

# Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

Trabajo final de Licenciatura en Tecnología Ambiental 2017

**Carla Sofía Stadler**

**Director: Dr. Elian A. Wolfram**

**Codirector: Dr. Facundo Carmona**



## Índice de contenido

Índice de figuras .....	3
Índice de tablas.....	6
Índice de abreviaturas y siglas .....	7
Resumen.....	9
Objetivos .....	12
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos .....	12
1. Introducción .....	14
1.1. Descripción de la atmósfera .....	14
1.1.1. <i>Distribución de la temperatura y capas</i> .....	15
1.1.2. <i>Componentes de la atmósfera</i> .....	16
1.2. Ozono estratosférico.....	16
1.2.1. <i>Formación y destrucción del ozono</i> .....	17
1.2.2. <i>Agujero de ozono</i> .....	19
1.2.3. <i>Distribución de ozono</i> .....	20
1.3. Radiación electromagnética y atmósfera .....	21
1.3.1. <i>Regiones del espectro electromagnético</i> .....	21
1.3.2. <i>Radiación solar e interacción con la atmósfera</i> .....	22
1.4. Radiación Ultravioleta.....	26
1.5. Índice UV.....	27
1.6. Efectos de la radiación UV y protección .....	29
1.6.1. <i>Medidas de protección hacia la radiación UV</i> .....	32
1.7. Radiación UV e índice UV en Argentina .....	33
1.8. Detección satelital de ozono e índice UV.....	35
2. Materiales y métodos .....	39
2.1. Zona de estudio .....	39
2.2. Cálculo del índice UV y dosis eritémica .....	40
2.3. Influencia de la presencia de nubes sobre el índice UV: Factor de modificación de nube .....	41
2.4. Tiempo de exposición necesario para inducir eritema y clasificación de tipos de pieles .....	42
2.5. Datos de sensores utilizados.....	45
2.5.1. <i>Sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument)</i> .....	45
2.5.2. <i>Sensor CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System)</i> .....	45

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

2.6. Procesado y análisis de la información .....	46
3. Resultados y discusión.....	49
3.1. Ajuste del modelo paramétrico .....	49
3.2. Caracterización del ozono .....	50
3.3. Caracterización del índice UV .....	51
3.4. Cálculo del Factor de Modificación de Nube (CMF) .....	53
3.5. Cuantificación de casos de IUV atenuados según su clasificación.....	56
3.6. Análisis del verano 2015-2016 para la ciudad de Mar del Plata .....	60
4. Conclusiones .....	66
5. Anexos.....	69
5.1. Anexo I .....	69
5.1.1. <i>Efectos cutáneos</i> .....	69
5.1.2. <i>Efectos oculares</i> .....	70
5.1.3. <i>Efectos sobre el sistema inmunológico</i> .....	70
5.2. Anexo II.....	71
6. Bibliografía.....	73

## Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Variación de la presión y temperatura con respecto a la altura. Primeras capas que constituyen la atmósfera. (Fuente: <a href="http://www.extramarks.com">www.extramarks.com</a> ) .....	14
<i>Figura 2.</i> Ubicación (derecha) y distribución (izquierda) de la concentración de ozono en la estratósfera en partes por millón (ppm) con respecto a la altura. (Fuente: NASA, <a href="http://www.disc.gsfc.nasa.gov">www.disc.gsfc.nasa.gov</a> ) .....	17
<i>Figura 3.</i> Perfil típico de concentración de ozono (moléculas/cm <sup>3</sup> de aire) y balance entre producción y destrucción. Se observa que la concentración máxima se encuentra alrededor de los 23 km (Fuente: Ojeda, 2006 (6)) .....	18
<i>Figura 4.</i> Los valores de la columna total de ozono obtenidos a partir de datos satelitales (TOMS), indican que existe una circulación meridiana en sentido a los polos que transporta este gas desde las regiones tropicales de producción hasta las regiones polares donde se amula (Fuente: Ojeda, 2006 (6)).....	20
<i>Figura 5.</i> Circulación atmosférica interhemisférica y ubicación de las celdas. (Fuente: Ojeda, 2006 (6)).....	21
<i>Figura 6.</i> Distribución anual de ozono en distintas latitudes. En los trópicos es más estable que en los polos, donde la diferencia es pronunciada (Fuente: Ojeda, 2006 (6)) .....	21
<i>Figura 7.</i> Regiones del espectro electromagnético de acuerdo a la longitud de onda $\lambda$ y la frecuencia $\nu$ . Se observa que la región de la radiación ultravioleta comprende las longitudes de onda entre 100 y 400 nm, aproximadamente. ....	22
<i>Figura 8.</i> Bandas de absorción de componentes atmosféricos y ventanas atmosféricas. La curva de línea representa el espectro de un cuerpo negro a 5250°C, el área amarilla es la radiación solar al tope de la atmósfera y el área roja es la radiación que llega a la superficie terrestre. Los valles que se observan se deben a la absorción por parte de los componentes atmosféricos señalados en la figura, mientras que la diferencia sobrante entre las áreas se debe a la dispersión de Rayleigh, la cual disminuye hacia el infrarrojo.....	23
<i>Figura 9.</i> Ángulos formados entre la posición de la Tierra y del Sol. El ángulo cenital solar es $\theta_z$ . ....	24
<i>Figura 10.</i> Balance de flujo radiativo entre atmósfera y superficie y algunos de los procesos que intervienen en la interacción atmósfera radiación. ....	25
<i>Figura 11.</i> Categorías de exposición a la radiación UV y medidas de protección de acuerdo al UVI (Fuente: WHO, 2003 (9)). ....	28
<i>Figura 12.</i> Comunicación del Servicio Meteorológico Nacional sobre el UVI, en función de la hora, del día 2/2/2017 para la ciudad de Buenos Aires (Fuente: SMN). ....	29
<i>Figura 13.</i> Balance del tiempo necesario de exposición en función del valor del índice UV. La zona azul oscuro, representa un déficit de dosis de radiación UV para la producción de vitamina D; la zona azul clara representa que partes del cuerpo es necesario tener expuesto para producir suficiente vitamina D sin causar daños; la zona roja produce daños (Fuente: McKenzie, 2008 (10)). ....	30

<i>Figura 14.</i> Mapa satelital de la media mensual del índice UV para el mes de enero y julio, calculado con una resolución geográfica de 0,5° x 0,5°. (Fuente: Luccini, 2006 (24)) .....	33
<i>Figura 15.</i> Variación anual del índice UV de acuerdo a distintas concentraciones de ozono (250, 275, 300 y 325 UD) para la ciudad de Mar del Plata, provincia de Buenos Aires. Se observa que los valores máximos se encuentran en los meses de diciembre, enero y febrero. ....	35
<i>Figura 16.</i> Localización de las ciudades estudiadas, Buenos Aires y Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina Google Maps.....	39
<i>Figura 17.</i> Tiempo de exposición para los tipos de pieles I (amarillo), II (naranja) y III (azul) sin protección (SPF=1) para distintos valores de índice UV.....	43
<i>Figura 18.</i> Curvas de tiempos de exposiciones en minutos necesarios para la producción de eritema para tipos de pieles I, II y III, según distintos valores de índice UV y factores de protección (SPF): sin factor de protección (azul), SPF 10 (roja), SPF 20 (verde) y SPF 30 (violeta). ....	44
<i>Figura 19.</i> Gráfico de dispersión del índice UV modelado entre las 12 y 15 horas para condiciones de cielo despejado, en función del índice UV del sensor CERES entre las 12 y 15 horas, para la ciudad de Mar del Plata durante el periodo 2004 a 2016. ....	50
<i>Figura 20.</i> Gráfico de la columna total de ozono (línea azul) obtenido del sensor OMI (satélite Aura) para las ciudades de a) Mar del Plata y b) Buenos Aires para el año 2015. La línea roja representa el valor medio de ozono calculado desde la base de datos del OMI para el periodo 2004 - 2015 y la sombra gris representa la desviación estándar.....	51
<i>Figura 21.</i> Índice UV calculado con el modelo paramétrico (Ec. 20) utilizando la base de datos de columna total de ozono (azul) del sensor OMI, para las ciudades de a) Mar del Plata y b) Buenos Aires, desde noviembre del 2015 a febrero del 2016. La línea roja representa el valor medio del IUV para cielo despejado calculado con el modelo paramétrico para el periodo 2004 -2015 y la sombra gris representa la desviación estándar.....	52
<i>Figura 22.</i> Índice UV del CERES en función del Factor de Modificación de Nube para los meses diciembre, enero y febrero en la ciudad de a) Mar del Plata y b) Buenos Aires.....	53
<i>Figura 23.</i> Número de días despejados, con Factor de Modificación de Nube entre 0,9 y 1, para diciembre, enero y febrero de 2004 a 2016 para a) Mar del Plata y b) Buenos Aires.....	54
<i>Figura 24.</i> Promedio del Factor de Modificación de Nube para los meses de diciembre, enero y febrero desde el 2004 al 2016 para las ciudades de a) Mar del Plata y b) Buenos Aires. ....	56
<i>Figura 25.</i> Número de casos para los meses de diciembre, enero y febrero obtenidos a partir del modelo paramétrico (barra derecha) y del sensor CERES (barra izquierda) para la ciudad de Mar del Plata (columna izquierda: a, b y c) y Buenos Aires (columna derecha: d, e y f) desde diciembre 2004 a febrero 2016. Las categorías “Moderado y	

bajo”, “Alto 2” y “Muy alto 2” corresponden a los datos del CERES que fueron atenuados y que corresponden a categorías superiores obtenidos con el modelo..... 57

*Figura 26.* Índice UV modelado (rojo), índice UV del sensor CERES (azul) y atenuación debido a nubes (barra verde) para la ciudad de Mar del Plata desde diciembre 2015 a febrero del 2016, con un error de  $\pm 10\%$ . La atenuación se calculó con la Ecuación 18. .... 61

*Figura 27.* Valores de dosis eritémica ( $\text{KJ/m}^2$ ) calculados con el índice UV modelado (línea roja) y con el índice del CERES (línea azul) desde diciembre 2015 a febrero 2016 para la ciudad de Mar del Plata. .... 62

*Figura 28.* Valor de la cantidad de veces en la que la dosis eritémica ( $\text{KJ/m}^2$ ) calculada a partir del CERES supera a la dosis eritémica mínima, MED (Tabla 2), para los tipos de pieles I (naranja), II (azul) y III (amarillo). .... 63

*Figura 29.* Valor de la cantidad de veces en la que la dosis eritémica ( $\text{KJ/m}^2$ ) calculada a partir del índice modelado supera a la dosis eritémica mínima, MED (Tabla 2), para los tipos de pieles I (naranja), II (azul) y III (amarillo). .... 64

*Figura 30.* Efectos cutáneos: A) Carcinoma de células basales B) Carcinoma de células escamosas (Fuente: WHO, 2003 (9))..... 69

*Figura 31.* Efecto cutáneo: Carcinoma maligno (Fuente: WHO, 2003 (9)). .... 70

## Índice de tablas

<i>Tabla 1.</i> Definición de los tipos básicos de piel para la población europea. Se incluyen en la tabla los valores MED que corresponden a los distintos tipos de piel. Para este trabajo se utilizaron los correspondientes a tipos de pieles I a III. Fuente: Lovengreen et. al., 2002.....	41
<i>Tabla 2.</i> Clasificación y descripción de los distintos tipos de pieles, según Fitzpatrick (31). Para este trabajo se utilizaron las dosis para tipos de pieles I a III.....	42
<i>Tabla 3.</i> Representación porcentual de los días despejados ( $0,9 < CMF < 1$ ) para los meses de diciembre, enero y febrero para las ciudades de Mar del Plata y Buenos Aires. ....	55
<i>Tabla 4.</i> Representación porcentual de la atenuación del índice UV para los meses de diciembre, enero y febrero durante los años 2004/2016 para la ciudad de Mar del Plata y Buenos Aires.....	58
<i>Tabla 5.</i> Representación porcentual de cada clasificación del índice UV modelado y del medido con el CERES para la ciudad de Mar del Plata y Buenos Aires durante el periodo 2004/2016. ....	59
<i>Tabla 6.</i> Diferencia de porcentajes de los casos encontrados entre el índice UV modelado y el índice UV del sensor CERES para la ciudad de Mar del Plata y Buenos Aires y para cada clasificación del índice, durante los meses de diciembre, enero y febrero desde el 2004 al 2016.....	60

## Índice de abreviaturas y siglas

$\varepsilon(\lambda)$ : espectro de acción eritémica

$\delta$ : declinación de la Tierra

$\rho$ : densidad

$\Pi$ : flujo entrante de radiación en condiciones de cielo real

$\nu$ : frecuencia

$\phi$ : latitud

$\lambda$ : longitud de onda

$\Pi_0$ : flujo entrante de radiación en condiciones de cielo despejado

$\rho_{\text{cloud}}$ : atenuación de radiación por nubes

$\mu_0$ : coseno del ángulo cenital

Ar: argón

c: velocidad de la luz

CERES: Clouds and the Earth's Radiant Energy System

CH<sub>4</sub>: metano

CMF: factor de modificación de nube

CO: monóxido de carbono

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono

CTO: columna total de ozono

E: energía

F<sub>s</sub>: flujo de radiación solar

g: gravedad

H: ángulo horario

h: constante de Planck

H<sub>2</sub>: hidrogeno molecular

$I(\lambda)$ : Irradiancia espectral en superficie

IUV: índice ultravioleta

MED: dosis eritémica mínima

n: número de moles

N<sub>2</sub>: nitrógeno molecular

Ne: neón

NO<sub>2</sub>: dióxido de nitrógeno

O<sub>2</sub>: ozono molecular



O<sub>3</sub>: ozono

OMI: Ozone Monitoring Instrument

p: presión

R: constante universal de gases

R: distancia

RAF: factor amplificado de radiación

SO<sub>2</sub>: dióxido de azufre

SPF: factor de protección solar

SW: longitud de onda corta

T: temperatura absoluta

t: tiempo

T<sub>0</sub>: termino de transmisión troposférica

t<sub>E</sub>: tiempo de exposición

TOA: tope de la atmósfera

UV: Ultravioleta

V: volumen

z: altura

θ<sub>z</sub>: ángulo cenital

## Resumen

La radiación ultravioleta (UV) es ampliamente reconocida como la principal causa del cáncer de piel. Nueve de cada diez casos de cáncer de piel son causados por la radiación UV solar (1). Nuestra piel absorbe las radiaciones ultravioletas emitidas por el Sol a lo largo de toda nuestra vida. Estas radiaciones se acumulan y a largo plazo causan daños irreversibles.

Se calcula que al cumplir los 18 años, una persona ya se expuso al 80% del total de las radiaciones solares que absorberá en toda su vida (2). Es por esto que es importante evitar el daño solar desde el nacimiento. Por lo tanto, el cáncer de piel es una enfermedad prevenible en su mayor parte. Las estrategias para reducir la exposición de la radiación UV reduce el riesgo de cáncer de piel. Esto es de particular relevancia para los tipos de piel pálida, que son más susceptibles a la carcinogénesis producida por la radiación UV y los efectos de fotoenvejecimiento del Sol.

Los tres pilares de la fotoprotección se basan en la modificación del comportamiento que conduce a un exceso de exposición a la radiación UV, el uso de ropa y gafas de protección y, por último, el uso de cantidades adecuadas de protector solar como un complemento de estas estrategias de protección. Sin embargo, cualquier programa de educación tiene que sustentarse en el conocimiento de la línea base estadística que define el riesgo potencial de un determinado fenómeno. En este caso, la educación ambiental relacionada con el diseño de estrategias de fotoprotección necesita cuantificar los niveles de radiación existentes en superficie en una determinada región a distintas escalas temporales y correlacionar esta situación con el comportamiento de las personas en cuanto a las actividades que se realizan al aire libre y al uso de las medidas de fotoprotección.

Para este trabajo se consideraron las ciudades argentinas de Buenos Aires y Mar del Plata como zonas de estudio, debido a que ambas cuentan con una gran población (llegando a aproximadamente tres millones y 600 mil habitantes, respectivamente) y, además, esta última es la ciudad de mayor movimiento turístico en verano de la costa bonaerense, con una cantidad importante de personas expuestas a la radiación UV. El periodo de estudio comprende desde octubre del año 2004 a mayo de 2016, sin embargo se centró en los meses de diciembre, enero y febrero por ser los más concurridos y cuando la exposición es mayor. Considerando la importancia del estudio de la radiación UV, en el presente trabajo se calculó el *Índice UV (IUV)* en situación de cielo despejado a partir del modelo paramétrico de Madronich (3), con ajuste en sus coeficientes para las condiciones locales elegidas a trabajar. El IUV es un indicador de la radiación UV en superficie, para la obtención de sus valores se trabajó con el sensor OMI del satélite Aura perteneciente a la NASA. De dicho instrumento se procesaron los datos de columna total de ozono que proporcionan y, además, se compararon los valores obtenidos del modelo paramétrico con valores de IUV que el sensor CERES brinda, debido a que en el primer caso se calcula para condiciones de cielo despejado y sin aerosoles mientras que el segundo es en condiciones reales. Durante los meses de verano se encontraron índices con valores alto, muy alto y extremadamente alto, según la clasificación de la Organización Mundial de la Salud (4), por lo tanto es esencial tomar las medidas de fotoprotección necesarias para evitar daños en la salud.

De los resultados obtenidos se observa que el modelo con los nuevos coeficientes calculados se ajusta a los valores del índice del sensor CERES para condiciones de cielo despejado y el error de la nueva ecuación corresponde al  $\pm 10\%$  proveniente del modelo original de Madronich (3). Además, se calculó la atenuación por presencia de nubes sobre el valor del IUV, encontrándose que puede disminuir hasta un 80% en relación a los encontrados en condiciones de cielo despejado. Por último, se calculó la dosis eritémica para distintos tipos de pieles, tanto para los valores obtenidos de índice UV con el modelo paramétrico como con los valores del sensor CERES, pudiendo apreciar que puede llegar a valores de hasta 15 veces mayores a la dosis mínima requerida para la producción de eritema para el tipo de piel I, esto es durante los meses de verano en la costa de la provincia de Buenos Aires, específicamente Mar del Plata.

## **Agradecimientos**

Principalmente quiero agradecer a mi familia, por todo el apoyo que me brindaron siempre, por darme la oportunidad de estudiar lo que me gusta y llegar a ser quién soy hoy.

A Elian Wolfram y Facundo Carmona, mis directores, por su paciencia, apoyo y ayuda en esta última etapa de mi carrera y por guiarme en la realización de este trabajo.

A Facundo Orte, quien fue un director más tanto por el apoyo que me brindó durante este trabajo como por enseñarme a procesar los datos y guiarme en su realización.

A mis amigos de siempre y los que me dio la facultad, por estar siempre conmigo, por tantas horas compartidas y hacer de la vida universitaria una experiencia única.

A mis profesores que me formaron como profesional y siempre estuvieron predispuestos a lo largo de mi carrera.

A la División Atmósfera del CEILAP y al IHLLA por tener las puertas abiertas siempre y recibirme cuando lo necesité y, por último, a JICA por el financiamiento del proyecto SAVER-Net en el cual se enmarca esta tesis de investigación.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Estudiar y cuantificar con datos de satélite la radiación solar ultravioleta que llega a superficie, identificando casos de riesgo para las personas en las ciudades de Buenos Aires y Mar del Plata.

### **Objetivos específicos**

- Conocer las misiones satelitales con las cuales se va a trabajar: OMI/NASA y CERES/NASA.
- Comprender y aprender a utilizar los modelos paramétricos para poder calcular niveles de radiación UV a partir de los datos obtenidos por los dos puntos anteriores.
- Adquirir nuevas herramientas informáticas para el procesamiento y análisis de datos (MATLAB).
- Calcular variaciones estacionales medias (climatologías) de los niveles de radiación solar UV utilizando bases de datos satelitales y modelos.
- Desarrollar rutinas en MATLAB para el cálculo de las climatologías mencionadas.
- Cuantificar casos donde los valores de IUV alcanzan las categorías bajo, moderado, alto, muy alto y extremo en las localidades elegidas.
- Evaluar el riesgo potencial asociado a la sobreexposición a la radiación solar UV en superficie, considerando los fototipos de piel presentes en las localidades de interés y las actividades realizadas al aire libre.
- Determinar la disminución del riesgo potencial de la radiación UV producido por las nubes.



## Capítulo 1

# *INTRODUCCIÓN*

## 1. Introducción

A continuación se describirá el marco teórico necesario para realizar este trabajo y entender cuestiones tanto fisicoquímicas como de salud sobre la radiación UV.

### 1.1. Descripción de la atmósfera

La atmósfera es una envoltura gaseosa que se encuentra alrededor de la Tierra, retenida por la acción de la gravedad. Tiene su densidad máxima cerca de la superficie terrestre decreciendo con la altura hasta volverse indistinguible del gas interplanetario, aunque no existe un límite definido. Se pueden distinguir diferentes regiones con amplias diferencias en cuanto a sus características, como así también de los fenómenos físicos y químicos que ocurren en cada una de ellas.

La presión en cada nivel depende del peso de todo el aire que se encuentra por encima, por unidad de área. El peso está dado por

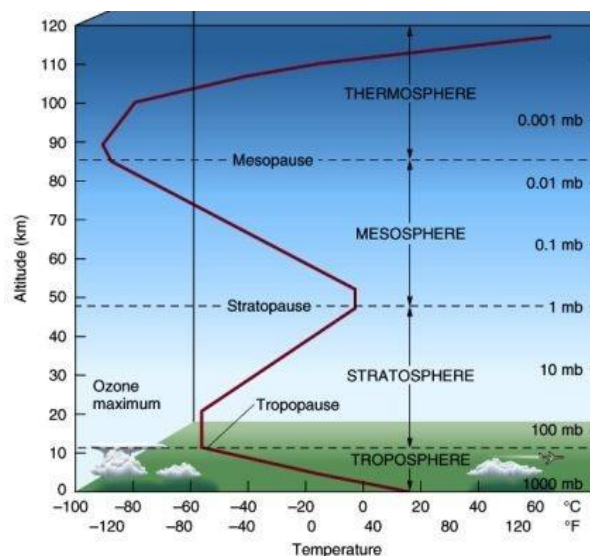
$$\int_z^{\infty} g \rho dz \quad [1]$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $g$  la aceleración de la gravedad, valor que varía levemente con la altura, y  $z$  es la altura. De esta forma, se puede observar que el 90% de la masa está contenida en los primeros 20 km (100 mb) y el 99.9% de la masa es contenida en los primeros 50 km (1 mb) (5).

La atmósfera puede considerarse esencialmente como un fluido en equilibrio hidrostático, es decir que para cada capa infinitesimal se cumple la siguiente relación:

$$-dp = g \rho dz \quad [2]$$

Esta relación es llamada ecuación hidrostática, donde  $p$  es la presión. En la Figura 1 se muestra la variación de la presión y temperatura con respecto a la altura.



**Figura 1.** Variación de la presión y temperatura con respecto a la altura. Primeras capas que constituyen la atmósfera. (Fuente: [www.extramarks.com](http://www.extramarks.com))

Se puede observar que el aire, a una temperatura y presión dada, se comporta como una mezcla de gases ideales. Para presiones cada vez más bajas, el comportamiento se aproxima cada vez más a un gas ideal. Entonces, para cada componente de la atmósfera se cumple la ecuación de gases ideales:

$$p_i V = n_i RT \quad [3]$$

Donde  $p_i$  es la presión parcial del componente  $i$ ,  $V$  es el volumen,  $n_i$  es el número de moles del componente  $i$ ,  $R$  es la constante universal de gases y  $T$  es la temperatura absoluta. Como la composición química en los primeros 100 km es constante (excepto para el vapor de agua y algunos gases trazas), se denomina homósfera, mientras que, por encima, el resto de la atmósfera se denomina heterósfera debido a sus variaciones en la composición (5).

#### *1.1.1. Distribución de la temperatura y capas*

De acuerdo a la Figura 1, la temperatura decrece a una tasa de 5 a 7 grados por kilómetro. Este gradiente varía con el tiempo y el lugar, incluso ocurre ocasionalmente que en capas superficiales la temperatura se incrementa con la altura, lo cual se denomina inversiones.

La primera capa es la tropósfera y es donde ocurren los fenómenos climáticos y contiene aproximadamente tres cuartos de la masa total de aire. Su límite superior está dado por un cambio repentino del gradiente de temperatura: deja de decrecer y comienza a aumentar lentamente. Este límite se denomina tropopausa, cuya altura depende también del tiempo y del lugar geográfico, siendo mayor en el ecuador que en los polos y se encuentra entre los 7 y 17 km. Su temperatura para latitudes medias es entre -50°C y -55°C.

La siguiente región muestra un incremento gradual de la temperatura, alcanzando un máximo cerca de los 0°C a los 50 km. Esta región es llamada estratósfera y su límite superior es la estratopausa, en donde la temperatura cae nuevamente hasta la región mesósfera. La temperatura alcanza un mínimo de -100°C a los 85 km, esta región se denomina mesopausa. A partir de esta altura, la temperatura se incrementa constantemente en la región termósfera. A los 500 km, la temperatura puede alcanzar valores entre 400°C y 2000°C, dependiendo de la hora del día, actividad solar y latitud.

La razón física de la distribución de la temperatura se debe a la absorción de radiación. En las capas más altas, las reacciones de ionización y disociación producen altas temperaturas en la termósfera. El máximo en la estratopausa está asociado a la presencia de ozono, de lo cual se hablará más adelante. La temperatura del suelo se debe a la absorción de una gran parte de la radiación solar que alcanza este nivel.

A grandes alturas, se encuentra la ionósfera. Su nombre se debe a que la radiación solar de longitudes de onda cortas produce una considerable cantidad de átomos y moléculas ionizadas y por lo tanto electrones libres. Sus distribuciones son diferentes de acuerdo a las condiciones diurnas o nocturnas. Dentro de esta región se distinguen otras cuatro, denominadas D, E,  $F_1$  y  $F_2$ . La región D sólo se observa de día, mientras que la  $F_1$  desaparece durante la noche. Por último, cerca de los 500 km, se encuentra

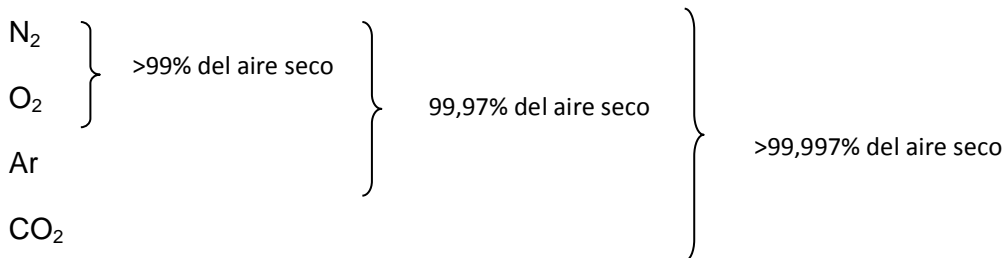


la exósfera, en la cual se produce la transición entre la atmósfera terrestre y el gas interplanetario (5).

### 1.1.2. Componentes de la atmósfera

El aire de la atmósfera puede ser considerado como una composición de una mezcla de gases que se los suele llamar aire seco, agua en sus tres estados físicos y partículas sólidas o líquidas en suspensión, llamados aerosoles atmosféricos.

Los principales compuestos del aire seco son (5)



Estos compuestos son permanentes, es decir que el tiempo de vida en la atmósfera es suficientemente grande.

El nitrógeno es el gas más abundante y representa un 78% del total. Esto se debe a la gran estabilidad química, lo cual lo hace suficientemente inerte. Es incorporado a la cadena trófica por bacterias, mineralizado, incorporado por plantas y luego por un proceso de desnitrificación mediante bacterias, es devuelto a la atmósfera (6).

El oxígeno es el segundo elemento más abundante (21%). Los organismos vivos lo utilizan para respirar, como fuente de energía, oxidándolo. Por el contrario, el proceso de reducción del dióxido de carbono, mediante la fotosíntesis de las plantas, devuelve a la atmósfera el oxígeno utilizado. Este componente interviene en todos los procesos oxidativos de los minerales de la corteza terrestre (6).

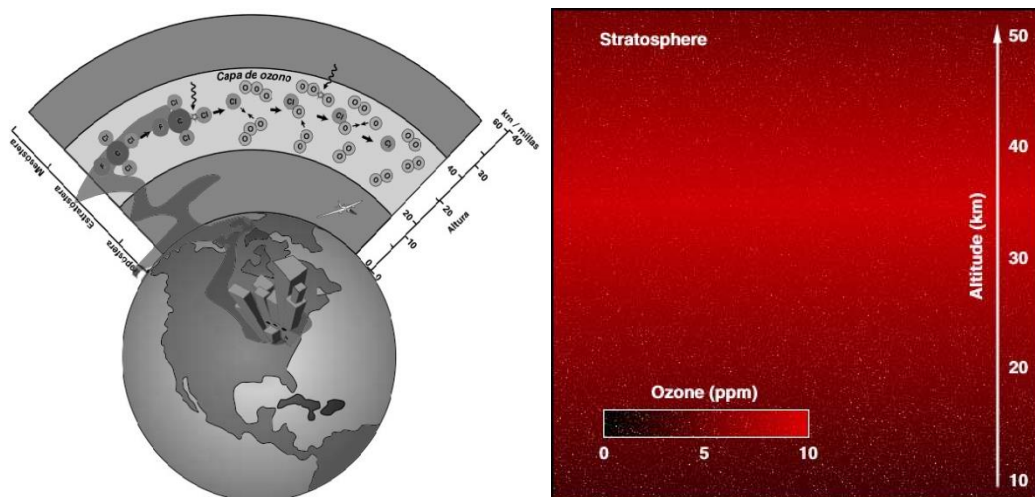
El dióxido de carbono, aunque se encuentra en una proporción menor, es fundamental para los procesos que ocurren en la atmósfera. Una de las razones es porque interviene en el efecto invernadero, debido a que presenta bandas de absorción en el infrarrojo, zona en la cual emite la superficie de la Tierra. Su concentración se ve fuertemente afectada por las actividades antropogénicas, teniendo un efecto directo en el clima. Interviene en el proceso de meteorización química de rocas ígneas (6).

Además de los componentes nombrados, existen otros componentes minoritarios que representan alrededor del 0,003%. A pesar de esto, son muy importantes en los procesos químicos de la atmósfera (6). Ejemplos de estos componentes son: Ne, CO,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $O_3$ , del cual hablaremos en la siguiente sección.

## 1.2. Ozono estratosférico

El ozono  $O_3$  es una molécula relativamente inestable compuesta por tres átomos de oxígeno. Absorbe en longitudes de onda entre los 170 nm y 370 nm, es decir en la región del ultravioleta de la radiación emitida por el Sol. Por lo tanto, si el ozono no estaría presente en la atmósfera, esta radiación alcanzaría la superficie terrestre y la

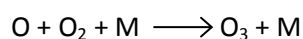
vida no sería de la manera que se conoce. La absorción produce un incremento en la temperatura de la estratósfera, llegando a un máximo de 0°C aproximadamente (5). La ubicación de la capa de ozono y la distribución de la concentración se observa en la Figura 2.



**Figura 2.** Ubicación (izquierda) y distribución (derecha) de la concentración de ozono en la estratósfera en partes por millón (ppm) con respecto a la altura. (Fuente: NASA, [www.disc.gsfc.nasa.gov](http://www.disc.gsfc.nasa.gov))

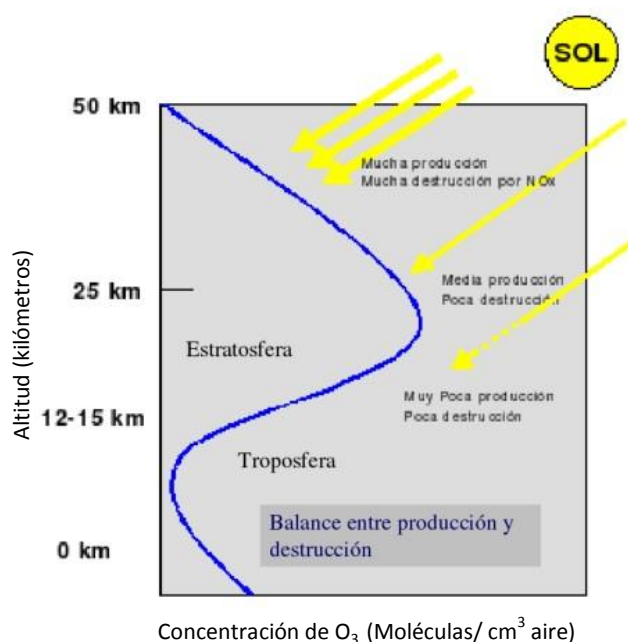
### 1.2.1. Formación y destrucción del ozono

La formación del ozono tiene lugar mediante procesos fotoquímicos. Las principales reacciones que ocurren son las siguientes (7).



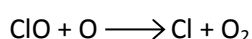
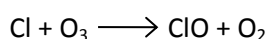
M es cualquier sustancia inerte, como  $\text{N}_2$ . La función que tiene M en esta reacción exotérmica es absorber parte del exceso de energía liberada y evitar la descomposición espontánea de la molécula de  $\text{O}_3$ . La energía que no absorbe M se libera en forma de calor. Cuando las moléculas de M regresan por si mismas al estado basal, liberan más calor al entorno (7).

Aunque la concentración de ozono en la estratósfera es muy baja, es suficiente para filtrar la radiación UV y actúa como escudo debido a que este tipo de radiación puede generar efectos graves en la salud. En la Figura 3 se observa un perfil de ozono medio y se muestra el balance de ozono.



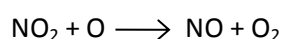
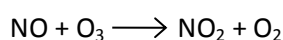
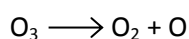
**Figura 3.** Perfil típico de concentración de ozono (moléculas/cm<sup>3</sup> de aire) y balance entre producción y destrucción. Se observa que la concentración máxima se encuentra alrededor de los 23 km (Fuente: Ojeda, 2006 (8))

La formación y destrucción del ozono por procesos naturales es un equilibrio dinámico que mantiene constante su concentración en la estratósfera. Sin embargo, desde mediados de la década de 1970, comenzó la preocupación por los efectos nocivos de ciertos clorofluorocarbonos (CFC) en la capa de ozono. Los más comunes son CFCI<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub> y C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>. Como son pocos reactivos, los CFC se difunden con lentitud en la estratósfera sin sufrir cambios. Luego se descomponen por medio de radiación UV y forman átomos de cloro, los cuales son muy reactivos y reaccionan de la siguiente manera.



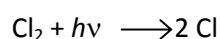
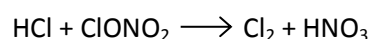
Un átomo de Cl es capaz de destruir más de 100 mil moléculas de O<sub>3</sub> antes que alguna otra reacción lo elimine. Debido a las consecuencias que pueden tener los CFC emitidos a la atmósfera, muchos países reconocieron que es urgente disminuir o eliminar por completo su producción (7).

Otro grupo de compuestos capaces de destruir el ozono de la estratósfera son los óxidos de nitrógeno, representados por NO<sub>x</sub>, como NO y NO<sub>2</sub>. Estos compuestos provienen de los gases expulsados por los aviones supersónicos que vuelan a grandes alturas, como así también los procesos naturales y otros antropogénicos. Los NO<sub>x</sub> son descompuestos fotoquímicamente a óxido nítrico NO, que también destruye la capa de ozono de la siguiente manera (7).



### 1.2.2. Agujero de ozono

A mediados de la década de 1980 comenzaron a acumularse evidencias de que en el invierno anterior se había formado “un agujero en la capa de ozono” del polo Sur, donde la cantidad de ozono había disminuido en casi 50%. Durante el invierno, en la estratósfera se forma una corriente de aire que rodea a la Antártida y que se conoce como “torbellino polar”. El aire queda atrapado y se vuelve extremadamente frío durante la noche polar, lo cual favorece la formación de partículas de hielo denominadas nubes polares estratosféricas. Estas nubes actúan como un catalizador heterogéneo al proporcionar una superficie para las reacciones en las que el HCl, proveniente de la Tierra, y el nitrato de cloro se convierten en moléculas de cloro más reactivas (primera reacción). Al comienzo de la primavera, la luz solar divide el cloro molecular en sus correspondientes átomos de cloro (segunda reacción), destruyendo el ozono como se demostró anteriormente.



La situación es menos grave en la región del Ártico debido a que, con mayor temperatura, el torbellino no persiste demasiado tiempo. Estudios han demostrado que los niveles de ozono en esta región disminuyeron entre 4 y 8% en los años 2010/2011. Las erupciones volcánicas inyectan grandes cantidades de partículas de polvo y aerosoles de ácido sulfúrico en la atmósfera las cuáles pueden tener la misma función catalítica que los cristales de hielo en el polo Sur y por eso se piensa que el agujero de ozono en el Ártico aumentará en los próximos años (7).

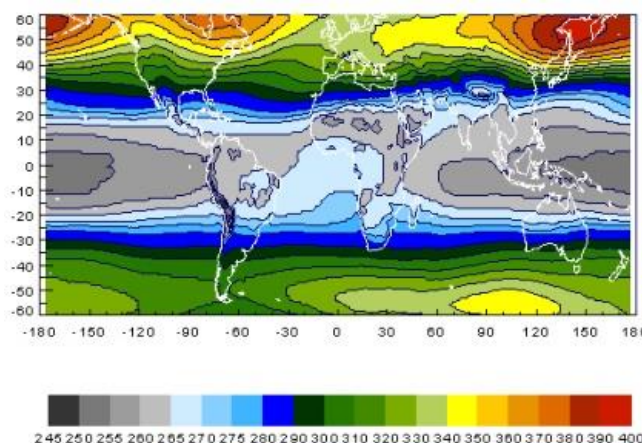
En los últimos años, la extensión geográfica y estacional del agujero de ozono en la Antártida ha variado significativamente año tras año, dependiendo de las condiciones meteorológicas. En el Ártico, el agotamiento del ozono es menor, sin embargo también hay una amplia variación año tras año. Con el cambio climático global, se espera que la temperatura de la estratósfera en el Ártico continúe decreciendo, generando que la probabilidad de agotamiento de ozono sea mayor debido a la química heterogénea en la superficie de las nubes polares. Por cada grado que se reduzca la temperatura se espera que se reduzcan 15 UD (Unidades Dobson, unidad que se utiliza para medir concentración de ozono).

El agotamiento de ozono en regiones polares tiene un impacto en el agotamiento del ozono de latitudes medias. Por ejemplo, el 50% de la reducción del ozono en latitudes medias del sur, se lo atribuye a la exportación del aire bajo en ozono proveniente de la Antártida.

Estudios demuestran que la tasa de reducción del ozono en la parte superior de la estratósfera ha disminuido globalmente. Estos cambios son consistentes con los cambios totales de cloro estratosférico. Los cambios de la circulación en la atmósfera tienen una importante influencia en la variabilidad del ozono, especialmente en la baja estratósfera, razón por la cual se ve un incremento de ozono en el hemisferio norte en los últimos años (9).

### 1.2.3. Distribución de ozono

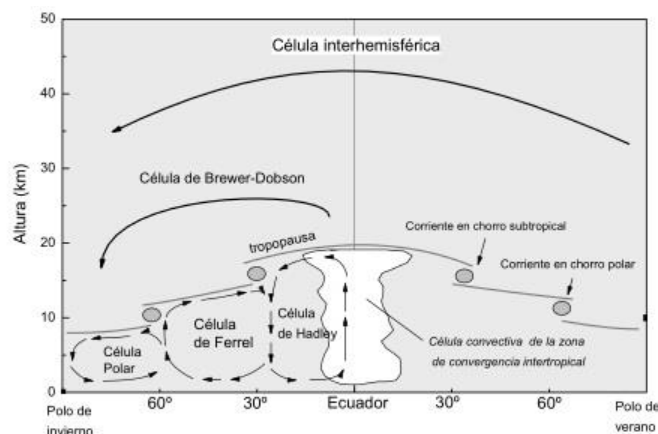
Observando la Figura 4, se puede contemplar que los mínimos de ozono total tienen lugar en el cinturón tropical, donde la radiación ultravioleta es mayor y por lo tanto la producción de ozono atómico también lo es. Brewer y Dobson postularon, en los años 50, un modelo conceptual basado en una célula meridiana hemisférica única con ascendencias en las regiones del cinturón de convergencia intertropical (ZCIT) y descensos en las regiones polares durante el invierno (Fig. 4). Este modelo está aceptado en la actualidad, aunque aún se sigue investigando en ello (8).



**Figura 4.** Los valores de la columna total de ozono obtenidos a partir de datos satelitales (TOMS), indican que existe una circulación meridiana en sentido a los polos que transporta este gas desde las regiones tropicales de producción hasta las regiones polares donde se acumula (Fuente: Ojeda, 2006 (8)).

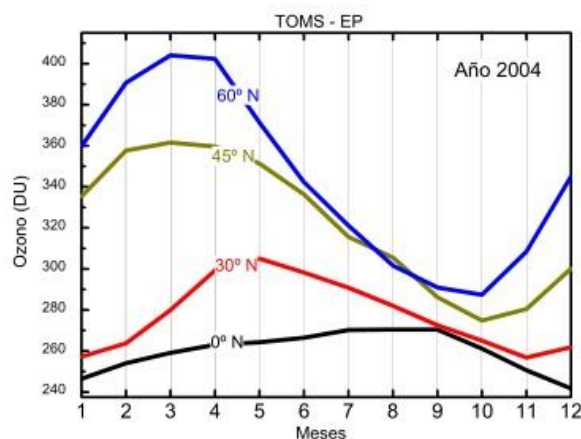
La pequeña magnitud de la velocidad del aire en sentido meridiano (según la célula) es uno de los principales obstáculos a la hora de su estudio. La circulación en la estratósfera es horizontal, ya que los movimientos verticales son dificultados por el gradiente vertical superadiabático, es decir que la temperatura aumenta en función de la altura. Además, es básicamente zonal siguiendo los círculos de los paralelos con alguna actividad de ondas de largo periodo superpuesta al flujo básico. La aproximación geostrófica del viento, donde el gradiente de presión entre las áreas de alta y baja presión se equilibra con la fuerza debida a la aceleración de Coriolis, falla en las regiones próximas al Ecuador, en donde la ecuación presenta una discontinuidad y también donde la influencia del rozamiento es importante. Sin embargo es válida en la estratósfera donde las perturbaciones son de escala planetaria. El viento geostrófico debe corregirse de los efectos diabáticos de intercambio de calor no contemplados, aunque puede utilizarse sin correcciones en periodos comprendidos entre una y dos semanas. Frente al viento zonal el transporte meridiano es muy lento: mientras que una partícula de aire invierte 7-10 días para dar una vuelta a la Tierra en dirección oeste-este, necesita varios meses para ir del Ecuador hasta los polos (8).

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 5.** Circulación atmosférica interhemisférica y ubicación de las celdas. (Fuente: Ojeda, 2006 (8))

En el caso del ozono, es producido en las regiones tropicales en la alta estratósfera y es transportado a las regiones polares durante el invierno y la primavera, mientras existe gradiente hemisférico y la actividad de ondas planetarias es intensa, y cesa en verano. Por esto, los máximos en latitudes medias y altas ocurren en primavera, y a partir de ahí el ozono disminuye lentamente por procesos químicos hasta que comienza el próximo invierno. De este modo se obtiene una gran variabilidad en los polos, como se muestra en la Figura 6, sin embargo durante todo el año la Tierra está cubierta por una capa de ozono aproximadamente homogénea (8).



**Figura 6.** Distribución anual de ozono en distintas latitudes. En los trópicos es más estable que en los polos, donde la diferencia es pronunciada (Fuente: Ojeda, 2006 (8))

### 1.3. Radiación electromagnética y atmósfera

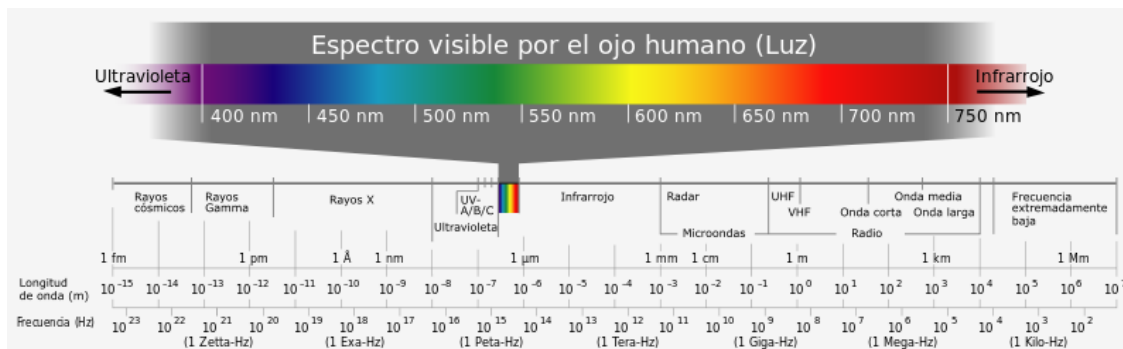
A continuación se hará una descripción general de la radiación electromagnética y sobre su interacción con la atmósfera terrestre.

#### 1.3.1. Regiones del espectro electromagnético

En la Figura 7 se muestra las distintas regiones del espectro electromagnético correspondientes a diferentes longitudes de onda  $\lambda$  y frecuencias  $\nu$  (5).



## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 7.** Regiones del espectro electromagnético de acuerdo a la longitud de onda  $\lambda$  y la frecuencia  $\nu$ . Se observa que la región de la radiación ultravioleta comprende las longitudes de onda entre 100 y 400 nm, aproximadamente.

Ambas magnitudes se relacionan de acuerdo a la siguiente ecuación

$$c = \nu\lambda \quad [4]$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $\approx 3 \times 10^8$  m/s). Las ondas electromagnéticas transportan energía que puede ser absorbida por la materia, produciendo distintos efectos. La absorción puede ocurrir sólo en una cierta cantidad, es decir que está cuantizada, proporcional a la frecuencia de la radiación. Por lo tanto

$$h\nu = hc/\lambda \quad [5]$$

con  $h$  como la constante de Planck, con un valor de  $6.62 \times 10^{-34}$  Js. Un cuanto de la energía es llamado fotón. La absorción de radiación ocurre por procesos elementales, cada uno involucra la absorción de un fotón y el salto de un estado energético a uno mayor en la molécula. Para que esto último ocurra, la energía debe ser la suficiente o mayor a la necesaria, causando un cambio en la energía de rotación y vibración de la molécula. La absorción puede producir la disociación de una molécula o la ionización de un átomo o molécula. En todos los casos, la diferencia de energía y la frecuencia de radiación absorbida, están relacionadas de la siguiente manera

$$\Delta E = h\nu \quad [6]$$

Cuando no ocurre ionización o disociación, solo ciertas frecuencias pueden ser absorbidas, correspondientes a los valores de  $\Delta E$  entre diferentes estados de la molécula (5).

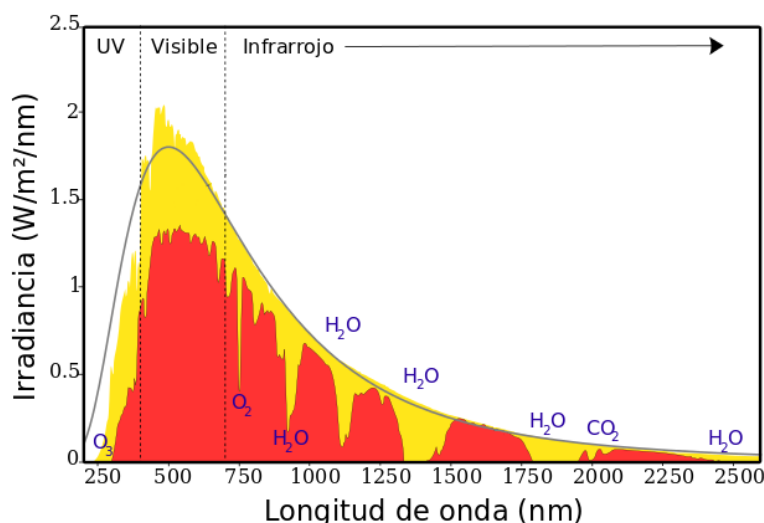
### 1.3.2. Radiación solar e interacción con la atmósfera

Excepto para algunas débiles líneas de excitación del  $O_2$  (es decir, la transición de la molécula de un estado de menor energía a uno de mayor) y de absorción por parte del  $O_3$ , la absorción en la región del visible de la radiación solar es muy baja. Sin embargo, se vuelve muy importante en la región del ultravioleta ( $<370$  nm), por lo tanto no llega a la superficie terrestre (5).

La radiación solar de longitudes de ondas más cortas, es decir de mayor energía, es rápidamente absorbida por átomos y moléculas que son ionizadas o disociadas. Las longitudes de onda más largas (menor energía), penetran más la atmósfera hasta que

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

la concentración de especies gaseosas es suficiente para ser capaz de absorberla (5). En la Figura 8 se puede observar el espectro solar y las longitudes de onda en las que absorbe algunos de los componentes presentes en la atmósfera.



**Figura 8.** Bandas de absorción de componentes atmosféricos y ventanas atmosféricas. La curva de línea representa el espectro de un cuerpo negro a  $5250^\circ\text{C}$ , el área amarilla es la radiación solar al tope de la atmósfera y el área roja es la radiación que llega a la superficie terrestre. Los valles que se observan se deben a la absorción por parte de los componentes atmosféricos señalados en la figura, mientras que la diferencia sobrante entre las áreas se debe a la dispersión de Rayleigh, la cual disminuye hacia el infrarrojo.

El espectro solar alcanza un máximo entre los 450 y 480 nm que corresponde al color verde-azulado y se puede dividir en varias zonas. Por debajo de los 10 nm se encuentran los rayos X, los cuales no llegan a la superficie terrestre siendo totalmente absorbida por el oxígeno en la parte alta de la atmósfera (por encima de los 60-70 km). Entre los 280 y 315 nm se encuentra la radiación ultravioleta B, UVB, dañina para los seres vivos y responsable de la reacción eritemática de la piel cuando es sometida a la radiación solar. La mayor parte es absorbida por la capa de ozono. La radiación entre los 315 y 400 nm pertenece a la radiación ultravioleta A, UVA, menos dañina que la anterior pero también responsable de la reacción eritemática de la piel aunque es menor medida. Entre los 400 y 750 nm se encuentra el espectro visible, región de la cual el ojo es sensible y por eso también es llamada radiación fotosintéticamente activa. Por encima de los 750 nm, la región pertenece al espectro infrarrojo, la cual puede dividirse en cercano y lejano. Desde un punto de vista energético, el ultravioleta y longitudes de onda menores representa el 8,2% de la energía solar; el visible un 45,4% y el infrarrojo un 46,4% (6).

Considerando la temperatura del Sol ( $\sim 6000\text{ K}$ ) y su diámetro (1390960 km), la potencia emitida tiene un valor de aproximadamente  $4 \times 10^{23}\text{ kW}$  y es dispersada para todas las direcciones. Ahora si se tiene en cuenta la energía que atraviesa un metro cuadrado de superficie a la distancia Sol-Tierra, se obtiene la constante solar con un valor de  $1360\text{ W/m}^2$ , aproximadamente. Este valor no es constante a lo largo del año, debido a que la Tierra traza una elipse en torno al Sol y por lo tanto en ciertas ocasiones está más cerca (perihelio) y recibe más energía que en otras en donde se encuentra más lejos (afelio) y recibe menos energía (6).



De acuerdo con la ley inversa del cuadrado para la distribución de flujo como función de la distancia, el flujo solar a una distancia  $R$  en términos del flujo a la distancia Sol-Tierra  $R'$ , vale

$$F_s(R) = S \left( \frac{R'}{R} \right)^2 \quad [7]$$

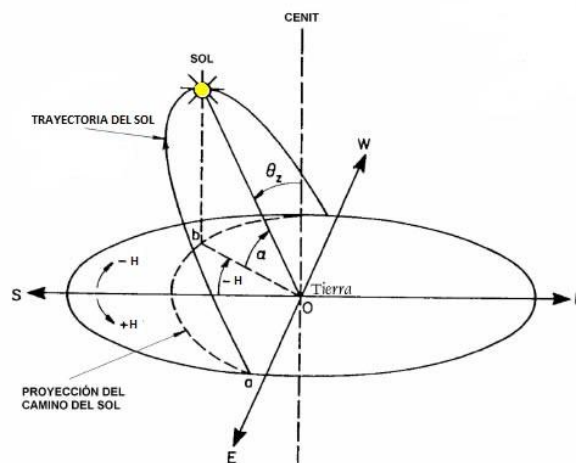
Dado que la distancia con respecto a las posiciones extremas varía aproximadamente un 1,7%, la radiación entre estos dos puntos extremos varía un 3,4%. Por otra parte, es necesario conocer el flujo que atraviesa la unidad de área horizontal

$$F = F_s(R) \cos \theta_z \quad [8]$$

Siendo  $F_s$  el flujo normal a la distancia  $R$  y  $\theta_z$  el ángulo cenital, es decir el ángulo que forma la normal a la superficie horizontal y los rayos solares. Este ángulo es función del punto de la Tierra que se tome como referencia, de la latitud y posición del Sol. Por el hecho de que el eje de rotación de la Tierra está inclinado un cierto ángulo, oblicuidad, respecto del plano donde se mueve, eclíptica, y por el hecho de que la Tierra rota sobre sí misma en el movimiento diurno, la posición del Sol respecto de un observador en la superficie de la Tierra varía a lo largo del día y a lo largo del año. El ángulo  $\theta_z$  se puede expresar de la siguiente manera

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H \quad [9]$$

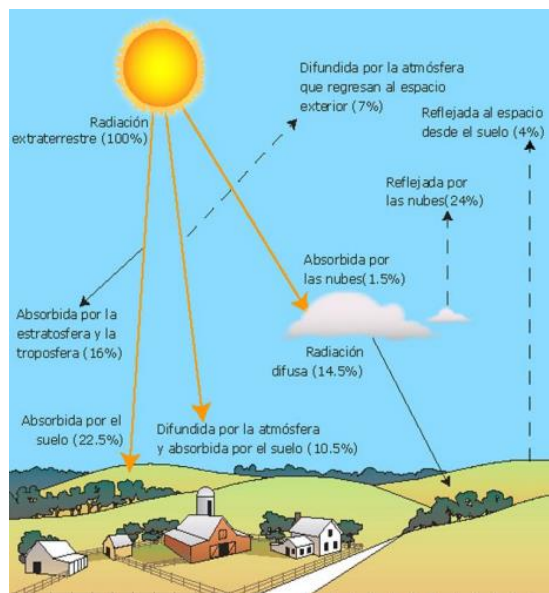
Siendo  $\phi$  la latitud,  $\delta$  la declinación de la Tierra y  $H$  el ángulo horario. La latitud  $\phi$  marca la posición del observador sobre la superficie y la declinación  $\delta$  marca la posición del Sol respecto del plano del Ecuador a lo largo del año. Este ángulo es igual a cero en los equinoccios, alcanza su valor máximo en el solsticio de verano ( $23,5^\circ$ ) y su valor mínimo en el solsticio de invierno ( $-23,5^\circ$ ). El ángulo horario  $H$  fija la posición del Sol respecto del meridiano, valiendo cero cuando el Sol pasa por el mismo y alcanza su máximo y mínimo en el ocaso y al atardecer respectivamente (6).



**Figura 9.** Ángulos formados entre la posición de la Tierra y del Sol. El ángulo cenital solar es  $\theta_z$ .

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

La atmósfera es un factor importante al considerar los flujos de radiación entre el Sol y la superficie terrestre y entre ésta y los satélites. En el espacio exterior no hay pérdida de radiación por interferencia con ningún medio material, sólo atenuación debida a la ley del cuadrado de la distancia.



**Figura 10.** Balance de flujo radiativo entre atmósfera y superficie y algunos de los procesos que intervienen en la interacción atmósfera-radiación.

Los gases y aerosoles que componen la atmósfera tienen un efecto triple sobre la radiación (Fig. 10):

- **Absorción:** se produce una transferencia de energía de la radiación a los constituyentes atmosféricos. Este mecanismo implica absorción de energía de determinada o determinadas longitudes de onda. Desde este punto de vista los absorbentes más eficaces de radiación solar son las moléculas de agua, de dióxido de carbono y ozono. Por otro lado, existen regiones del espectro en las que no se produce absorción por parte de la atmósfera, son las denominadas ventanas atmosféricas. Por lo tanto, la teledetección sólo va a ser en principio viable en estas ventanas. Las principales aparecen en la Figura 8.
- **Dispersión:** es una difusión (reflección y/o refracción) de la radiación producida por partículas de la atmósfera y gases. Se puede considerar tres mecanismos principales:
  - **Dispersión de Rayleigh,** ocurre cuando la longitud de onda es mucho mayor que el tamaño de los objetos responsables de la dispersión. Afecta por tanto a las longitudes de onda más cortas y causa el color azul del cielo.
  - **Dispersión de Mie,** cuando la longitud de onda es del mismo orden de magnitud que los objetos dispersores (vapor de agua, polvo y aerosoles). Afecta a todas las longitudes de onda del visible.
  - **Dispersión no selectiva,** cuando la longitud de onda es mucho menor que los objetos, la producen gotas de agua en la atmósfera (niebla o nubes).

- Emisión que, por su temperatura, tendrá un máximo en el infrarrojo térmico. Los datos que llegan al satélite incluyen emisión tanto de la superficie como de las diferentes capas de la atmósfera (10).

En el caso tratado en este trabajo, interesa la interacción de la radiación UV con el ozono encontrado en la estratósfera, descrito en la sección 1.2.

#### **1.4. Radiación Ultravioleta**

Como se dijo anteriormente, la radiación ultravioleta UV constituye una parte del espectro electromagnético emitido por el Sol, el cuál es dividido en UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) y UVC (100-280 nm). Tanto la radiación UVC como el 90% de la UVB son absorbida por moléculas como vapor de agua, dióxido de carbono, oxígeno y ozono. En el caso de la radiación UVA, la atmósfera no tiene una influencia significativa, por lo tanto la radiación que llega a la superficie de la Tierra corresponde a este rango y a una pequeña parte de la UVB (11).

Los niveles de radiación UV que penetran la atmósfera y logran llegar a la superficie terrestre dependen de los siguientes factores (11):

- Elevación del Sol: varía de acuerdo con la hora del día y las estaciones del año. A mayor elevación, mayores niveles de radiación UV.
- Latitud: más cerca de regiones ecuatoriales, mayores niveles.
- Cobertura de nubes: los niveles de radiación en un día cubierto suelen disminuir por la presencia de nubes. Sin embargo, a causa de la reflexión que estas producen, los niveles alcanzados en la superficie terrestre pueden aumentar.
- Altitud: a mayor altura, mayores niveles de radiación debido a que la capa de atmósfera es más delgada y por lo tanto absorbe una menor proporción. Cada 1000 metros de altura, los niveles de radiación crecen de un 10% a 12%.
- Ozono: varía durante el año e incluso durante el día.
- Reflexión del suelo: depende del tipo de suelo y sus características.
- Presencia de polvo, neblina y varios compuestos orgánicos.

La concentración de ozono sufre cambios de acuerdo a la posición geográfica y las estaciones a lo largo del año. Esto influye en la radiación UV que logra llegar a la superficie, siendo máxima en aquellos lugares donde el ángulo cenital es cero y disminuye a medida que el ángulo crece. Así, las dosis diarias y anuales más altas tienden a ocurrir en los trópicos y las más bajas ocurren en las regiones polares, llegando a un valor de cero en invierno. Existen dos desviaciones importantes del patrón general: la primera ocurre durante la primavera en el periodo donde aparece el agujero de ozono en la Antártida y la radiación UV puede alcanzar valores similares a latitudes medias y bajas. En la segunda desviación, la cantidad de radiación UV puede ser muy alta en la región del Altiplano en América del Sur. También puede alcanzarse valores relativamente altos en latitudes altas como el continente Antártico. En verano en latitudes medias (45°), la dosis de radiación UV que produce eritema es comparable a la de los trópicos, debido a los días más largos. Sin embargo en invierno, es menor al 10% de la dosis en verano. En el hemisferio sur, la diferencia entre verano e invierno de la dosis de radiación UV es más marcada, debido a la disminución de la distancia entre la órbita terrestre y del Sol, las diferencias de

concentraciones de ozono de norte a sur y a la baja contaminación. Esta amplia diferencia estacional genera graves problemas en la salud humana, desde deficiencia de vitamina D (invierno) hasta quemaduras de sol y melanomas (verano) (12).

Las nubes constituyen el factor más importante en cuanto a la radiación UV que logra llegar a la superficie terrestre y que puede limitar la detección de ozono. Aunque las nubes generalmente atenúan la radiación, estudios confirman que se produce un aumento de radiación UV en superficie bajo cielos parcialmente nublados (13) (14) (15) (16). Una capa de nube sobre una superficie de hielo o nieve incrementa significativamente la dosis de UV, debido al aumento de la dispersión múltiple (9).

Los aerosoles y gases traza presentan un importante impacto en la radiación UV, principalmente por aquellos que tienen una fuerte absorción. Estudios han demostrado que en áreas urbanas, los aerosoles y contaminantes del aire, como  $O_3$ ,  $SO_2$  y  $NO_2$ , pueden atenuar significativamente la radiación UV (17) (18) (19) (20). Tanto aerosoles como gases traza originados en la quema de biomasa, pueden penetrar en la estratósfera y afectar las reacciones químicas que se producen en esta zona de la atmósfera. Sin embargo, se podría considerar que la absorción de estos compuestos provee una protección al ecosistema; por el otro lado, algunos aerosoles dispersan la radiación UV y por lo tanto tiene un efecto en la dosis que recibe la superficie terrestre (9).

La radiación UV en la superficie ha cambiado durante las últimas tres décadas a tasas que varían temporal y espacialmente. Estos cambios son atribuidos a los factores que se analizaron anteriormente. La irradiancia de radiación UVB no solo depende de los puntos nombrados, sino también de la variabilidad de emisión solar y de la geometría del sistema solar (12).

### 1.5. Índice UV

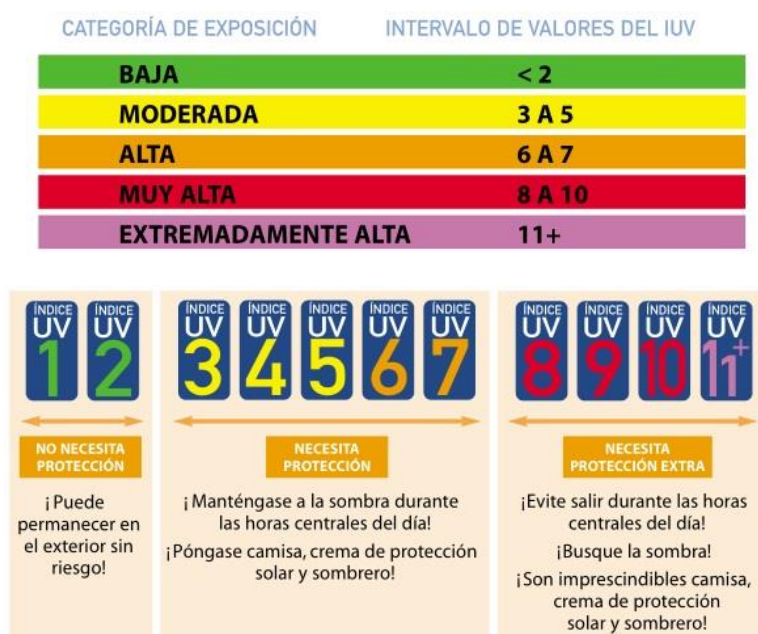
El índice UV solar mundial (IUV) es una medida de la intensidad de la radiación UV solar en la superficie terrestre. El IUV se expresa como un valor superior a cero. Cuanto más alto es este valor, mayor es la probabilidad de lesiones cutáneas y oculares, las que a su vez toman menos tiempo en producirse. Existe una fuerte asociación entre el pronunciado incremento de la incidencia de cánceres de piel en poblaciones de piel clara de todo el mundo y la exposición excesiva a la radiación UV solar. Además, puede estar relacionado con el uso de fuentes artificiales de radiación UV. Como se ha nombrado, los hábitos personales de exposición al sol constituyen el factor de riesgo más importante de alteraciones ocasionadas por la radiación UV. De ahí que el IUV es un vehículo importante para aumentar la concientización de la población sobre los riesgos de la exposición excesiva y para advertir sobre la necesidad de utilizar medidas de protección (11).

Este instrumento educativo debe utilizarse como parte integral de un programa para informar a la población sobre la protección solar y los riesgos a la salud y sus efectos, así como también para cambiar hábitos y comportamiento con respecto a la exposición. El IUV debe dirigirse a grupos vulnerables y con exposición alta, como los niños y turistas (11).

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

Es necesario que la información sobre el índice UV proporcione al menos el valor máximo diario y sea aproximado al número entero más próximo. Sin embargo, cuando la nubosidad es variable, el IUV debe notificarse mediante el intervalo de valores. Es conveniente que las predicciones sobre el índice tengan en cuenta los efectos de las nubes sobre la transmisión de la radiación UV a través de la atmósfera, por eso cuando se comunica el valor del índice, debe aclararse si es en condiciones de cielo despejado o nublado (11).

Los valores del índice UV se dividen en categorías de exposición, como se muestran en la Fig. 11. Los servicios de información meteorológicos pueden informar sobre la categoría de exposición, el valor o intervalo de valores del IUV o ambos (11).



**Figura 11.** Categorías de exposición a la radiación UV y medidas de protección de acuerdo al UVI (Fuente: WHO, 2003 (11)).

En el caso del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (21), el IUV se comunica de ambas formas (Fig. 12).



**Figura 12.** Comunicación del Servicio Meteorológico Nacional sobre el IUV, en función de la hora desde las 5 am hasta las 8 pm, del día 24/11/2017 para la ciudad de Buenos Aires (Fuente: SMN).

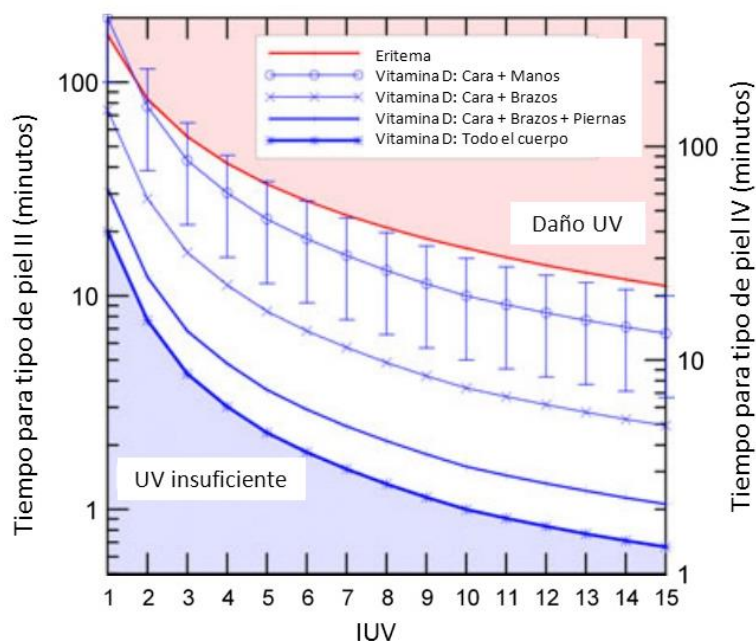
### 1.6. Efectos de la radiación UV y protección

Pequeñas dosis de radiación UV que llegan a la piel son esenciales para la producción de vitamina D, la cual juega un rol importante en el desarrollo esquelético, funciones inmunológicas y la formación de glóbulos rojos. Además, la vitamina D, tiene efectos de protección contra osteoporosis, artritis, hipertensión, diabetes y algunos tipos de cáncer (22). La radiación UV artificial es utilizada como tratamiento para enfermedades severa, incluyendo raquitismo, psoriasis y eczema bajo supervisión médica. Sin embargo, la sobreexposición puede causar daños a la piel, ojos y sistema inmune, aunque su influencia depende de varios factores como el tipo de piel, dieta, etc. (23). Ejemplos claros de los posibles efectos a exposiciones excesivas de radiación UV son las quemaduras de Sol y bronceado. En largos periodos, puede provocar cambios degenerativos en células, tejidos y vasos sanguíneos, lo que conduce al envejecimiento prematura de la piel (11).

Entonces, la radiación UV presenta beneficios en cuanto a la producción de vitamina D pero también provoca lesiones en la piel y severas enfermedades. Es decir, existe una fuerte asociación entre eritema y melanomas como así también un incremento en evidencias que insuficiente radiación ultravioleta provoca deficiencias en vitamina D, lo cual conlleva problemas de salud. Por lo tanto una alta irradiancia UV en verano contribuye al cáncer de piel, mientras que una baja irradiancia en invierno contribuye a problemas asociados a la deficiencia de vitamina D. En la siguiente figura se presentan los tiempos de exposición necesarios según el IUV y dos tipos de pieles sin factor de protección.



## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 13.** Balance del tiempo necesario de exposición en función del valor del índice UV. La zona azul oscuro, representa un déficit de dosis de radiación UV para la producción de vitamina D; la zona azul clara representa que partes del cuerpo es necesario tener expuesto para producir suficiente vitamina D sin causar daños; la zona roja produce daños (Fuente: McKenzie, 2008 (12)).

En esta figura se observa cuáles son los tiempos de exposición para la producción de eritema y para lograr una síntesis de vitamina D suficiente para un dado IUV y un tipo de piel (las clasificaciones se expondrán más adelante). El área roja representa los tiempos en los cuales se produce lesiones en la piel para distintos índices; el área azul representa los tiempos de exposición donde la radiación UV es insuficiente para la producción de vitamina D con todo el cuerpo expuesto y por último, las otras tres curvas representan los tiempo de exposición necesarios para una producción de vitamina D óptima con distintas partes del cuerpo expuestas. Se puede observar que para el tipo de piel II los tiempos de exposición para la producción de vitamina D para un mismo índice UV son mayores que para el tipo de piel IV. Además, se requiere más tiempo a medida que el área del cuerpo expuesta es menor y a su vez se acerca más a la curva de producción de eritema.

Los efectos crónicos incluyen dos grandes problemas en la salud: cáncer de piel y cataratas. Por año hay entre dos a tres millones de casos de cáncer de piel no melanoma y aproximadamente 130 mil casos de cáncer de piel melanoma a nivel global, 66 mil casos mueren por melanomas u otros tipos de cáncer de piel. En el caso de cataratas, entre 12 a 15 millones de personas quedan ciegas y un 20% se debe a la exposición solar, un número que aumenta a medida que disminuye la capa de ozono atmosférica (11) (23).

Según predicciones de modelos computacionales, una disminución de la densidad del ozono estratosférico en un 10% podría aumentar en 300 mil los casos de cáncer de piel no melánico, en 4500 los de cáncer de piel melánico y en 1,6 a 1,75 millones de casos de cataratas en todo el mundo (23).

Dos grupos de personas son afectadas en gran medida, las mujeres embarazadas y los niños. En el primer caso, la piel de las embarazadas sufre algunos cambios que se relacionan con las variaciones hormonales propias de la gestación. Es importante considerar que estos cambios son fisiológicos, es decir que no deben ser considerados enfermedades. La hiperpigmentación (oscurecimiento de la piel) generalizada o localizada es uno de los cambios que se observan con mayor frecuencia en aproximadamente el 90% de las embarazadas, sobre todo en las mujeres de piel más oscura. Aunque estos cambios estarían relacionados con las modificaciones hormonales y mejoran y tienden a desaparecer con el parto o cerca del mismo, todos empeoran con la exposición solar. En un 30% de las pacientes se extiende por más tiempo. Debido a que durante la gestación no es aconsejable la utilización de cremas blanqueadoras y tratamientos despigmentantes, es muy importante extremar las medidas de fotoprotección tanto con relación a la exposición a la luz solar como a las distintas fuentes artificiales como lámparas o camas solares (2).

En el caso de los niños, su sistema natural de protección no está desarrollado y en ellos el daño solar es máximo y acumulativo, de manera que una adecuada protección desde la infancia disminuirá el riesgo de desarrollar cáncer en la edad adulta. El cáncer de piel puede prevenirse limitando la exposición solar mejorando los hábitos solares. La infancia, es un periodo de la vida en el cual es frecuente una exposición solar prolongada, debido sobre todo a los hábitos de juego de los niños. Algunos estudios indican que a los 18 años, una persona ya se expuso al 80% del total de las radiaciones solares que recibirá en toda su vida. La promoción de hábitos de protección solar en la infancia enseñando los efectos beneficiosos y perjudiciales del sol y como utilizar los fotoprotectores, tiene una importancia capital en la prevención del cáncer de piel (2).

La piel tiene mecanismos naturales de fotoprotección que son:

- Hiperqueratosis: engrosamiento del estrato corneo (la capa más externa de la piel).
- Melanogénesis: síntesis y distribución de melanina.
- Determinados sistemas enzimáticos, algunas vitaminas y oligoelementos que actúan para desactivar los radicales libres.
- Sistemas de reparación del ADN, a través de diversas enzimas.

En los niños, estos mecanismos no están completamente desarrollados por la escasa presencia de melanina, la capa cornea más fina y permeable que la de los adultos, y por lo tanto requieren una adecuada fotoprotección artificial.

Las quemaduras solares, la fotosensibilidad, las fotodermatosis, la inmunodepresión, el fotoenvejecimiento y la fotocarcinogénesis son los principales efectos adversos cutáneos de la exposición a la radiación solar sin las mínimas medidas preventivas. El aumento de la esperanza de vida, la excesiva exposición al sol debido a las actividades de ocio al aire libre o a la búsqueda del bronceado y, en algunas áreas terrestres, la depleción de la capa de ozono, han contribuido al incremento de los problemas cutáneos. Por tanto, el principal objetivo de la fotoprotección debe ser el de prevenir el daño que ocurre en nuestra piel como resultado de su exposición a la radiación ultravioleta (UV). Dicha prevención es aconsejable a todas las edades, pero es en la población infantil y en los adolescentes en quienes se debe hacer especial



énfasis. Los niños se consideran más susceptibles a los efectos nocivos de las radiaciones UV que los adultos por varios motivos. Así, los episodios de quemaduras durante la infancia y la adolescencia han sido propuestos como un factor de riesgo independiente para el desarrollo de melanoma en la vida adulta. Además, existe una asociación entre la exposición solar en la infancia y el desarrollo de nevus melanocíticos (lunares) (2).

En el Anexo I se detallan los efectos cutáneos, oculares y sobre el sistema inmunológico. Es importante la consideración de los efectos que produce la radiación UV debido a que es una de las motivaciones para la realización de este trabajo.

#### *1.6.1. Medidas de protección hacia la radiación UV*

Hay evidencias que indican que los hábitos personales en cuanto a la exposición solar constituyen uno de los factores de mayor riesgo individual para los daños que ocasiona la radiación UV. Es importante medir la radiación a través del índice UV para concientizar sobre los riesgos y alertar a la población sobre la necesidad de tomar medidas de protección. De esta manera es posible disminuir los efectos nocivos en la salud y también reducir los costos que conlleva el tratamiento de las enfermedades que puede ocasionar, ya que los efectos de la exposición a la radiación UV son acumulativos (11).

Un gran porcentaje de la población tiene conocimientos sobre los efectos de la radiación UV pero no tiene verdadera conciencia o no tiene conocimiento de qué significa realmente el índice UV. Por eso es importante incluirlo como una herramienta educativa y usar los medios de comunicación como una vía clara y sencilla para familiarizarse con el concepto y así poner en práctica las recomendaciones para una exposición solar adecuada, principalmente en los grupos poblacionales más vulnerables. Se sabe que el 90% de los cánceres de piel no melanoma ocurre en los tipos de pieles I y II, generalmente pieles muy blancas que tienden a quemarse. Aunque aquellas personas con pieles más oscuras tienen menos probabilidad de contraer cáncer de piel, sin embargo están expuestos a efectos en los ojos y en el sistema inmune (11).

Las medidas de protección básicas que se deben tener en cuenta son:

- Reducir la exposición durante las horas centrales del día.
- Buscar sombra.
- Utilizar prendas de protección.
- Utilizar un sombrero de ala ancha para proteger los ojos, la cara y el cuello.
- Protegerse los ojos con gafas de sol con diseño envolvente o con paneles laterales.
- Utilizar crema de protección solar de amplio espectro, con un factor de protección solar (FPS) +15 o mayor, en abundancia y cuantas veces se necesite.
- Evitar las camas solares.
- Es particularmente importante proteger a los bebés y niños de corta edad.

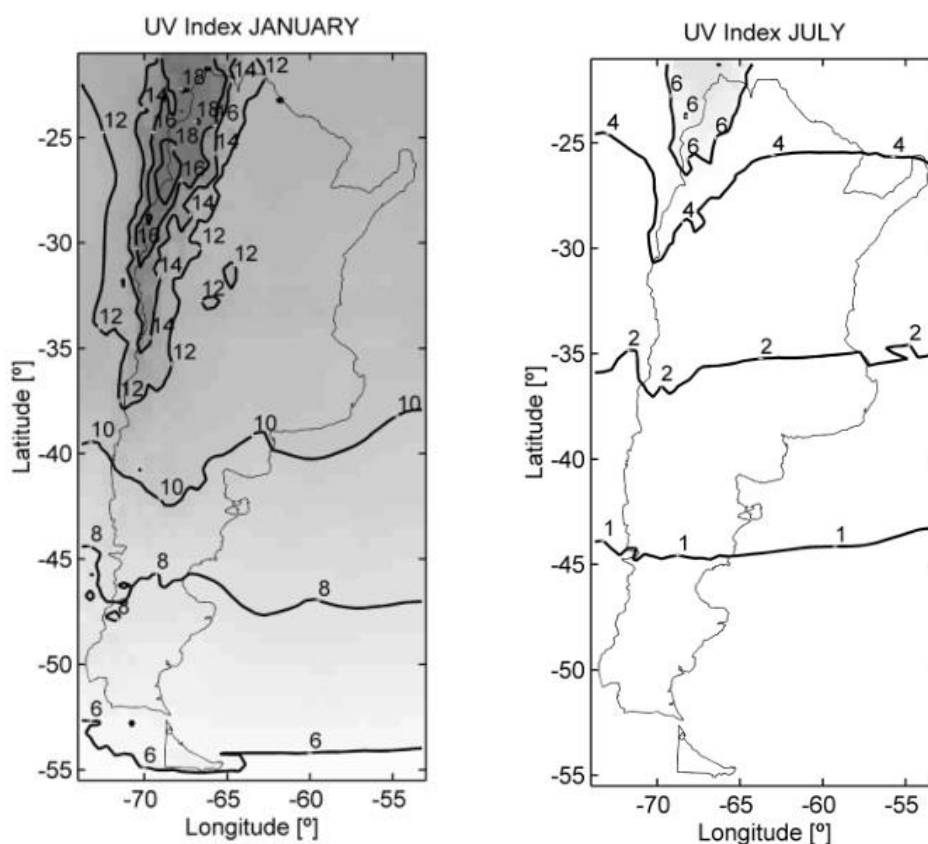
Lugares de recreación al aire libre, como parques, playa, piletas de natación, clubes de deportes, etc., serían puntos estratégicos claves para proveer información sobre los niveles de radiación y las medidas de protección solar. Además, muchos de estos

lugares forman parte de los lugares turísticos que muchas personas eligen para pasar sus vacaciones y en donde se exponen periódicamente por largos tiempos (11).

Los impactos negativos sobre la salud humana podrían ser significativamente disminuidos por una conciencia pública profesional basada, por ejemplo, en la información del Índice UV (24), del cual se hablará a continuación.

### 1.7. Radiación UV e índice UV en Argentina

Argentina, al situarse cerca de la Antártida, es frecuentemente afectada por el agujero de ozono que se forma cada año durante la primavera (25). Zonas de poca elevación, esto es sur y este del país, indican que el índice UV muestra una dependencia latitudinal característica, en respuesta al comportamiento del ozono estratosférico y al incremento del ángulo cenital solar hacia el sur. Los valores medios de IUV mensuales para regiones bajas, se encuentra entre 12 en el norte y 6 en el sur en verano, mientras que en invierno los valores son de 4 y menores de 1 respectivamente. En los Andes, se encontraron valores extremos de 18 en verano. La alta elevación, el pequeño ángulo cenital y la relativamente delgada y estable columna total de ozono en las regiones de latitudes bajas, causan los característicos valores altos de IUV observados a lo largo del año en las regiones tropical y subtropical, los cuales se encuentran dentro de los niveles más altos de IUV para regiones densamente pobladas en el mundo (25).



**Figura 14.** Mapa satelital de la media mensual del índice UV para el mes de enero y julio, calculado con una resolución geográfica de 0,5° x 0,5°. (Fuente: Luccini, 2006 (25))

En la Figura 14 se presenta la variación del índice UV según la latitud para el mes de enero y julio. Se observa que los valores más altos de índice se encuentran en el noroeste del país para ambos meses, mientras que en el sur los valores son menores. La diferencia entre ambos meses del índice UV llega a ser de 12 unidades, dándose el máximo en enero con un valor de 18 y el mínimo en julio con un valor de 6.

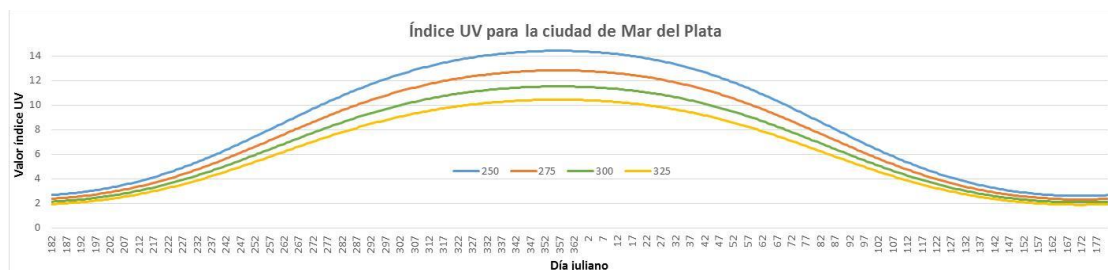
Una comparación de la climatología de esta región del hemisferio sur con la equivalente en el hemisferio norte, estaría restringida a zonas de baja elevación para evitar las diferencias que pueden ser atribuidas a la resolución geográfica de los cálculos. Por ejemplo, la irradiancia media en el mediodía solar que puede causar eritema en las zonas costeras en enero para latitudes de 30° a 50°S, es entre un 20-30% mayor que el equivalente para latitudes de 30° a 50°N en julio. Para el caso de ozono a las mismas latitudes, la columna total promedio en verano en el Sur es aproximadamente un 9% menor que en el Norte. Considerando que el factor de amplificación de radiación para la irradiancia UV que produce eritema, que depende del porcentaje de ozono, es aproximadamente de 1,1, entonces un 10% de la diferencia norte-sur es explicada por la capa de ozono (25).

En enero se producen niveles medios mensuales de índice UV de más de 18 y una dosis diaria de eritema de más de 10 kJ/m<sup>2</sup>, destacando la necesidad de tomar rigurosas medidas de protección contra la exposición excesiva al Sol para la población en esta región. Incluso las zonas del norte de baja altitud tienen niveles medios mensual IUV y dosis diarias de eritema por encima de 12 y 7 kJ/m<sup>2</sup>, respectivamente.

En cuanto a la influencia de las nubes, diferentes estudios encontraron que las mismas atenúan en menos de un 30% promedio mensual a la irradiancia media eritémica del mediodía y a la dosis diaria de eritema en comparación a un día despejado, incluso en la gran parte de la región continental y en aquella donde existe una alta densidad poblacional, la atenuación es en general menos del 20% (25). Esto implica que, en términos de índice UV, la nubosidad atenúa menos que tres unidades de IUV en toda la región durante el año. La máxima atenuación ocurre en el suroeste andino, Patagonia y regiones sureste atlánticas, donde los vientos sureste predominantes generan un gran porcentaje de nubosidad.

Para conocer la variación anual del IUV, en la Figura 15 se muestra la variación teórica para distintas concentraciones de ozono (250, 275, 300 y 325 UD), desde el primero de julio al 30 de junio representados como día juliano, para la ciudad de Mar del Plata, provincia de Buenos Aires, donde los valores máximos correspondientes al verano queden centrados en el gráfico (se utilizó la Ecuación 14 del modelo de Madronich para los cálculos).

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 15.** Variación anual del índice UV de acuerdo a distintas concentraciones de ozono (250, 275, 300 y 325 UD) para la ciudad de Mar del Plata, provincia de Buenos Aires. Se observa que los valores máximos se encuentran en los meses de diciembre, enero y febrero.

El gráfico se obtuvo suponiendo una columna total de ozono constante durante el año y calculando el ángulo cenital mínimo para cada día. La variación anual que se observa se debe a los valores que toma el ángulo cenital solar a lo largo del año, siendo menor en verano. Esta es la razón por la cual en los meses de verano se observan mayores valores del índice y luego disminuyen hacia el invierno. Además, existe una variación del índice según la columna total de ozono, pudiendo observarse que los valores del índice aumentan para una columna total de ozono cada vez menor. En este caso, el valor máximo obtenido del índice UV fue de 14 para 250 UD, mientras que para 325 UD fue de 10. Si consideramos la clasificación de la OMS, estos valores corresponden a la categoría IUV extremos y muy altos, respectivamente.

De esta manera, la región central del país, recibe niveles de radiación solar ultravioleta muy altos y extremos, que si bien no son los más altos en comparación con el noroeste andino, son peligrosos para las personas. Si combinamos esta situación ambiental con la más alta densidad de población del país en la Provincia de Buenos Aires (26), y la elevada concurrencia de turistas estivales a las costas de la Provincia de Buenos Aires, esta zona del país se convierte en una de las más vulnerables a la influencia de la radiación solar ultravioleta de origen solar dañina para la salud humana. Es por ello que este trabajo centra su área de estudio en la región Provincia de Buenos Aires, y principalmente su zona costera, tomando a la ciudad de Mar del Plata como una zona representativa de lo que ocurre en esta región de estudio.

### 1.8. Detección satelital de ozono e índice UV

Desde la década 1920, el ozono ha sido medido por medio de instrumentos de superficie. Los científicos colocan instrumentos en varios lugares alrededor de la Tierra para medir la cantidad de radiación ultravioleta que atraviesa la atmósfera en cada sitio. Con base en estas mediciones, se calcula la concentración de ozono en la atmósfera de ese lugar. Aunque esta información es muy útil, no es adecuada para obtener una visión global de la concentración de ozono (27).

La cantidad total y la distribución vertical de las moléculas de ozono en la estratósfera varían a nivel global. Las moléculas de ozono son transportadas en la estratósfera de la misma manera que las nubes son transportadas en la troposfera. Por eso, las fluctuaciones de ozono en un lugar en particular son difíciles de considerar si se deben por un cambio local o global (27).

El uso de los satélites ha brindado la capacidad de superar esa dificultad debido a que desde el espacio se obtiene una visión de lo que está pasando cada día en todo el planeta. La NASA y la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos (NOAA), han monitoreado conjuntamente la concentración de ozono desde hace más de 20 años en función de las estaciones, latitud y longitud usando instrumentos en satélites. Estas mediciones han permitido observar cambios a largo plazo (27).

#### *1.8.1. Misión satelital Aura*

La misión Aura fue lanzada con éxito el 15 de julio de 2004, en sincronización con el Sol cerca de la órbita polar con una inclinación de 98,2 grados. Su órbita es heliosincrónica y lo hace a unos 705 km sobre la Tierra, con una resolución temporal de 16 días y 233 revoluciones por ciclo. El nodo ascendente es la luz del día y cruza el ecuador aproximadamente a las 13:45 horas. Los instrumentos del Aura miden gases trazas en la atmósfera mediante la detección de sus propias firmas espectrales. El instrumento MLS (Microwave Limb Sounder) detecta las emisiones microondas débiles de rotación y vibración molecular. Los instrumentos HIRDLS (High Resolution Dynamics Limb Sounder) y TES (Tropospheric Emission Spectrometer) se encargan de las emisiones térmicas infrarrojas, también debido a las vibraciones y rotaciones moleculares. Por último, el instrumento OMI (Ozone Monitoring Instrument) detecta la absorción molecular de la radiación solar retrodispersada en las bandas del visible y ultravioleta.

#### *1.8.2. Misiones satelitales Aqua, Terra y TRMM*

Aqua es una misión satelital de NASA que tiene como objetivo recolectar información sobre el ciclo del agua de la Tierra, incluyendo evaporación desde los océanos, vapor de agua presente en la atmósfera, nubes, precipitaciones, humedad del suelo, superficie de hielo en el mar y en la tierra, cobertura de nieve en la tierra y hielo. Además, realiza mediciones sobre flujos de energía radiativa, aerosoles, cobertura vegetal terrestre, fitoplancton y materia orgánica disuelta en océanos y temperatura de aire, tierra y agua. Esta misión forma parte del Sistema de Observación de la Tierra (Earth Observing System, EOS). Fue lanzado en mayo del año 2002 y cuenta con seis instrumentos a bordo para la observación de la Tierra: AIRS, AMSU, CERES (dos sensores idénticos), MODIS y AMSR-E. Aqua fue el primer miembro lanzado de un grupo de satélites denominados como Constelación de la Tarde (Afternoon Constellation), mientras que la misión Aura fue la segunda (28).

La misión Terra fue lanzada en diciembre de 1999 por la NASA, pertenece a EOS y es una misión internacional en la que colaboran Estados Unidos, Japón y Canadá. Lleva a bordo cinco instrumentos: ASTER, CERES (dos sensores idénticos), MODIS, MISR y MOPITT. Realizan observaciones de la atmósfera, océano, tierra, nieve y hielo de la Tierra y sobre balance de energía. Todas estas observaciones permiten conocer los impactos de la humanidad sobre el planeta y provee información relevante sobre peligros naturales como incendios y volcanes (29).

Por último, la Misión de Mediciones de Precipitaciones Tropicales (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) es una misión articulada entre NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA).

**Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite**

Fue lanzada en noviembre del año 1997 y cesó su recolección de información en abril del 2015. Tiene como objetivo el estudio de las precipitaciones para la investigación del clima y para llevarlo a cabo cuenta con cinco instrumentos: PR, TMI, VIRS (sensores de lluvia), LIS y CERES. La información recolectada permite entender la formación y evolución de ciclones tropicales, tormentas eléctricas, impactos antropogénicos sobre precipitaciones, entre otros (30).



## Capítulo 2

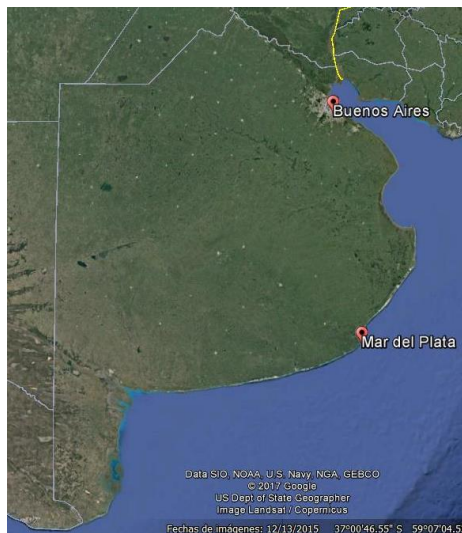
# *MATERIALES Y MÉTODOS*

## 2. Materiales y métodos

En este apartado se describirá la metodología aplicada, la zona de estudio elegida y los sensores utilizados de los cuales se obtuvo la información necesaria sobre los parámetros utilizados para la determinación del índice UV. Se desarrollará cómo se obtuvieron los coeficientes ajustados a la zona de estudio para el modelo del IUV, las ecuaciones necesarias para la determinación de la influencia de la presencia de nubes sobre los valores de IUV, la dosis eritémica recibida y del tiempo de exposición para los tipos de pieles I a III.

### 2.1. Zona de estudio

Este trabajo se desarrolló en las ciudades de Buenos Aires y Mar del Plata, Argentina (Fig. 16). La elección se basó principalmente por ser dos grandes e importantes ciudades y debido a que el sensor OMI contiene información de ambas. La localidad de Mar del Plata a su vez fue seleccionada por ser la de mayor importancia en cuanto al turismo que recibe durante la temporada de verano.



**Figura 16.** Localización de las ciudades estudiadas, Buenos Aires y Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina (Fuente: Google Maps).

La ciudad de Buenos Aires ( $34^{\circ}35'59''\text{S}$   $58^{\circ}22'55''\text{O}$ ) está situada en la región centroeste de Argentina, sobre la orilla occidental del Río de la Plata, en la llanura pampeana y cuenta con 2.890.151 habitantes, según datos del último censo 2010 del INDEC (26), ascendiendo a casi 13 millones si se considera el conurbano bonaerense que rodea a la ciudad de Buenos Aires. El clima de la ciudad de Buenos Aires es templado pampeano con una temperatura media anual de  $17,9^{\circ}\text{C}$  (1981-2010) (21). En cuanto al turismo, es el destino preferido de los extranjeros con unas 4 millones de visitas al año.

Por otro lado, Mar del Plata ( $38^{\circ}00'\text{S}$ ,  $57^{\circ}33'\text{O}$ ) se encuentra ubicada en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, sobre la costa del mar Argentino. Cuenta con 593.337 de habitantes (26), lo que la ubica en el tercer puesto como centro más poblado de la Provincia de Buenos Aires y desde un punto de vista geográfico es considerada la ciudad costera más poblada de Argentina. Su clima se clasifica como templado oceánico, con temperatura media anual de  $14^{\circ}\text{C}$ . Posee un importante puerto



pesquero y balneario, y es la segunda urbe de turismo más importante del país detrás de Buenos Aires, ya que en época de verano su población puede aumentar un 311%.

## 2.2. Cálculo del índice UV y dosis eritémica

El índice UV (IUV) se calcula de la siguiente manera (4),

$$IUV = (40m^2W^{-1}) \int \varepsilon(\lambda)I(\lambda)d\lambda \quad [10]$$

donde  $I(\lambda)$  es la irradiancia del espectro solar ( $W m^{-2} nm^{-1}$ ) en la superficie de la Tierra,  $\varepsilon(\lambda)$  es el espectro de acción eritémico según McKinlay y Diffey y  $\lambda$  es la longitud de onda. Los valores de la primer variable dependen de la localización, fecha y hora (particularmente del ángulo solar) y de la composición de la atmósfera (gases y nubes). Si consideramos condiciones de cielo despejado, el parámetro atmosférico que más afecta la radiación solar en el rango del ultravioleta es la columna total de ozono, siendo casi despreciable la contribución de otros gases en condiciones normales. Por lo tanto, considerar un caso libre de nubes y contaminantes es importante porque se aproxima a los valores máximos que puede tomar el índice UV y permite estimar el riesgo potencial asociado a la radiación solar UV en superficie.

Considerando los factores que sólo dependen del ángulo cenital solar ( $\theta_z$ ) y de la columna total de ozono (CTO), se obtiene que (3),

$$IUV \propto T_0 (CTO / \mu_0)^{-RAF} \quad [11]$$

donde  $\mu_0$  es el coseno de  $\theta_z$ ,  $T_0$  es el término de transmisión troposférica y RAF es el factor amplificado de radiación. Como primera aproximación,  $T_0$  es independiente de CTO pero es aproximadamente proporcional a  $\mu_0$  debido a que el IUV es medido en la superficie horizontal y por lo tanto,

$$IUV \propto (\mu_0)^{1+RAF} (CTO)^{-RAF} \quad [12]$$

El valor de RAF para la radiación que causa eritema es de 1,2. Una mejor aproximación se puede obtener asumiendo la misma dependencia funcional de  $\mu_0$  y CTO,

$$IUV \approx a(\mu_0)^b (CTO)^c \quad [13]$$

Los coeficientes a, b y c se estimaron por ajuste de los resultados al modelo de transmisión radiativa (RTM) (3). Se usó el modelo troposférico de radiación UV y VIS (TUV) con condiciones como cielo libre de nubes, aerosoles y albedo superficial de 5%. Para la posición del Sol normal a la superficie y una CTO=300 UD, el índice UV computado es de 12,5 y así la dependencia de  $\mu_0$  y CTO se ajusta por la siguiente expresión (3),

$$IUV \approx 12,5\mu_0^{2,42} (CTO/300)^{-1,23} \quad [14]$$

El error porcentual del modelo es de 10% (3). Más adelante se explicará cómo se obtuvieron nuevos coeficientes del modelo adaptados a las condiciones locales y para

cielo despejado (sección 3.1). Los valores de UVI pueden ser reducidos por la presencia de nubes, polvo y gases, mientras que puede ser incrementado por la elevación de la superficie, el albedo y los efectos de scattering de las nubes.

Si la irradiancia eritémica se integra en el tiempo, se obtiene la dosis eritémica. Cuando el intervalo en el cual se integra la irradiancia eritémica es un día, este valor se denomina dosis eritémica diaria.

$$DosisEritémica = \int_t \int_{280nm}^{400nm} I_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} d\lambda dt \quad [15]$$

Donde  $I_{\lambda}$  es la irradiancia espectral en superficie ( $W/m^2/nm$ ),  $\varepsilon_{\lambda}$  es el espectro de acción eritémica,  $\lambda$  la longitud de onda y  $t$  el tiempo. Para describir el potencial eritémico de la radiación UV se utiliza la Dosis Eritémica Mínima (MED). Un MED se define como la dosis efectiva de UV que causa un enrojecimiento perceptible de la piel humana no expuesta previamente para una exposición de 8 horas. Sin embargo, como no todos los individuos tienen la misma sensibilidad a la radiación UV debido a las diferentes capacidades de autoprotección de sus pieles, el MED varía entre 200 y 500  $J/m^2$ . La tabla a continuación muestra los valores MED para diferentes tipos de piel de acuerdo con las normas alemanas DIN 5050-1 y DIN 5050-2 (31) (32).

**Tabla 1.** Definición de los tipos básicos de piel para la población europea. Se incluyen en la tabla los valores MED que corresponden a los distintos tipos de piel. Para este trabajo se utilizaron los correspondientes a tipos de pieles I a III. Fuente: Lovengreen et. al., 2002.

Tipo de piel	Descripción	Se broncea	Se quema	1 MED( $J/m^2$ )	Color de Pelo	Color de ojos
I	Céltico	Nunca	Siempre	200	Rojizo	Azul
II	Pálido	A veces	A veces	250	Rubio	Azul/Verde
III	Caucásico	Siempre	Raramente	350	Castaño	Gris/Marrón
IV	Mediterráneo	Siempre	Nunca	450	Negro	Marrón
V	Suramericano	Rara vez	Nunca	600 a 2000	Negro	Oscuros
VI	Negroide	Nunca	Nunca	600 a 2000	Negro	Oscuros

Con los datos de la Tabla 1, se observa que el MED aumenta según el tipo de piel. Para las pieles más oscuras, las cuales no se queman, se requiere de una dosis muy grande, superior a 600  $Jm^{-2}$ , para la producción de eritema, mientras que para las pieles más claras la dosis es de 200  $Jm^{-2}$ .

### 2.3. Influencia de la presencia de nubes sobre el índice UV: Factor de modificación de nube

Como se describió en las secciones anteriores, la presencia de nubes en el cielo es uno de los factores con gran influencia en la radiación solar que logra alcanzar la superficie terrestre debido a su interacción por dispersión y que por lo tanto modifica el valor del índice UV significativamente. Una de las maneras de calcular su afección es con el Factor de Modificación de Nube (Cloud Modification Factor, CMF) específicamente para el índice UV y se calcula de la siguiente manera.

$$CMF = \frac{IUV \text{ en condiciones reales}}{IUV \text{ en cielo despejado}} \quad [16]$$

Cuando el cielo se encuentra despejado, el valor que tomará el CMF será cercano a 1 y en este caso el valor del índice UV será alto.

#### 2.4. Tiempo de exposición necesario para inducir eritema y clasificación de tipos de pieles

El tiempo de exposición al cuál comienza a producirse eritema, se calculó de la siguiente manera (12)

$$t_E = \frac{4000}{60} \frac{MED \cdot SPF}{IUV} \quad [17]$$

donde 4000 es el factor para la conversión de unidades desde UV que produce eritema (UVeri) al IUV, 60 la relación entre segundos y minutos, IUV es el índice de UV igual a 40 UVeri, el mismo factor de la Ecuación 10, MED es un factor que considera los diferentes tipos de pieles presentados a la Tabla 2, de acuerdo a la clasificación de pieles de Fitzpatrick (33) y SPF es el factor de protección solar proporcionado por los protectores solares. Cuando no hay aplicación de protector solar, el SPF toma el valor de uno.

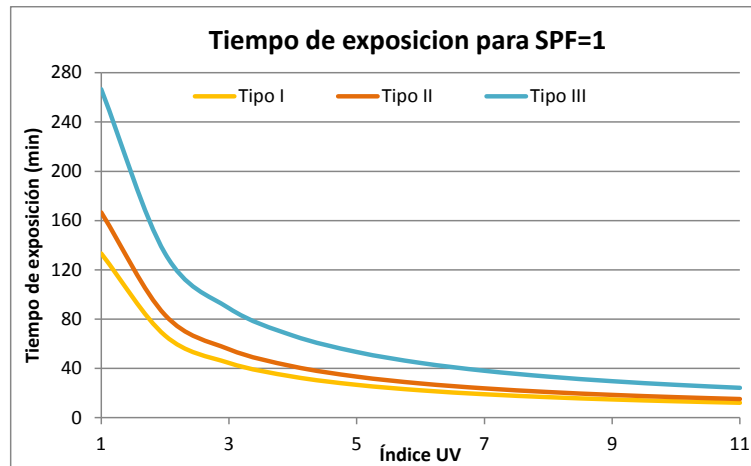
**Tabla 2.** Clasificación y descripción de los distintos tipos de pieles, según Fitzpatrick (33). Para este trabajo se utilizaron las dosis para tipos de pieles I a III.

Tipos de pieles	Descripción	Dosis estándar eritémica (Fitzpatrick)
I	Céltico (siempre se quema)	2
II	Pálido (fácil de quemarse)	2,5
III	Caucásico (puede quemarse)	4
IV	Mediterráneo (raramente se quema)	5,25
V	Suramérica (raramente se quema)	6 a 20
VI	Negroide (raramente se quema)	6 a 20

Para definir los tipos de piel a considerar en este trabajo, se realizó un relevamiento de los tipos de piel que se encuentran con más frecuencia en las playas argentina. Para este trabajo se consideraron los tipos de pieles I, II y III. A modo de ejemplo, en el Anexo II se muestran algunas fotos tomadas en las playas de la costa atlántica argentina.

En la Figura 17 se presenta el tiempo de exposición mínimo para generar eritema en función del IUV considerando los tipos de piel I, II y III y sus respectivas dosis eritémicas estándar (Tabla 2) en ausencia de protector solar (SPF=1)

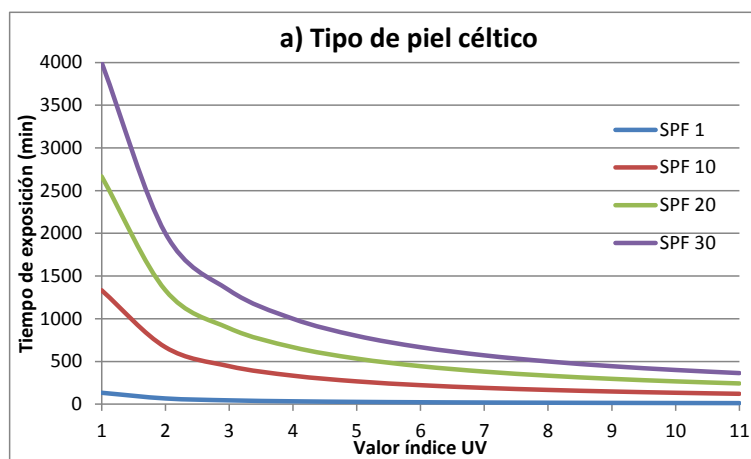
## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



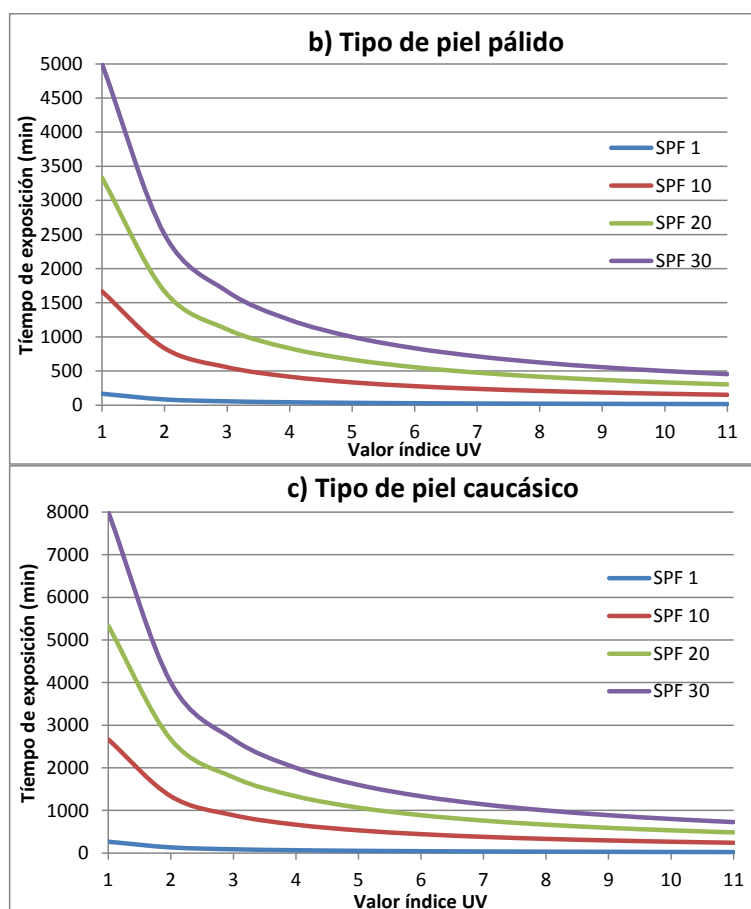
**Figura 17.** Tiempo de exposición para los tipos de pieles I (amarillo), II (naranja) y III (azul) sin protección (SPF=1) para distintos valores de IUV.

Al considerar un  $SPF = 1$ , es decir que las personas no se encuentran protegidas, se representa el riesgo potencial según su fototipo de piel. Por lo tanto, esta situación es totalmente desfavorable y produce la mayor cantidad de eritema. Se observa que para un IUV igual a uno se necesitan dos horas para la producción de eritema en el tipo de piel I, mientras que para el tipo de piel II se tarda dos horas y 40 minutos y para el tipo de piel III cuatro horas y media, aproximadamente.

Los gráficos a continuación representan los tiempos de exposición para distintos índices UV (de 1 a 11) y factores de protección, obtenidos a partir de la Ecuación 17.



## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 18.** Curvas de tiempos de exposiciones en minutos necesarios para la producción de eritema para (a) tipo de piel I céltico, (b) tipo de piel II pálido y (c) tipo de piel III caucásico, según distintos valores de índice UV y factores de protección (SPF): sin factor de protección (azul), SPF 10 (roja), SPF 20 (verde) y SPF 30 (violeta).

Como es de esperar, se observa que los tiempos de exposición disminuyen a medida que el índice UV aumenta y el tipo de piel es más blanca. Para todos los tipos de pieles sin protección, el tiempo de exposición para la contracción de eritema es muy corto. A su vez, los tiempos necesarios para que se produzca eritema se ven prolongados con el uso de protector y su mayor factor de protección. En el caso del tipo de piel céltico, los tiempos de exposición son mucho menores que para los otros dos tipos de pieles. Por ejemplo, con un IUUV igual a 7 (alto) y factor de protección 10, el tiempo de exposición para el tipo de piel I es de tres horas y 10 minutos, para el tipo II es de cuatro horas y para el tipo III es de casi seis horas y media, aproximadamente.

Por otro lado, se observa que para factores de protección más altos, los tiempos de exposición se incrementan considerablemente. Si aumentamos el factor de protección a 30 para el mismo índice, el tiempo de exposición para el tipo de piel I es de nueve horas y media, para el tipo II es de doce horas y para el tipo III de 19 horas, aproximadamente.

Esto demuestra que los tipos de pieles célticas y pálidas tienen una mayor probabilidad de sufrir daños en la piel y por lo tanto necesitan una mayor protección y un mayor cuidado en cuanto a los hábitos que se tienen sobre la exposición solar.

## 2.5. Datos de sensores utilizados

### 2.5.1. Sensor OMI (*Ozone Monitoring Instrument*)

El sensor OMI, a bordo del satélite Aura de la NASA, es un espectrómetro diseñado para registrar la cantidad de ozono y otras especies químicas en la atmósfera. OMI es el sucesor del Total Ozone Monitoring System (TOMS), y continúa su registro de la concentración de ozono en columna vertical total, aerosoles y radiación solar UV. Este instrumento mide la radiación solar reflejada y la retrodispersada en el rango espectral 270-500 nm con una resolución espectral de 0,55 nm en el UV y 0,63 nm en el visible. Tiene un ancho de barrido de 2600 km que permite una cobertura global diaria con una resolución espacial de 13x24 km en nadir. Los productos de OMI incluyen ozono, aerosoles, nubes, radiación UV y gases traza ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , HCHO, BrO, OCIO) (34). Además, es capaz de medir la presión y cobertura de las nubes, proporcionando información sobre el ozono troposférico. Emplea imágenes hiperespectrales de modo push-broom para observar la radiación solar retrodispersada en el visible y ultravioleta. Este tipo de imágenes incrementa la exactitud y precisión de la cantidad total de ozono. (35).

Los datos obtenidos de la columna total de ozono para la realización de este trabajo pertenecen al instrumento OMI.

### 2.5.2. Sensor CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*)

El instrumento CERES es uno de los de mayor prioridad científica desarrollado por el Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA. El primer instrumento fue lanzado en diciembre de 1997 a bordo de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (Tropical Rainfall Measurement Mission, TRMM) de la NASA. Actualmente los instrumentos de CERES se encuentran recolectando información desde tres misiones satelitales individuales, incluyendo EOS Terra y Aqua y el observatorio de la Asociación Nacional Suomi de órbita polar (Suomi National Polar-orbiting Partnership (S-NPP)). Cada instrumento cuenta con tres canales: un canal de onda corta para medir la luz solar reflejada entre 0,3-5,0  $\mu\text{m}$ , un canal de onda larga para medir radiación térmica emitida por la Tierra entre 8-12  $\mu\text{m}$  y un canal general para medir todas las longitudes de onda desde 0,3 a 100  $\mu\text{m}$ . Su resolución espacial es de 20 km en nadir (10 km para TRMM) (36). Las propiedades de las nubes son determinadas usando simultáneamente mediciones de los instrumentos EOS y S-NPP. El análisis de los datos del CERES permite obtener información sobre el balance de la radiación terrestre y comprender el rol de las nubes y el ciclo de la energía en el cambio climático global (36).

Para este trabajo se utilizaron datos del índice UV, que incluye radiación UVA y UVB capaz de producir eritema, y flujos entrante de onda corta (SW) para cielo en situación despejado y en condiciones reales proporcionados por el producto SYN1deg. Este producto proporciona datos de radiación en condiciones de cielo despejado y nublado (el término SYN se refiere a Synoptic Radiative Fluxes and Clouds) con una resolución espacial de 1 grado de latitud/longitud (37), y las propiedades de nubes y aerosoles coincidentes derivados del instrumento MODIS (a bordo del satélite Terra) que incluyen las propiedades de las nubes, derivadas de los satélites geoestacionarios y los flujos de banda ancha que han sido cuidadosamente normalizado con los flujos de

CERES. La resolución temporal del SYN1deg elegida para realizar este trabajo es de tres horas por día, esto quiere decir que se obtiene un valor promedio cada tres horas (36).

## 2.6. Procesado y análisis de la información

Para realizar este trabajo, se eligió trabajar con datos a la hora del mediodía solar de la región, debido a que los valores de radiación UV son máximos por factores que se describieron anteriormente. Se seleccionaron las ciudades de Buenos Aires y Mar del Plata.

Se utilizaron datos de ozono de la base de datos del sensor OMI tomados al mediodía solar, los cuales se obtuvieron a partir de la página Web del mismo (35). Se hizo hincapié en los meses de temporada de verano (diciembre, enero y febrero) debido a que es la época en la cual concurre más gente a la costa y la exposición solar es mayor, sin embargo la base de datos completa analizada fue desde octubre del 2004 hasta mayo del 2016.

Se utilizó el programa Matlab para desarrollar rutinas que permitieron procesar los datos y calcular los valores de las variables necesarias. De esta manera se obtuvieron para cada día los valores de columna total de ozono (CTO). A partir de la base de datos completa del OMI, se calculó la CTO medio y la desviación estándar para cada día del año. Una vez obtenidos todos estos parámetros junto con el ángulo cenital para cada día del año, se calcularon los valores estadísticos del índice UV (media y desviación estándar) mediante el modelo paramétrico (Ec. 13).

Además, se utilizaron valores de índice UV obtenidos de la base de datos del sensor CERES (36). Se seleccionó un área pequeña en cada ciudad para asegurarse de sólo abarcar un píxel ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) y tener información únicamente del mismo. Se trabajó con una resolución temporal de tres horas diarias para el periodo considerado entre el 2004 y 2016. Debido a que durante el mediodía se obtiene la mayor dosis de radiación, se consideraron los valores de UV de la base de datos obtenidos del sensor CERES a las 16:30 horas UTC. Estos datos corresponden al promedio del IUV entre las 15 y las 18 horas UTC, que a su vez corresponden a las 12 y 15 hora local. Se eligió trabajar con este rango horario ya que, de todos los rangos disponibles por el sensor CERES, es el más próximo al mediodía. Los datos fueron procesados con una rutina Matlab desarrollada específicamente para este cálculo. Con datos bajados del mismo sensor sobre flujo entrante de onda corta para condiciones de cielo despejadas y reales, se calculó la atenuación de la radiación (Ec. 18) por efecto de las nubes.

Con todos los datos calculados de índice UV, tanto modelados como con los obtenidos del CERES, se realizaron histogramas para los meses de verano y el índice UV en todas sus categorías para poder comparar la cantidad de casos obtenido con cada uno de los índices de acuerdo a las condiciones consideradas.

Luego, se eligió la temporada de verano más reciente del periodo considerado 2015/2016 para analizar un caso concreto, y para la ciudad de Mar del Plata por ser la más visitada durante el verano. Se analizó las diferencias que presenta el índice UV modelado con el índice UV del CERES y se las relacionó con los valores de atenuación de radiación calculados anteriormente.

A partir de este análisis, se calculó el Factor de Modificación de Nube (Ec. 16) para poder ver que influencia tiene sobre el índice UV la presencia de nubes en el cielo.

Para la misma temporada de verano se calculó la dosis eritémica (Ec. 15) recibida en las personas, tanto con el índice modelado como con el del sensor CERES, y se comparó con las dosis eritémicas mínimas para los tipos de pieles I a III.



## Capítulo 3

# *RESULTADOS Y DISCUSIÓN*

### 3. Resultados y discusión

En esta apartado se presentarán y se analizarán los resultados obtenidos en el trabajo para luego llegar a las conclusiones. Primero se mostrará el ajuste de los coeficientes del modelo de Madronich (3) para la zona de estudio, luego la variación de ozono a lo largo de un año seleccionado a partir de los valores obtenidos por el sensor OMI y se mostrarán los valores de índice UV resultantes del modelo. Por último se los comparará con los valores de IUV proporcionados por el sensor CERES y se relacionará con la atenuación de la radiación.

#### 3.1. Ajuste del modelo paramétrico

Para calcular los valores de índice UV en situación de cielo despejado se empleó la Ecuación 13 con los coeficientes paramétricos (a, b y c) del trabajo original, considerando los datos de la columna total de ozono obtenidos a partir de información del sensor OMI y el ángulo cenital calculado cada 10 minutos entre las 12 y 15 horas para luego obtener un promedio del IUV en ese rango horario. Los datos obtenidos se compararon con los valores de IUV promedio entre las 12 y 15 horas (hora local) dados por el CERES en condiciones de cielo real. Se encontró que para las ciudades de Mar del Plata y Buenos Aires, la diferencia entre ambos índices es de alrededor del 10% para condiciones de cielo despejado en acuerdo con el error reportado en la bibliografía para esta ecuación paramétrica (3). A partir de estos datos, se realizó un ajuste de los coeficientes del modelo de Madronich (Ec. 13) para la zona de estudio, con el objetivo de mejorar el ajuste del modelo paramétrico para calcular el IUV. A continuación se describe la obtención de los nuevos coeficientes del modelo para un mejor ajuste con los datos de índice UV del sensor CERES.

Lo primero que se realizó fue calcular la atenuación de la radiación debido a la presencia de nubes,  $p_{cloud}$ , de la siguiente forma:

$$p_{cloud} = 1 - \frac{\Pi_s}{\Pi_{s_0}} \quad [18]$$

donde  $\Pi_{s_0}$  y  $\Pi_s$  son los flujos entrantes de radiación solar en condiciones de cielo despejado y real, respectivamente, los cuales fueron obtenidos del sensor CERES y representan un promedio de tres horas (entre las 12 y las 15 horas). Este factor da una idea sobre la atenuación de la radiación asociada a la presencia de nubes. Cuando  $p_{cloud}$  es bajo, se asocia con una condición de cielo despejado durante las tres horas. Una vez calculado este factor para todos los días, se filtraron aquellos valores de IUV donde  $p_{cloud}$  es menor a 0,005, es decir para cielo despejado. Teniendo en cuenta estos valores, se realizó el siguiente ajuste no lineal con el objetivo de obtener los coeficientes que mejor modelan el IUV medido por el CERES.

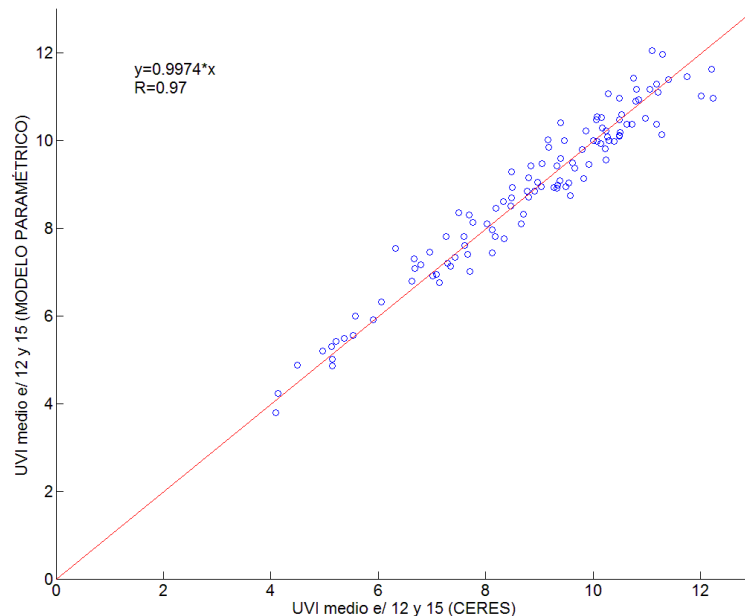
$$IUV_{CERES_{clearsky}} = a * \left( \frac{CTO}{300} \right)^c * \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i^b}{N} \quad [19]$$

donde N es el número en que se fracciona el periodo entre las 12 y 15 horas para ser modelado en cada momento. Para el cálculo se tomaron intervalos de diez minutos dentro del periodo (N=19).

Con estos nuevos coeficientes, el modelo paramétrico (Ec. 13) se reescribe de la siguiente manera:

$$IUV_{\text{mod}} \approx 11,3861 \mu_0^{2,6808} (CTO/300)^{-1,1605} \quad [20]$$

En la siguiente figura se presenta un gráfico de dispersión comparando los datos del índice UV del CERES entre las 12 y las 15 horas para cielo despejado y los calculados por el modelo paramétrico con los nuevos coeficientes. Se observa una muy buena correlación entre ambos parámetros obteniendo una pendiente de ~1 y un coeficiente de correlación de 0.97 (Fig. 19). Por lo tanto, se concluye que el modelo paramétrico obtenido (Ec. 20) reproduce con buena exactitud y precisión el IUV en superficie para cielo despejado.



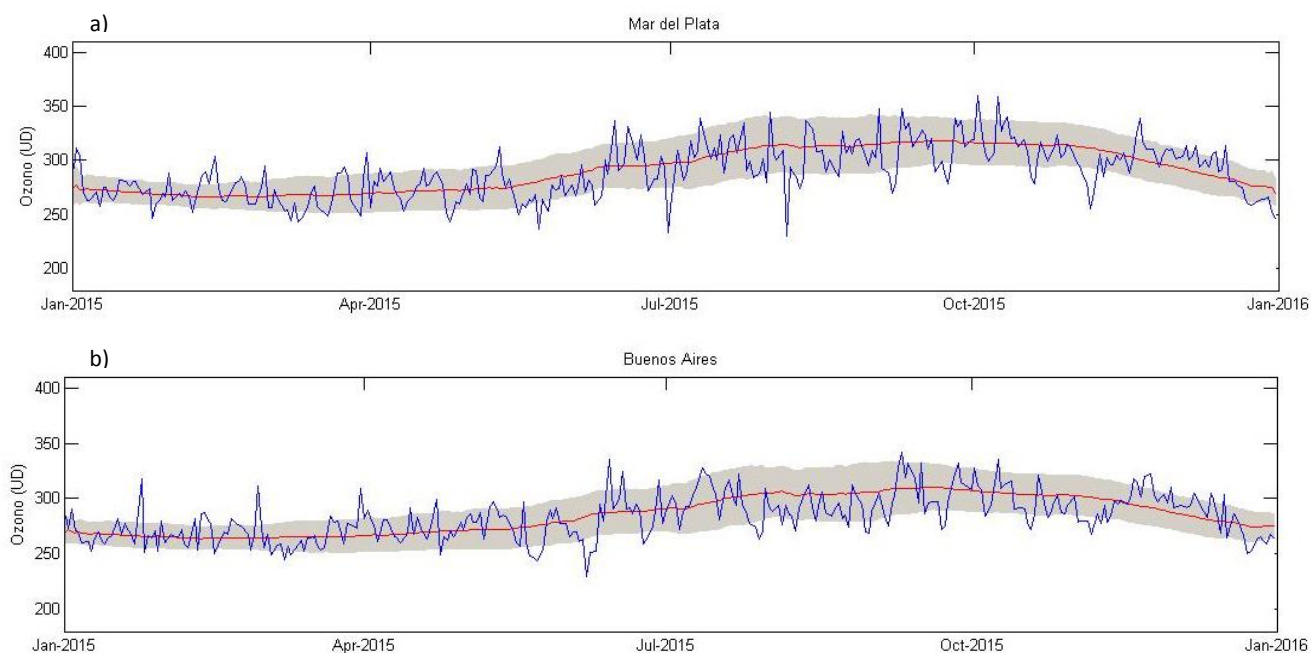
**Figura 19.** Gráfico de dispersión del índice UV modelado entre las 12 y 15 horas para condiciones de cielo despejado, en función del índice UV del sensor CERES entre las 12 y 15 horas, para la ciudad de Mar del Plata durante los meses de diciembre, enero y febrero en el periodo 2004 a 2016.

Finalmente, se calculó el IUV cada 10 minutos entre las 12 y las 15 horas y se promedió para el periodo a analizar. Estos valores se compararon con aquellos obtenidos a partir del producto CERES, para toda la base de datos, y se cuantificó la atenuación producida por la nubosidad en el IUV.

### 3.2. Caracterización del ozono

En el siguiente gráfico se presenta la variación anual de la columna total de ozono durante el año 2015 para las ciudades de Mar del Plata y Buenos Aires.

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 20.** Gráfico de la columna total de ozono (línea azul) obtenido del sensor OMI (satélite Aura) para las ciudades de a) Mar del Plata y b) Buenos Aires para el año 2015. La línea roja representa el valor medio de ozono calculado desde la base de datos del OMI para el periodo 2004 - 2016 y la sombra gris representa la desviación estándar.

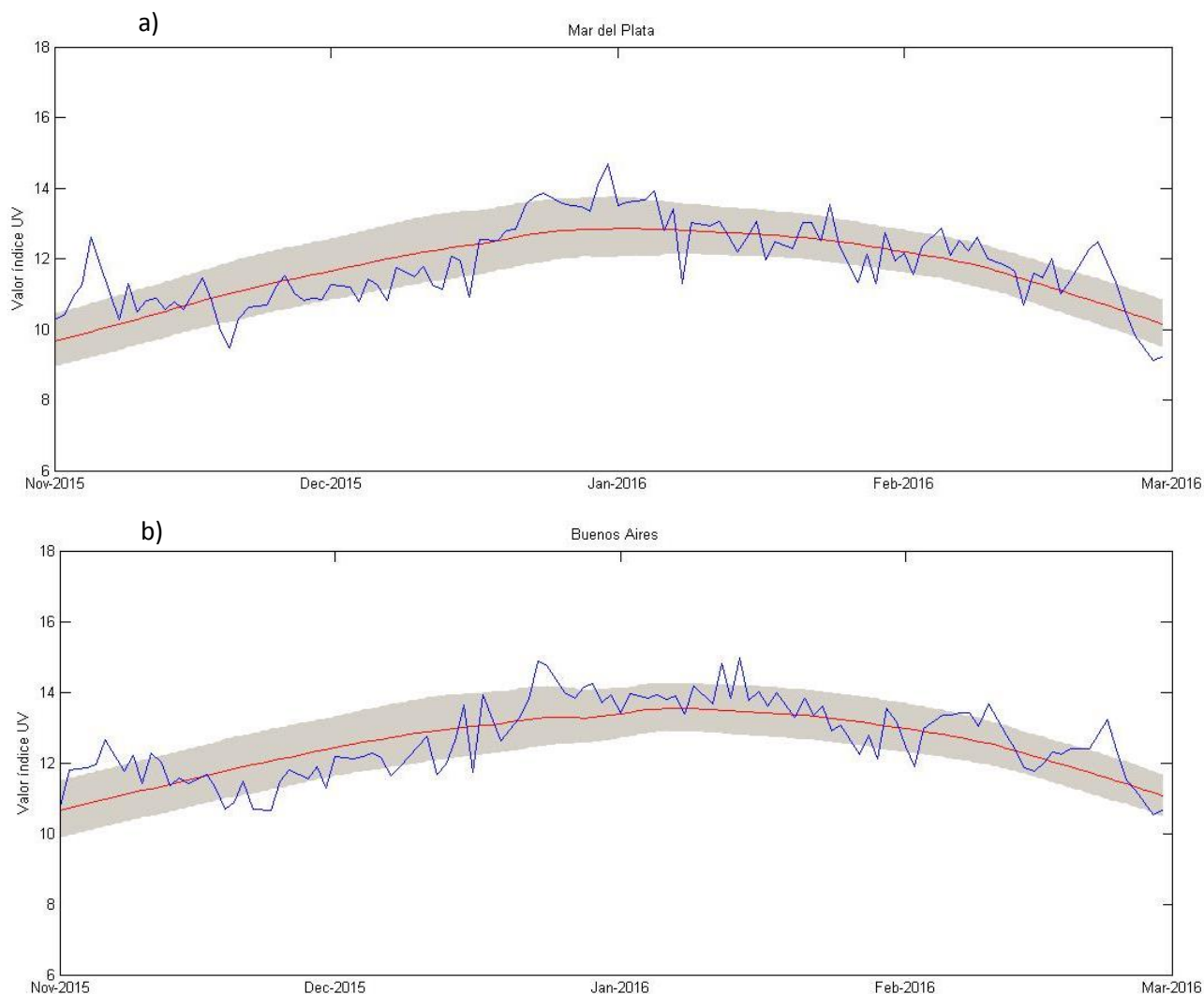
En la mayoría de los casos el sensor OMI realiza dos mediciones por día, por lo tanto se realizó un promedio de ambos datos y se trabajó con el valor promedio obtenido.

Se observa un aumento de la media de la columna total de ozono a partir del mes de mayo hasta el mes de septiembre y luego la concentración media comienza a disminuir (línea roja). La variación estacional de la columna total de ozono en latitudes medias, como es el caso de las ciudades de estudio consideradas, presenta un mínimo en el otoño y un máximo en primavera, modulado principalmente por factores dinámicos como la circulación media residual de Brewer-Dobson. Durante el año 2015, los valores máximos alcanzados son de 360 UD para Mar del Plata y de 340 UD para Buenos Aires y ocurren en octubre y septiembre, respectivamente. A pesar de estas altas concentraciones, también se observan valores muy bajos en invierno, donde para ambas ciudades se alcanzó un valor mínimo de 230 UD de la columna total de ozono en el mes de agosto en Mar del Plata y en junio en Buenos Aires, lo cual se debe a fenómenos de transporte de masas de aire en la estratosfera de origen inter tropical, con columnas total de ozono más bajas que las correspondientes a latitudes medias. Durante los meses de verano y primavera, los valores se encuentran en general por debajo de los 300 UD, exceptuando algunos casos donde son superados. El valor mínimo encontrado en estas estaciones para ambas ciudades es de 245 UD para el mes de marzo.

### 3.3. Caracterización del índice UV

A continuación se presentan los siguientes gráficos de la variación del IUV en las ciudades de Mar del Plata y Buenos Aires, desde noviembre de 2015 a marzo de 2016.

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 21.** Índice UV calculado con el modelo paramétrico (Ec. 20) utilizando la base de datos de columna total de ozono (azul) del sensor OMI, para las ciudades de a) Mar del Plata y b) Buenos Aires, desde noviembre del 2015 a febrero del 2016. La línea roja representa el valor medio del IUV para cielo despejado calculado con el modelo paramétrico para el período 2004 -2016 y la sombra gris representa la desviación estándar.

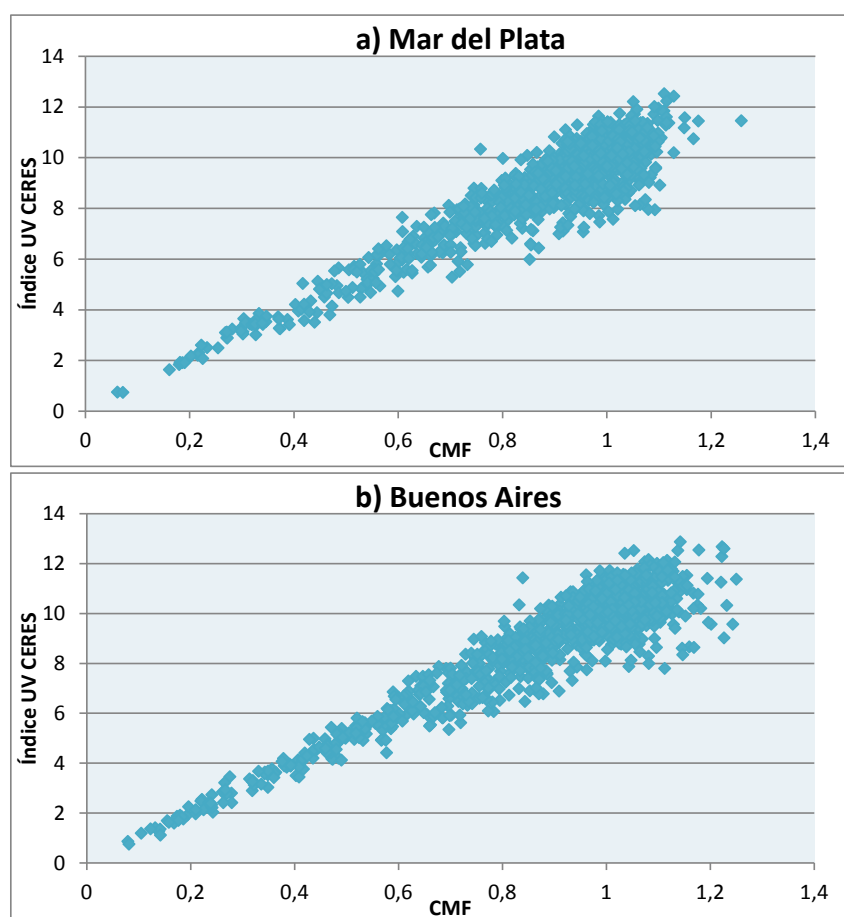
El IUV fue calculado aplicando el modelo paramétrico con los coeficientes ajustados (Ec. 20) y utilizando los valores de la columna total de ozono del sensor OMI para el mediodía solar. Se presenta únicamente los meses de noviembre a febrero porque abarca la estación de verano y son los meses que presentan los mayores valores de índices y existe una mayor exposición a la radiación por parte de la población, permitiendo evaluar el riesgo potencial al que se somete la población.

Se observa que durante el mes de noviembre la media del índice UV aumenta y continua haciéndolo hasta enero donde se encuentran los valores máximos. Luego hacia febrero comienza a disminuir y en el mes de marzo los valores son similares a los de noviembre. Este comportamiento se explica por el valor que toma el ángulo cenital que influye en la radiación solar que llega a la superficie terrestre, como se explicó en la sección 2.5. Es decir, durante los meses de verano, el ángulo cenital alcanza valores mínimos anuales y su coseno toma valores cercanos a uno, por lo

tanto la radiación es mayor. Lo contrario sucede en los meses de invierno. En particular, en el periodo representado, el valor máximo del índice fue mayor a 14 para ambas ciudades, el día 31/12/2015 en Mar del Plata y el día 14/1/2016 para Buenos Aires. El valor de la columna total de ozono para dichas fechas fue de 246 UD para ambas localidades y es el valor mínimo de la CTO encontrado. Los valores similares del índice UV para ambas ciudades se debe a que en ambos casos se presenta una CTO similar y, al encontrarse las ciudades en una latitud muy similar y las fechas estar cercanas en tiempo, no hay grandes variaciones en cuanto al ángulo cenital solar. A partir de estos datos y observando las Figuras 20 y 21, se puede advertir en rasgos generales que a menor valor de ozono, mayor es el índice UV.

### 3.4. Cálculo del Factor de Modificación de Nube (CMF)

A partir de los datos obtenidos del índice UV modelado y del CERES, se calculó el CMF, factor que representa la atenuación específicamente para el índice UV. Se presentan a continuación los siguientes gráficos del IUV del CERES en función del CMF, para todos los meses de diciembre, enero y febrero entre 2004 y 2016 para la ciudad de Mar del Plata y Buenos Aires. El total de los días analizados para Mar del Plata es de 933 y para Buenos Aires de 982 días



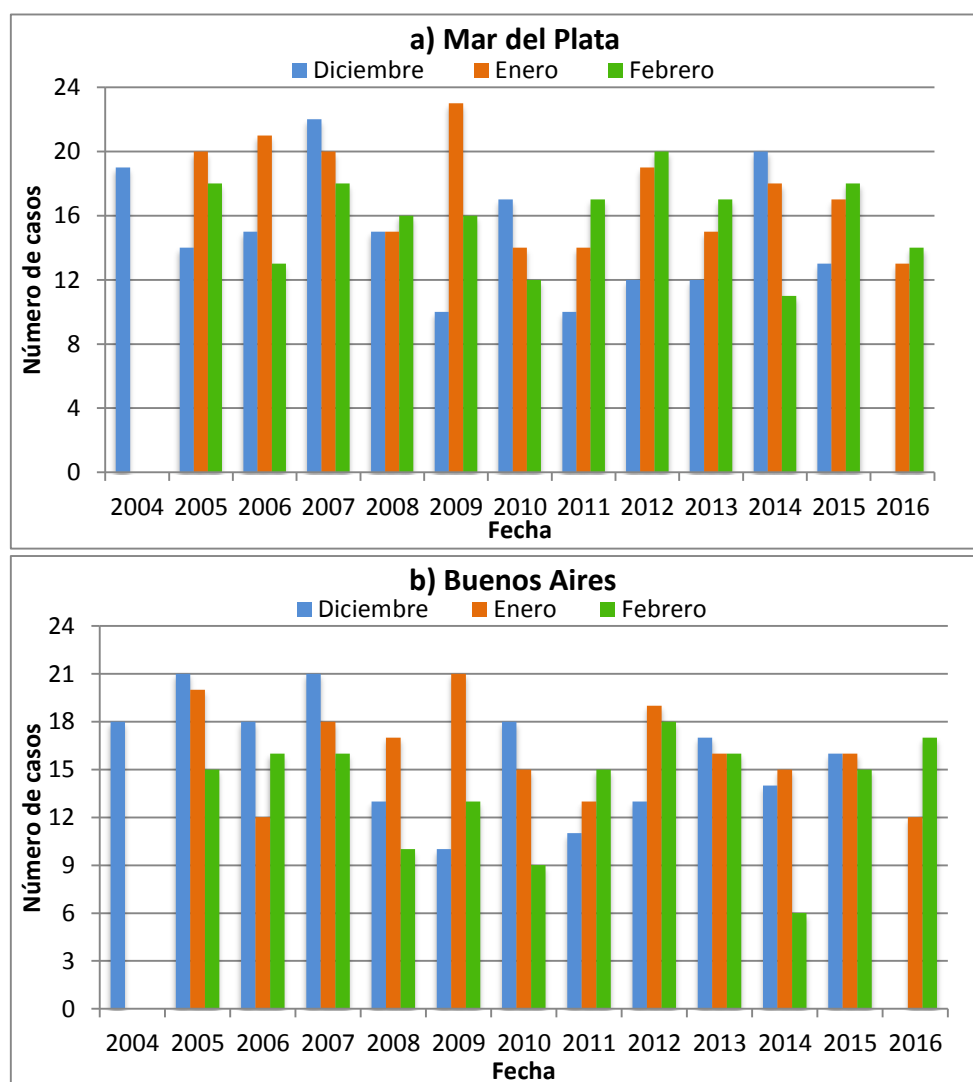
**Figura 22.** Índice UV del CERES en función del Factor de Modificación de Nube para los meses diciembre, enero y febrero en la ciudad de a) Mar del Plata y b) Buenos Aires.

A partir de la Ecuación 16, se sabe que el CMF toma el valor cercano a uno cuando el cielo se encuentra despejado. Para este valor se observan índices UV del CERES muy

### Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

altos, es decir mayores a 8. Por el contrario, cuando el CMF es próximo a cero, el cielo se encuentra cubierto de nubes y por lo tanto los valores del IUUV son bajos. Los valores que se encuentran por encima de uno se deben al error de ajuste del modelo paramétrico y en el caso de Buenos Aires se observa una nube de puntos más densa, lo que quiere decir que ocurre en un mayor número de días comparado con Mar del Plata. Además, se debe considerar los errores de los productos de los satélites utilizados.

Los siguientes gráficos representan el número de casos entre diciembre, enero y febrero de cada año con un CMF entre 0,9 y 1, esto es días con cielo despejado.



**Figura 23.** Número de días despejados, con Factor de Modificación de Nube entre 0,9 y 1, para diciembre, enero y febrero de 2004 a 2016 para a) Mar del Plata y b) Buenos Aires.

Para ambas ciudades se observa una variación año a año para los meses elegidos. En Mar del Plata el número de días despejados es mayor con un 62% del total de los días analizados frente a un 56% para la ciudad de Buenos Aires. Esto tendría como consecuencia un mayor número de casos con alto índice UV. En Buenos Aires, el mes que presentó una mayor variación fue febrero con un mínimo de 6 días despejados en

# Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

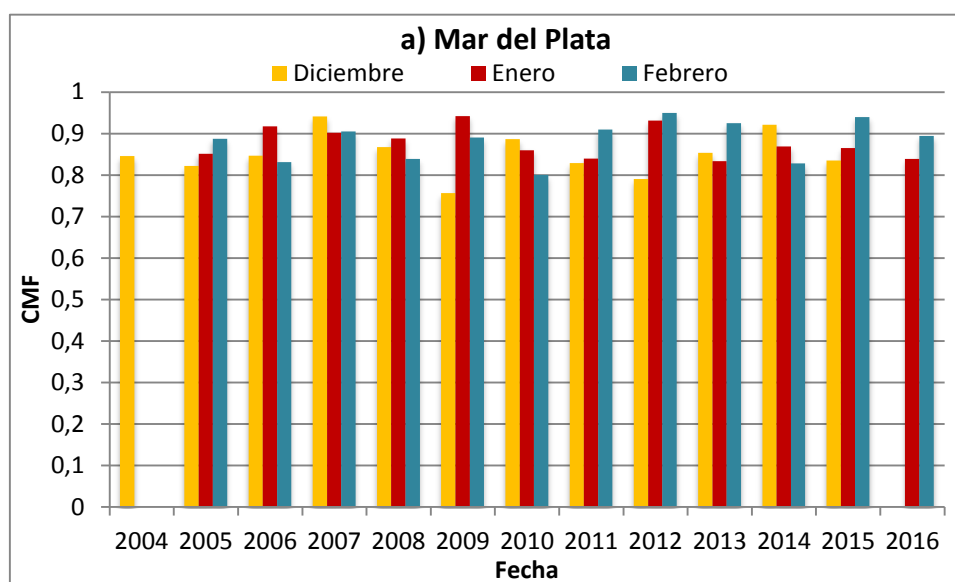
el año 2014 y un máximo de 18 días despejados en 2012, en cambio diciembre tuvo un promedio de 15 días despejados y enero un promedio de 16 días. Para Mar del Plata, los tres meses fueron muy variables aunque enero fue el que mantuvo un mayor número de días despejados con un promedio de 17 días y llegando a un máximo de 23 días despejados en 2009. Para el mes diciembre se obtuvo un promedio de 15 días despejados y para febrero un promedio de 16 días. En la Tabla 3 se presenta el porcentaje de días despejados por mes para cada una de las ciudades.

**Tabla 3.** Representación porcentual de los días despejados ( $0,9 < \text{CMF} < 1$ ) para los meses de diciembre, enero y febrero para las ciudades de Mar del Plata y Buenos Aires entre los años 2004 y 2016.

Mes	Mar del Plata	Buenos Aires
Diciembre	53% (179 días)	57% (190 días)
Enero	66% (209 días)	57% (194 días)
Febrero	67% (190 días)	54% (166 días)

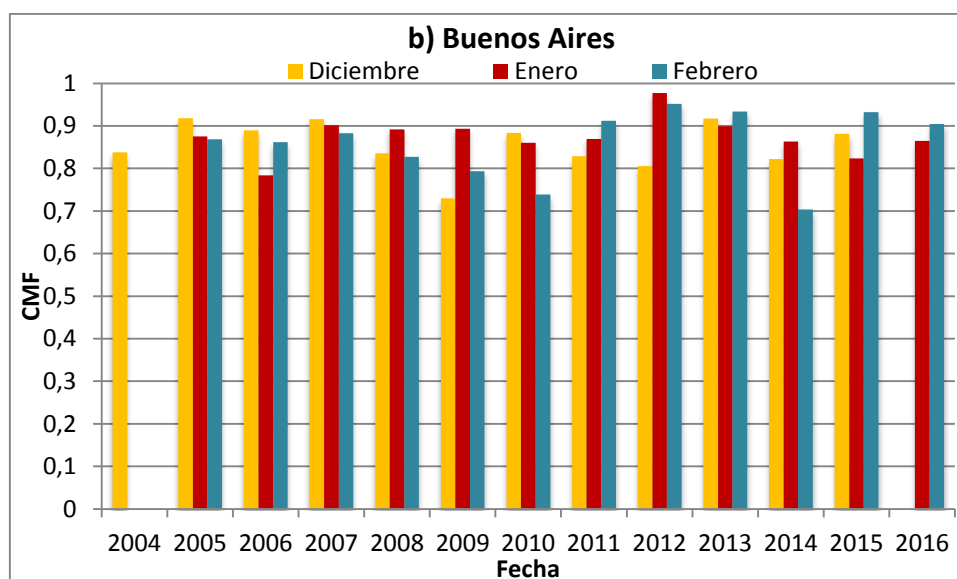
Según la tabla anterior, el mes con mayor cantidad de días despejados es enero en ambas ciudades, seguido por febrero y diciembre en Mar del Plata y por diciembre y febrero en Buenos Aires.

En la Figura 24 se presenta el promedio del CMF para los meses de diciembre, enero y febrero entre 2004 y 2016 para las ciudades de Mar del Plata y Buenos Aires.





## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 24.** Promedio del Factor de Modificación de Nube para los meses de diciembre, enero y febrero desde el 2004 al 2016 para las ciudades de a) Mar del Plata y b) Buenos Aires.

Observando la figura anterior, el promedio para los meses elegidos es igual o superior a 0,8 para ambos lugares, esto da una idea sobre la condición del cielo durante los meses de verano, es decir que en promedio un 20% del cielo se encontraba cubierto de nubes.

### 3.5. Cuantificación de casos de IUV atenuados según su clasificación

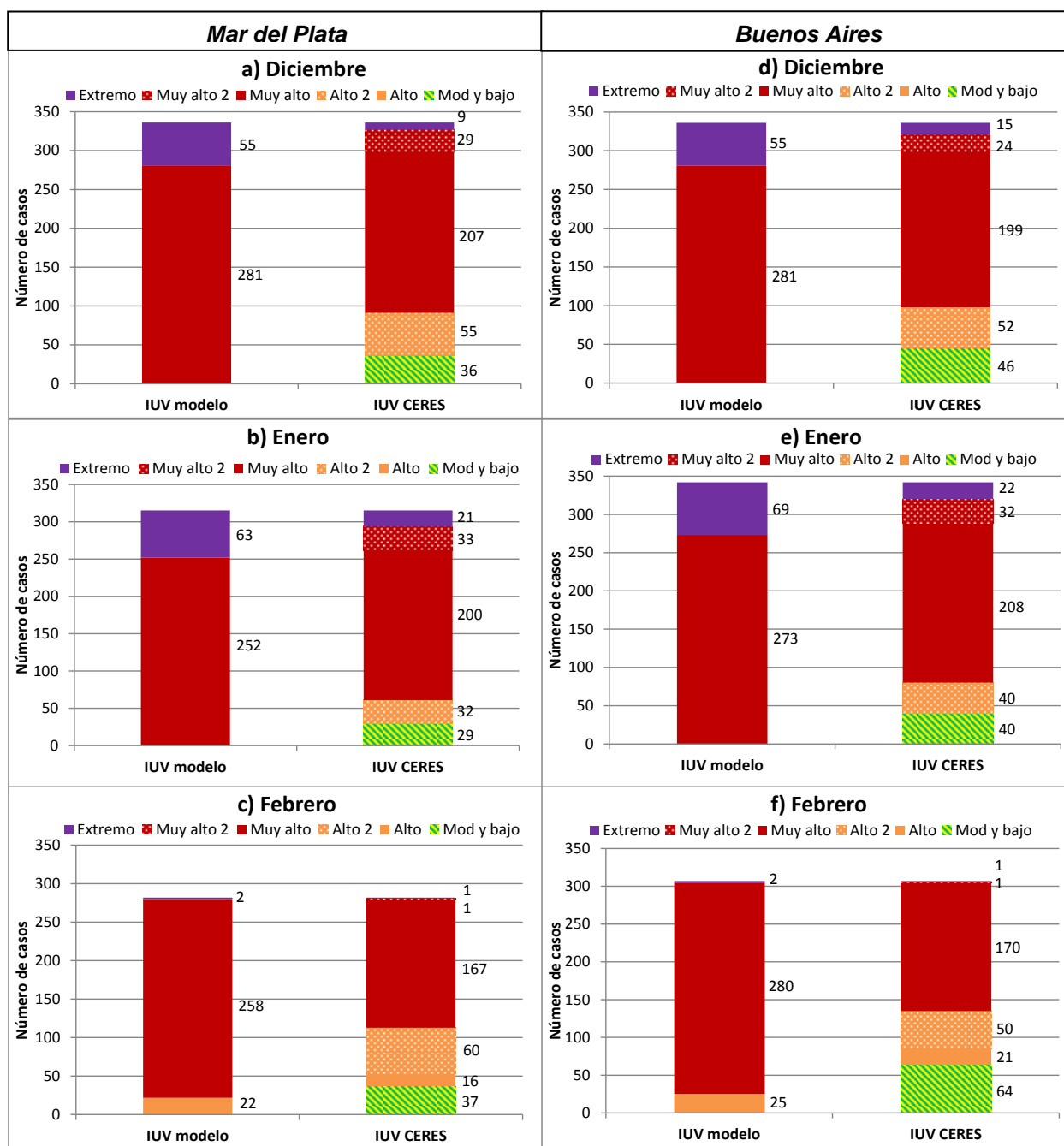
En este apartado se presentan los casos calculados de índice UV que alcanzan las categorías “Moderado y bajo”, “Alto”, “Muy Alto” y “Extremadamente Alto”, basados en la categorización realizada por la Organización Mundial de la Salud (4), para condiciones de cielo despejado obtenidos con el modelo de la Ecuación 20, utilizando el valor de la columna total de ozono del sensor OMI. Además, se presentan los valores medidos proporcionados por el sensor CERES que tiene en cuenta situaciones tanto de cielo despejado como nublado (también considera la atenuación de otros gases y partículas). Se debe tener en cuenta que hay días en donde no se tiene datos debido a que el sensor OMI no realizó mediciones lo que imposibilitó el cálculo del IUV por el modelo. Esta es la razón por la que puede haber diferencia en el número de casos totales para cada ciudad y para cada mes. También debe considerarse que se trabaja con un promedio entre las 12 y 15 horas, por lo tanto no corresponde al valor máximo del índice durante el día, el cual se da en el mediodía solar en condiciones de cielo despejado.

Considerando lo analizado en el apartado anterior sobre la cantidad de días despejados para cada mes en cada ciudad y sabiendo cómo trabaja cada índice, la proporción de casos que son atenuados pueden ser directamente calculados comparando las cantidades de casos de IUV que se encuentran en las distintas categorías para los datos modelados (cielo despejado) versus los datos medidos (cielo con condiciones reales). Por lo tanto, la atenuación puede ser directamente atribuida a la nubosidad, teniendo en cuenta que la atenuación producida por la contaminación de gases o partículas es despreciable. Este análisis se realizó para las ciudades de Mar

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

del Plata y Buenos Aires, en los meses de diciembre, enero y febrero entre los años 2004 y 2016.

En los siguientes gráficos se muestran los casos totales que se encontraron en cada uno de los meses y para las distintas clasificaciones del índice a lo largo del periodo mencionado en Mar del Plata y Buenos Aires.



**Figura 25.** Número de casos para los meses de diciembre, enero y febrero obtenidos a partir del modelo paramétrico (barra derecha) y del sensor CERES (barra izquierda) para la ciudad de Mar del Plata (columna izquierda: a, b y c) y Buenos Aires (columna derecha: d, e y f) desde diciembre 2004 a febrero 2016. Las categorías “Moderado y bajo”, “Alto 2” y “Muy alto 2” corresponden a los datos del CERES que fueron atenuados y que corresponden a categorías superiores obtenidos con el modelo.

La Figura 25 muestra la cantidad de casos para cada clasificación tanto con el IUV modelado (barra izquierda) como con el IUV del sensor CERES (barra derecha) para ambas ciudades. La primera representa los casos potenciales de índice UV sin presencia de nubes, mientras la segunda representa la cantidad de casos reales en los que el índice UV alcanzó cada categoría, durante el periodo elegido (2004-2016). Las categorías “Muy alto 2”, “Alto 2” y “Moderado y bajo” que aparecen en color con trama rayada o con puntos, representan los casos que no se detectaron con el modelo y por lo tanto fueron atenuados por la presencia de nubes, es decir que corresponden a categorías mayores con el índice modelado. Por ejemplo, para los meses de enero en Mar del Plata (Gráfico b), el total de días analizados es 315. En condiciones de cielo despejado (índice modelado) se encontraron 63 días “Extremadamente alto” y 252 días “Muy alto”, mientras que en condiciones reales del cielo (índice del sensor CERES) sólo se encontraron 21 días “Extremadamente alto” y 233 días “Muy alto”, de los cuales 33 fueron atenuados (“Muy alto 2”). Del resto de los días, 32 fueron “Alto 2” y 29 fueron “Moderado y bajo”, los cuales también fueron atenuados por las nubes ya que no se observan en situación de cielo despejado. Por lo tanto, los días atenuados totales son 94 y representan un 30% del total de días analizados durante los meses de enero entre 2005 y 2016.

En la siguiente tabla, se presentan los porcentajes de días atenuados para los meses de diciembre, enero y febrero para ambas ciudades. Estos porcentajes representan los valores que se observan en la Figura 25 en color con trama (“Moderado y bajo”, “Alto 2” y “Muy alto 2”), encontrados con el índice del sensor CERES y que para estos mismos días los valores obtenidos con el índice modelado son categorías mayores. Por lo tanto, fueron atenuados por la presencia de nubes en el cielo.

**Tabla 4.** Representación porcentual de la atenuación del IUV para los meses de diciembre, enero y febrero durante los años 2004-2016 para la ciudad de Mar del Plata y Buenos Aires.

Mes	Mar del Plata	Buenos Aires
Diciembre	36% (120 días)	36% (122 días)
Enero	30% (94 días)	33% (112 días)
Febrero	35% (98 días)	37% (115 días)

De acuerdo a la Tabla 4, el porcentaje de atenuación se encuentra entre 30% y 37% según la ciudad. Para ambas ciudades, la mayor cantidad de días atenuados ocurrieron en el mes de diciembre, sin embargo, para Buenos Aires durante los meses de febrero hubo un mayor porcentaje total de atenuación (37%). Esta diferencia está dada por la cantidad de días analizados de acuerdo a las mediciones del sensor OMI.

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

**Tabla 5.** Representación porcentual de cada clasificación del índice UV modelado y del medido con el CERES para la ciudad de Mar del Plata y Buenos Aires durante el periodo 2004/2016.

Clasificación	Mar del Plata		Buenos Aires	
	IUV modelo	IUV CERES	IUV modelo	IUV CERES
Extremo	13%	3%	13%	4%
Muy alto	85%	68%	85%	64%
Alto	2%	18%	2%	17%
Moderado y bajo		11%		15%

Se puede observar en la Tabla 5 que el modelo sobreestima los valores reales del índice UV, siendo siempre mayor el porcentaje de los casos “Extremo” y “Muy alto” calculados con el modelo (13% y 85%, respectivamente) comparado con el CERES (aproximadamente 3% y 66%, respectivamente dependiendo de la ciudad). Por otra parte, para los casos de índice “Alto”, el porcentaje es mayor con el CERES que el obtenido con el modelo (aproximadamente 18% y 2% respectivamente según la ciudad). Por último, los casos “Modelado y bajo” sólo se encuentran en el índice UV del CERES y representan más del 10% del total de los casos. Estas dos últimas situaciones, se debe a la atenuación del índice que se lo atribuye a la presencia de elevada nubosidad, lo cual se observa en los gráficos de la Figura 23 y Figura 24. Por lo tanto, la diferencia de porcentajes entre ambos índices representa la cantidad de días que fueron atenuados.

De la Figura 25, se observa que el índice predominante es “Muy alto” para los tres meses y que los casos “Extremo” ocurren principalmente durante los meses de diciembre y enero, tanto para el índice modelado como para el del CERES y para ambas ciudades. Mientras que para diciembre y enero la cantidad de días con índice UV medido “Muy alto” y “Extremo” son elevados, siendo de aproximadamente el 70% y menos del 10% respectivamente para ambas ciudades, estos disminuyen para el mes de febrero (menos del 60% y 0,5%, respectivamente) y en cambio aumentan la cantidad de días con índice “Alto” y “Moderado y bajo”.

Comparando ambas localidades, en lo que respecta del mes de diciembre, la cantidad de casos modelados para las categorías “Extremo” y “Muy alto” son iguales, 16% y 84% respectivamente, debido a que se encuentran en latitudes muy similares, como se dijo anteriormente, y el total de los casos es de 336 para ambas ciudades. Por otra parte, los casos reales del índice, es decir los del CERES, durante este mes son muy similares en todas sus categorías: 3% “Extremo” para Mar del Plata y 4% para Buenos Aires, 70% “Muy alto” para Mar del Plata y 66% para Buenos Aires, 16% “Alto” para ambas ciudades y 11% “Moderado y bajo” para Mar del Plata y 14% para Buenos Aires.

En el mes de enero, el índice UV modelado obtenido está representado en un 20% “Muy alto” y un 80% “Extremo” para ambas ciudades, mientras que para el índice UV real no se encontraron grandes diferencias en el número de casos entre las dos localidades: 7% “Extremo”, 74% “Muy alto”, 10% “Alto” y 9% “Moderado y bajo” para

Mar del Plata versus 6% “Extremo” y 70% “Muy alto”, 12% “Alto” y 12% “Moderado y bajo” para Buenos Aires.

Por último, para el mes de febrero la mayor diferencia observada con los meses anteriores, es que se encontraron valores de índice UV modelado en la categoría “Alto”, siendo de un 8% de los casos para ambas ciudades. Para índices “Muy alto” y “Extremo”, el porcentaje fue de 91% y 1% respectivamente. En cuanto a los valores del índice del CERES, el comportamiento es muy similar entre ambas ciudades, siendo de 0,5% “Extremo” para ambas ciudades, 59% “Muy alto” para Mar del Plata y 56% para Buenos Aires, 27% “Alto” para Mar del Plata y 23% para Buenos Aires y, por último, 13% “Moderado y bajo” para Mar del Plata y 21% para Buenos Aires, siendo en esta categoría la mayor diferencia entre ambas localidades.

En la Tabla 6 se resume la diferencia de porcentajes que representa los casos atenuados por ciudad y por categoría del índice UV y que, por lo tanto, en situación de cielo real pasaron a categorías menores que los que se encontrarían en situación de cielo despejado.

**Tabla 6.** Diferencia de porcentajes de los casos encontrados entre el índice UV modelado y el índice UV del sensor CERES para la ciudad de Mar del Plata y Buenos Aires y para cada clasificación del índice, durante los meses de diciembre, enero y febrero desde el 2004 al 2016.

Clasificación	Mar del Plata	Buenos Aires
Extremo	10%	9%
Muy alto	17%	21%
Alto	-16%	-15%
Moderado y bajo	-11%	-15%

De la tabla anterior, se observa que la suma de porcentajes entre los casos “Extremo” y “Muy alto” (27% para Mar del Plata y 30% para Buenos Aires) es la misma que la suma entre los casos “Alto” y “Moderado y bajo” pero con signo opuesto. Esto quiere decir que los casos de las primeras dos categorías que se obtienen con el IUV modelado, pasan a categorías menores con el IUV del sensor CERES.

En total, según la Tabla 4, para la ciudad de Mar del Plata un 34% del total de los días analizados (933) fueron atenuados y para Buenos Aires un 35% del total de los días (982). De acuerdo a la Tabla 3, se encontró que para Mar del Plata el total de días nublados es un 38% y para Buenos Aires un 44%, valores similares a los encontrados sobre los días atenuados.

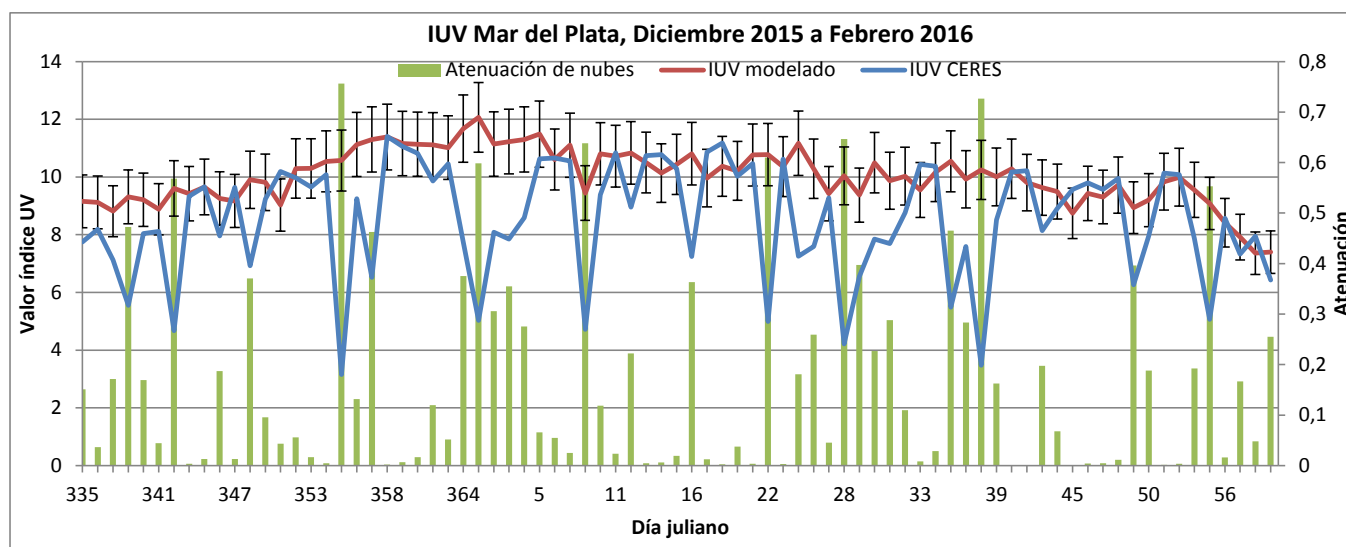
### 3.6. Análisis del verano 2015-2016 para la ciudad de Mar del Plata

Como se nombró en la introducción, Mar del Plata es la ciudad de la costa bonaerense que recibe la mayor cantidad de turistas durante el verano, es por esta razón que se toma como ejemplo para el análisis de un caso específico.

En la siguiente figura se grafica el IUV modelado, calculado con valores de CTO del sensor OMI, el IUV proporcionado por el CERES y la atenuación debido a la presencia de nubes, desde diciembre de 2015 a febrero de 2016. Los valores representados

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite

corresponden al promedio entre las 12 y las 15 horas local. Los valores de IUV modelado poseen una barra de error de  $\pm 10\%$  de acuerdo al modelo de Madronich (3).



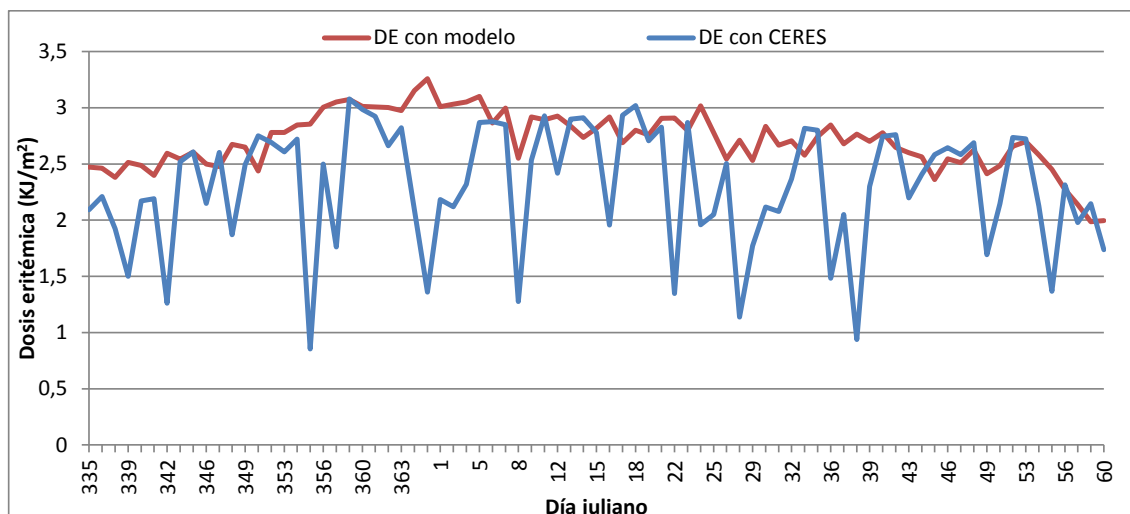
**Figura 26.** Índice UV modelado (rojo), índice UV del sensor CERES (azul) y atenuación debido a nubes (barra verde) para la ciudad de Mar del Plata desde diciembre 2015 a febrero del 2016, con un error de  $\pm 10\%$ . La atenuación se calculó con la Ecuación 18.

Se observa en general que cuando la atenuación por la nubosidad es mayor a 0,3, el valor del índice UV del CERES es considerablemente más pequeño comparado con el índice UV modelado, por ejemplo para el día juliano 365. Esto indica que la presencia de nubes es uno de los factores que influye en forma significativa en el valor que toma el índice, aunque no quiere decir que sea el único. Además se observa que en algunos días con una atenuación menor a 0,3, los valores del índice del CERES son muy similares a los valores del índice modelado. Sólo en algunos casos sucede lo contrario, es decir que el índice del sensor CERES es mayor al índice modelado, lo cual es debido a errores de ajuste del modelo original de Madronich que, de todas formas, se encuentran dentro del 10% expresado por las barras de error.

Se puede decir que el riesgo potencial está dado por el valor que se obtiene a partir del modelo paramétrico y, en cambio, el riesgo real está representado por el valor del índice obtenido por el CERES.

A partir de la Ecuación 15, se calculó la dosis eritémica con el valor promedio del IUV entre las 12 y 15 horas para este mismo periodo y misma localidad, tanto con el índice UV aportado por el CERES como para el índice UV modelado (Fig. 27). En el siguiente gráfico se presentan los valores obtenidos.

## Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 27.** Valores de dosis eritémica ( $\text{KJ/m}^2$ ) promedio entre las 12 y 15 hora local, calculados con el índice UV modelado (línea roja) y con el índice del CERES (línea azul) desde diciembre 2015 a febrero 2016 para la ciudad de Mar del Plata.

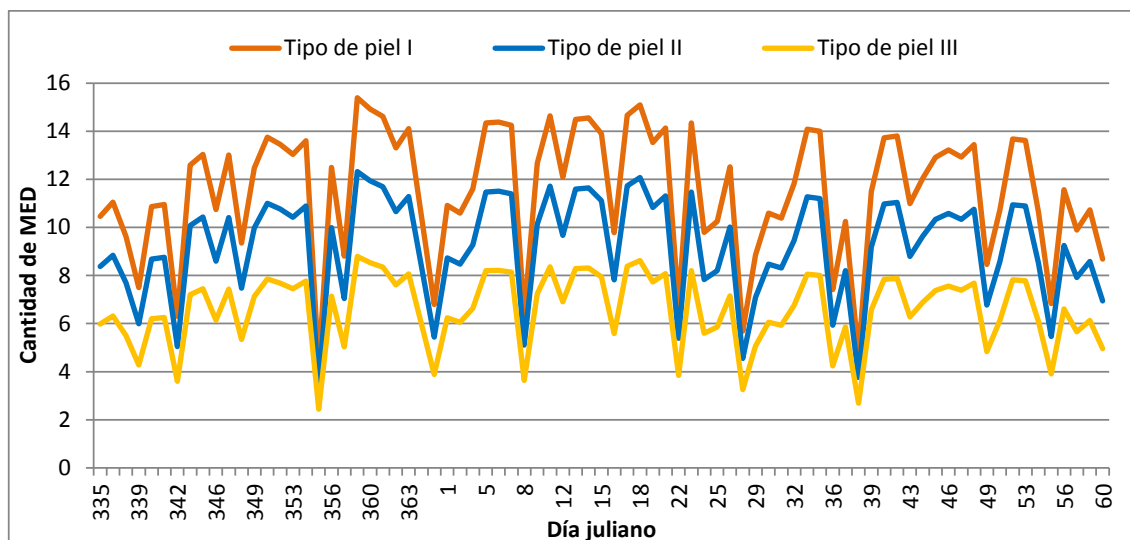
Se observa que la dosis eritémica calculada de ambas formas difiere significativamente entre sí, debido a las condiciones de cielo que cada uno considera. En general, la dosis calculada con el índice modelado se encuentra por encima de la dosis real, es decir la obtenida a partir del índice medido por el CERES, y aquellos días en donde las dosis son iguales o muy cercanas, se debe a que el cielo se encontraba despejado.

En cuanto a la dosis calculada a partir del índice del CERES, se puede ver una gran variación a lo largo del periodo, donde el máximo obtenido es de  $3,08 \text{ KJ/m}^2$  para el día 24 de diciembre y el mínimo es de  $0,85 \text{ KJ/m}^2$  para el 21 de diciembre. Ésta variación es debida a que tiene en cuenta las condiciones reales del cielo, tanto nublado como despejado, dejando en evidencia que la cobertura nubosa puede atenuar más del 70% de la dosis eritémica en situaciones de cielo con alta cobertura nubosa. En el caso de la dosis eritémica calculada con el índice modelado, no presenta una gran variación sino que sus valores son más altos y constantes por siempre tener en cuenta condiciones de cielo despejado y sólo variar a causa del ángulo cenital mínimo y la CTO. El máximo se obtuvo para el día 31 de diciembre con un valor  $3,26 \text{ KJ/m}^2$  y el mínimo para el día 29 de febrero con un valor  $2 \text{ KJ/m}^2$  aproximadamente.

A continuación, se presenta en que cantidad la dosis eritémica recibida real promedio entre las 12 y 15 hora local, calculada con el índice del CERES, supera a la dosis eritémica mínima (MED) para cada tipo de piel (Tabla 2), esto es la relación entre ambos factores.



# Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



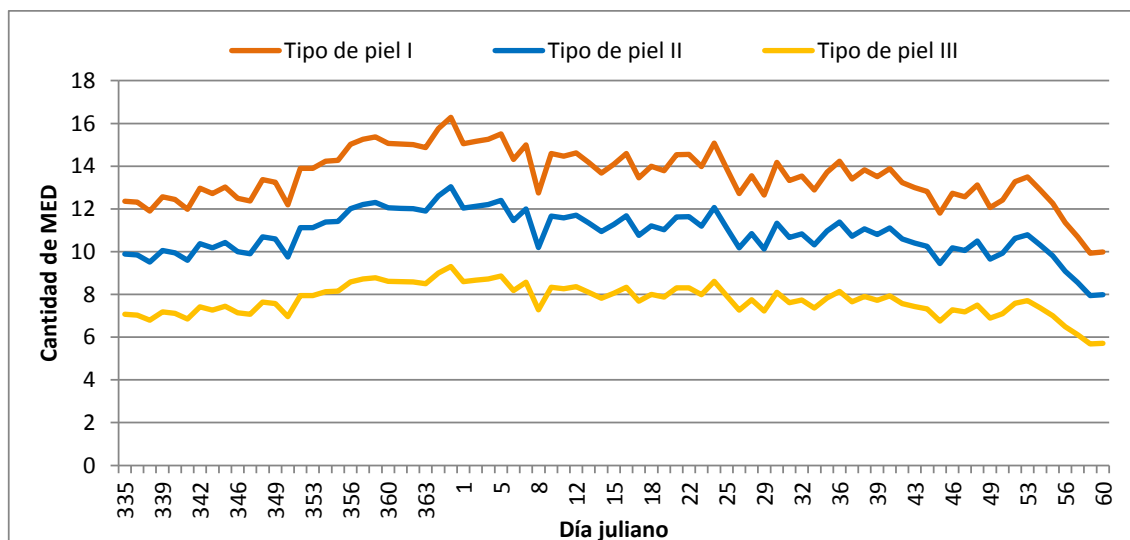
**Figura 28.** Valor de la cantidad de veces en la que la dosis eritémica ( $\text{KJ/m}^2$ ) promedio entre las 12 y 15 hora local calculada a partir del CERES supera a la dosis eritémica mínima, MED (Tabla 2), para los tipos de pieles I (naranja), II (azul) y III (amarillo).

En la Figura 28, se observa que, aunque el comportamiento de las tres curvas es idéntico por el hecho de que todos los tipos de pieles reciben la misma dosis, para el tipo de piel I la dosis eritémica recibida siempre supera ampliamente a la dosis mínima, seguida por el tipo de piel II y luego el tipo de piel III. Además se observa que para un mismo valor de dosis eritémica, las cantidades de MEDs son distintas para cada tipo de piel. Por ejemplo, para día 18 de enero la dosis eritémica es de  $3 \text{ KJ/m}^2$ . Este valor representa 15 veces la dosis mínima para la producción de eritema en el tipo de piel I, 12 veces la dosis mínima para el tipo de piel II y 8 veces la dosis mínima para el tipo de piel III. Por lo tanto, las personas con tipo de piel I son las que están expuestas a un mayor riesgo que aquellas de tipo de pieles II y III y son las que deben tener más recaudos a la hora de exponerse al Sol.

Sabiendo que el riesgo potencial está dado por los valores del índice modelado, por considerar el cielo en situación despejado y por lo tanto representar los mayores riesgos a la salud, la Figura 29 representa en qué cantidad la dosis eritémica calculada supera a la mínima de acuerdo a los valores calculados con el modelo de la Ecuación 20.

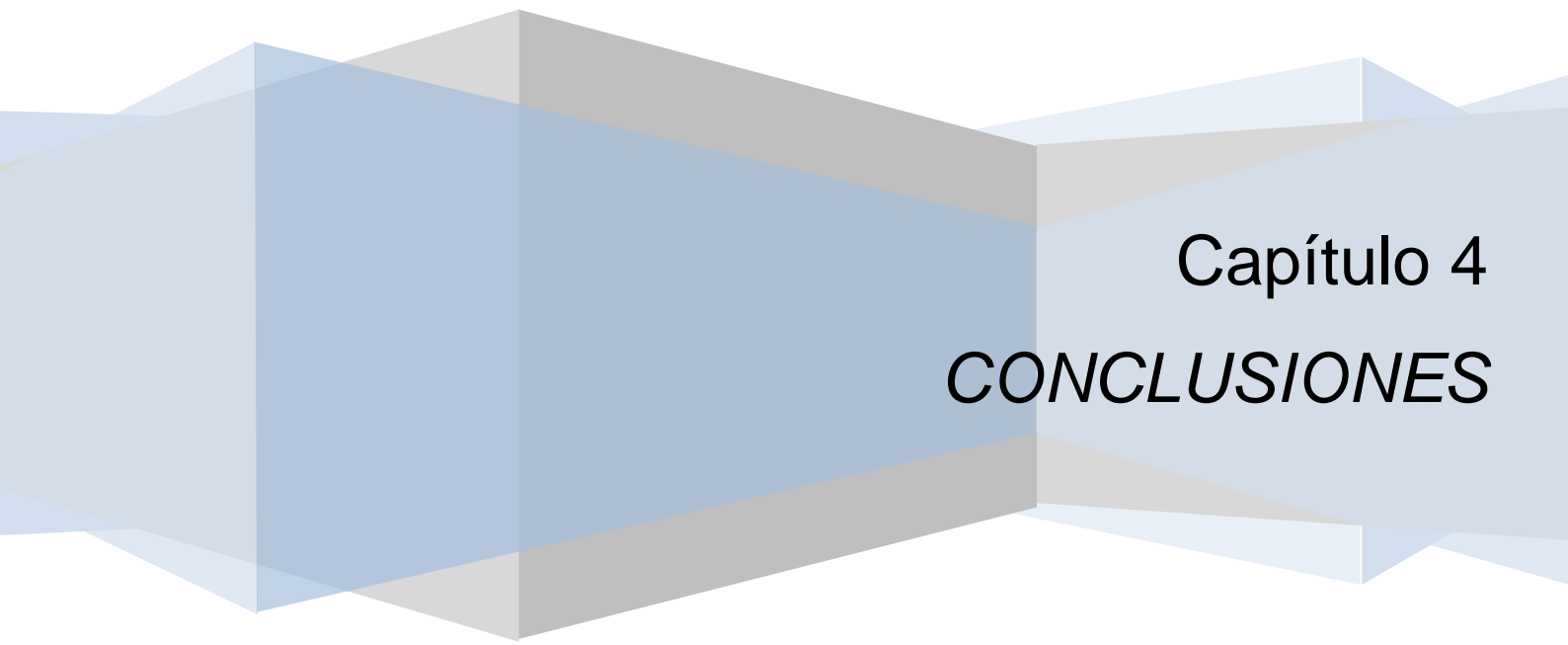


# Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite



**Figura 29.** Valor de la cantidad de veces en la que la dosis eritémica ( $\text{KJ/m}^2$ ) promedio entre las 12 y 15 hora local calculada a partir del índice modelado supera a la dosis eritémica mínima, MED (Tabla 2), para los tipos de pieles I (naranja), II (azul) y III (amarillo).

En este caso, el comportamiento de las curvas también es idéntico y siempre para el tipo de piel I es mayor la cantidad de veces que se supera la dosis mínima. Para el día 18 de enero, el mismo analizado anteriormente, el valor de dosis eritémica correspondiente es de  $2,8 \text{ KJ/m}^2$ , el cual representa 14 veces la dosis mínima para el tipo de piel I, 11 veces para el tipo de piel II y 8 veces para el tipo de piel III. Si se considera otro día, por ejemplo el 24 de enero, se tiene que el valor que toma la dosis eritémica es de  $3,01$  y de  $1,96 \text{ KJ/m}^2$  para el índice modelado y el índice del CERES, respectivamente, valores con una diferencia muy amplia.



## Capítulo 4

# *CONCLUSIONES*

#### 4. Conclusiones

Durante la realización de este trabajo se adquirieron conocimientos sobre la importancia del estudio de la concentración de ozono y los factores que influyen en la misma, así como también la relación con la radiación ultravioleta que logra alcanzar la superficie terrestre. Se consiguió comprender los efectos de este tipo de radiación sobre la salud y su importancia en cuanto a prevención y cuidado. Se lograron conocer algunas de las misiones satelitales que trabajan con parámetros atmosféricos como ozono, nubes e índice UV y se decidió trabajar con dos sensores, OMI y CERES, que ofrecen esta información en sus bases de datos. Se aprendió a bajar los datos desde sus páginas webs y a analizarlos mediante el software Matlab, lo que requirió anteriormente comprender su funcionamiento básico y su utilización.

De forma teórica, se calcularon los tiempos de exposición necesarios para la formación de eritema en los distintos tipos de pieles (I, II y III) que comúnmente se encuentran en esta región para distintos valores de IUV, sin y con factor de protección solar. Se encontró que los tiempos sin el uso de factor de protección son menores a 45 minutos con un IUV igual y mayor a la categoría “Alto” para los tres tipos de pieles. A medida que el índice aumenta, estos tiempos se acortan y, por el contrario, cuando aumenta el factor de protección los tiempos son mayores. Considerando que el IUV predominante es “Muy alto” y “Extremo” y que sólo se necesitan menos de 22 minutos para que se produzca eritema en cualquiera de los tres tipos de pieles (sin protección solar), es fundamental tomar las medidas de fotoprotección sugeridas como el uso de protector solar y de ser posible que sea mayor o igual a 30, como así también renovar la aplicación cada cierto tiempo para asegurar una buena protección.

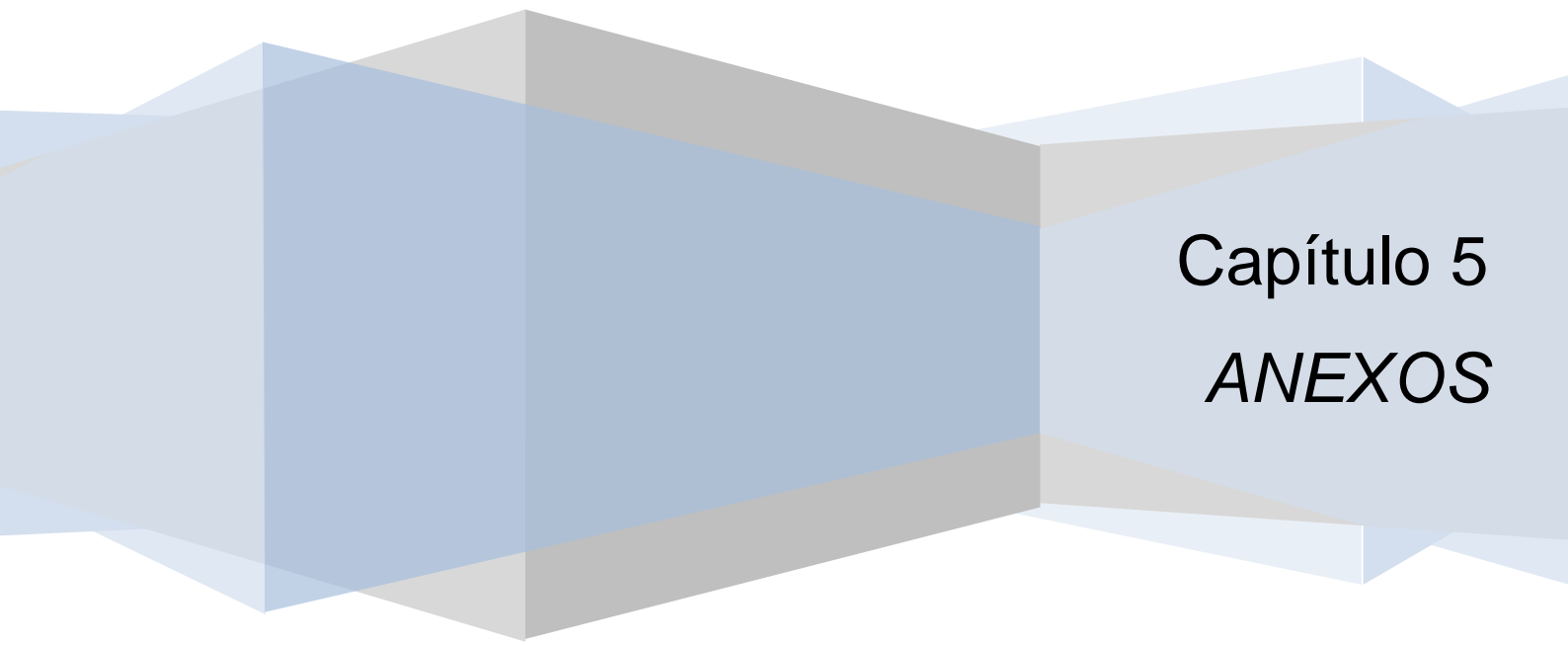
A partir del procesamiento de los datos, se logró calcular nuevos coeficientes adaptados a las condiciones locales para la zona de estudio para el modelo paramétrico con el cual se trabajó. Con la nueva ecuación obtenida, se logró conocer los valores de índices UV que usualmente se alcanzan durante la estación de verano de forma paramétrica y los valores del índice UV que se alcanzan en condiciones reales de la atmósfera a partir de los datos proporcionados por el sensor CERES, durante los meses de verano en el periodo 2004-2016 para las ciudades de Mar del Plata y Buenos Aires. Durante estos meses, considerando la clasificación del índice de la Organización Mundial de la Salud, se obtuvieron que los valores del índice UV modelado fueron un 2% “Alto”, 85% “Muy alto” y un 13% “Extremadamente alto” del total de datos analizados, en promedio para ambas ciudades. En cambio, el IUV obtenido con el sensor CERES presentó valores más diversos, desde bajos a extremos, lo cual se debe a las distintas condiciones de cobertura nubosa presente. En este caso, se obtuvo que, en promedio entre ambas ciudades, un 13% fue “Moderado y bajo”, 17,5% “Alto”, 66% “Muy alto” y 3,5% “Extremadamente alto”. A partir de estas diferencias, se estudió el impacto por la presencia de nubes sobre el IUV, encontrando que puede atenuar hasta un 60% los valores del índice en comparación a los que se obtendrían en situación de cielo despejado.

Se tomó un caso en concreto, temporada 2015/2016, para comparar el valor del índice modelado y el del sensor CERES con la atenuación por la nubosidad, encontrándose que cuando la atenuación es mayor a cero existen diferencias entre ambos índices.

Aunque estas diferencias pueden ser pequeñas, cuando la atenuación es mayor a 0,3 la diferencia entre ambos índices es significativa pero nunca supera al 10% del error del modelo. Para este mismo periodo, se calculó la dosis eritémica recibida real y la calculada con el IUV modelado, promedio entre las 12 y 15 hora local, y se comparó con la dosis eritémica mínima para distintos tipos de pieles, obteniéndose que puede ser hasta 15 veces superior para el tipo de piel I. Para la dosis eritémica recibida real se encontró una gran variación a lo largo del periodo debido a las condiciones de cielo que considera, donde las nubes pueden atenuarla en más de un 70%. A partir de los resultados obtenidos, se puede decir que los valores calculados con el modelo paramétrico representan el riesgo potencial y, por lo tanto, sirven para hacer pronósticos y tomar las medidas de fotoprotección adecuadas para la prevención de daños a la salud, mientras que los valores del índice del sensor CERES describen la situación real. Como trabajo a futuro, se propone estudiar un periodo más extenso para poder identificar si existen cambios o variaciones temporales en cuanto al ozono y por lo tanto al IUV.

También se calculó el Factor de Modificación de Nubes que permitió conocer cuantos días despejados y nublados hubo durante los meses de verano entre 2004 y 2016. Esto se realizó considerando que los valores entre 0,9 y 1 del CMF corresponden a cielo despejado. Se encontró que tanto para la ciudad de Mar del Plata como para Buenos Aires, el promedio del factor para cada mes durante 2004/2016 es igual o mayor a 0,8, esto quiere decir que la presencia de nubes atenúa un 20% del índice. Para la primera ciudad, el 62% del total de los días en el periodo analizado fueron despejados (179 días en diciembre, 209 en enero y 190 en febrero). Para la segunda ciudad, un 56% del total de los días durante el periodo elegido fueron despejados (190 en diciembre, 194 en enero y 166 en febrero).

Considerando, que las playas de la provincia de Buenos Aires son el lugar de veraneo por excelencia de los argentinos y de los visitantes de países vecinos, que cada verano reciben alrededor de 7 millones de turistas (38), y que concretamente Mar del Plata es el destino turístico más importante de Argentina, en donde arribaron un total de 4.276.999 de turistas en la temporada 2015/2016, de los cuales el 58,64% son familias con hijos en edad escolar (39), se cree necesario la creación de un eficiente programa de prevención y educación sobre los efectos y la protección necesaria sobre la radiación UV, especialmente en las ciudades que comprenden la costa bonaerense y desde los meses previos al verano y durante los mismos. De esta manera, la población se encontrará informada y podrá actuar de una manera más consciente en cuanto a la exposición de la radiación solar. Así mismo, los resultados obtenidos en este trabajo, ayudarán a diseñar programas de fotoprotección específicos para la zona geográfica analizada, permitiendo hacer un uso responsable del Sol que permitan evitar daños y maximizar la oportunidad de disfrutar de las actividades al aire libre en forma saludable.



## Capítulo 5

### *ANEXOS*

## 5. Anexos

A continuación se realiza una descripción más detallada de los efectos que produce la exposición a la radiación UV, tanto cutáneos, oculares como sobre el sistema inmunológico.

### 5.1. Anexo I

#### 5.1.1. Efectos cutáneos

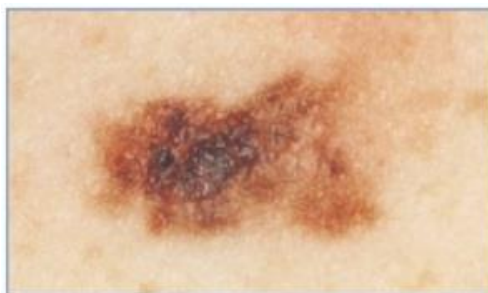
- Quemaduras solares, bronceado y envejecimiento de la piel: el efecto agudo más conocido debido a la exposición excesiva a la radiación UV es el eritema, más conocido como quemadura solar. El bronceado se adquiere unos días después de exposición, como un resultado a la estimulación de la producción de melanina. Otro efecto es el engrosamiento de las capas más externas de la piel, proceso de adaptación que produce una disminución de la penetración de la radiación UV. La exposición crónica ocasiona varios cambios de tipo degenerativo en las células, el tejido fibroso y los vasos sanguíneos de la piel (pecas y nevos). Además se acelera el envejecimiento de la piel y la pérdida gradual de la elasticidad produce arrugas y una piel seca y áspera.
- Cánceres de piel no melánicos CPNM: comprenden los carcinomas de células basales y los carcinomas de células escamosas (Fig. 30). Raramente son mortales, sin embargo el tratamiento quirúrgico es doloroso y en ocasiones desfigurante. Estudios han demostrado que entre las décadas 60 y 80, la prevalencia de CPNM se multiplicó por un factor mayor a dos. Son más frecuentes en las partes del cuerpo expuestas al Sol como orejas, cara, cuello y antebrazos. En algunos países existe una clara correlación entre el aumento de la incidencia de CPNM y la disminución de la latitud, por lo tanto una mayor intensidad de la radiación UV (11).



**Figura 30.** Efectos cutáneos: A) Carcinoma de células basales B) Carcinoma de células escamosas (Fuente: WHO, 2003 (11)).

- Melanoma maligno MM: es menos frecuente que el CPNM pero es la principal causa de muerte por cáncer de piel. Estudios demuestran que durante comienzos de la década de los 70, la incidencia de MM ha aumentado significativamente. El principal factor de riesgo de MM en poblaciones de piel clara es la presencia de numerosos lunares atípicos. Son más frecuentes en personas con tez clara, ojos azules y pelo rubio o pelirrojo. Al parecer, un importante factor de riesgo de sufrir MM es la exposición alta e intermitente a la radiación UV solar. La incidencia de MM en la población de tez blanca generalmente aumenta conforme se disminuye la latitud. Estudios demuestran

que existe una relación con antecedentes de quemaduras solares y particularmente en edades tempranas (11).



**Figura 31.** Efecto cutáneo: Carcinoma maligno (Fuente: WHO, 2003 (11)).

#### *5.1.2. Efectos oculares*

Los ojos se encuentran protegidos por el arco superciliar, las cejas y las pestañas. La luz intensa activa la constricción pupilar y el reflejo de cierre parcial de los párpados para minimizar la penetración de los rayos solares. Sin embargo, en condiciones extremas, como camas solares, arena o nieve, las defensas naturales pierden su eficacia.

La fotoqueratitis y la fotoconjuntivitis son efectos agudos de la exposición a la radiación UV. Son reacciones inflamatorias en los tejidos pseudocutáneos, pueden ser muy dolorosas pero son reversibles y no ocasionan daños a largo plazo en el ojo ni en la visión.

Las cataratas son la principal causa de ceguera en todo el mundo. Se produce una desnaturalización de las proteínas del cristalino, que se disgregan y acumulan pigmentos, aumentando la opacidad del cristalino y acabando por producir ceguera. Un gran porcentaje de personas mayores presentan un cierto grado de cataratas, sin embargo la exposición al Sol, especialmente de radiación UVB, es uno de los factores principales de riesgo (11).

#### *5.1.3. Efectos sobre el sistema inmunológico*

El sistema inmunológico es el mecanismo de defensa del organismo contra las infecciones y el cáncer, y normalmente reconoce y responde de forma muy eficaz a los microorganismos invasores o a la aparición de un tumor. Cada vez hay más evidencias sobre el efecto inmunodepresor sistemático por la exposición a la radiación UV, tanto aguda como de dosis bajas. Además las personas tratadas con medicamentos inmunodepresores presentan una mayor incidencia de carcinoma de células escamosas que la población no tratada. En consecuencia, además de su papel iniciador del cáncer de piel, la exposición al sol puede reducir las defensas del organismo que normalmente limitan el desarrollo progresivo de los tumores cutáneos. Estudios han demostrado que la exposición a niveles medioambientales de radiación UV altera la actividad y distribución de algunas de las células responsables de desencadenar respuestas inmunitarias en el ser humano, estando más expuestas a infecciones y enfermedades y hasta disminuyendo la eficacia de las vacunas (23).



## 5.2. Anexo II

A continuación se presentan algunas fotos tomadas durante el mes de enero del año 2017 en la ciudad de Necochea, provincia de Buenos Aires, como muestra de los tipos de pieles que se pueden encontrar habitualmente en la costa.





**Estudio del impacto de la radiación solar Ultravioleta en las personas por medio de información de satélite**

Las primeras tres fotos (A, B y C) fueron tomadas entre las 13 y 15 horas y las dos últimas (D y E) fotos alrededor de las 18 horas.

Además de los distintos tipos de pieles, se puede observar que en general no se toman las medidas de protección recomendadas, sólo el uso de sombrillas y en algunos casos de gorra y anteojos de sol. Es necesario que para evitar la producción de eritema y de consecuencias a largo plazo se utilicen todas las protecciones mencionadas en la introducción, principalmente durante el mediodía y en niños.

## 6. Bibliografía

1. *Cancer in Ireland 2013: Annual report of the National Cancer Registry*. **Registry, National Cancer**. Cork, Ireland : s.n., 2013.
2. *Manual de Cuidado y Prevención*. **Dermatología, Sociedad Argentina de**.
3. *Analytic Formula for the Clear-sky UV Index*. **Madronich, Sasha**. 2007, Photochemistry and Photobiology, pp. 83: 1537–1538.
4. *Índice UV solar mundial*. **Organización Mundial de la Salud, (OMS)**. s.l. : ISBN 92 4 359007 3, 2003.
5. **Cho, J.V. Iribarne y H.R.** *Atmospheric Physics*. Holanda : s.n., 1980.
6. **García, José Agustín García**. *Apuntes de Meteorología*. Badajoz, España : s.n., 2004.
7. **Chang, Raymond**. *Química*. s.l. : McGraw-Hill/Interamericana, 2010.
8. *El ozono estratosférico*. **Ojeda, Manuel Gil**. ISSN-1139-3394, s.l. : Associació Catalana de Meteorologia, 2006.
9. *Changes in biologically-active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface*. **McKenzie, Aucamp, et. al**. s.l. : Photochemical & Photobiological Sciences, 2007.
10. Teledet. [Online] [Cited: Abril 6, 2016.] [www.teledet.com.uy](http://www.teledet.com.uy).
11. *Índice UV solar mundial: Guía práctica*. **WHO**. 2003.
12. *UV Radiation: Balancing Risks and Benefits*. **McKenzie, Richard, et al**. s.l. : Photochemical and Photobiology, 2008.
13. *Effects of clouds on erythemal and total irradiance as derived from data of the Argentine Network*. **Cede, A., Blumthaler, M., Luccini, E., Piacentini, R.D. y Nunez, L**. s.l. : Geophys. Res. Lett., 2002.
14. *Cloud impacts on UV spectral actinic flux observed during the International Photolysis Frequency Measurement and Model Intercomparison (IPMM)*. **Crawford, J., Shetter, R.E., Lefer, B., Cantrell, C., Junkermann, W., Madronich, S. y Calvert, J**. s.l. : J. Geophys. Res, 2003.
15. *Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance*. **Pfister, G., McKenzie, R.L., Liley, J.B., Thomas, A., Forgan, B.W. y Long, C.N**. s.l. : J. Appl. Meteorol., 2003.
16. *Extreme solar total and UV irradiance due to cloud effect measured near the summer solstice at the high-altitude desertic plateau Puna of Atacama*. **Piacentini, R.D., Cede, A. y Barcena, H**. s.l. : J. Atmos. Sol.-Terr. Phy, 2003.
17. *Influence of aerosol and atmospheric gases on ultraviolet radiation in different optical conditions including smoky mist of 2002*. **Chubarova, N.E**. s.l. : Doklady Earth Sciences, 2004.

18. *Interrelations of UV-global/global/diffuse solar irradiance components and UV-global attenuations on air pollution episode days in Athens, Greece.* **Koronakis, P.S., Sfantos, G.K., Paliatsos, A.G., Kaldellis, J.K., Garofalakis, J.E. y Koronaki, I.P.** s.l. : Atmos. Environ., 2002.
19. *Long-term UV irradiance changes over Moscow and comparisons with UV estimates from TOMS and METEOSAT.* **Chubarova, N.Y., Nezval, Y.I., Verdebout, J., Krotkov, N. y Herman, J.** s.l. : Ultraviolet Ground- and Space- based Measurements, Models and Effects , 2005.
20. *Daily surface UV exposure and its relationship to surface pollutant measurements.* **Barnard, W.F., Saxena, V.K., Carolina, N., Wenny, B.N. y DeLuisi, J.J.** s.l. : J. Air Waste Manag. Assoc., 2003.
21. Servicio Meteorológico Nacional. [Online] [Cited: Febrero 2, 2017.] [www.smn.gov.ar](http://www.smn.gov.ar).
22. *Risk Factor Interventions.* **Krueger, H.** 2005.
23. *INTERSUN: the Global UV Project: a guide and compendium.* **WHO.** 2003.
24. **Vanicek, K., Frei, T., et al.** *UV- Index for the public.* 2000.
25. *Ultraviolet climatology over Argentina.* **Luccini, ed. al.** s.l. : Journal of Geophysical Research, 2006, Vol. 111.
26. INDEC. [Online] Septiembre 2016. [www.indec.gob.ar](http://www.indec.gob.ar).
27. *Ozono.* **NASA.** FS-2001-7-023-GSFC, 2001.
28. **NASA.** Aqua. [Online] [Cited: 07 14, 2017.] <https://aqua.nasa.gov/>.
29. —. Terra. [Online] [Cited: 07 14, 2017.] <https://terra.nasa.gov/>.
30. —. TRMM. [Online] [Cited: 07 14, 2017.] <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>.
31. **Lovengreen vd M, J. L. Alvarez B., H. Fuenzalida P. y M. Aritio G.** *Radiación ultravioleta productora de eritema en Valdivia. Comparación entre inferencias satelitales, modelo de transferencia radiativa y mediciones desde Tierra.* s.l. : Revista médica de Chile, 2002. ISSN 0034-9887.
32. **Orte, Facundo.** *Estudio de la influencia del agujero de ozono y nubosidad sobre la radiación solar UV para la ciudad de Río Gallegos: balance entre eritema y síntesis de vitamina D sobre sus habitantes.* 2009.
33. *The validity and practicality of Sun-reactive skin types I through VI.* **Fitzpatrick, T. B.** 1988, Vol. 124, pp. 869-871.
34. *Validación de los datos de radiación solar UV del Ozone Monitoring Instrument (OMI) a partir de medidas con base en tierra en la costa mediterránea.* **Marchetti, F., Esteve, A.R., Siani, A.M., Martínez-Lozano, J.A., Utrillas, M.P.** s.l. : Revista de Teledetección, 2016.
35. **NASA.** Aura. [Online] [Cited: Septiembre 21, 2016.] <https://aura.gsfc.nasa.gov/>.

36. —. CERES. [Online] [Cited: Enero 21, 2017.] <https://ceres.larc.nasa.gov>.
37. **Smith, G., Priestley, K. and al., et.** *Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES), a review: Past, present and future.* s.l. : Adv. Space Res, 2011.
38. Turismo de Provincia de Buenos Aires. [Online] [Cited: Febrero 4, 2017.] [www.buenosaires.tur.ar](http://www.buenosaires.tur.ar).
39. *Estudio de Demanda – Temporada Estival 2015/2016.* **Plata, Ente Municipal de Turismo Mar del.** 2016. [investigacion@turismomardelplata.gob.ar](mailto:investigacion@turismomardelplata.gob.ar).