie. Lo ideal sería realizar comparaciones en distintos puntos del país, sin embargo, lo impide la carencia de estaciones en el país.

Al realizar la comparación de la estación del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, se ha encontrado que los valores se encuentran hasta un 22% mayores que los mostrados por el Satélite, sin embargo, la marcha temporal de ambos datos resulta muy similar, lo cual corrobora que el instrumento funciona bien y es capaz de mostrar atinadamente la distribución de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” en el país.

El gráfico 1, ilustra la marcha temporal de la radiación UVB en el periodo seleccionado (7 años), se puede observar que está compuesto por 7 ciclos, cada uno representa la marcha anual, cuentan con un máximo de junio a septiembre y mínimo noviembre a abril, las estaciones de transición que se mencionaron en el capítulo anterior se ejemplifican en las líneas de ascenso y descenso de los valores máximos y mínimos.

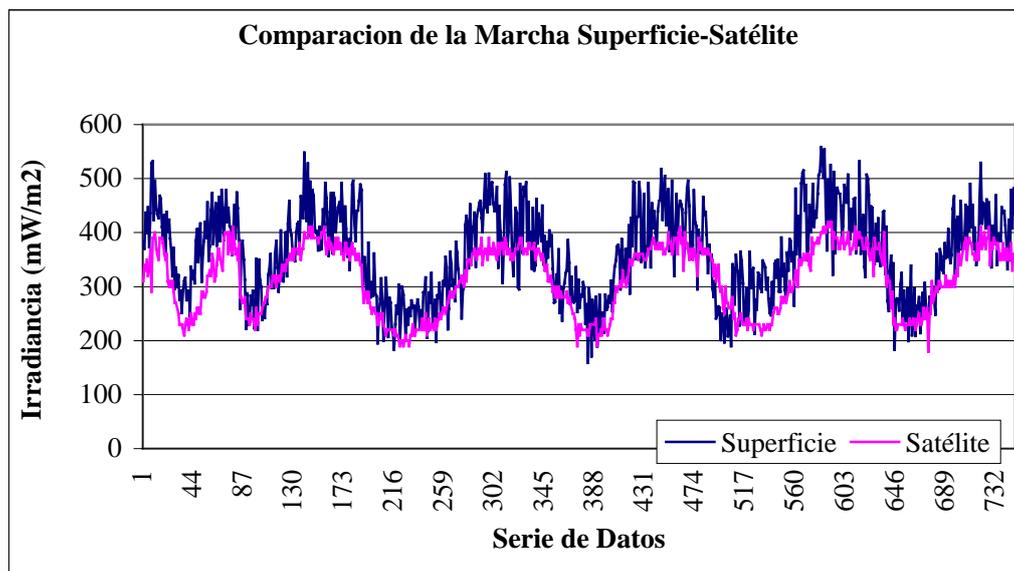
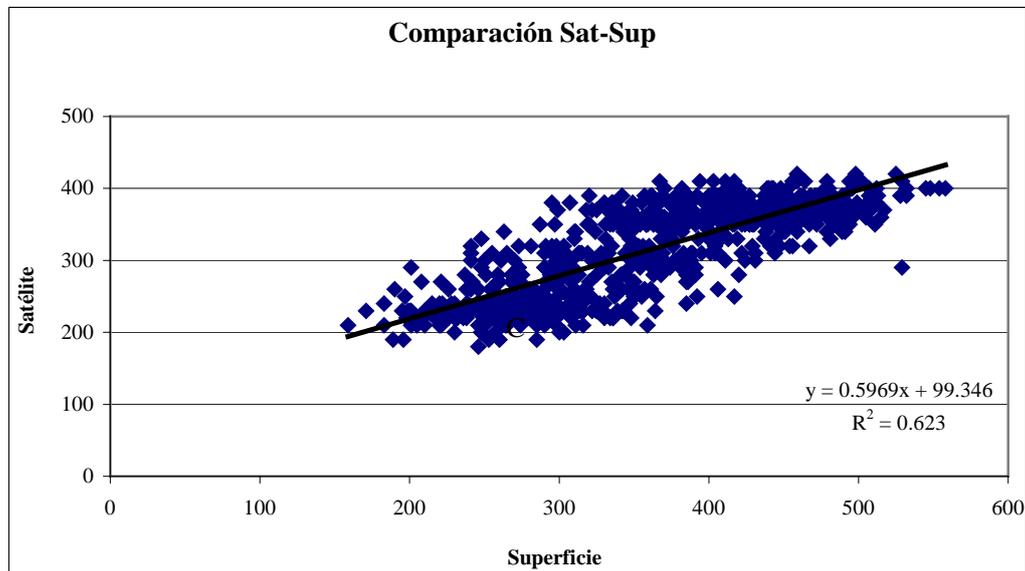


Gráfico 1. Comparación del Comportamiento Temporal. Datos Superficie-Satélite

En el gráfico 2 se muestra la comparación de los datos en superficie (eje Y), contra los del satélite (eje X), dando como resultado un bajo grado de correlación ( $R^2$ ), sobre todo para la precisión que este tipo de estudios requiere, también se puede apreciar que la

dispersión de las medidas no se encuentran tan dispersas de la línea de tendencia traduciéndose en que ambas medidas muestran un comportamiento muy similar.



En cuanto a los gráficos 3 y 4 se ilustra el comportamiento de la marcha anual de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” medida por el satélite y en superficie, se han incluido estos gráficos de manera separada para apreciar que los datos proporcionados por el satélite son más suavizados y estables que los que los de superficie, resultado del algoritmo utilizado que favorece condiciones más estables a lo largo del año, en otras palabras funciona como si todos los días estuvieran despejados, al contrario de los datos de superficie que muestran con más detalle la marcha anual, de igual manera se puede apreciar mayor cantidad de radiación registrada en superficie, en comparación con el satélite.

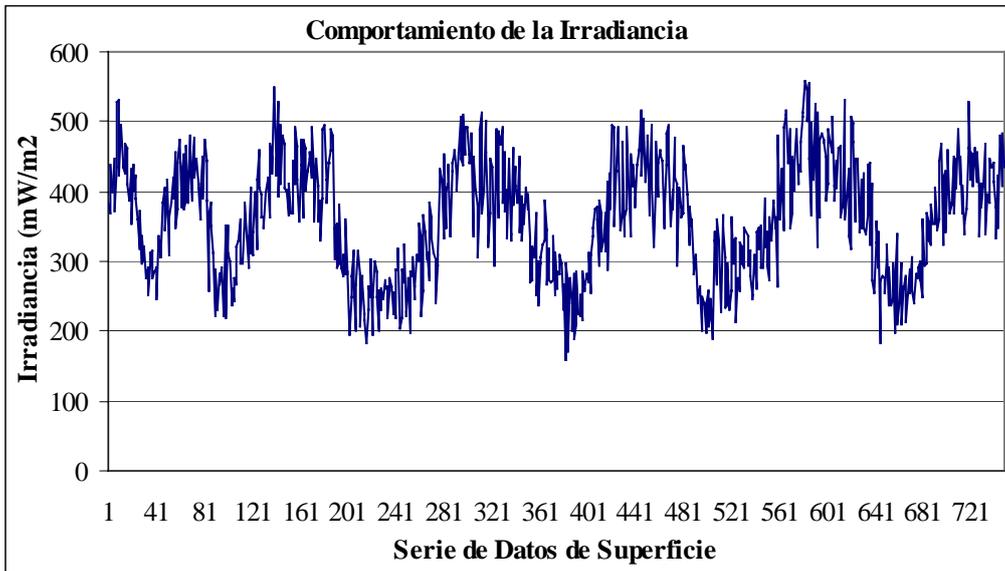


Gráfico 3. Comportamiento Temporal de Superficie

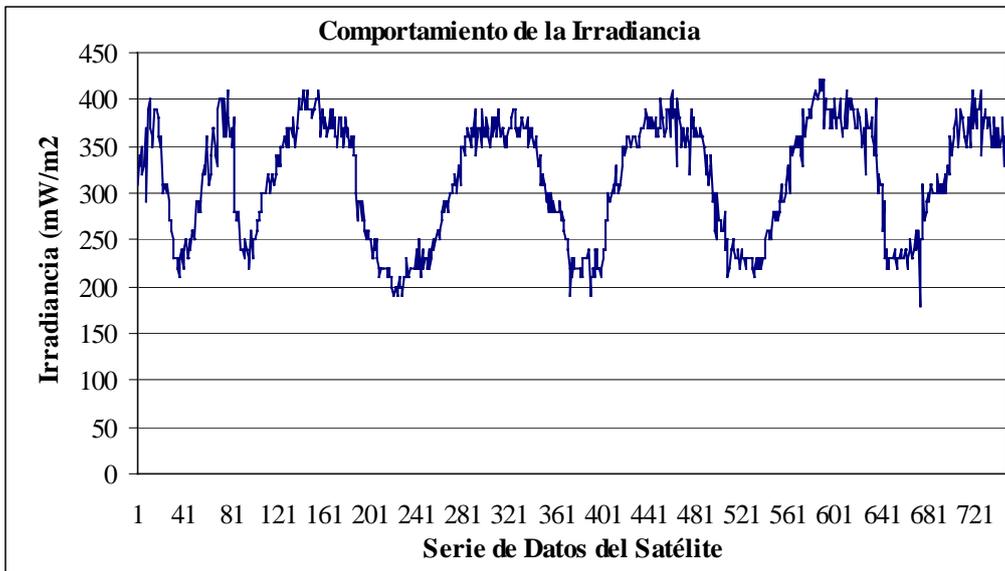


Gráfico 4. Comportamiento Temporal del Satélite

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Al igual que en otros parámetros meteorológicos, la cantidad de radiación solar en superficie está fuertemente determinada por las grandes geoformas del país (sierras, cuencas, llanuras costeras, altiplanicies, etc.) y precisamente esta dependencia se ve reflejada en la distribución de los mapas presentados en este trabajo. Es esta dependencia, la característica más importante de los mapas, pues ésta es la que da validez a los resultados en cuanto al comportamiento espacial y temporal, no así a los valores de irradiancia con que se presenta dicho elemento climático en superficie.

Los gráficos No. 1, 3 y 4 del capítulo IV, nos muestran un comportamiento muy semejante de los valores obtenidos por el satélite y los sensores en superficie, aunado a lo expresado en el punto anterior, sirve como el argumento más importante para la utilización de esta tecnología, particularmente para el monitoreo de la Radiación Solar Ultravioleta Banda "B".

Es de fundamental importancia, la implementación de sensores en superficie, para obtener resultados aceptables de estas tecnologías satelitales que tienen valor siempre y cuando existan referencias de medidas reales en superficie, para obtener coeficientes que permitan calibrar el modelo y los datos del satélite en territorio nacional.

Para la ubicación de sensores en superficie es de vital importancia hacer una regionalización de la República Mexicana, en función de factores que determinan la

reflectividad de la radiación en superficie, pues ésta es la base de las observaciones que realiza el satélite meteorológico, permitiendo la instalación de estaciones estratégicamente localizadas que podrán ayudar a corregir las mediciones del satélite con el objetivo de mantener un adecuado monitoreo del parámetro en todo el país.

En los mapas mensuales, se puede observar la marcha de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B” a lo largo del año. Pero en los mapas estacionales, al no coincidir las estaciones astronómicas con las de la marcha real del parámetro, enmascaran mucha información importante.

La utilización de esta tecnología es válida como lo demuestra este trabajo, su uso es imprescindible en nuestro país debido a la extensión y la morfología del mismo, evaluar este recurso radiacional desde la superficie tiene un alto costo económico y técnicamente prohibitivo para el presupuesto de las instituciones interesadas.

Es de vital importancia la creación de una organización encargada de la difusión del estado de la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, el conocimiento de dicho parámetro podrá reducir significativamente enfermedades relacionadas por sobreexposición, además de proporcionar información para saber cuáles son las medidas que la población debe tomar.

La metodología empleada permite elaborar mapas a escalas menores (1:4000000) semejantes a las empleadas en el Atlas Nacional de México, editado por el Instituto de Geografía.

En estos momentos de altos niveles de contaminación ambiental, de un fuerte deterioro del entorno, donde los valores de concentración de ozono en la estratosfera han disminuido en las regiones polares, se debe de considerar como una prioridad nacional implementar una red de monitoreo de la Radiación Solar Ultravioleta Banda "B", pues más de 100 millones de mexicanos, están expuestos a una mala administración del tiempo de exposición a este tipo de radiación, que representa un peligro para su salud.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Blumthaler, M., Ambach, Morys., Slomka, J. (1989) "Comparison of Robertson Berger UV Meters" *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. Warsaw*. pp. 230-245
- Carreño, V., Redondas, C., Cuevas, E. (2001) *Modelo de predicción del Índice Ultravioleta (IUV) del Instituto Nacional de Meteorología*. Observatorio Atmosférico de Izaña. INM. España.
- Cora, O., Echeandía F. (2007) Evaluación Y Pronostico De La Radiación Ultravioleta Banda "B" en las Ciudades De Lima, Arequipa, Cajamarca Y Puno Diciembre 2006 - Enero 2007 Servicio Nacional De Meteorología e Hidrología. Lima, Peru.
- Dave, J. V., (1978) "Effect of Aerosols on the Estimation of Total Ozone in an Atmospheric Column From the Measurement of its Ultraviolet Radiance," *Journal Atmospheric. Science.*, Vol. 35, pp. 899-911.
- Estrada, V. (1991) "Algunos comentarios cerca del cálculo de la Radiación Solar en México", *Informe Interno 0112*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México. pp.154-160
- Galindo, I. (1988) "Evaluation of the impact of some atmospheric elements on health" *Comunicaciones técnicas, Serie Investigación No. 94*. Instituto de Geofísica, UNAM. México.
- Galindo, I., Castro, S. Valdés M. (1991) "[Satellite Derived Solar Irradiance Over Mexico](#)" *Atmósfera*, Vol. 4 -3, UNAM. México. pp. 189 - 201
- Gavilanes, J. (1994) *Mediciones a 5100 m. de Altitud de la Irradiación Solar Global y Ultravioleta*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM, México 167 p.
- Huffman, R. (1992) *Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing*. Academic Press, California, EUA, 320 p.
- Koller, L. (1965) *Ultraviolet Radiation*. Wiley, NY, E.U.A.
- Krupa S., Kickert R., Jäger H. (1998) *Elevated ultraviolet (UV)-B radiation and agriculture* Springer - Verlag Berlin Heidelberg and Landes Bioscience. Georgetown, Tx., E.U.A. 296 p.
- Iqbal, M. (1983) *An Introduction to Solar Radiation* Academic Press. Ontario, Canada. 391 p.
- McKinlay, Diffey (1987) "A reference action spectrum for ultra-violet induced erythema in human skin". In *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations* (Edited by W.F. Passchier and B.F.M. Bosnjakovic), Elsevier, Amsterdam. pp83-87.

- Matthes, R., Sliney D. (1998) *Measurements of Optical Radiation Hazard*. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), International Commission on Illumination (CIE), Germany. 762 p.
- McPeters Richard., Bhartia P., Krueger Arlin., Herman Jay. (1996) *Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide*. NASA Technical Publication. Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland. 73 p.
- (1998) *Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide*. NASA Technical Publication. Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland. 70 p.
- Muhlia, A. (2000) *Apuntes de Solarimetría, curso para el personal del Servicio Meteorológico Nacional*. Instituto de Geofísica, UNAM. México D.F.
- (2006) Comunicación Personal
- Organización Meteorológica Mundial (WMO) (1994) "The International Programme on Chemical Safety (IPCS)" *Environmental health criteria*. Vol. 160 Geneva, Switzerland
- (WMO) (1996) *Guía de Instrumentación y Observaciones Meteorológicas*. Geneva, Switzerland
- Sánchez, F. (2006) "Consideraciones sobre la capa de ozono y su relación con el cáncer de piel". *Revista Médica de Chile* Vol. 134 Santiago de Chile, Chile. pp. 1185-1190.
- SIMAT, (1998) Sistema de Monitoreo Atmosférico.  
<http://www.sma.df.gob.mx/simat/homecontam.php>  
<http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnradiacion.htm>
- Simon, P. (1997) "Extraterrestrial Solar Irradiance in the Near and Medium UV Range", *Solar Ultraviolet Radiation, Modelling, Measurements and Effects*. NATO ASI Series, Vol. I:52, Springer-Verlag, Berlin, pp. 1-12
- Solar Light (2000) *501 UV-B iometer Version 1.0*. Manual de Usuario e Instalación. 34 p.
- Valdés, M. (1996) Caracterización de los flujos radiacionales de entrada y de sus variaciones temporales en la Ciudad de México Tesis de Doctorado. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. 85 p.
- (2005-2006) Comunicación personal.
- Zerefos, C., Bais, A. (1997) *Solar Ultraviolet Radiation*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg. New York, E.U.A. 335 p.

## **ANEXOS**

## Anexo 1. Procedimiento para el calculo del Índice Ultravioleta

Existen por lo menos dos métodos para elaborar el Índice Ultravioleta, el primero de ellos se puede realizar con mediciones en superficie, para formar una climatología y mediante ésta realizar un pronóstico de lo que probablemente puede incidir determinado día.

El segundo método es calculado, usando los datos de ozono pronosticados por un modelo de transferencia de radiación, cantidades de nubes pronosticadas y la elevación del sitio, en algunas ocasiones se puede incluir una variable para simular contaminación atmosférica, esta última sólo se aplica a ciudades cuyo problema de contaminación es significativo.

El Índice UV se estimará multiplicando el valor de la irradiancia efectiva ( $W/m^2$ ) por 40.0 (en los países donde se utiliza este método el valor resultante se redondea al valor entero más próximo).

De acuerdo al último de estos criterios resulta que 1 IUUV tiene una equivalencia de  $1/40.0$  de  $W/m^2$ , es decir:

$$0.025 W/m^2 = 1 IUUV$$

Cuadro 1. Tiempo Máximo de Exposición en una piel tipo II, calculados de acuerdo al valor del IUUV 1 a 10 con una dosis de  $210 J/m^2$  (Muhlia, 2000)

Índice UV	Equivalencia del IUUV en $W/m^2$	Tiempo de exposición (Te) Horas
1	0.025	2.333
2	0.050	1.167
3	0.075	0.778
4	0.100	0.583
5	0.125	0.467
6	0.150	0.389
7	0.175	0.333
8	0.200	0.292
9	0.225	0.259
10	0.250	0.233

Una de las medidas de precaución que se debe tomar al exponerse a cierta irradiación de ultravioleta Banda “B”, es estimar el tiempo mínimo de exposición antes de llegar a efecto negativos, este tiempo de exposición se puede estimar de la siguiente manera:

$$\text{dosis} = R \times T_e$$

donde:

R = irradiancia

$T_e$  = es el tiempo de exposición

Se obtiene la siguiente expresión:

$$T_e = \text{dosis} / R$$

Para el caso de la exposición de la piel humana a la Radiación Solar Ultravioleta Banda “B”, es conveniente usar los MED’s y los MED/hora para expresar la dosis y la irradiancia efectiva (R) respectivamente, de esta manera las unidades de  $T_e$  serán horas o fracciones de ésta. Sin embargo, en el ámbito internacional es cada vez más común el uso del Índice Ultravioleta para expresar la irradiancia efectiva a través de su equivalencia en  $\text{W/m}^2$ .

Los tiempos de exposición,  $T_e$ , que aparecen en la tabla anterior se calcularon con la misma fórmula que antes, para una dosis de  $210 \text{ J/m}^2$  y,  $R = \text{IUV en } \text{W/m}^2$ , dividiendo el resultado entre 3600 (para convertir en el sistema sexagesimal) para expresar este tiempo en horas.

Otras unidades con las anteriormente mencionadas que pueden ser de utilidad para el cálculo del Índice Ultravioleta, son los MED (Minimum Erythema Dose) o en su caso los MED/hora, estas unidades son utilizadas principalmente con fines médicos, pero obedecen estudios basados en la acción efectiva del eritema, o bien denominados Diffey Erythema Sensitivity Spectrum. (McKinlay-Diffey, 1987)

De esta manera:

$$\text{La irradiancia de 1 MED/hora} = 0.0583 \text{ W/m}^2$$

Cuya equivalencia en J/m<sup>2</sup> se puede asignar de la manera siguiente:

$$(1 \text{ MED/hora}) \times (1 \text{ hora}) = (0.0583 \text{ W/m}^2) \times (3600 \text{ s}) = 209.88 \text{ J/m}^2$$

El cual para fines prácticos es:

$$1 \text{ MED} = 210 \text{ J/m}^2$$

La equivalencia que se puede encontrar entre los MED/hora y el IUUV es:

$$1 \text{ MED/hora} = 0.0583 \text{ W/m}^2$$

Entonces:

$$0.0583 \times 40.0 = 2.332 \text{ IUUV}$$

Dicho de otra forma, la razón a la que llega la radiación ultravioleta Banda “B” es, R, dada en MED/hora, entonces el IUUV se calcula así:

$$\text{IUUV} = R \times 2.332$$

Aplicada a un ejemplo, si R = 5 MED/hora, entonces el IUUV será:

$$\text{IUUV} = 5 \times 2.332 = 11.66$$

$$\text{IUUV} = 12$$

Cuadro 2. Equivalencia en MED/hora para los 6 valores de Índice UV y el equivalente de MED a unidades de energía radiante para cada tipo de piel en Joules por metro cuadrado (J/m<sup>2</sup>).

Índice UV	Med/Hr	Tipos de Piel	MED	J/m <sup>2</sup>
0	0.0	Piel muy clara (extrasensitiva)	0.80	168
1	0.43	Piel clara (sensitiva)	1.00	210
2	0.86	Piel morena clara (normal)	1.25	262.5
3	1.29	Piel morena (normal)	1.56	328.1
4	1.72	Piel oscura (insensitiva)	1.95	410.2
5	2.14	Piel muy oscura (insensitiva)	2.44	512.7

En base al cuadro anterior se pueden obtener los tiempos de exposición antes de que se produzca un enrojecimiento (Eritema).

Cuadro 3. Tiempo máximo de exposición. (Minutos). (SIMAT, 1998)

Índice UV	Tipo de piel					
	1	2	3	4	5	6
0	Indefinido	Indefinido	Indefinido	Indefinido	Indefinido	Indefinido
1	112.0	140.0	175.0	218.7	273.5	341.8
2	56.0	70.0	87.5	109.4	136.7	170.9
3	37.3	46.7	58.3	72.9	91.2	113.9
4	28.0	35.0	43.8	54.7	68.4	85.5
5	22.4	28.0	35.0	43.7	54.7	68.4
6	18.7	23.3	29.2	36.5	45.6	57.0
7	16.0	20.0	25.0	31.2	39.1	48.8
8	14.0	17.5	21.9	27.3	34.2	42.7
9	12.4	15.6	19.4	24.3	30.4	38.0
10	11.2	14.0	17.5	21.9	27.3	34.2
11	10.2	12.7	15.9	19.9	24.9	31.1
12	9.3	11.7	14.6	18.2	22.8	28.5
13	8.6	10.8	13.5	16.8	21.0	26.3
14	8.0	10.0	12.5	15.6	19.5	24.4
15	7.5	9.3	11.7	14.6	18.2	22.8

Cuadro 4. Efectos producidos por diferentes dosis de radiación Ultravioleta Banda “B” en una piel tipo II. (Koller, 1965)

Dosis en MED's (aproximadas)	1	2.5	5	10
Grado de Eritema	Dosis mínima que provoca un Eritema levemente perceptible	Intensa, produce quemaduras moderadas	Provoca quemaduras dolorosas	Provoca aparición de quemaduras

Cuadro 5. Peligro de exposición y acciones de protección del Índice Ultravioleta (NOAA, 1995)

Peligro de exposición	Índice UV	Acciones de protección
Mínimo	0, 1, 2	Aplice en la piel protector solar (SPF) 15
Bajo	3,4	Protector solar (SPF) 15 y ropa protectora (sombrero ala ancha)
Moderado	5,6	(SPF) 15, ropa protectora y lentes protectores de radiación solar Ultravioleta (Banda “A”, “B”)
Alto	7,8,9	(SPF) 15, ropa protectora, lentes protectores y tomar precauciones para evitar exposición solar entre 10am a 4 pm.
Muy alto	Mayor a 10	(SPF) 15, ropa protectora, lentes protectores y no exponerse a los rayos solares de 10am a 4pm

Cuadro 6. Tipo de Piel y efectos a la exposición solar ultravioleta. (SIMAT, 1998)

Tipo de Piel	Pigmentación	Efectos de exposición	Apariencia
PIEL II	Clara	Se quema con facilidad.	Raramente se logra un mínimo bronceado.
PIEL III	Morena clara	Se quema con moderación.	Bronceado gradual.
PIEL IV	Morena oscura	Se quema mínimamente.	Siempre se broncea.
PIEL V	Oscura	Raramente se quema.	Bronceado profundo.
PIEL VI	Muy oscura	No se quema.	Piel con profunda pigmentación.

## **Anexo 2. Principales definiciones Radiométricas.**

Uno de los más importantes trabajos de la División 6 del CIE, es definir y estandarizar los términos radiométricos (Matthes, 1998).

Las cantidades radiométricas pueden ser utilizadas en el registro de la radiación solar incluida la parte fotobiológica, enseguida se explican los más importantes.

- *Irradiancia.* (Dosis constante en Superficie) y *Exposición Radiante.* (Dosis de superficie) Son unidades específicas referidas al poder energético que incide sobre un plano. La unidad más comúnmente utilizada son los  $W/m^2$  y los  $J/m^2$  respectivamente.  $1 W = 1 J/s$ .
- *Tasa de flujo y Flujo.* Ambos términos utilizados en estudios muy sofisticados y específicos, donde la dosis de la superficie interna con retrodispersión es considerada. Estos términos son usados de manera correcta y con frecuencia en estudios teóricos de distribución de dosis de flujo, y donde la fotoquímica a nivel de tejido molecular es mayor como resultado de los eventos de dispersión que ocurren en éste. Desafortunadamente estos términos son frecuentemente mal empleados refiriéndose como irradiancia o exposición radiante ya que las unidades son las mismas ( $W/m^2$  y  $J/m^2$  respectivamente).
- *Radiancia.* (Irradiancia por ángulo sólido) Es una cantidad muy importante utilizada específicamente en la fuente. Esta cantidad limita por la facultad de las lentes y la reflectividad óptica dentro de la concentración de la fuente de energía (luz). Por ejemplo, una lámpara de xenón tiene una muy alta radiancia, y esta energía puede ser enfocada para producir una alta irradiancia sobre un objetivo específico. En contraste a una lámpara de tubo fluorescente que tiene mucho menos radiancia, esta energía no puede ser enfocada para lograr una alta concentración. La radiancia es muy útil específicamente para homologar la

seguridad de las lámparas ya que son potencialmente un riesgo sobre todo en la retina.

- *Intensidad Radiante.* (Poder por ángulo sólido) Es usado para indicar como es realmente la fuente de energía (luz). Aunque es útil específicamente en reflectores, esto normalmente tiene un uso muy limitado en fotobiología. Las unidades son W/sr (Estereorradianes).
- *Cantidades Espectrales.* (Unidades por longitud de onda) Son utilizadas para especificar la energía, poder o irradiancia por intervalos de longitud de onda. Cuando se calcula la dosis fotobiológicamente efectiva cantidad espectral puede ser multiplicada por el espectro de acción. Ejemplos: “poder radiante espectral”, “irradiancia espectral”, “exposición radiante espectral”, etc.