



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ciencias

**UN ESTUDIO SOBRE LA TURBIDAD ATMOSFÉRICA  
EN LA CIUDAD DE MANAGUA, NICARAGUA  
DURANTE EL PERÍODO 1983-2002**

**Freddy Estuardo Rodríguez Quezada**  
Asesorado por el Lic. Cesar Antonio Izquierdo Merlo

**Guatemala, febrero de 2006**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**UN ESTUDIO SOBRE LA TURBIDAD  
ATMOSFÉRICA  
EN LA CIUDAD DE MANAGUA, NICARAGUA  
DURANTE EL PERÍODO 1983-2002**

TRABAJO DE GRADUACIÓN  
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**FREDDY ESTUARDO RODRÍGUEZ QUEZADA**

ASESORADO POR LIC. CESAR ANTONIO IZQUIERDO  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**LICENCIADO EN FÍSICA**  
GUATEMALA, FEBRERO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
VOCAL I.  
VOCAL II. Lic. Amahán Sanchez Alvarez  
VOCAL III. Ing. Julio David Galicia Celada  
VOCAL IV. Br. Keneth Issur Estrada Ruiz  
VOCAL V. Br. Elisa Yazminda Vides Leiva  
SECRETARIA. Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO. Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
EXAMINADOR. Lic. Héctor Perez  
EXAMINADOR. Lic. Carlos Castellanos  
EXAMINADOR. Ing. Rodolfo Samayoa  
SECRETARIO. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**Un estudio sobre la turbiedad atmosférica en la ciudad de Managua, Nicaragua durante el período 1983-2002,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ciencias, con fecha Marzo de 2002.



Freddy Estuardo Rodríguez Quezada

Guatemala 13 de febrero de 2006

Ing. Alberto Boy  
Director Escuela Ciencias

Por este medio me dirijo a usted para informarle que luego de revisar el trabajo de graduación del estudiante Freddy Estuardo Rodríguez Quezada, titulado "Un estudio sobre la Turbidad Atmosférica en la ciudad de Managua, Nicaragua, durante el período 1983-2002", considero que llena los requisitos de ley y las exigencias académicas de la carrera de Licenciatura en Física Aplicada.

Sin otro particular, me despido atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Cesar Izquierdo", with a large, stylized flourish extending downwards and to the left.

Lic. Cesar Izquierdo  
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

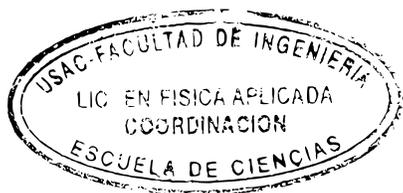
Guatemala, 20 de febrero de 2006

Ing. José Alberto Boy Piedrasanta  
DIRECTOR, ESCUELA DE CIENCIAS  
FACULTAD DE INGENIERIA  
Ciudad

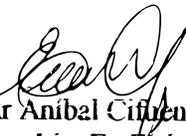
Estimado Ingeniero Boy

Me dirijo a usted para informarle que he realizado la revisión al trabajo de graduación "UN ESTUDIO SOBRE LA TURBIDIDAD ATMOSFERICA EN LA CIUDAD DE MANAGUA, NICARAGUA, DURANTE EL PERIODO 1983-2002", del estudiante **Freddy Estuardo Rodríguez Quezada**; y considerando que cumple con los objetivos de la carrera de Licenciatura en Física Aplicada, le doy mi aprobación.

Muy Atentamente,



"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Lic. Edgar Anibal Cifuentes Anleú  
Coordinador, Lic. En Física Aplicada  
Departamento de Física  
Facultad de Ingeniería

c-c- archivo



El Director de la Escuela de Ciencias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con el visto bueno del Coordinador de la Licenciatura en Física Aplicada al trabajo de graduación del estudiante **FREDDY ESTUARDO RODRÍGUEZ QUEZADA**, titulado “UN ESTUDIO SOBRE LA TURBIDIDAD ATMOSFERICA EN LA CIUDAD DE MANAGUA, NICARAGUA, DURANTE EL PERIODO 1983-2002” procede a la autorización del mismo.

Ing. José Alberto Boy Piedrasanta  
Director Escuela de Ciencias



Guatemala, 24 de febrero de 2006

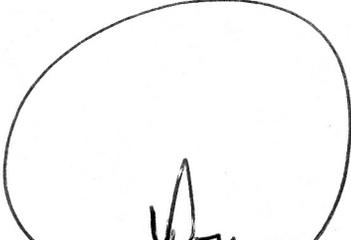
JABP:sevs



Ref. DTG. 040-2006.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ciencias, al trabajo de graduación titulado: **UN ESTUDIO SOBRE LA TURBIDAD ATMOSFÉRICA EN LA CIUDAD DE MANAGUA, NICARAGUA, DURANTE EL PERÍODO 1983-2002**, presentado por el estudiante universitario **Freddy Estuardo Rodríguez Quezada** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Olympe Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, febrero 28 de 2,006

/gdech

# AGRADECIMIENTOS

A Dios inmenso y amante que me incitó desde un principio a admirar las leyes que conducen la naturaleza y me dejó compartir este sentimiento con tantos, en especial con los jóvenes del Grupo Externadista de Ciencias y Astronomía de El Salvador

Al Dr. Julio Lopez de la Fuente S.J. quien durante 20 años recopiló en Managua toda la información en que se basa el presente estudio, y me la confió con muchas esperanzas

A mis profesores, Lic. Cesar Izquierdo, Lic. Oscar Castañeda e Ing. Rodolfo Samayoa que siempre me mostraron la dignidad de sus conocimientos

A Lizbeth Castillo, porque su cariño e inspiración dejaron nuevos anhelos y más autenticidad en mi vida

A mis amigos que no me dejaron donde había quedado, sino que me ayudaron a seguir adelante, a Floribel Bonilla, Julio Ruiz, Domingo Rosa, Robin Yani, Mesala, Pablo, Rodrigo, Geovanni, Manuel, Gustavo, Gracias de veras

A mi mamá y mis hermanos, por su respaldo, comunicación y recuerdos entrañables de mi papá

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	III
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	V
<b>GLOSARIO</b>	VII
<b>RESUMEN</b>	IX
<b>OBJETIVOS</b>	XI
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XIII
<b>1. RELACIONES ENTRE EL SOL Y NUESTRA ATMÓSFERA</b>	<b>1</b>
1.1. La energía en el sol	1
1.2. La atmósfera del sol	5
1.3. Variaciones en la radiación solar	6
1.4. El agua y la atmósfera de la tierra	7
1.5. Principales efectos del Sol en nuestra atmósfera	9
1.6. Atenuación de la radiación solar: esparcimiento y absorción	10
1.7. El esparcimiento de Rayleigh y de Mie	13
1.8. La turbididad atmosférica	17
1.9. Medición de la turbididad atmosférica	17
1.9.1. Un nuevo método para el cálculo de $\beta$	19
<b>2. EL PIROHELIÓMETRO DE ANGSTROM</b>	<b>23</b>
2.1. Medición de la irradiación directa	23
2.2. Medición de la turbididad atmosférica	27
<b>3. CÁLCULO DE LA TURBIDAD</b>	<b>33</b>

<b>4. EL CÁLCULO DE <math>\beta</math> PARA GUATEMALA</b>	<b>55</b>
4.1. Instrumentación solar mínima	55
4.2. Adquisición de datos	56
4.3. Presupuesto	58
4.4. Teoría de la Instrumentación solar	59
4.4.1. Sensores de radiación	59
4.4.2. Instrumentos de medición de radiación directa	61
4.4.3. Medición de la irradiación global: piranómetros	61
4.4.4. Características de piranómetros	62
4.4.5. Clasificación de los piranómetros	64
4.4.6. Medición de la radiación difusa	65
4.4.7. Medición del brillo solar	65
<b>5. DATOS RECOPIRADOS Y CALCULADOS</b>	<b>67</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>101</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>103</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO</b>	<b>107</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Modos de esparcimiento	16
2	Nomograma para la derivación de $\beta$ del radio $D/I_H$	22
3	Datos mínimos de la turbiedad atmosférica	42
4	Turbiedad atmosférica 10:30 a.m.	49
5	Turbiedad atmosférica 11:30 a.m.	49
6	Turbiedad atmosférica 12:30 p.m.	50
7	Turbiedad atmosférica 13:30 p.m.	50
8	Turbiedad atmosférica y su incertidumbre	51
9	Radiación en superficies horizontales	63
10	Pirheliómetro de Angstrom	107
11	Piranómetro	108
12	Anillo de sombra	109

## TABLAS

I	Teoría de Emdem sobre las esferas gaseosas	3
II	Mediciones de corriente del Piroheliometro	29
III	IPS56 [D-RG630] (langleys)	30
IV	Valores para reducción a distancia solar media	31
V	Correcciones de las mediciones solares en Langleys	32
VI	Muestra de la hoja de cálculo	34
VII	Turbididades mínimas ( $\beta \times 1000$ )	37
VIII	Turbididades ( $\beta \times 1000$ ) con su desviación estandard	43
IX	Análisis de medias del período dic-enero	53
X	Lista de precios para internacionales	56
XI	Datos de radiación turbididad totales 10:30 a.m.	68
XII	Datos de radiación turbididad totales 11:30 a.m.	77
XIII	Datos de radiación turbididad totales 12:30 p.m.	85
XIV	Datos de radiación turbididad totales 13:30 p.m.	93

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>RG630:</b>	Cantidad de radiación solar en el rango de absorción por gotas de agua y gases de la atmósfera
$I_{RG630}$ :	Radiación solar para todas las longitudes de onda extrapolado al momento de medir RG630
$\beta$ :	Coefficiente de Angstrom para la turbiedad atmosférica
$S_a$ :	Función de esparcimiento del aire
$S_p$ :	Función de esparcimiento del polvo
<b>H:</b>	Calor absorbido por unidad de tiempo
$I_n$ :	Irradianza directa normal
$I_{sc}$ :	Irradianza solar extraterrestre (constante solar)
$I_H$ :	Radiación directa horizontal
<b>G:</b>	Radiación global
<b>D:</b>	Radiación difusa
$\tau$ :	Transmitancia total
<b>m:</b>	Camino óptico
$\lambda$ :	Longitud de onda monocromática
<b>K:</b>	Factor del piroheliómetro
<b>f(m):</b>	Función de transmisión para aire puro por esparcimiento Rayleigh
$g(\beta)$ :	Función de transmisión debido al esparcimiento del polvo
$\alpha$ :	Constante por distribución del tamaño de las partículas de polvo
<b>S:</b>	Constante solar



## GLOSARIO

**Aerosoles** Humo, cenizas, polen y bióxido de azufre ( $SO_3$ ) que reacciona con el vapor de agua y produce ácido sulfúrico ( $SO_4H_2$ ), que queda en suspensión en la estratosfera por hasta dos años, en forma de pequeñas gotas.

**Humedad relativa (HR)** Contenido de vapor de agua del aire, 100% si contiene la cantidad de gramos de vapor de agua por kilogramo de aire a la temperatura dada por la siguiente tabla:

Temperatura °C	-20	-10	0	5	10	15	20	25
razón de mezcla g/Kg	0.75	2	3.5	5	7	10	14	20

**Camino óptico** Expresión corta para la masa relativa de aire óptica  $m_a$  que se define como la razón del camino óptico a lo largo de una trayectoria oblicua a el camino vertical en la dirección del zenith. En el caso del presente estudio la expresión se simplifica al secante del ángulo zenital, o sea el cosecante de la altura solar.

**Turbidad atmosférica** La turbidad o turbidez es cualquier condición de la atmósfera que reduce la transmisión de la radiación. Generalmente se refiere al humo, bruma y polvo que afectan la sección no nubosa del cielo, pues no se toma en cuenta en la turbidad la atenuación que producen las moléculas de aire seco.



## RESUMEN

La radiación solar que atraviesa la atmósfera, se extingue por esparcimiento del aire, gases o polvo y por absorción. Se estudian en este trabajo los distintos procesos de extinción, con énfasis en la atenuación producida por partículas de polvo suspendidas en la atmósfera.

Se comparan los resultados de turbididad obtenidos por 2 métodos distintos, el primero por comparación directa de la irradiancia en una atmósfera turbia con la que se obtendría en una atmósfera limpia, eliminada la extinción debida al vapor de agua con un filtro RG630. El segundo método es el de parametrización, en donde se contemplan todos y cada uno de los procesos de absorción y esparcimiento en la radiación directa y en la radiación difusa, se eliminan los factores comunes a ambas radiaciones por medio de una división y quedan sólo el esparcimiento Rayleigh cuya expresión analítica se conoce exactamente y el esparcimiento Mie, originado por las partículas de polvo y que cuantificado en este trabajo con el coeficiente de Angstrom  $\beta$ , se calcula a partir de las radiaciones medidas y la posición del Sol.

El estudio comienza al dar una relación de las tremendas fuerzas que interaccionan al interior del sol y cómo llega esa energía hasta nosotros. Se define turbididad atmosférica como la presencia de polvo en la atmósfera y se describen los métodos ya mencionados para evaluarla.

Se presenta los datos calculados por medio de gráficas que muestran las tendencias y los fenómenos que originan tal comportamiento. Finalmente se concluye sobre la importancia del estudio y sus repercusiones, en caso se trasladara la experiencia a la Universidad de San Carlos de Guatemala.



# OBJETIVOS

## General

Definir criterios para el conocimiento de la turbididad atmosférica y analizar los procesos naturales que originan su variación.

## Específicos

1. Reportar los resultados de la medición de la turbididad atmosférica en distintas condiciones del día y del clima, con un Pyroheliometro de Compensación de Angstrom.
2. Comparar los resultados de la medición directa de la turbididad en el Pyrheliometro con los resultados del cálculo de la turbididad a partir de la radiación directa y difusa registradas con las sondas solares o piranómetros en Managua durante los últimos 20 años, para así conocer su tendencia actual.
3. Descubrir los ciclos anuales de la turbididad atmosférica en los cuales la tierra se limpia en los cambios que se producen después de un período de lluvias y a lo largo de su comportamiento estacional en la estación seca y húmeda.



# INTRODUCCIÓN

Mediante la observación de los efectos de la energía solar, la humanidad ha podido aprovechar mejor los recursos naturales renovables, principalmente a través de la agricultura que transforma en biosfera la energía del Sol.

La recopilación de más de 20 años de variables solares por parte de la estación actinométrica Vadstena-UCA, motivó el presente estudio atmosférico de la ciudad de Managua entre 1982 y 2002.

Mediante el análisis de la radiación global y difusa se puede conocer el contenido de polvo y/o aerosoles en el aire. Este estudio puede convertirse en referencia para la validación de modelos en la elaboración de mapas solares y de viento que se construyen a partir de datos de fácil adquisición como la profundidad óptica de aerosoles, el agua precipitable, la humedad relativa, la temperatura de rocío, etc.

Evidencias muy concretas muestran que la atmósfera en Managua es limpia y la turbididad va en disminución, siendo solamente alterada por erupciones volcánicas.

La necesidad de monitorear el ambiente natural en Guatemala y el desarrollo del análisis de las condiciones atmosféricas prevalecientes en Nicaragua, hacen que el desarrollo de este trabajo de tesis abarque también una propuesta para el proceso de adquisición de datos de turbididad atmosférica en la ciudad de Guatemala. Por tal motivo, se presenta en el último capítulo los pasos a seguir para medir este parámetro de la atmósfera en esta ciudad, o en otro Departamento.



# 1. RELACIONES ENTRE EL SOL Y NUESTRA ATMÓSFERA

## 1.1. La energía en el sol

Desde el punto de vista de las leyes de la termodinámica, podemos considerar al sol como una esfera gaseosa cuya superficie es muy caliente y donde la presión, densidad y temperatura deben de aumentar continuamente hacia su interior. En base al peso del material solar, se calcula que la presión central debe ser del orden de  $10^{11}$  atmósferas y la temperatura central (siempre que resulten aplicables las leyes de los gases  $PV = nRT$ ) superior a diez millones de grados Kelvin. En los laboratorios terrestres, no es posible reproducir semejante temperatura para estudiar experimentalmente qué sucede con la materia en tales condiciones; no obstante, esto puede lograrse hoy día en forma indirecta, porque en los tubos de alto vacío se pueden producir caídas de potencial de suficiente magnitud como para provocar un bombardeo electrónico de átomos tan violento como el ocasionado por las colisiones en un gas a temperaturas superiores a mil millones de grados. El comportamiento de los átomos, en estas condiciones, nos permite imaginar lo que sucede en el interior del Sol.

Se encuentra así que, a pesar de la alta presión a que están sometidos los estratos internos del sol, el material debe conservarse totalmente gaseoso: según la teoría de Eddington un material tan fuertemente ionizado continúa comportándose como un gas perfecto, puesto que el espacio que ocupan los electrones libres y los átomos despojados de sus electrones es siempre pequeño si se lo compara con el volumen total.

En las condiciones de presión y temperatura que asignamos al centro del Sol y conociéndose el potencial de ionización, se deduce que, los átomos con número atómico menor de seis o siete (hasta el carbono y el nitrógeno), deben haber perdido todos sus electrones exteriores y se han reducido simplemente a sus núcleos. Los átomos de calcio (No. atómico 20) conservarán solamente dos de los electrones más internos y el hierro (No. atómico 26), únicamente dos o tres.

En la sección 1.6 se deducen algunas ecuaciones de la radiación, cuyo significado se tratará desde ya. La energía radiante fluye en todas direcciones a través de los gases interiores del sol por entre los electrones y los iones, aunque escasamente podrá salir toda esta energía de la fotosfera debido a que el sol es completamente opaco a la luz que viene de su centro. Existen 4 formas de opacidad al interior del sol: por transición de un electron ligado, por fotoionizacion cuando un foton tiene suficiente energia para ionizar un atomo, por absorción de un electron libre y por esparcimiento de electrones. Debajo de la fotosfera pueden aplicarse las leyes que gobiernan la radiación del cuerpo negro por el equilibrio termodinámico que origina la opacidad. Una de ellas, la “ley de desplazamiento de Wien”, dice que la longitud de onda correspondiente al máximo de intensidad de un cuerpo negro, multiplicada por la temperatura absoluta es igual a una constante. Si se conoce la constante, se calcula de inmediato que a la temperatura de diez millones de grados y la radiación debe tener una longitud de onda cortísima, del orden de 3 angstrom, es decir, que debe corresponder a lo que se denomina: “rayos X blandos”.

Otra ley de la radiación del cuerpo negro, la ley de “Stefan”, dice que la energía total que emite un cuerpo negro es igual a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, multiplicada por una constante. A diez millones de grados, el flujo en todas las direcciones es  $8 \times 10^{12}$  veces mayor que el que emana de la fotosfera. Es por lo tanto, un flujo de intensidad inconcebible para nosotros, que se transmite lentamente hacia el exterior del Sol mediante una serie de absorciones y reemisiones.

La aplicación al globo solar de la teoría de Emden sobre las esferas gaseosas permite el cálculo de las características físicas (presión, densidad y temperatura) en el centro y a diversas distancias del centro. Si denominamos  $\mathbf{R}$  al radio solar;  $\mathbf{r}$  al radio de las sucesivas esferas entre el centro del Sol y su superficie;  $\mathbf{M}$  la masa solar total y  $\mathbf{M}_r$  la masa contenida en la esfera de radio  $\mathbf{r}$ , tendremos de acuerdo con Waldemeier, los datos siguientes:

**Tabla I. Teoría de Emden sobre las esferas gaseosas**

$\mathbf{r}$ en Km	$\mathbf{r}/\mathbf{R}$	presión en atm.	densidad en $g/cm^3$	temperatura en Kelvin	$\mathbf{M}_r/\mathbf{M}$
0	0	$1.2 \times 10^{11}$	76.5	$19 \times 10^6$	0
200,000	0.28	$1.4 \times 10^{10}$	15.1	$11 \times 10^6$	0.52
400,000	0.58	$2.3 \times 10^8$	0.7	$4 \times 10^6$	0.95
600,000	0.86	$0.5 \times 10^6$	0.001	$0,8 \times 10^6$	1.00

Se observa en la tabla anterior que  $\mathbf{M}_r/\mathbf{M} = 0,52$  cuando  $\mathbf{r}/\mathbf{R} = 0,28$ , es decir, que la mitad de la masa del Sol se encuentra contenida dentro de una esfera cuyo radio es igual a un tercio del radio solar; el volumen de esta esfera es sólo aproximadamente el 4% del volumen total del Sol. De este resultado se deduce que la materia que constituye el sol se encuentra fuertemente concentrada hacia su centro. Sin embargo, a pesar de su densidad tan elevada (mayor que la de cualquier metal), esa materia debe encontrarse permanentemente en estado gaseoso a causa de su altísima temperatura. La temperatura de la fotosfera depende de la velocidad con la cual el calor puede escapar desde el interior del Sol y esto, a su vez, depende de la opacidad de la materia en la base de la fotosfera para impedir que el intenso calor interno pueda escapar con mayor rapidez.

El problema del origen de una energía tan colosal como la que el Sol irradia en todas las direcciones y constantemente (o casi constantemente) durante un período tan prolongado, ha sido discutido muchas veces. Conociéndose la llamada “constante solar”, se calcula que el Sol irradia alrededor de 62.8 MegaWatts/m<sup>2</sup>.

Hoy día puede demostrarse que la gran cantidad de energía que libera el Sol, se origina en los núcleos de los átomos. El hidrógeno tiene peso atómico 1.008, mientras que casi todos los átomos más pesados tienen pesos atómicos enteros; en la formación de un átomo de peso atómico  $x$ ,  $x$  átomos de hidrógeno transformarán en energía una masa:  $(0.008)(x)$ . Como la masa del sol ( $1.98 \times 10^{30}$  kilogramos) está compuesta principalmente de hidrógeno, sólo el 0.008% de su masa se puede transformar en energía, o sea  $1.6 \times 10^{28}$  kilogramos. De acuerdo con la teoría de la relatividad, una pérdida de  $m$  gramos de masa corresponde a la liberación de  $mc^2$  joules, es decir, a  $9.00 \times 10^{16}$  joules por kilogramo. Por consiguiente el Sol dispone de  $1.4 \times 10^{45}$  joules. Como la constante solar es  $S = 1367 \text{ watts/m}^2$  (ver sección 1.3) se tiene que para la radiación total del Sol,  $E_{tot}$ , (llamando  $R$  a la distancia media de la tierra al Sol):

$$E_{tot} = 4\pi R^2 S = 3.8 \times 10^{26} \text{ joules/seg} \quad (1.1)$$

Por consiguiente, la energía disponible en el Sol durará  $0.4 \times 10^{19}$  seg =  $1.3 \times 10^{11}$  años. Quiere decir, que si la formación de elementos más pesados que el hidrógeno se produce ininterrumpidamente, se puede explicar la prolongada vida del sol.

## 1.2. La atmósfera del sol

En las esferas interiores del sol, la materia sube y transporta su energía de un nivel más bajo y caliente a otro superior y más frío, de forma que hay un constante movimiento circular de gases hacia arriba y abajo en la zona de convección. Más arriba sigue la zona de inversión que es donde se encuentran en estado gaseoso todos los elementos químicos que se encuentran en la Tierra. Los fotones en cambio se difunden hacia afuera a través del material solar, por medio de una brisa o leve presión originada por las mismas diferencias de temperatura, pero siguen un camino azaroso con un desplazamiento neto como resultado de un número muy grande de pasos de longitud igual al camino libre medio de los fotones. Vemos así que el transporte de energía por radiación es extremadamente ineficiente, pues se calcula que se necesitan un millón de pasos para desplazarse 1000 veces un camino libre medio.

Debido a que la profundidad óptica (ver sección 1.6) en un punto es aproximadamente el número de caminos libres medios de un fotón de ese punto a la superficie (medidos a lo largo del camino recto de un rayo de luz) y al cálculo del desplazamiento neto se deduce que el número promedio de pasos que un fotón que abandona la superficie toma para desplazarse es el cuadrado de la profundidad óptica. Cuando la profundidad óptica es aproximadamente 1, un fotón puede escapar de la superficie del sol. Se puede probar que el nivel promedio en la atmósfera de donde los fotones de longitud  $\lambda$  escapan es a  $\vartheta = 2/3$ , lo que constituye la fotosfera, donde la luz visible se origina.

La parte gaseosa externa de un planeta, satélite natural o estrella se denomina atmósfera, mas sólo los cuerpos con una gran atracción gravitacional pueden retener una. El Sol posee atmósfera y es la región relativamente transparente a longitudes de onda visibles. Está constituida por la fotosfera, la cromósfera y la corona.

- La fotosfera es la superficie visible del Sol. Consiste en una zona donde las capas gaseosas cambian de ser completamente opacas a la radiación a ser transparentes a la misma. Es la capa o esfera exterior del sol de la cual es emitida la luz que realmente vemos.
- La cromósfera está localizada entre la fotosfera y la corona. Es más caliente que la fotosfera, pero no tan caliente como la corona.
- La corona es la capa exterior de la atmósfera solar y consiste en un gas altamente rarificado con una temperatura mayor de un millón de grados Kelvin. Es visible a simple vista durante un eclipse total de sol.

Todavía no se comprende cómo la temperatura de la corona es tan alta, puesto que la fotosfera está a solo 5,000 grados Kelvin. Más allá de la corona todavía sigue el viento solar, que es un constante flujo de partículas de la corona con una velocidad cercana a los 500 Km. por segundo. El viento solar alcanza la órbita de Plutón (cerca de 5,900 millones de Kilómetros).

### 1.3. Variaciones en la radiación solar

Durante los años 1969 y 1980, mediante distintos instrumentos y con distintas plataformas, se determinó la constante solar promedio a

$$S = 1.96 \text{ cal / cm}^2 \text{ min} = 1367 \text{ W / m}^2 \quad (1.2)$$

con una precisión máxima de los instrumentos del  $\pm 0.3\%$  y finalmente una desviación estandar de  $\pm 1.6 \text{ W/m}^2$ .

Una precisión tal, en la determinación de la constante solar, plantea el problema de establecer sí, por causas inherentes al Sol y a su variable actividad, esa constante puede experimentar una variación de período más o menos largo.

El problema es difícil a causa de las perturbaciones que introduce la atmósfera de la tierra. En general, no debe excluirse la posibilidad de variaciones de corto período, especialmente en determinadas circunstancias, como por ejemplo, durante el paso de grandes manchas solares por el meridiano central del sol, erupciones en dirección a la tierra, etc. Abbot cree que las menores amplitudes de estas variaciones, en el corto plazo, alcanzan el 0.45 % , mientras que las mayores llegan al 2.5 % ; opina además que ellas están relacionadas con las variaciones de la temperatura y la presión de la atmósfera terrestre.

Las erupciones solares son nubes de gases de millones de grados Kelvin que pesan billones de toneladas, expulsadas a millones de kilómetros por hora. Son causadas por enormes fuerzas magnéticas que ocurren casi a diario aunque muy pocas están dirigidas hacia la tierra.

Las manchas solares, son áreas más frías y oscuras en la superficie del sol, causadas por una concentración de las líneas de fuerza magnéticas que pueden durar de varias horas a varios meses. Se desplazan desde las latitudes norte y sur hacia el ecuador solar y su frecuencia es de 11 años. Hubo dos máximos en 1989 y 2000.

## **1.4. El agua y la atmósfera de la tierra**

La atmósfera terrestre no existió desde el principio. El cielo fue una creación de la vida, es decir, la biósfera (compuesta en un principio por algas y diatomeas) tuvo la capacidad de controlar su entorno. Esta vida primigenia se originó en el agua, gracias a importantes propiedades de la misma, la cuales se enumeran a continuación.

1. **El agua al congelarse se expande** <sup>1</sup> con lo cual el hielo flota proporcionando al agua líquida una capa protectora contra los fríos glaciares.
2. **El punto de fusión del agua disminuye con el incremento de la presión** <sup>2</sup> lo cual proporcionó movilidad a los inmensos bloques de hielo en la época glaciaria.
3. **La capacidad calorífica del agua es mucho más grande que la de los continentes.** Esta propiedad, conjuntamente con la inclinación constante del eje de rotación de la tierra en su movimiento de precesión (ver sección 1.5), propició la aparición de climas benignos en nuestro planeta. La capacidad calorífica está definida por  $C = Q/(\theta_i - \theta_f)$  para la absorción de  $Q$  unidades de calor cuando un sistema experimenta un cambio de temperatura de  $\theta_i$  a  $\theta_f$ . <sup>3</sup>

Una consecuencia de esta última propiedad del agua, aplicado a Centroamérica, es la siguiente: Los océanos retienen muy bien el calor que ganan durante el verano y por eso el clima de esta región no es tan inestable como en el centro de los continentes. De manera que la atmósfera cumple además de proveernos de oxígeno, la función de corregir el desfase térmico entre los continentes y los océanos por medio de la circulación general de los vientos.

La composición de la atmósfera es:

- Nitrógeno ( $N_2$ ) 78.8 %
- Oxígeno ( $O_2$ ) 20.9 %
- Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) 0.3 %
- Ozono ( $O_3$ )

---

<sup>1</sup>Feynman, Richard. **The Feynman Lectures on Physics, Part I** (Estados Unidos: Addison Wesley,1963) p. I-4

<sup>2</sup>Fermi, Enrico. **Thermodynamics** (Estados Unidos:) p. 68

<sup>3</sup>Zemansky, Mark. **Calor y Termodinámica** (Estados Unidos: Mcgraw-hill,1968) p. 85

- Vapor de agua (en la tropósfera: 16 Km en el ecuador, 8 Km en los polos).
- Partículas suspendidas: humo, sal, polen, arena, ceniza volcánica, polvo y aerosoles: algunos muy importantes en cuanto puntos de acreción de gotas de agua.
- Agentes contaminantes.

## 1.5. Principales efectos del Sol en nuestra atmósfera

Además de la **traslación** alrededor del sol, la tierra simultaneamente realiza otros movimientos importantes: la **rotación** alrededor de un eje imaginario que la atravieza en los polos y la **precesión** o movimiento cónico de este mismo eje respecto de un punto imaginario. La inclinación de este eje de rotación de la tierra es de  $23,5^\circ$  respecto de la perpendicular al plano de traslación (también llamado el plano de la eclíptica) y completa una circunvalación en 26,000 años.

Debido a este ángulo, el sol alcanza el zenith en el trópico de cancer ( $-23^\circ$  de latitud en el hemisferio sur) seis meses antes de alcanzarlo en el trópico de capricornio ( $23.5^\circ$  de latitud en el hemisferio norte). Este movimiento relativo del sol irradia en forma diferente los dos hemisferios, lo que produce las estaciones, no sólo por el calentamiento desigual, sino particularmente por su atracción gravitacional, pues es la gravedad del mismo la que mueve alternativamente hacia el norte y hacia el sur a las partículas suspendidas en la atmósfera y a las grandes nubes, marcando así las estaciones.

Gaspard Gustave de Coriolis midió por primera vez el movimiento de rotación de la tierra, que va de oeste a este, y arrojó el resultado de 1,700 Km/hora. Este movimiento produce naturalmente una corriente de aire denominada vientos alisios, que constituyen la zona de convergencia intertropical, caracterizada por humedad, calor, cumulonimbos, etc.

La tierra y el agua tienen distintas capacidades caloríficas, lo cual significa que el mar resiste mejor los bruscos cambios de temperatura entre el sol de mediodía y la noche. Esto provoca la circulación de vientos entre el océano y la tierra de la siguiente manera: durante el día tenemos baja presión en la tierra (el calor rarifica el aire) y alta presión en el mar y los vientos fluyen hacia la tierra; durante la noche hay una alta presión en la tierra (el frío hace más denso el aire) y baja presión en el mar y los vientos fluyen hacia el mar. Las altas densidades de aire fluyen hacia las zonas donde hay menos densidad.

Las presiones altas producen: frentes fríos, aire denso y limpio, asentamiento de partículas, anticiclones de trayectoria hacia afuera (a favor de las manecillas del reloj) y avance rápido.

Las presiones bajas traen: frentes cálidos, aire liviano, levantamiento de partículas (mala visibilidad), aire sucio, tropical, avance lento, ciclones (contra reloj) que convergen hacia el centro, mal tiempo, tormenta tropical, depresión y huracán.

## 1.6. Atenuación de la radiación solar: esparcimiento y absorción

Se define la radiación  $I_\lambda$  como la cantidad de energía que tiene longitud entre  $\lambda$  y  $\lambda + d\lambda$  que pasa en un tiempo  $dt$  a través de un área  $dA$  dentro de un ángulo sólido  $d\Omega$

$$I_\lambda = \frac{E_\lambda d\lambda}{d\lambda dt dA \cos\theta \Omega}$$

Mientras la radiación del sol pasa a través de la atmósfera de la tierra, ésta es modificada por los siguientes procesos:

1. Esparcimiento por moléculas de aire y partículas mucho más pequeñas que la

longitud de onda de la luz (esparcimiento de Rayleigh).

2. Absorción selectiva de los gases atmosféricos, particularmente oxígeno, ozono, dióxido de carbono y vapor de agua.
3. Esparcimiento y absorción de masas de nubes.
4. Esparcimiento y reflexión difusa de partículas (por ejemplo, polvo y humo) de tamaño comparable o mayor que la longitud de onda de la luz.

Prácticamente toda la energía en longitudes de onda menores a  $0.3 \mu m$  es removida por el oxígeno y el ozono en las partes altas de la atmósfera. La pequeña cantidad que alcanza la superficie, aunque es de enorme importancia biológica, tiene una influencia negligible en cuanto a intercambios de energía. La parte visible del espectro está sometida a poca absorción selectiva (por el ozono, oxígeno y vapor de agua) pero es absorbida hasta cierto punto no-selectivamente en atmósferas contaminadas de polvo y humo. La absorción del vapor de agua, y en porcentaje mucho menor, del dióxido de carbono es efectiva en el infrarojo.

La radiación difusa es radiación esparcida. Una porción de la radiación difusa es regresada al espacio y otra porción alcanza el suelo, llegando como luz reflejada de las nubes, o del cielo mismo. La radiación que llega al suelo directamente en línea del disco solar se llama radiación directa. La porción restante que no llega al suelo ni regresa al espacio es absorbida por la atmósfera y convertida en calor.

Sea  $I_{on\lambda}$  la radiación de un rayo de luz monocromática que incide en un medio homogéneo. Sea  $I_{n\lambda}$  el flujo emergente del medio, después de atravesarlo una distancia óptica  $m$ . El subíndice  $n$  indica que el flujo se mide perpendicularmente a la dirección de propagación (en la dirección normal).

El cambio en la intensidad  $dI_\lambda$ , de un rayo de longitud  $\lambda$  mientras viaja a través de un gas es proporcional a su intensidad,  $I_\lambda$ , a la distancia recorrida  $ds$  y a la densidad

del gas  $\rho$ , o sea:

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds \quad (1.3)$$

La distancia  $s$  es medida a lo largo del camino que atraviesa el rayo, el signo menos muestra que la intensidad decrece con la distancia debido a la absorción de fotones. La cantidad  $k_\lambda$  se denomina coeficiente de absorción.

Si tenemos  $I_\lambda = I_{on\lambda}$  en  $s = 0$ , la intensidad final  $I_{n\lambda}$  despues de atravesar la distancia  $s$  se encuentra integrando eq. 1.3.

$$\int_{I_{on\lambda}}^{I_{n\lambda}} \frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = - \int_0^s k_\lambda \rho ds \implies I_{n\lambda} = I_{on\lambda} e^{-\int_0^s k_\lambda \rho ds}$$

El término

$$\int_0^s k_\lambda \rho ds \equiv \vartheta_\lambda$$

se denomina profundidad óptica

Usando  $ds = -dz/\cos\theta = -\sec\theta dz$

$$\int_0^s k_\lambda \rho ds = - \int_h^0 k_\lambda \rho \frac{dz}{\cos\theta} = \sec\theta \int_0^h k_\lambda \rho dz$$

La intensidad atenuada queda:

$$I_{n\lambda} = I_{on\lambda} e^{-\vartheta_{\lambda,o} \sec\theta} \quad (1.4)$$

Siendo  $\vartheta_{\lambda,o}$  la profundidad óptica para un foton que atraviesa verticalmente la atmósfera y  $\theta$  es el ángulo subtendido entre el zenith (la perpendicular al punto de medición) y la dirección del sol.

## 1.7. El esparcimiento de Rayleigh y de Mie

Cuando una onda electromagnética choca con una partícula, una parte de la energía incidente es esparcida en todas direcciones. La energía esparcida por partículas esféricas puede ser obtenida de la solución de las ecuaciones de Maxwell en coordenadas esféricas polares. Todas las partículas, ya sean del tamaño de un electrón o del tamaño de un planeta esparcen la radiación. Una solución muy simple se obtiene cuando la partícula es esférica y mucho más pequeña que la longitud de onda de la radiación incidente.

La cantidad de energía absorbida de la onda incidente aumenta conforme la frecuencia de la onda se aproxima a la frecuencia natural del átomo. Para gases de baja densidad donde las interacciones interatómicas son despreciables, la absorción será insignificante y la onda esparcida o rerradiada llevará cada vez más energía conforme la frecuencia impulsora se acerca a una resonancia. Esto da como resultado algunos efectos muy interesantes, cuando las frecuencias naturales del átomo están en el ultravioleta y la onda incidente está en la región visible. En este caso, conforme la frecuencia de la luz incidente aumenta, más y más cantidad de ella será esparcida.

Es precisamente por esta razón, que en una mañana clara y brillante, el cielo es de un azul brillante que lo inunda todo. La luz del sol que fluye en la atmósfera desde una dirección es esparcida en todas direcciones por las moléculas de aire.

Sin una atmósfera, el cielo diurno sería tan negro como el espacio vacío, un punto que se ilustra bien en las fotografías lunares del Apolo. Un observador entonces solamente vería luz que brillara directamente hacia él. Con atmósfera, el extremo rojo del espectro en su mayor parte no se desviará, mientras que el extremo azul o de alta frecuencia, se esparcirá substancialmente. Esta luz esparcida de alta frecuencia, llegará al observador desde muchas direcciones y el cielo entero aparecerá brillante y azul.

Cuando el sol está muy abajo en el cielo, sus rayos pasan a través de un gran espesor de aire. Los azules y los violetas son esparcidos hacia los lados del haz con mayor fuerza que los amarillos y los rojos que continúan propagándose a lo largo de una línea de visión desde el sol para formar las ardientes y familiares puestas de sol en la tierra.

Lord Rayleigh, dedujo la dependencia de la densidad de flujo esparcido con la frecuencia. De acuerdo con la ecuación que describe el patrón de radiación para un dipolo oscilante, la densidad de flujo esparcido es directamente proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia impulsora.

$$I(\theta) = \frac{p_o^2 \omega^4}{32\pi^2 c^3 \epsilon_o} \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$$

donde

- $p_o$  : dipolo eléctrico igual a una de las cargas por la separación máxima entre los centros de las dos cargas (qd)
- $\omega$ : frecuencia de oscilación
- $\theta$ : ángulo entre el dipolo y la dirección de observación
- $c$ : velocidad de la luz
- $\epsilon_o$ : permitividad del vacío
- $r$ : distancia al punto de observación

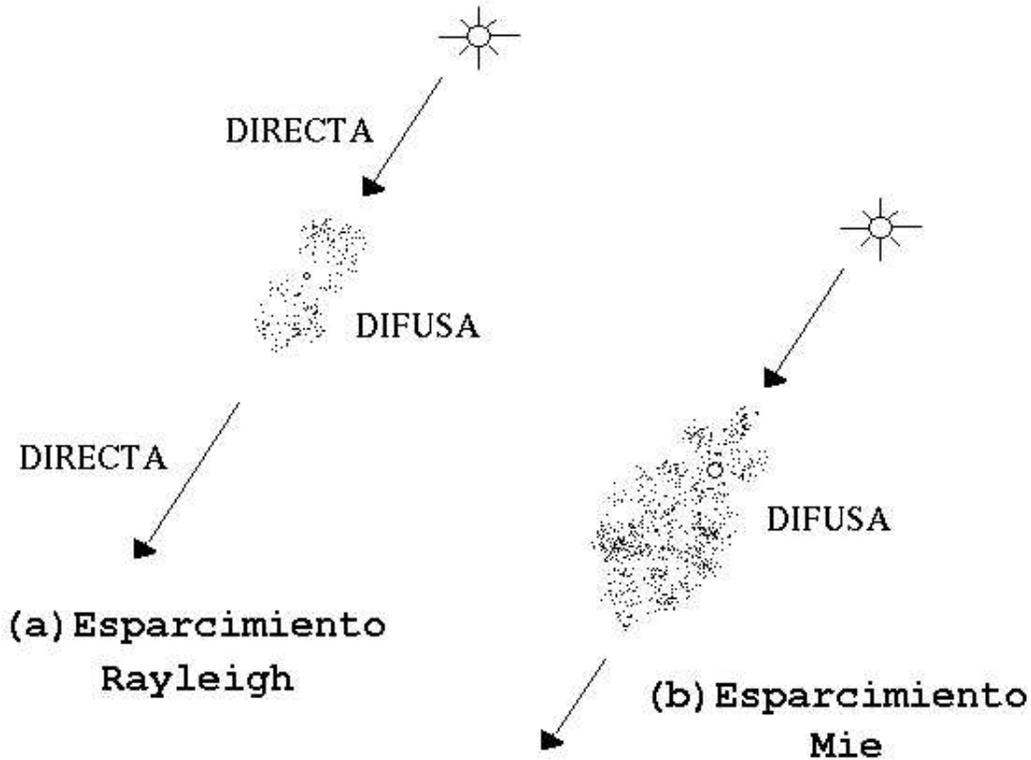
El esparcimiento de luz por objetos que son pequeños en comparación con la longitud de onda se conoce como esparcimiento de Rayleigh. Las moléculas de medios densos transparentes sean gaseosos, líquidos o sólidos, igualmente esparcirán predominantemente luz azulada, aunque sea muy débilmente. El efecto es muy débil, particularmente en líquidos y sólidos, porque los osciladores están arreglados de una manera más ordenada y las ondas reemitidas tienden a reforzarse unas a otras en la dirección frontal, eliminando el esparcimiento lateral.

El humo que sale del extremo de un cigarrillo encendido está formado por partículas que son más pequeñas que la longitud de onda de la luz y por lo tanto aparece azul cuando se ve contra un fondo oscuro. En contraste, el humo exhalado contiene gotitas de agua relativamente grandes y aparece blanco. Cada gotita es más grande que las longitudes de onda de la luz y entonces contiene tantos osciladores como para poder sostener los procesos ordinarios de reflexión y refracción. Estos efectos no tienen preferencia por ninguna frecuencia componente en la luz blanca incidente. La luz reflejada y refractada varias veces por una gotita y finalmente regresada al observador es por consiguiente también blanca. Esto explica la blancura de pequeños granos de sal y azúcar, niebla, nubes, papel, polvos, vidrio esmerilado, y de modo más fatal, el cielo de la ciudad con polución, típicamente pálido.

Cuando el tamaño de la partícula es del orden de la longitud de onda de la radiación incidente, la solución de la ecuación de onda se vuelve formidable. La solución fue exitosamente lograda al principio del siglo XX por Gustave Mie y en su honor se llama teoría de Mie. En el tratamiento matemático de Mie, un parámetro conveniente para expresar el tamaño de las partículas es  $\pi D/\lambda$ , donde  $D$  es el diámetro de la partícula. Sea  $n$  el índice de refracción y  $\lambda$  la longitud de onda en  $\mu m$ . Se considera que:

1. Cuando  $\pi D/\lambda < 0.6/n$  el esparcimiento se rige por la teoría de Rayleigh y en una atmósfera sin nubes se aplica a las moléculas del aire ya que la mayor parte de ellas mide  $1 \text{ \AA}$ .
2. Cuando  $\pi D/\lambda > 5$  el esparcimiento es principalmente un proceso de reflexión difusa, que raramente ocurre en la atmósfera terrestre.
3. Cuando  $0.6/n < \pi D/\lambda < 5$ , el esparcimiento se rige por la teoría de Mie y se aplica a partículas del tamaño de  $10 \text{ \AA}$ , como aerosoles.

**Figura 1:** Modos de esparcimiento de la radiación electromagnética



**Esparcimiento de la radiación electromagnética. (a) Rayleigh. (b) Mie.**

La figura anterior muestra la diferencia entre los dos modos de esparcimiento. En el modo Rayleigh, el proceso es idéntico en la dirección frontal como en la trasera. El esparcimiento es máximo en ambas direcciones y es mínimo a  $90^\circ$  de la línea de incidencia. Además, mayor esparcimiento ocurre cuando la radiación incidente es de menor longitud de onda.

En el modo Mie, más energía es esparcida en la dirección frontal que en la dirección trasera. Más aún, conforme el tamaño de la partícula aumenta, así lo hace el esparcimiento frontal, y la forma del globo de esparcimiento se altera.

## 1.8. La turbididad atmosférica

La turbididad o turbidez es cualquier condición de la atmósfera que reduce la transmisión de la radiación. Generalmente se refiere al humo, bruma y polvo que afectan la sección no nubosa del cielo, pues no se toma en cuenta en la turbididad la atenuación que producen las moléculas de aire seco.

Al pasar por la atmósfera, la radiación solar es parcialmente dispersa por las moléculas de aire (esparcimiento Rayleigh) y por partículas de polvo (esparcimiento Mie). La dispersión Rayleigh hace que el cielo se vea azul, y la turbidez produce una radiación celeste circumsolar de tal forma que el borde del disco solar es menos claro en una atmósfera turbia que en aire limpio.

La energía radiante circumsolar es la radiación esparcida por la atmósfera que pareciera se origina de un área del cielo inmediatamente adyacente al sol y está relacionada con la turbididad de la siguiente forma: su extensión angular es directamente proporcional a la turbididad atmosférica, siendo más grande a mayor turbididad.

## 1.9. Medición de la turbididad atmosférica

La turbididad atmosférica es una medida verticalmente integrada de la carga total de partículas en la atmósfera, un factor importante que influencia la energética de la radiación solar en la atmósfera terrestre.

Sirve como un índice de la contaminación atmosférica, particularmente en estudios de cambios a largo plazo en la composición de la atmósfera y resultante de cambios climáticos globales. A pesar de su importancia, no parece haber ninguna definición universalmente adoptada de la turbididad o alguna técnica universalmente aceptada para medirla.

Dos parámetros de la turbididad son usados actualmente. El coeficiente de turbididad de Angstrom  $\beta$  es expresado por:

$$\tau_\lambda = e^{\beta\lambda^{-\alpha}} \quad (1.5)$$

donde  $\tau_\lambda$  es el factor de transmisión solar a la longitud de onda  $\lambda$  para el esparcimiento por polvo en un camino vertical y  $\alpha$  es una constante caracterizada por la distribución del tamaño de las partículas de polvo. Usualmente se asume que tiene un valor promedio de 1.3, (varía desde 4 para las moléculas de aire en el esparcimiento Rayleigh, hasta 0 para las moléculas de agua que se aglutinan en los puntos de acreción). El valor preciso de  $\alpha$  bajo unas condiciones determinadas de la atmósfera puede ser determinada a partir de mediciones de  $\tau_{\lambda_1}$  y  $\tau_{\lambda_2}$  a dos longitudes de onda convenientes  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  que estén libres de efectos de absorción del vapor de agua y del ozono usando la relación:

$$\alpha = \frac{\log\log\tau_{\lambda_1} - \log\log\tau_{\lambda_2}}{\log\lambda_2 - \log\lambda_1} \quad (1.6)$$

Sin embargo, fue probado por Mani et al. (1969) que solamente con mediciones muy cuidadosas se puede obtener  $\alpha$  y  $\beta$  de suficiente confiabilidad y que observaciones de rutina en estaciones normales no son lo suficientemente precisas para ese propósito.

El otro parámetro de turbididad es  $B$  el cual es el coeficiente de extinción decádico para esparcimiento por polvo a una longitud de onda de  $0.5 \mu$ . Es medido con un fotómetro de sol usando la relación

$$I_\lambda = I_{O\lambda} S 10^{-(a_R+B)m}$$

donde  $I_{O\lambda}$  es la intensidad de la radiación solar extraterrestre a una longitud de onda  $\lambda$  que cae en el sensor del fotómetro.  $S$  es un factor de conversión para la distancia variable tierra-Sol,  $m$  es el camino óptico y  $a_R$  es el coeficiente de extinción decádico para el esparcimiento Rayleigh.  $\lambda$  y  $B$  están relacionadas entre sí mediante

$$B=0.4343\lambda 2^\alpha$$

El parámetro  $\beta$  se mide con un piroheliómetro de Angstrom, de la forma que es indicada en el capítulo dos del presente trabajo.

### 1.9.1. Un nuevo método para el cálculo de $\beta$

El artículo de Rangarajan & Mani <sup>4</sup> describe un método alternativo, simple y práctico para evaluar  $\beta$  en base a medidas horarias promedio de radiación directa y difusa en horas del medio día con cielos despejados.

Usando un modelo teórico para determinar la atenuación solar debido a la absorción del vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono, el oxígeno, el polvo y a el esparcimiento debido a las moléculas del aire y del polvo se encuentra una expresión para la razón de la radiación solar difusa a la directa como función de  $\beta$ .

Más adelante se verá que los valores de absortancia se eliminan porque realizan el mismo trabajo en la determinación de las radiaciones difusa y directa, dejando únicamente los efectos del esparcimiento en la fórmula de  $\beta$ .

#### Parametrización para el cálculo de la radiación difusa y directa

La esencia de la teoría de Rayleigh es que el coeficiente de extinción monocromático (ver esparcimiento, absorción y atenuación de la luz) varía aproximadamente en  $\lambda^{-4}$ , asumiendo que las partículas que esparcen la luz son esféricas, menores a  $0.2\lambda$  en diametro y que las partículas esparcen independientemente unas de otras. Este cálculo ha sido comprobado experimentalmente y puede expresarse mediante la fórmula aproximada para el coeficiente de esparcimiento del aire seco de Leckner: <sup>5</sup>

$$\tau_{R\lambda} = e^{-,008735\lambda^{-4},08 m_a} \quad (1.7)$$

---

<sup>4</sup>Rangarajan S. & Mani A. **A new method for the determination of atmospheric turbidity** (India: Tellus, 1984) 36B, p. 50-54

<sup>5</sup>Leckner, B. **The spectral distribution of solar radiation at the earth surface - elements of a model.** Sol. *Energy* (Estados Unidos, 1978) **20**(2),143-150.

para la transmitancia por esparcimiento de Rayleigh, donde  $m_a = 1/\sin h$  es el camino óptico y  $h$  es la altura solar, es decir, el ángulo entre el horizonte y la dirección del sol.

Usando el método de parametrización para calcular valores instantaneos de radiación directa, difusa y global, calculamos la energía radiante empleando la transmitancia debida a cada uno de los constituyentes atmosféricos para computar la transmitancia total de la atmósfera.

Se define la transmitancia total de la irradiación directa normal:

$$\tau = I_n/I_{sc}$$

con  $I_{sc} = 1367W/m^2$ , e  $I_n$  es la radiacion que incide en la dirección normal a la propagación. Como se hace a menudo, se asume que las transmitancias son multiplicativas y se puede escribir:

$$\tau = \tau_{ozono}\tau_{aire}\tau_{vapor}\tau_{gases(noaire)}\tau_{aerosoles(polvo)}$$

Para la radiación directa horizontal (perpendicular a un plano horizontal):

$$I_H = I_{sc}\left(1 - \sum_{i=1}^5 \alpha_i\right)\left(1 - S_a\right)\left(1 - S_p\right) \cos z \quad (1.8)$$

el primer término entre paréntesis representa  $\tau_1\tau_2\tau_3\tau_4\tau_5$ , donde

- $\tau_1 : \tau_{ozono}$
- $\tau_2 : \tau_{aire}$
- $\tau_3 : \tau_{vapor}$
- $\tau_4 : \tau_{gases(noaire)}$
- $\tau_5 : \tau_{aerosoles(polvo)}$

pues se comprueba fácilmente que al expandir la expresión equivalente y eliminar términos de orden mayor que 1, nos queda  $(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)(1 - \alpha_4)(1 - \alpha_5) = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5)$ .  $I_{sc}$  es la constante solar y  $z$  es el ángulo azimutal.

$\sum_{i=1}^5 \alpha_i$  entonces representa los efectos de absorción debidos a el vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono, el oxígeno y el polvo, mientras que  $S_a$  y  $S_p$  son las funciones de esparcimiento de el aire y el polvo (el polvo absorbe y esparce al mismo tiempo).

$$S_a = 1 - f(m)^m \quad (1.9)$$

$$S_p = 1 - g(\beta)^m \quad (1.10)$$

$f(m)$  es la función de transmisión para aire puro debido al esparcimiento de Rayleigh para una masa absoluta de aire  $m$ , y  $g(\beta)$  la función de transmisión debido al esparcimiento del polvo.

En cuanto a la radiación difusa el esparcimiento se origina tanto del polvo como del aire, y sumando ambas contribuciones computamos:

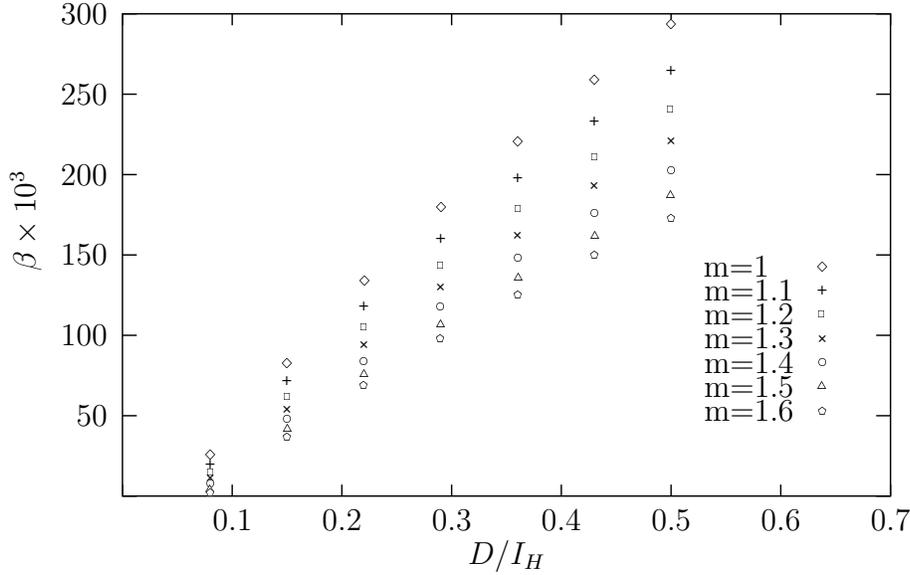
$$D = I_{sc} \left(1 - \sum_{i=1}^5 \alpha_i\right) (0,5S_a + 0,75S_p) \cos z \quad (1.11)$$

Los coeficientes de las funciones de esparcimiento para el aire y el polvo en D valen 0.5 en el primer caso pues el esparcimiento Rayleigh es simétrico respecto de la dirección de propagación y 0.75 en el segundo caso pues para el modo de esparcimiento de Mie una mayor cantidad de energía es dispersada en la dirección frontal que en la dirección trasera (Figura 1.1).

Dividiendo (8) entre (7):

$$D/I_H = \frac{0,5S_a + 0,75S_p}{(1 - S_a)(1 - S_p)} \quad (1.12)$$

Figura 2: Nomograma para la derivación del coeficiente  $\beta$  del radio  $D/I_H$



$S_p$  puede ser obtenido si  $D/I_H$  y  $S_a$  son conocidos;  $S_a$  es calculabe por su dependencia en el esparcimiento Rayleigh <sup>6</sup>

$$S_a = 0,384042 - 0,375566e^{-0,221185m} \quad (13)$$

$g(\beta)$  puede obtenerse de  $S_p$  (función de esparcimiento por polvo). Finalmente  $\beta$  se obtiene mediante la expresión <sup>7</sup>

$$g(\beta) = -0,914000 + 1,909267e^{-0,667023\beta} \quad 0 < \beta < 0,5 \quad (14)$$

Usando estas relaciones se preparó un nomograma (representacion gráfica de dos variables que se relacionan linealmente) en la Figura 1.2 para la evaluación directa del coeficiente de turbidat  $\beta$  de  $D/I_H$ .

<sup>6</sup>Iqbal, Med. **An Introduction to Solar Radiation** (Canadá: Academic Press,1983) p.183

<sup>7</sup>Iqbal, Med. **An Introduction to Solar Radiation** (Canadá: Academic Press,1983) p.183

## 2. EL PIROHELIÓMETRO DE ANGSTROM

### 2.1. Medición de la irradiación directa

La radiación directa se mide con un piroheliómetro, un instrumento tipo telescopio con dos aberturas angostas que constituyen la apertura que se dirige hacia el sol y tiene un mecanismo de relojería para seguir al sol en su movimiento. El interés para establecer el valor de la constante solar, ha sido la principal fuerza detrás del desarrollo de este instrumento. A principios del siglo pasado, el Dr Charles Greeley Abbot del Instituto Smitsoniano desarrolló tres instrumentos llamados piroheliómetros de flujo de agua, de agua revuelta y de disco de plata.

Casi paralelamente al desarrollo de los piroheliómetros anteriores Knut Angstrom en Suecia desarrolló el primer instrumento para una medición muy precisa de la irradiación directa normal.

El piroheliómetro de Angstrom está basado en el principio calorimétrico. El receptor sensitivo de la radiación solar es colocado en el extremo trasero del tubo del piroheliómetro y consiste en dos tiras de manganina de aproximadamente 2mm de ancho y 20 mm de largo obscurecidas por medio de una cubierta de hollín de candela, cuyo poder de aborción es más o menos de 0.98. Las tiras son lo más similares posible entre sí en dimensiones y resistencias eléctricas.

Cada tira puede conectarse por separado a un circuito eléctrico con una fuente de energía (seis voltios D.C.), un miliamperímetro y una caja de reóstato que contiene una resistencia variable. Al mismo tiempo, mientras permanece conectada al circuito, tiene que estar a la sombra de una pantalla. El interruptor eléctrico y la pantalla están por lo general unidos de tal modo que ambos puedan cambiarse con un sólo movimiento.

Dos termopares son fijados a las partes centrales de los lados traseros de las tiras y se conectan con un galvanómetro sensible cuya medida cero indica la equivalencia en la temperatura de las dos tiras. El reostato regula la corriente para igualar las temperaturas de las tiras.

El procedimiento de medida se inicia poniendo las tiras de cara a la radiación solar. La pantalla se coloca en una posición tal, que no hace sombra a ninguna de las tiras. En esta posición la corriente eléctrica se corta en ambas fajas.

Digamos que la radiación es  $I \text{ watt/cm}^2$  y asumamos que habrá una ligera variación entre los valores medidos  $I'$ ,  $I''$  e  $I'''$  en los pasos del procedimiento de medida.

Si la longitud de la parte irradiada de la tira a mano izquierda es  $L_l$  su anchura es  $b_l$  y el poder de absorción de su superficie oscurecida es  $a_l$ , entonces, el calor absorbido por unidad de tiempo en esa tira es:

$$H'_l = I'_l a_l b_l L_l \text{ Watts} \quad (2.1)$$

La misma fórmula es aplicable a la tira de la derecha

$$H'_r = I'_r a_r b_r L_r \text{ Watts} \quad (2.2)$$

Cuando el balance de calor en cada faja se hace fijo, la absorción de calor solar es equivalente a la suma de calor perdido por conducción, convección e irradiación de onda larga.

No es posible hacer las tiras tan similares que sus características no difieran del todo, por tanto, los términos de balance de calor pueden ser diferentes entre las mismas (en pequeñas cantidades, sin embargo), y en consecuencia puede haber una diferencia de temperatura entre las termouniones en los lados traseros de las cintas, aún bajo la irradiación simultánea del sol.

De cualquier forma, la diferencia de temperatura alcanzada entre las termouniones cuando ambas bandas son irradiadas simultáneamente por el sol establece el punto cero al cual tienen que estar referidas las indicaciones del galvanómetro.

Cuando las tiras son irradiadas simultáneamente, la cantidad  $I'_l$  en (2.1) e  $I'_r$  en (2.2) son equivalentes.

Al registrar el punto cero, el galvanómetro indica que las irradiaciones simultáneas  $I'_l$  e  $I'_r$  son iguales. La aplicación del punto cero se basa en esta afirmación.

La posición del punto cero no es afectada considerablemente por variaciones sincrónicas de la irradianza de las fajas. Entonces, permanece constante cuando la irradianza  $I$  está sujeta a variaciones normales ( $I'$ ,  $I''$ ,  $I'''$ ). Sin embargo debe hacerse siempre una comprobación de la posición del punto cero al final del proceso.

**En el segundo paso** la tira a mano izquierda se le hace sombra, mientras que la otra sigue siendo irradiada y afecta el galvanómetro, de tal forma que, la aguja sigue sincrónicamente las fluctuaciones de la radiación.

$$H''_r = I''_l a_r b_r L_r \quad (2.3)$$

La radiación solar  $I''_l$  interceptada por la pantalla y que no alcanza la tira izquierda es reemplazada por una cantidad equivalente de calor eléctrico:

$$H_l'' = I_l'' a_l b_l L_l = i_l^2 R_l L_l \quad (2.4)$$

Donde  $R_l$  es la resistencia eléctrica de la faja en ohmios por unidad de longitud. Regulando la corriente eléctrica, la aguja del galvanómetro se reajusta al punto cero y en este estado la irradiación interceptada  $I_l''$  en (2.4) es igual a  $I_r''$  en (2.3) y a  $I''$ , y consecuentemente el valor actual de la radiación del sol es:

$$I_l'' = I_r'' = I'' = k_l i_l^2 \quad \text{donde } k_l = \frac{R_l}{a_l b_l} \text{ (ohms/m}^2\text{)} \quad (2.5)$$

**El tercer paso** inicia con el cambio de la posición de la pantalla de forma que la tira de la izquierda queda expuesta a la radiación del sol

$$H_l''' = I_l''' a_l b_l L_l \quad (2.6)$$

Y la tira de la derecha se tapa. Aquí, el calor eléctrico sustituye a la radiación del sol,

$$H_r''' = I_r''' a_r b_r L_r = i_r^2 R_r L_r \quad (2.7)$$

ajustado de tal manera que el galvanómetro apunte al punto cero. La cantidad  $I_r'''$ , que en realidad no es medida sino que obstruída por la pantalla, es entonces numericamente igual a  $I_l'''$  que simultáneamente calienta la tira izquierda. Por tanto,

$$I_r''' = k_r i_r^2 \quad \text{donde } k_r = \frac{R_r}{a_r b_r} \text{ (ohms/m}^2\text{)} \quad (2.8)$$

**En el cuarto paso**, la tira de la izquierda es nuevamente tapada y el procedimiento del segundo paso es repetido.

Todo el procedimiento de medida es culminado revisando el punto cero en la forma descrita en el primer paso.

Tenemos ahora una serie de tres medidas de la corriente eléctrica de calentamiento, las cuales se espera que no duren más de tres a cinco minutos en vistas del control requerido del punto cero. Las lecturas son promediadas de forma que a la medida central le es dado un doble peso,

$$i = (i_l + 2i_r + i'_l)/4 \quad (2.9)$$

La irradiación es entonces obtenida con la fórmula

$$I = Ki^2 \quad (2.10)$$

Donde  $K$  es el factor del instrumento,  $K = 5708 \text{ ohms}/m^2$  en el caso del instrumento usado en la presente investigación.

## 2.2. Medición de la turbidatión atmosférica

La manera directa de medir la turbidatión atmosférica con el piroheliómetro de Angstrom se indica a continuación.

Casi toda la absorción de la energía solar ocurre en el rango de longitud de onda  $> 630 \text{ nm}$  (rojo e infrarrojo), de modo que al poner en el piroheliómetro de Angstrom un filtro rojo, se mide la cantidad de radiación solar en el rango de absorción por gotas de agua y gases de la atmósfera, llámese esta cantidad  $RG630$ .

Se hace luego una segunda medición con el Piroheliómetro, esta vez de la radiación solar para todas las longitudes de onda, llámese a esta cantidad  $I$ . Entonces  $(I - RG630)$  es la cantidad de energía solar en el rango de longitudes de onda  $300\text{-}630\text{nm}$ , en donde la absorción de energía en la atmósfera es debida exclusivamente a aerosoles como el polvo, etc.

Al comparar esta cantidad de energía ( $I - RG630$ ) con la cantidad de energía solar transmitida por una columna vertical ideal de aire (normal al instrumento de medición) en el cual no hay aerosoles, ni vapor de agua, ni partículas de polvo, etc, determinamos el coeficiente de turbididad  $\beta$ , que expresa el porcentaje de contenido de polvo en la atmósfera.

Del conocimiento de la altura solar al momento de la medición se obtiene el factor de masa de aire o camino óptico  $m_a$ . Con el conocimiento de  $m_a$  y ( $I - RG630$ ) en langleys se obtiene  $\beta$  en la tabla III.

### Procedimiento

Las medidas fueron realizadas entre las 13:33 y las 13:59 p.m. del 27 de julio de 2002 y la radiación con filtro rojo se midió exactamente a las 13:53, o sea a un ángulo horario de  $28.25^\circ$ . Por la posición del sol se tenía una masa de aire  $m=1.13363$  para una declinación de  $19.3^\circ$  con una latitud en managua de  $12.1^\circ$ .

La altura solar para esa hora fue

$$\sin(h) = \sin 12.1 \sin 19.3 + \cos 12.1 \cos 19.3 \cos 28.25$$

cuyo recíproco es el camino óptico del sol  $m = 1.13363$

Del amperímetro se obtuvo las siguientes medidas:

**Tabla II. Mediciones de corriente del piroheliómetro**

$I$ $i(mA)$	$I_1$	$RG630$	$I_2$
$i_l$	369	245	353
$i_r$	360	255	352
$i_l$	358	245	357

Para poder usar la tabla III del coeficiente de turbididad de Angstrom se deben tener en cuenta los pasos siguientes:

1. La medida debe ser extrapolada a la distancia media del sol 1 AU. (tabla IV).
2. Como la medida está en la escala WRR (Referencia de Radiación Mundial), que fue adoptada por la Organización Meteorológica Mundial desde 1975, tiene que ser reducida en un 2.2% , para poder usar la Tabla III del IGY (Año Internacional Geofísico), la cual es válida para la Escala Piroheliométrica Internacional (IPS) de 1956.
3. La tabla IPS56 está en Langleys, de forma que la radiación en  $W/m^2$  debe estar en Langleys (Ly) ó  $cal\ cm^{-2}\ min^{-1}$  (1 Langley =  $1\ cal\ cm^{-2}\ min^{-1} = 698\ W\ min^{-1}m^{-2}$ )

$$I_1 = 5708(0.362 \pm 0.004)^2 = 748 \pm 17\ W/m^2$$

$$RG_{630} = 5708(0.250 \pm 0.006)^2 = 357 \pm 17\ W/m^2$$

$$I_2 = 5708(0.354 \pm 0.002)^2 = 715 \pm 8\ W/m^2$$

**Tabla III. IPS56 [I-RG630 (langleys)]**

$m$ $10^3 \times \beta$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
00	594	582	570	559	547	536	525
05	586	573	561	549	537	525	514
10	578	564	552	539	527	515	503
15	570	557	543	530	517	506	492
20	563	549	535	521	509	496	482
25	556	541	527	514	500	486	472
30	548	533	518	505	490	477	464
35	540	525	511	495	480	468	454
40	533	518	503	488	472	460	444
45	526	511	495	479	464	451	435
50	519	503	487	471	456	441	426
55	513	495	479	464	447	432	417
60	506	488	471	456	438	423	409
65	499	481	464	448	431	416	401
70	492	474	457	440	423	408	393
75	486	467	450	433	416	401	385
80	479	461	443	425	409	394	378
85	472	454	436	418	402	387	369
90	466	448	429	412	395	380	362
95	461	441	422	405	388	372	355
100	455	434	416	398	381	365	348

Tabla IV. Valores para reducción a distancia solar media

Fecha	$s = \frac{R^2}{R_m^2} - 1$ (%)	Fecha	$s = \frac{R^2}{R_m^2} - 1$ (%)
Ene. 1	-3.32	Jul. 1	+3.37
11	-3.29	11	+3.36
21	-3.16	21	+3.24
Feb. 1	-2.90	Ago. 1	+3.01
11	-2.53	11	+2.71
21	-2.18	21	+2.32
Mar. 1	-1.80	Sep. 1	+1.83
11	-1.30	11	+1.32
21	-0.74	21	+0.77
Abr. 1	-0.11	Oct. 1	+0.21
11	+0.17	11	-0.37
21	+1.02	21	-0.94
May. 1	+1.54	Nov. 1	-1.52
11	+2.04	11	-2.01
21	+2.46	21	-2.44
Jun. 1	+2.85	Dic. 1	-2.79
11	+3.11	11	-3.06
21	+3.29	21	-3.24

**Tabla V. Correcciones de las mediciones solares en Langleys**

Tiempo aprox.	Medida ( $W/m^2$ )	Acción del filtro	Reducción a 1 AU	Reducción por IPS56	Conversión a Langleys
$I_1$ en 13:37	$748 \pm 17$		$772 \pm 18$	$755 \pm 17$	$1.08 \pm 0.02$
RG630 en 13:53	$357 \pm 17$	$\times 1,115$ $= 398 \pm 19$	$411 \pm 20$	$402 \pm 19$	$0.58 \pm 0.03$
$I_2$ en 13:57	$715 \pm 8$		$738 \pm 8$	$722 \pm 8$	$1.03 \pm 0.01$

Transcurso de tiempo entre  $I_1$  y  $I_2 = 13:57 - 13:37 = 20$  min. Por lo tanto, si extrapolamos para encontrar la radiación directa a las 13:53 (16 min. despues de  $I_1$ ):

$$I_{RG630} = I_1 - \frac{16}{20} \times (I_1 - I_2)$$

Radiación total =  $1.08 - 16/20(1.08 - 1.03) = 1.04 \pm 0.02$  lys

$I_{RG630} - RG630 = 1.04 - 0.58 = 0.46 \pm 0.03$  lys

De acuerdo al valor de  $m$ , en la tabla III encontramos  $\beta = [.060 - .100]$

Este resultado deberá ser contrastado con  $\beta$  obtenido por medio del nomograma (Figura 2), con la radiación global =  $910 W/m^2$  & la radiación difusa =  $183 W/m^2$ , con  $m$  (masa de aire) = 1.1 ( $I_H = G - D$ )

### 3. CÁLCULO DE LA TURBIDAD

En la tabla VI se presenta una muestra de la hoja de cálculo de la turbidad para 2 caminos ópticos equivalentes del sol, a las 11:30 hora solar verdadera indicada con una (m) en la columna 1, ó a las 12:30 hora solar verdadera que se indica con una (t) en la misma columna 1. Los datos de la tabla pertenecen a las primeras décadas de días del año 1983, que se indica con (e1) para la primer década de enero, (e2) para la segunda década de enero, (f1) para la primer década de febrero y así sucesivamente en la columna **M**.

En la segunda, tercera y cuarta columna se encuentra la información de radiación aplicable al presente estudio, es decir, la radiación directa (**I**), difusa (**D**) y global (**G**) en  $Watts/m^2$  sin presencia de nubes.

Las siguientes columnas se calculan como se indica a continuación:

columna **K** = corrección por el aro de sombra del piranómetro

columna **m** = camino óptico (1/seno de la altura solar)

columna **X** =  $D*K*0.9/(G-D)$

columna **Y** =  $0.6159958 + 0.375566*\exp(-0.221185*m)$  ver eq. 1.9 y 1.13

columna **Z** =  $\text{power}((0.75+0.5*(1-Y))/(0.75+X*Y),1/m)$  ver eq. 1.12

columna  $\beta$  =  $(1/0.667023*\ln((Z+0.914)/1.909267))$  ver eq. 1.14

columna **M** = década de enero (e1,e2 y e3) ó febrero (f1, f2, f3)

**Tabla VI. Muestra de la hoja de cálculo**

<b>1</b>	<b>I</b>	<b>D</b>	<b>G</b>	<b>K</b>	<b>m</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	$\beta$	<b>M</b>
m	829	136	854	1,0921	1.2	0,1862	0,9040	0,8896	0.085	e1
m	842	132	856	1,0921	1.2	0,1792	0,9040	0,8947	0.081	e1
m	839	129	858	1,0956	1.2	0,1745	0,9040	0,8982	0.078	e2
m	809	154	860	1,0956	1.2	0,2151	0,9040	0,8690	0.102	e2
t	796	145	840	1,0956	1.2	0,2057	0,9040	0,8755	0.097	e2
m	844	125	859	1,0956	1.2	0,1679	0,9040	0,9031	0.074	e2
t	830	129	851	1,0956	1.2	0,1762	0,9040	0,8969	0.079	e2
m	841	124	858	1,0956	1.2	0,1666	0,9040	0,9041	0.073	e2
t	843	122	855	1,0956	1.2	0,1641	0,9040	0,9060	0.071	e2
m	643	210	803	1,0956	1.2	0,3492	0,9040	0,7858	0.174	e2
m	852	119	865	1,0956	1.2	0,1573	0,9040	0,9112	0.067	e2
t	844	121	860	1,0956	1.2	0,1615	0,9040	0,9080	0.070	e2
m	758	155	836	1,0956	1.2	0,2244	0,9040	0,8626	0.107	e2
m	781	149	854	1,1002	1.2	0,2093	0,9040	0,8731	0.099	e3
t	787	146	846	1,1002	1.2	0,2065	0,9040	0,8750	0.097	e3
t	790	159	866	1,1002	1.2	0,2227	0,9040	0,8638	0.106	e3
t	799	154	887	1,1002	1.2	0,2080	0,9040	0,8739	0.098	e3
t	806	154	897	1,1064	1.1	0,2064	0,9105	0,8602	0.109	f1
m	861	129	920	1,1064	1.1	0,1624	0,9105	0,8951	0.080	f1
t	837	141	913	1,1064	1.1	0,1819	0,9105	0,8793	0.093	f1
m	870	120	929	1,1064	1.1	0,1477	0,9105	0,9074	0.070	f1
t	860	124	924	1,1064	1.1	0,1543	0,9105	0,9018	0.075	f1
m	748	216	929	1,1125	1.1	0,3033	0,9105	0,7927	0.168	f2
m	849	134	934	1,1125	1.1	0,1677	0,9105	0,8907	0.084	f2
m	849	125	926	1,1125	1.1	0,1563	0,9105	0,9002	0.076	f2

continuación

	<b>1</b>	<b>I</b>	<b>D</b>	<b>G</b>	<b>K</b>	<b>m</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	$\beta$	<b>M</b>
t	862	118	932		1,1125	1.1	0,1451	0,9105	0,9095	0.068	f2
m	791	164	924		1,1125	1.1	0,2161	0,9105	0,8530	0.116	f2
t	808	155	932		1,1125	1.1	0,1997	0,9105	0,8653	0.105	f2
m	812	150	919		1,1125	1.1	0,1953	0,9105	0,8687	0.102	f2
t	794	161	931		1,1187	1.1	0,2105	0,9105	0,8571	0.112	f3

Para la primera validación de los datos calculados se realizó una correlación lineal múltiple para la turbididad como variable independiente y la razón de radiación entre la difusa y directa y el camino óptico como variables dependientes, las cuales se encuentran en la tabla VI en las columnas **X** y **m** y la turbididad en la columna  $\beta$ . Los resultados fueron  $R = 0.918996302$  y el  $R^2 = 0.844554203$  para la relación:

$$\beta = 457.1051205 \mathbf{X} - 128.7183324 \mathbf{m} + 147.3299116$$

En la tala IV, de la página siguiente, se encuentran los datos mínimos para la turbididad atmosférica en períodos bimensuales por el tiempo que transcurrió el estudio. En base a esos datos se realizó la gráfica 3 que le sucede y es la segunda de las validaciones del presente estudio pues se observa en ella como la turbididad no depende de la hora en que se mida, al menos durante el período del 84 hasta el 94 donde hay muy poca desviación de la turbididad entre una hora y otra. Es interesante observar la relación de turbididades mínimas a lo largo del día en los meses más limpios que son diciembre y enero: durante los 20 años de estudio el promedio de las desviaciones entre una hora y otra es de 0.005.

En el año 1983 había mucha turbididad, pues en enero había casi 4 veces el promedio de las turbididades mínimas de los primeros meses del año mientras que duró el estudio, el cual es 0.018 (exceptuando el 92 que es atípico por la erupción del volcán Cerro Negro). Siempre durante diciembre y enero, el record de limpieza atmosférica es en el 1990, mientras que en el año 1992 se obtuvo la turbididad más alta, más de 5 veces el promedio antes mencionado. Este fenómeno corresponde a la erupción del volcán Cerro Negro en tierras Nicaragüenses mencionado arriba, mientras que la alta turbididad del año 83 son vestigios de la erupción del volcán Chichón en México un año antes de que empezara el presente estudio.

**Tabla VII. Turbidades mínimas ( $\beta \times 1000$ )**

período bimensual	10:30 AM	11:30 AM	12:30 PM	1:30 PM
enero 1983	61	67	70	68
feb/mar	59	70	66	63
abril/may	145	119	89	93
jun/jul	141		41	44
agosto/sep	106	126	57	95
oct/nov	31	32	37	40
dic/enero 1984	28	27	30	34
feb/mar	38	58	34	36
abril/may	33	37	40	42
jun/jul	81			
agosto/sep	50	28	24	42
oct/nov	22	24	35	29
dic/enero 1985	9	11	16	12
feb/mar	25	25	29	40
abril/may	24	48	42	57
jun/jul	65	59	94	91
agosto/sep	94	95	59	35
oct/nov	45	56	47	34
dic/enero 1986	11	10	15	12
feb/mar	25	26	27	32
abril/may	50	57	51	60
jun/jul				
agosto/sep	37	36	39	55
oct/nov	27	37	39	28

continuación

período bimensual	10:30 AM	11:30 AM	12:30 PM	1:30 PM
dic/enero 1987	16	16	15	15
feb/mar	28	26	28	23
abril/may	53	48	72	55
jun/jul				63
agosto/sep	73	83	43	47
oct/nov	22	26	23	22
dic/enero 1988	19	20	22	20
feb/mar	18	26	27	22
abril/may	35	38	40	44
jun/jul	36	49	64	55
agosto/sep	22	58	63	63
oct/nov	30	26	26	21
dic/enero 1989	30	27	32	25
feb/mar	17	11	12	9
abril/may	45	40	40	47
jun/jul	71	127	90	102
agosto/sep	16	42	34	26
oct/nov	12	12	11	12
dic/enero 1990	4	5	5	5
feb/mar	51	33	32	37
abril/may	113	84	44	35
jun/jul	98	91		105
agosto/sep	65	86	56	47
oct/nov	7	13	16	14

continuación

período bimensual	10:30 AM	11:30 AM	12:30 PM	1:30 PM
dic/enero 1991	15	19	19	17
feb/mar	19	22	24	23
abril/may	123	185	154	89
jun/jul	101	123		101
agosto/sep	146	162	189	160
oct/nov	113	125	129	102
dic/enero 1992	91	101	101	99
feb/mar	104	113	107	106
abril/may	99	126	126	132
jun/jul	123	115	115	117
agosto/sep	81	84	88	149
oct/nov	57	65	66	82
dic/enero 1993	34	36	33	31
feb/mar	38	38	38	42
abril/may	45	60	86	68
jun/jul	158	95	67	76
agosto/sep	58	71	74	104
oct/nov	22	30	32	26
dic/enero 1994	25	29	25	26
feb/mar	34	38	39	41
abril/may	55	67	94	76
jun/jul			56	111
agosto/sep	168	147	170	218
oct/nov	15	34		153

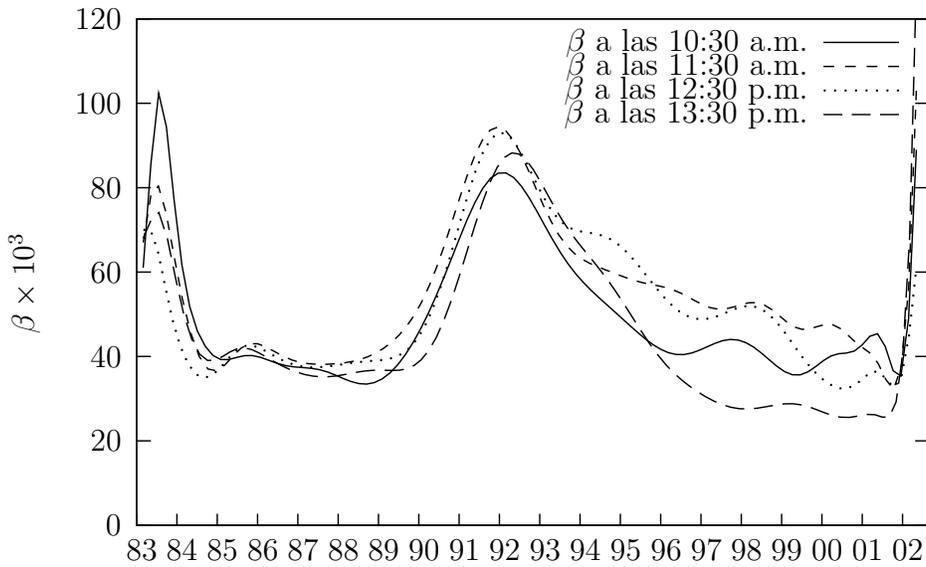
continuación

período bimensual	10:30 AM	11:30 AM	12:30 PM	1:30 PM
dic/enero 1995	18	22	21	23
feb/mar	18	21	16	24
abril/may	43	55	77	44
jun/jul			69	91
agosto/sep	80	28	23	19
oct/nov	34	96	138	50
dic/enero 1996	11	11	14	11
feb/mar	10	8	15	25
abril/may	55	59	46	41
jun/jul	79	180	58	50
agosto/sep	30	95	107	52
oct/nov	11	14	27	34
dic/enero 1997	12	16	16	16
feb/mar	14	14	17	15
abril/may	29	30	49	53
jun/jul	170		87	
agosto/sep	32	39	29	13
oct/nov	32	85		138
dic/enero 1998	15	12	17	18
feb/mar	32	22	24	19
abril/may	40	40	35	45
jun/jul	90	101	89	0
agosto/sep	65	135	148	50
oct/nov	24	62		

continuación

período bimensual	10:30 AM	11:30 AM	12:30 PM	1:30 PM
dic/enero 1999	11	10		15
feb/mar	16	6	9	20
abril/may	42	39	30	34
jun/jul	44	39	37	23
agosto/sep	44	94	84	54
oct/nov	10	15	17	34
dic/enero 2000	10	12	13	8
feb/mar	23	57	27	35
abril/may		99	67	68
jun/jul	87	105		
agosto/sep	24	45		25
oct/nov	13	12	17	10
dic/enero 2001	12	16	13	13
feb/mar	15	18	20	28
abril/may	86	85	57	37
jun/jul	63	77	75	52
agosto/sep	83	17	29	8
oct/nov	10	13	20	18
dic/enero 2002	15	16	15	13
feb/mar	30	41	40	32
abril/may	36	37	41	40
jun/jul	89	103	61	128

**Figura 3: Datos mínimos del coeficiente de Angstrom para la turbididad**



En la tabla VIII, de la página siguiente, se aprecian los datos medios de turbididad con sus desviaciones, y en base a esta tabla se presentan las gráficas 4, 5, 6, 7 y 8 que le suceden.

**Tabla VIII. Turbidades medias (X 1000) y desviaciones estandar**

Bimestre	10:30 A.M.		11:30 A.M.		12:30 P.M.		13:30 P.M.	
	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S
ene 83	77	12	85	11	88	12	80	8
feb/mar	91	16	94	19	102	24	99	21
abr/may	145	0	156	22	128	18	140	26
jun/jul	143	2			85	44	130	43
agosto/sep	122	12	155	15	116	54	134	19
oct/nov	64	16	89	39	57	9	86	39
dic/ene 84	59	17	54	17	64	25	55	18
feb/mar	53	15	105	29	96	47	69	20
abr/may	74	23	65	19	62	14	95	35
jun/jul	101	20						
agosto/sep	79	27	56	18	55	20	89	46
oct/nov	41	13	55	19	51	9	51	14
dic/ene 85	46	21	47	42	43	42	44	15
feb/mar	63	23	68	18	82	33	50	6
abr/may	71	19	75	17	68	18	100	23
jun/jul	65	0	98	28	111	17	91	0
agosto/sep	126	32	107	12	64	6	75	30
oct/nov	88	23	69	13	65	26	78	35

continuación

Bimestre	10:30 A.M.		11:30 A.M.		12:30 P.M.		13:30 P.M.	
	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S
dic/ene 86	47	27	38	17	44	21	39	21
feb/mar	55	21	50	16	49	13	60	21
abr/may	63	13	82	16	81	20	103	30
jun/jul								
agosto/sep	62	19	35	1	57	18	115	45
oct/nov	60	25	61	12	39	0	68	26
dic/ene 87	33	9	35	11	36	11	33	9
feb/mar	48	11	47	9	55	22	58	25
abr/may	71	8	73	16	72	0	86	40
jun/jul							63	0
agosto/sep	85	8	83	0	75	23	76	27
oct/nov	38	5	57	25	58	22	50	18
dic/ene 88	36	10	36	11	52	29	54	25
feb/mar	37	13	37	12	52	27	52	22
abr/may	80	23	96	19	78	23	95	35
jun/jul	55	19	60	11	64	0	88	29
agosto/sep	102	53	100	21	115	33	94	41
oct/nov	67	23	74	28	112	40	107	48

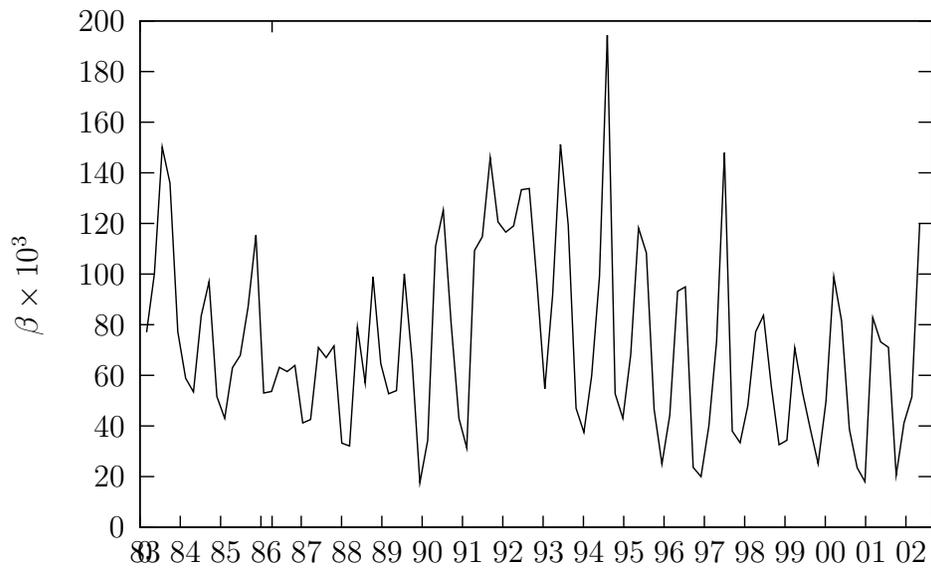
continuación	10:30 A.M.		11:30 A.M.		12:30 P.M.		13:30 P.M.	
	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S
dic/ene 89	68	24	70	25	87	24	72	30
feb/mar	44	19	40	17	38	13	37	11
abr/may	61	17	71	18	69	11	60	11
jun/jul	100	19	127	0	132	42	102	0
agosto/sep	75	43	70	28	57	25	28	2
oct/nov	28	11	31	18	36	21	56	32
dic/ene 90	16	11	18	13	8	3	6	1
feb/mar	61	14	74	31	63	18	62	16
abr/may	124	11	99	15	97	26	77	37
jun/jul	123	12	91	0			132	27
agosto/sep	85	20	98	13	98	42	100	53
oct/nov	45	27	37	16	44	18	46	20
dic/ene 91	42	19	32	12	41	20	45	22
feb/mar	40	10	38	7	43	12	42	11
abr/may	139	16	186	1	162	8	108	19
jun/jul	110	9	123	0			101	0
agosto/sep	146	0	162	0	189	0	170	9
oct/nov	126	9	137	9	161	21	130	20
dic/ene 92	112	11	121	14	122	12	119	11
feb/mar	124	14	135	12	137	14	130	14
abr/may	117	12	137	7	126	0	162	30
jun/jul	139	10	144	18	157	21	117	0
agosto/sep	132	31	132	35	88	0	149	0
oct/nov	101	28	92	19	109	35	99	10

continuación	10:30 A.M.		11:30 A.M.		12:30 P.M.		13:30 P.M.	
	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S
dic/ene 93	56	15	60	18	43	7	45	10
feb/mar	74	21	77	23	70	19	70	18
abr/may	118	36	119	28	98	12	131	42
jun/jul	158	0	95	0	67	0	76	0
agosto/sep	106	48	71	0	77	3	106	1
oct/nov	47	22	53	24	56	24	60	29
dic/ene 94	36	7	37	6	31	4	40	14
feb/mar	51	10	49	8	64	13	56	7
abr/may	78	15	79	8	94	0	94	18
jun/jul					131	43	132	18
agosto/sep	191	15	169	22	173	4	218	0
oct/nov	42	19	56	12			195	25
dic/ene 95	41	12	42	12	45	11	43	16
feb/mar	55	21	41	12	39	9	47	14
abr/may	110	45	100	36	108	20	108	40
jun/jul					115	35	95	4
agosto/sep	97	17	55	27	55	16	60	27
oct/nov	37	3	96	0	138	0	50	0
dic/ene 96	25	8	40	29	39	22	29	13
feb/mar	42	12	46	12	40	8	47	13
abr/may	67	7	78	21	59	9	60	14
jun/jul	124	30	180	0	58	0	79	29
agosto/sep	56	24	120	25	107	0	52	0
oct/nov	19	4	23	8	33	6	39	5

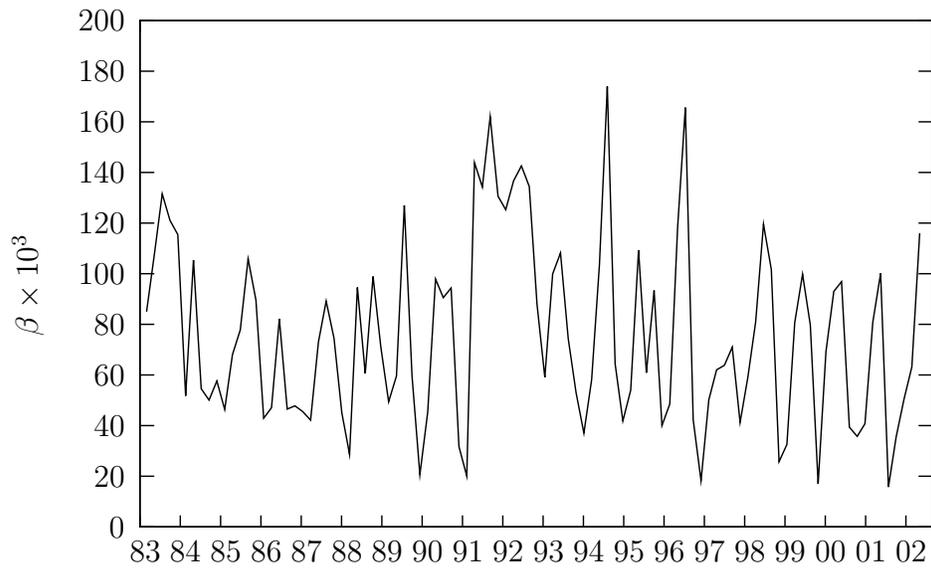
continuación	10:30 A.M.		11:30 A.M.		12:30 P.M.		13:30 P.M.	
	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S
dic/ene 97	22	6	21	5	26	9	24	5
feb/mar	42	12	50	18	46	19	23	8
abr/may	38	6	50	13	73	23	66	12
jun/jul	170	0			87	0		
agosto/sep	79	47	39	0	29	0	13	0
oct/nov	32	0	85	0			138	0
dic/ene 98	35	11	33	12	37	12	33	8
feb/mar	48	13	59	22	54	18	42	17
abr/may	72	16	79	21	86	30	64	17
jun/jul	90	0	101	0	89	0		
agosto/sep	65	0	135	0	148	0	50	0
oct/nov	49	16	62	0				
dic/ene 99	28	12	21	8	49	9	21	6
feb/mar	37	8	36	11	36	12	32	11
abr/may	70	19	79	26	70	20	62	20
jun/jul	58	9	89	33	37	0	23	0
agosto/sep	44	0	114	20	84	0	54	0
oct/nov	32	12	29	9	43	9	58	29
dic/ene 00	26	10	29	10	28	11	34	16
feb/mar	58	23	76	12	64	19	52	11
abr/may			99	0	93	10	84	9
jun/jul	87	0	105	0				
agosto/sep	53	24	45	0			25	0
oct/nov	22	6	44	23	23	4	21	7

continuación	10:30 A.M.		11:30 A.M.		12:30 P.M.		13:30 P.M.	
	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S	$\beta$	S
dic/ene 01	25	8	29	8	39	22	27	9
feb/mar	24	6	49	23	32	9	31	1
abr/may	86	0	85	0	106	37	67	15
jun/jul	73	8	106	14	90	11	52	0
agosto/sep	83	0	17	0	41	12	31	23
oct/nov	26	10	43	24	45	18	38	14
dic/ene 02	31	10	24	4	51	25	35	14
feb/mar	44	9	66	16	61	11	58	15
abr/may	57	12	64	20	62	20	53	9
jun/jul	120	31	116	13	67	6	128	0

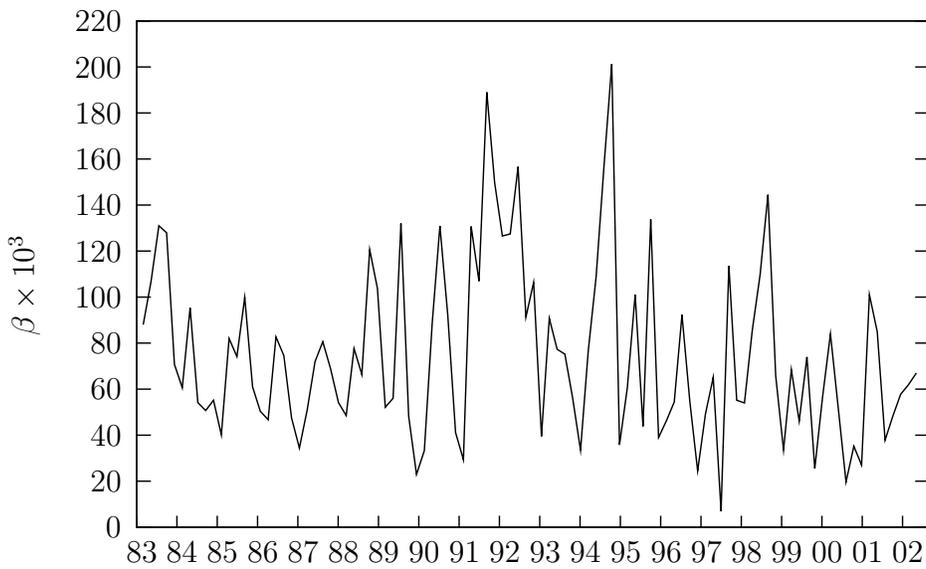
**Figura 4:** Coeficiente Angstrom de la turbidat atmosférica a las 10:30 a.m.



**Figura 5:** Coeficiente Angstrom de la turbidat atmosférica a las 11:30 a.m.



**Figura 6:** Coeficiente Angstrom de la turbidat atmosférica a las 12:30 p.m.



**Figura 7:** Coeficiente Angstrom de la turbidat atmosférica a las 1:30 p.m.

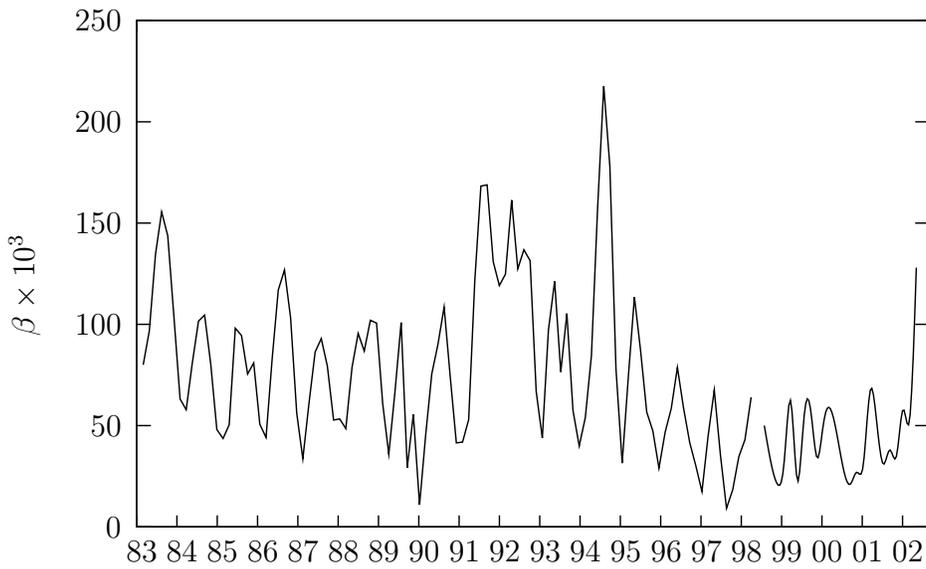
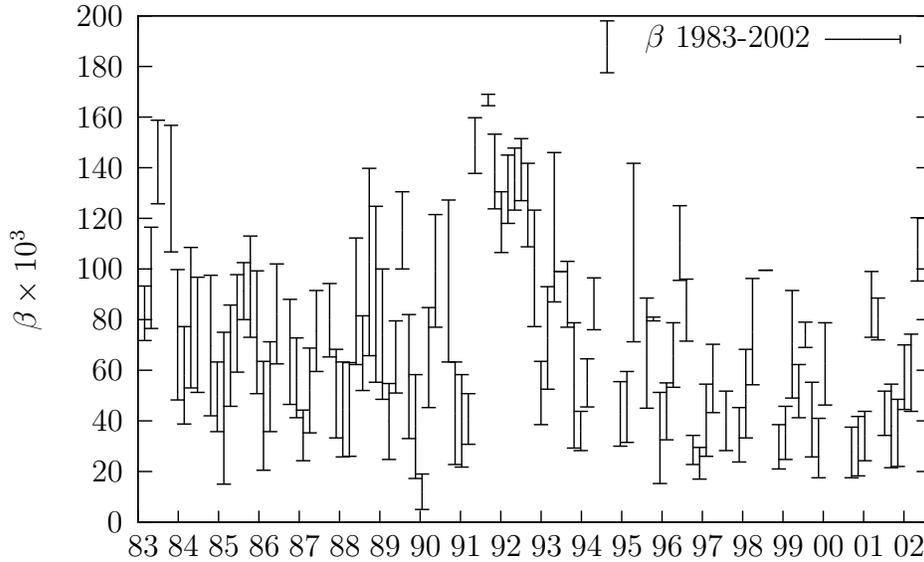


Figura 8: Turbidad atmosférica ( $\beta$ ) en Managua y su incertidumbre



Todas y cada una de las gráficas muestran el comportamiento de la turbidad atmosférica a lo largo de 20 años de medición, durante los cuales se tiene conocimiento de por lo menos 4 fenómenos atmosféricos de gran envergadura, que son las erupciones del volcán Chichón de México en 1982 (unos meses antes de que iniciara el estudio, pero de fuerza suficiente para dejar su marca en todo el continente) y el volcán Cerro Negro en 1992; Con consecuencias muy distintas se ven los efectos de los huracanes Juana en 1989 y el huracán Mitch en 1998, especialmente en las figuras 4, 6 y 7.

Después de hacer un análisis de medias a la tabla V, se determinó mediante una prueba de Hipótesis que la mayoría de medias no corresponde a la media total para ese período del año. A saber, los meses de diciembre y enero tienen un promedio de turbidad igual a 0.042 y un total de 30 muestras de las 80 caen dentro del rango que puede considerarse igual al promedio, según la prueba t de Student. Asimismo, los meses de febrero y marzo tienen un promedio de turbidad igual a 0.059, y un total de 29 muestras de las

80 caen dentro del rango que puede considerarse igual al promedio, según la prueba t de Student. Los meses de abril y mayo tienen un promedio de turbididad igual a 0.090 y un total de 26 muestras de las 80 caen dentro del rango que puede considerarse igual al promedio, según la prueba t de Student. Los meses de Junio y Julio tienen un promedio de turbididad igual a 0.111 y un total de 16 muestras de las 80 caen dentro del rango que puede considerarse igual al promedio, según la prueba t de Student. Los meses de Agosto y Septiembre tienen un promedio de turbididad igual a 0.091 y un total de 19 muestras de las 76 caen dentro del rango que puede considerarse igual al promedio, según la prueba t de Student. Los meses de Octubre y Noviembre tienen un promedio de turbididad igual a 0.064 y un total de 19 muestras de las 76 caen dentro del rango que puede considerarse igual al promedio, según la prueba t de Student.

Los efectos de un huracán se relaciona con una disminución en  $\beta$ , sobre todo durante los meses de suyo limpios o claros de polvo y aerosoles como se observa en los años 1989 y 1998 que son los picos más cercanos al eje  $\beta = 0$ . Los efectos de una erupción volcánica por el contrario se relacionan con un aumento de  $\beta$ , tal y como se observa en los años próximos a 1982 y 1992.

**Tabla IX. Análisis de las medias del periodo bimensual diciembre-enero**

Año	10:30 AM			11:30 AM			12:30 AM			1:30 AM		
	beta	S	t Stud	beta	S	t Stud	beta	S	t Stud	beta	S	t Stud
1983	77	12	13.04	85	11	17.48	88	12	17.14	80	8	21.24
1984	59	17	4.472	54	17	3.157	64	25	3.935	55	18	3.23
1985	46	21	0.852	47	42	0.532	43	42	0.106	44	15	0.596
1986	47	27	0.828	38	17	-1.05	44	21	0.426	39	21	-0.64
1987	33	9	-4.47	35	11	-2.85	36	11	-2.44	33	9	-4.47
1988	36	10	-2.68	36	11	-2.44	52	29	1.542	54	25	2.147
1989	68	24	4.845	70	25	5.009	87	24	8.385	72	30	4.472
1990	16	11	-10.6	18	13	-8.26	8	3	-50.7	6	1	-161
1991	42	19	0	32	12	-3.73	41	20	-0.22	45	22	0.61
1992	112	11	28.46	121	14	25.24	122	12	29.81	119	11	31.3
1993	56	15	4.174	60	18	4.472	43	7	0.639	45	10	1.342
1994	36	7	-3.83	37	6	-3.73	31	4	-12.3	40	14	-0.64
1995	41	12	-0.37	42	12	0	45	11	1.22	43	16	0.28
1996	25	8	-9.5	40	29	-0.31	39	22	-0.61	29	13	-4.47
1997	22	6	-14.9	21	5	-18.8	26	9	-7.95	24	5	-16.1
1998	35	11	-2.85	33	12	-3.35	37	12	-1.86	33	8	-5.03
1999	28	12	-5.22	21	8	-11.7	49	9	3.478	21	6	-15.7
2000	26	10	-7.16	29	10	-5.81	28	11	-5.69	34	16	-2.24
2001	25	8	-9.5	29	8	-7.27	39	22	-0.61	27	9	-7.45
2002	31	10	-4.92	24	4	-20.1	51	25	1.61	35	14	-2.24

5 t

5 t

11 t

9 t



## 4. EL CÁLCULO DE $\beta$ PARA GUATEMALA

### 4.1. Instrumentación solar

Para emplear el presente método de análisis atmosférico el único instrumento indispensable es el piranómetro para medir la radiación global, que se puede comprar a la Firma Kipp & Zonen (Delft Holland) por un precio cotizado al 12 de mayo de 2,005 de \$2,235,00. De estos se deben comprar dos, puesto que la radiación difusa se mide agregándole una lata circular al piranómetro.

En la tabla siguiente se indican el número de catálogo, modelo, descripción y el precio al consumidor final, fuera de los gastos de envío de un puerto de Alemania.

El piranómetro CM 11 es diseñado para medir la irradiación (flujo radiante, en Watt/m<sup>2</sup>) en una superficie plana, la cual resulta de la radiación directa del sol y de la radiación difusa incidente de todo el hemisferio superior o cúpula celeste.

**TABLA X. Lista de precios para internacionales**

PART NR.	MODELO/DESCRIPCIÓN	PRECIO
1305-904	<b>CM 11</b> Piranometro, con pantalla tornillos de nivelación, nivel, desecador y cable de conección de 10 mts.	\$2, 235,00
1305-810	<b>CM 121</b> Anillo de sombra ajustable para CM 6B y CM 11	\$2, 972,00
2643 943	Agente secante, gel de silicón	\$35,20

## 4.2. Adquisición de datos

Durante el tiempo que ha durado el estudio de la información solar recopilada en Managua, se visitó el INSIVUMEH para poder hacer eventualmente una comparación entre los dos ambientes y sus respectivas turbidades, pero lamentablemente esta institución no tiene mediciones de la radiación difusa, por lo que si se quiere conocer la turbidatad atmosférica en Guatemala se hace imperativo medir la radiación global y la radiación difusa de modo ininterrumpido por lo menos durante los meses de noviembre a marzo, en concordancia con la conclusión 6 del presente trabajo de graduación para que la mayoría de los datos recogidos sean válidos y se tenga mayor probabilidad de una medición de la turbidatad atmosférica real.

Afortunadamente, durante estos meses existe la posibilidad de aprovechar todas las ventajas que ofrece realizar una imagen de este estudio realizado en Managua, en el Ingenio Santa Ana de Escuintla (Km 64.5 carretera a Santa Lucía Cotzumalguapa), empresa a la que le cotizaron el piranometro que aparece en el anexo. Estas ventajas son:

1. Un ingenio cuenta con autómatas que reciben información analógica las 24 horas del día y cuenta con suficientes canales como para instalar los transductores que convierten la radiación solar interesante al estudio en señales eléctricas.
2. Se puede ocupar la capacidad instalada de almacenamiento de información digital en un servidor de históricos (SERVER03 en la red de informática) con respaldo diario y seguridad contra hurto.
3. La comisión del ambiente de FUNDAZUCAR ya tiene conocimiento de este proyecto y ha mostrado interés de llevarlo a cabo para comprobar la influencia que la combustión del bagazo en las calderas de un Ingenio tiene en la turbiedad atmosférica, pues saben que la turbiedad es un parámetro de la contaminación atmosférica.
4. El Ingenio Santa Ana está localizado cerca de la ciudad de Escuintla, un sitio de comparación muy conveniente puesto que tanto la altitud como el desarrollo urbanístico de esta ciudad, como de la ciudad de Managua son muy parecidos.
5. El Ingenio Santa Ana, a diferencia de los demás Ingenios, cuenta con un punto de control remoto situado a 10 Km. de la fábrica, en el desvío del cauce del río Guacalate a las bombas de inyección de agua que se usa para levantar vacío en los evaporadores, drenaje, etc. Esta ventaja sería definitivamente una mejora del estudio respecto del ya realizado en Managua, pues se contaría con información simultanea de la turbiedad en 2 puntos. siendo el más alejado de la fábrica el que más se asemejaría a las condiciones establecidas en el punto anterior.

En el otro caso, de medir la turbididad en la ciudad de Guatemala, el equipo que recomienda la estación actinométrica de Managua, es el modelo Agilent HP34970A, cuyo precio es de \$ 1,685.00 más la tarjeta multiplexadora de 20 canales que vale \$ 395.00. El programa puede asignarsele un valor de \$ 2,000.00

### 4.3. Presupuesto

Un proyecto para hacer este estudio en el Ingenio Santa Ana, necesariamente debe contar con un presupuesto que incluya:

- 4 piranómetros \$ 8,940.00
- 2 aros para medir la radiación difusa \$ 5,944.00

Lo que da un total de \$14,884.00 y un período de tiempo mínimo de 5 meses.

En caso de tener que realizar el estudio en la capital el proyecto debe contar con un presupuesto que incluya:

- Equipo de adquisición de datos(sin incluir el precio de la Computadora) \$ 2,080.00
- 2 piranómetros \$ 4,470.00
- aro para medir la radiación difusa \$ 2,972.00
- Software \$ 2,000.00

Lo que da un total de \$ 11,522.00 y un período de tiempo mínimo de 5 meses.

## 4.4. Teoría de la Instrumentación solar

### 4.4.1. Sensores de Radiación

Existen cuatro tipos de sensores de los cuales por afan de completitud se explicarán los cuatro.

1. Sensores calorimétricos.
2. Sensores Termomecánicos.
3. Sensores Termoeléctricos.
4. Sensores fotoeléctricos.

#### **Sensores calorimétricos**

La radiación es incidente sobre un metal de alta conductividad que está revestido con una pintura negra -no selectiva de alta absortancia. El calor de conversión de la energía radiante es medido de diversos modos:

- el calor es transportado por un fluido cuyo cambio de entalpía ( $H$ ) es medido ( $H = u + pV$ ,  $u$ : la energía interna,  $p$ : presión,  $V$ : volumen).
- el aumento de la entalpía (o incremento de la temperatura en el sensor metálico) es medido.
- la temperatura diferencial con respecto a un transductor se mantiene constante por medio de un calentador eléctrico, la cual es proporcional a la irradianza.

#### **Sensores Termomecánicos**

El flujo radiante es medido a través de la deflexión de una lámina de metal. Así, dos láminas de metal con diferentes propiedades térmicas de expansión son mantenidas unidas rígidamente; mientras una es fijada la otra lámina se mujeve libremente. Por otra

parte se reviste una de las laminas con pintura altamente absorbente y expuesta al sol mientras la otra tiene una capa de alta reflectividad.

Las temperaturas desiguales así como los diferentes coeficientes de expansión térmica producen una curvatura entre las láminas; y esta distorsión es transmitida óptica o mecánicamente al indicador adecuado.

### **Sensores Termoeléctricos**

Conocidos también como termopares, se basan en el fenómeno de la termoelectricidad, a saber: Cuando un circuito está formado por dos conductores metálicos diferentes, unidos en sus terminales y con temperaturas diferentes en sus uniones, se produce una corriente en el circuito. La fuerza electromotriz (*fem*) generada por la corriente es proporcional a la diferencia entre el calor producido por la Irradianza y una temperatura de referencia cualquiera.

### **Sensores fotoeléctricos**

En la medición de la radiación solar muchos instrumentos emplean sensores fotoeléctricos o fotovoltaicos. El silicio (valencia 4) como material de base se dopa con impurezas como fósforo, antimonio o arsénico (con valencia cinco). De este modo en la unión entre átomos Si - X se hallan electrones libres que pueden ser eyectados por la luz solar incidente de la banda de valencia a la banda de valencia, originando una corriente de electrones.

En caso que las impurezas sean aluminio, boro o indio (valencia tres), aparecen huecos o cargas libres que en la banda de conducción permiten originar una corriente de cargas positivas.

La mayor desventaja de los artificios con celdas de silicio es que su respuesta espectral a la luz solar es fuerte solo en la región roja e infrarroja cercana; si bien presentan una respuesta rápida y son de bajo costo. La sensibilidad espectral pertenece al rango (0.4 - 1.1) $\mu\text{m}$  y su respuesta se aparta de la ideal ley del coseno (ver sección 4.1.4), si bien es corregida en parte con un difusor plástico, una capa antireflexiva y una superficie

textilizada. La respuesta espectral relativa de una celda fotovoltaica de silicio alcanza un máximo de 58 % de la energía solar incidente.

#### 4.4.2. Instrumentos de medición de radiación directa

La radiación solar directa se mide con un instrumento llamado piroheliómetro (pir = fuego, helio = sol, metro = medida), que se parece a un pequeño telescopio con una entrada estrecha llamada apertura. El instrumento se coloca sobre un rastreador solar y su apertura de cara al sol. La necesidad de conocer con precisión la constante solar,  $I_{sc}$ , ha forzado el desarrollo del piroheliómetro a lo largo del siglo XX (ver capítulo 2).

#### 4.4.3. Medición de la irradiación global: piranómetros

La irradiación solar global se mide mediante radiómetros con campos de visión hemisférica llamados piranómetros (*pir = fuego, nanometro =  $10^{-9}$ mts*). Sus sensores más comunes están basados en principios termoeléctricos, termomecánicos y fotovoltaicos.

Entre los piranómetros más comerciales se hallan el “piranómetro espectral” de precisión del laboratorio Eppley. El sensor está revestido de un lacre negro de Parson, que tiene una alta absorptividad en toda longitud de onda y está cubierto con dos cúpulas hemisféricas de cristal Schott - WG295 (transmite uniformemente entre 285 y 2800 nm). Se le puede recubrir con filtros hemisféricos de cristal SchoH, para transmitir dentro de anchos de banda específicos, razón por la cual se le llama “Piranómetro espectral”.

El otro piranómetro conocido es el fabricado por Kipp & Zonen, Holanda, llamado solarímetro y cuyos detectores son termopilas Moll (CM 9, CM 11). Tienen una gran estabilidad y respuesta rápida.

No faltan piranómetros contruídos con principios termomecánicos. Así, el actinógrafo de Robitzsch o piranógrafo, es un piranómetro bimetalico. En este instrumento, el movimiento del extremo libre de la lámina bimetálica es engranado mecánicamente y registrado mediante un brazo movable y una pluma sobre un tambor. Como el tambor es movido por un muelle de reloj, el instrumento es autónomo y puede ser instalado en regiones de clima severo con una cúpula de cristal encima de las láminas bimetálicas.

Los actinógrafos bimetalicos son populares debido a su simplicidad, robustez y portabilidad; pero su precisión está ubicada en el rango de 5 - 10 % y algún mes llegan hasta 18 % , si es muy nuboso. Su respuesta es más bien lenta y hasta brusca al repentino cambio del flujo radiativo.

Los actinógrafos basados en celdas fotovoltaicas de silicio van ganando confianza comercial; si bien la precisión alcanzable con estos radiómetros no es elevada. Su respuesta es prácticamente instantánea, produciendo una señal integrada de salida sin energía externa y cuestan una fracción del precio de un instrumento con termopila.

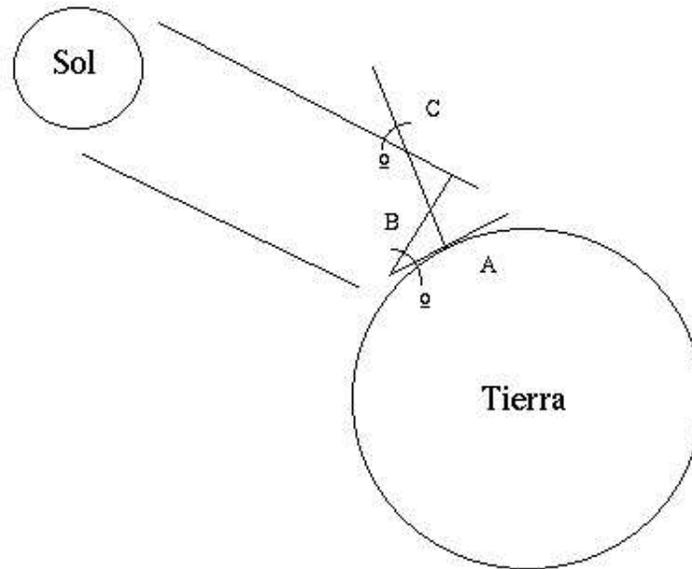
#### 4.4.4. Características de piranómetros

Los piranómetros presentan algunas características específicas a tener en cuenta. Así la respuesta direccional del sensor con respecto a la elevación solar y el azimut del sol, como el efecto de inclinación al no ser colocado en posición horizontal, son aspectos propios de estos instrumentos.

1. El efecto coseno: (Ley de Lambert).

Sea una superficie **A**, fuera de la atmósfera y paralela (tangente) a la tierra, y otra superficie **B** normal al haz solar; el ángulo entre ellas es  $\theta_z$ , que resulta ser el ángulo cenital o de elevación solar. El haz solar extraterrestre  $I_{sc}$ , es la máxima radiación que recibe la superficie **B**. Pero cuando una superficie **A** no es normal al

Figura 9: Cálculo de la radiación del Sol sobre una superficie horizontal



haz de rayos solares, la radiación incidente sobre ella estará reducida por el coseno del ángulo que forma la superficie vertical **C** y los rayos solares,  $\theta_z$ .

Si bien la cantidad de energía solar sobre las superficies **A** y **B** es la misma, la razón de energía por unidad de superficie es reducida por:

$$I_{n_A} = I_{sc} \times \cos(\theta_z) \quad (4.1)$$

Así pues, se llama el “efecto coseno” a la reducción de la radiación según el coseno del ángulo de incidencia entre la normal a la superficie y el rayo incidente.

Los elementos sensores de los piranómetros están revestidos con algún tipo de pintura negra de alta absorción. Para la mayoría de los sensores eléctricos, la absorptividad permanece prácticamente constante hasta que el ángulo de incidencia excede los  $70^\circ$ , creciendo a continuación y decayendo rápidamente al acercarse a los  $90^\circ$ . (todo esto constituye el efecto coseno).

## 2. Efecto del Azimut.

Bajo condiciones ideales, la respuesta del radiómetro es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de la radiación y deberá ser constante para todo ángulo azimutal. Pero, las superficies receptoras presentan imperfecciones de manufactura y por tanto se dan pequeñas variaciones en la absorción azimutal.

## 3. Efecto de inclinación

Algunas aplicaciones solares necesitan medir la insolación en planos inclinados. Un piranómetro montado en una superficie inclinada recibe la radiación directa, difusa y reflejada del suelo. Como los piranómetros se calibran en la posición horizontal, al ser colocados inclinados o invertidos, suelen presentar un cambio en su respuesta. Lo cual ocurre debido a un cambio en la forma interna y externa de la cúpula hemisférica de cristal de transferir el calor. Así pues, el efecto de inclinación varía con el ángulo de inclinación y con el nivel de radiación.

### **4.4.5. Clasificación de los piranómetros**

Contrariamente a los pirheliómetros, no hay piranómetros absolutos y todos son instrumentos calibrados, ya sea contra un pirheliómetro de referencia estándar mientras el piranómetro se sombrea alternativamente con un disco (10 cm de diámetro) sostenido a 1 m. de distancia. También, se puede calibrar un piranómetro contra un piranómetro de referencia, colocado en posición horizontal y operando al mismo tiempo.

Los piranómetros se clasifican como: de primera, segunda y tercera clase; basándose

en la precisión de estos instrumentos.

#### 4.4.6. Medición de la radiación difusa

Dependiendo de las mediciones de la radiación directa y la global, al contar con un piroheliómetro y un piranómetro, la radiación difusa se calcula:

$$DIF = Glb - Direct \times \cos(\theta_z) = Glb - Direct \times \sin(h) \quad (4.2)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital y  $h$  es el ángulo de elevación solar

$$\sin(h) = \sin \delta \sin ltd + \cos \delta \sin ltd \cos wh \quad wh = \text{ángulo horario}$$

Como la medición de la radiación directa necesita que el piroheliómetro esté montado sobre un rastreador solar, instrumento costoso, se recurre a un piranómetro con un sombrero para medir la radiación difusa.

En la práctica, se coloca un aro paralelo al plano ecuatorial con una inclinación respecto a la vertical, igual al ángulo de latitud. Como el sol varía su declinación a lo largo del año, el aro es manualmente desplazado cada dos días para mantener el piranómetro en la sombra. Claro está, el aro apantalla un casquete esférico celeste, disminuyendo el flujo de radiación difusa incidente en el sensor, razón por la cual hay que introducir una corrección experimental, a partir de un cálculo teórico correspondiente a un disco-sombrero en un cielo con intensidad difusiva isotrópica.

#### 4.4.7. Medición del brillo solar

Además del piranómetro y del piroheliómetro que miden la insolación total y de haz directo solar, en las observaciones meteorológicas se emplea otro instrumento que mide la duración del brillo-solar que llega a la tierra.

El instrumento tradicional para medir este parámetro de umbral ( $S_1 : 120 \text{ W/m}^2$ ;

S2 : 200 W/m<sup>2</sup>) es el heliógrafo de Campbell - Stokes. Este instrumento consta de una bola de cristal que concentra el haz de la radiación solar, quemando una traza sobre una tarjeta de material térmico especial. La esfera está montada sobre un eje paralelo al de la tierra y la tarjeta colocada en la dirección este-oeste. Cuando la radiación solar está por debajo del nivel energético umbral, que quema la tarjeta, la línea quemada se interrumpe en su desplazamiento. Así pues, es posible conocer la hora y la duración del brillo solar a lo largo del día.

La mayor limitación del instrumento, es el efecto de la humedad sobre la tarjeta y por tanto su variabilidad en fijar un nivel umbral de radiación. Bajo condiciones muy húmedas, la quema en la tarjeta no comienza hasta que el umbral es de 280 W/m<sup>2</sup>; mientras en un clima muy seco, la quema puede comenzar con un nivel radiactivo de 70 W/m<sup>2</sup>.

## 5. DATOS RECOPIRADOS Y CALCULADOS

En las tablas a continuación se presenta el total de datos recopilados de radiación directa **I**, radiación difusa **D** y la turbidatión atmosférica  $\beta(X 1000)$  agrupados por decadas de días, donde (e1) representa cualquiera de los primeros 10 días de enero, (f2) cualquiera de los días comprendidos entre el 11 y el 20 de febrero y así sucesivamente desde 1,983 hasta 2,002. Cronologicamente, las primeras 4 columnas preceden a las otras 4 y así sucesivamente, hasta la última hoja de la tabla en cuestión. La tabla XI es de datos tomados entre las 10 y las 11 de la mañana. La tabla XII es de datos tomados entre las 11 y las 12:00 a.m. La tabla XIII de datos tomados entre las 12 y la 1 de la tarde y la tabla XIV de datos tomados entre la 1 y las 2 de la tarde.

**Tabla XI. Datos totales de radiación y turbididad para las 10:30 A.M.**

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
e183	833	129	76	j3	696	176	141		894	88	38	o1	864	92	46
	822	126	77	jl1	705	183	145		836	106	58	n1	870	107	55
e2	822	126	75	ag1	712	184	141	e2	816	114	65		862	105	55
	830	116	66	ag2	757	150	106	e3	876	99	45		915	80	30
	845	114	63	s3	780	169	120	f1	902	87	40		878	82	34
	835	117	66	o2	798	124	81	m1	915	84	38	n2	825	115	67
	839	112	61		676	116	86		911	92	43		897	85	36
	791	132	83	o3	851	105	57	m2	882	111	62	n3	912	78	25
e3	710	174	130	n1	878	108	55		841	131	83		912	73	22
f1	834	129	81		897	80	31	a1	809	148	98	d1	876	89	38
	849	118	69	n2	833	123	74		922	88	36		873	103	50
f2	756	174	127	d1	831	122	69	a2	824	120	71		902	86	34
	862	108	59		859	96	46	a3	830	139	85		912	87	34
	815	128	80	d2	805	146	93	my1	765	158	111	d2	901	88	36
	761	159	112	d3	822	140	87	my3	856	82	33		767	142	95
	803	141	92		867	90	42		864	123	84		817	107	60
m1	838	121	78		833	109	60	j1	831	130	81		726	167	121
	843	126	82		751	143	100	j3	753	166	121	d3	827	91	46
	777	139	101					ag1	784	153	105		891	93	42
	796	156	112	e184	908	83	33	ag2	852	103	55				
m2	810	145	100		902	121	64		842	97	50	e185	950	58	9
	796	152	108		899	77	28		824	96	51		939	59	10
m3	852	122	73		759	125	83	s2	800	159	108		873	76	29
a1	724	189	145		869	94	45	s3	831	161	107	e2	918	81	30

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
	820	147	92		874	93	45	f2	838	120	69		878	95	55
	856	117	63	n3	797	142	86	f3	827	119	69	ag3	886	111	58
e3	892	91	39		932	140	71		883	95	44	s3	891	86	37
	887	89	37	d1	848	112	59		797	139	83	o2	836	139	92
	922	80	26		853	85	37		816	114	60		889	82	37
f2	822	95	50	d2	911	87	35	m1	867	111	68	o3	797	125	75
m2	828	145	96	d3	895	90	39		929	81	34		864	92	41
	890	94	46		862	99	50		915	88	41		904	78	27
	868	126	75						913	88	41	n2	894	97	47
m3	932	74	25	e186	584	149	147		835	113	71	n3	816	165	102
	837	143	90	e2	872	87	41		914	91	44	d2	907	89	37
a1	936	75	24		937	69	20	m2	913	89	41		899	79	29
a2	827	126	75		749	136	102		909	95	46		918	77	26
	820	135	83		931	70	21		705	206	164	d3	917	73	23
my1	851	125	73		923	77	28	m3	904	82	34		860	88	40
	804	154	103		751	123	87		908	86	37		821	113	65
jl2	837	111	65		762	64	28		889	99	50				
ag3	744	200	159	e3	851	127	76		832	126	77	e187	856	111	60
s2	808	143	94		917	72	20	a1	882	100	50		909	72	23
o1	860	143	90		956	63	11		799	153	105		907	84	34
o2	845	124	76		948	64	12		898	104	51		952	67	16
	681	213	182	f1	936	74	25	a2	826	117	69	e2	928	77	26
n1	842	134	79		939	80	30		804	106	61		882	90	39
n2	854	131	79		952	78	27		876	105	53	e3	903	79	28

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
	898	81	30	ag2	790	148	99		914	72	22	j2	900	98	46
	879	90	39	s2	855	127	73		914	72	22		875	82	36
	923	72	21	s3	819	133	85		914	72	22	jl2	789	125	84
	902	81	29	o2	972	97	50	f1	922	75	26	jl3	723	166	129
f1	925	77	28		891	85	38		932	73	24		692	193	157
	904	84	35		900	82	35	f2	927	80	29	s2	904	68	22
f2	894	94	45		897	82	35		904	92	40	o1	841	89	44
	912	83	34		913	87	39	f3	944	79	26	o3	756	143	103
	890	88	39	o3	870	104	50		960	71	18		865	90	44
	873	105	55	n1	910	72	22	m1	947	77	30	n1	664	138	115
	884	96	46	n2	883	88	39		923	89	42		799	100	59
f3	809	111	63	n3	882	96	41		903	84	37		719	133	102
m1	859	107	63	d1	869	90	39		823	132	88	n2	917	76	30
	858	98	54		910	69	19	m2	934	81	32		856	98	55
m2	870	106	59		865	80	32		893	111	61		699	98	61
	922	81	32		827	113	64	a1	895	97	47	n3	850	113	61
	882	104	55	d2	885	91	40		887	100	51	d1	863	90	43
	915	92	42		859	89	40		801	136	91	d2	889	85	37
m3	855	125	73		872	103	52	a3	797	144	98		754	130	90
a1	867	103	53	d3	861	107	58		910	85	35		775	148	98
	822	133	84					my1	785	138	95		899	80	30
	821	128	79	e188	877	86	38		774	150	107	d3	853	90	42
my3	836	120	71	e2	898	79	30		794	145	100				
	833	118	69	e3	900	82	31	my2	770	138	96	e189	722	119	83

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
	803	127	79		880	93	45	m1	890	98	51	e391	863	117	63
e2	795	153	102		847	106	58	m3	879	100	51	f1	837	105	60
e3	801	130	79	my3	858	91	46		820	129	83		964	69	19
f2	929	80	28	j3	827	116	71	a2	740	178	135		954	71	21
f3	892	102	49		707	147	115	my3	738	153	113		864	96	48
	913	81	30	jl2	779	159	114	j1	677	168	123		934	77	27
	950	69	17	ag2	830	104	59		772	141	98	f2	928	82	31
	920	87	44	s1	900	62	16	j2	755	191	144		944	73	22
	938	79	26	s2	847	111	64	jl3	735	169	127		914	92	41
	895	97	44	s3	760	211	162	ag1	830	112	65		909	93	41
m1	836	134	90	o2	922	62	14	s2	783	150	106	m1	886	99	53
	940	67	20		915	70	22	s3	867	116	72		844	120	75
	946	68	21	n1	867	93	46	o2	776	167	128		927	88	39
	950	75	26		935	58	12	o3	907	71	24		933	82	33
m2	926	89	41	n2	868	95	49	n1	851	92	47	m2	912	91	42
	808	133	90	n3	892	73	24		925	70	23		891	92	44
	939	83	34		863	76	30	n2	924	52	7		887	101	52
	821	144	99		917	72	24		889	86	42		919	90	40
m3	861	113	66		952	51	4	n3	915	72	23	m3	876	101	52
	920	87	37		963	52	4		926	62	15		933	80	29
	918	80	31		951	57	9	d2	873	104	54	my2	751	205	156
a2	889	94	45						852	107	58	my3	776	167	123
a3	785	143	99	e190	928	71	21	d3	930	69	20	j1	793	145	101
	827	121	75	e3	902	93	39					jl3	771	163	119

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
ag2	742	192	146	m1	808	154	109	o1	705	154	122		898	85	34
s1	729	190	147		824	151	104		725	177	147		904	91	38
o3	739	167	121		784	178	131	o3	711	180	139		809	125	73
n1	758	160	120	m2	759	180	136		676	182	149		896	90	37
n2	747	159	121		795	163	116	n1	852	107	62	f1	909	88	41
	707	178	145		790	164	118	n2	861	100	57		865	119	71
n3	692	188	143	m3	789	179	128		746	143	109		926	88	38
	728	160	113		796	169	119		783	135	97		889	98	50
	716	168	124		683	222	201	n3	755	145	99	f2	862	113	64
d1	744	167	121		792	173	121		837	122	72		900	104	50
	790	144	97		816	159	107		828	115	67	f3	884	106	54
d3	807	140	91	a1	757	182	136	d1	808	121	74	m1	789	148	110
	731	169	125	a2	778	164	116		795	114	70		860	142	92
				a3	812	149	99	d2	836	112	65	m2	728	185	149
e192	758	155	109	j3	755	180	136		831	120	72		863	109	63
	742	160	115		748	164	123	d3	815	135	86		833	131	85
	776	158	109		756	181	137		887	97	47		871	108	60
e2	797	151	99		713	172	137		893	92	43		871	102	54
e3	717	176	127	jl1	712	209	166					m3	846	136	88
	716	182	133	ag1	672	194	160	e193	900	90	41		866	116	67
f1	768	167	123		716	212	168		884	90	42		860	127	78
	737	178	135	s3	799	148	105	e2	832	119	70		764	151	111
	769	164	119		726	183	147	e3	826	111	62		822	127	81
f2	786	155	107		789	122	81		872	100	48		820	139	92

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
a1	724	186	146	e194	893	82	34	d2	944	112	56	f2	863	110	63
	822	149	99	f1	887	99	50		967	67	18		726	76	46
	910	95	45		902	91	40		905	91	43		967	110	53
a2	751	174	132	f3	887	117	62		918	86	37	f3	985	125	63
my2	816	124	83		917	94	40	d3	872	77	33		999	125	62
my3	685	183	143	m1	881	99	55		853	130	81		986	144	77
	656	198	182		881	107	62		913	92	43		952	160	93
jl2	686	193	158		869	115	69		873	112	64		967	148	82
ag3	753	202	155	m2	875	117	68		923	89	39	m1	971	85	34
s2	849	103	58	m3	898	100	51		929	86	36		816	195	143
o1	819	148	102		924	89	40		962	90	37		823	75	37
o3	862	97	49		941	84	34		949	73	24	m2	987	68	18
n3	891	89	38	a2	875	107	55						954	99	48
	899	72	24	my1	806	135	86	e195	940	70	20	m3	930	95	47
	910	71	22	my2	762	136	94	e2	902	90	40		959	87	37
d1	881	85	48	ag1	691	209	176		813	109	65		651	216	192
d2	847	90	45	ag3	681	196	168		945	83	31	a2	839	118	71
	931	73	25	s1	628	229	211		942	75	25	a3	701	175	141
	895	79	33	s2	665	226	197	e3	937	109	53	my1	868	90	43
	853	90	45	s3	664	233	203		980	107	48	my2	790	151	104
	874	85	39	n1	949	104	54	f1	905	77	30	ag3	821	167	114
	931	78	30	n2	963	79	31		906	73	26	s2	803	123	80
d3	927	76	27		995	63	15		837	102	58	n3	879	91	40
					915	120	70		913	76	28		899	85	34

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
d1	869	95	45	m3	903	95	47	f3	900	99	46	e3	922	73	24
d2	913	91	39		914	91	42	m2	835	113	72		896	83	34
					932	85	34	m3	912	96	49		905	82	32
e296	960	62	11	a1	862	121	72		990	78	27	f2	895	83	37
	952	72	20		880	112	61		963	63	14	m2	869	96	54
	955	67	15	a2	835	122	72		913	91	43		900	79	35
	932	78	26		856	105	55	a1	937	78	29		944	78	31
e3	935	84	28	my3	802	120	78	a2	894	94	46	m3	855	117	72
	948	77	22	jl	784	219	165	my1	887	87	40		865	104	59
f1	841	119	71	jl1	795	124	79	jl	690	202	170	a1	830	122	79
	939	83	31	jl2	762	172	128	s1	876	77	32	a2	892	86	40
	834	121	71	ag1	814	139	93		750	162	127		867	111	64
f2	903	84	37		876	74	30	o1	867	74	32	a3	826	120	74
f3	936	88	35	s2	885	93	46	d1	884	84	35	my1	780	147	105
	931	92	38	n2	921	56	11	d2	875	91	44	j2	795	135	90
m1	889	119	72		909	68	24		909	74	27	ag2	842	112	65
	906	98	51		929	66	24		727	131	97	n2	824	105	62
	940	66	20		931	61	20		883	72	27	n3	803	107	61
	969	57	10	d2	892	74	35		936	62	15		891	72	24
m2	949	76	28		902	68	22	d3	925	63	16	d1	915	68	19
	934	87	39						920	97	40		838	109	60
	924	98	49	e197	936	59	12						903	71	23
	934	94	45	e2	916	71	22	e298	907	79	30	d2	859	85	38
	910	100	52	f1	924	94	48		865	86	38	d3	933	61	13

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
	938	60	11	jl3	848	108	73	e3	955	62	11		929	61	13
d3	870	90	44	s1	870	92	44		925	72	20	n1	910	78	30
				o3	935	61	10		876	94	41		904	72	25
e199	921	71	21		915	61	13		818	106	56		924	70	23
e2	914	70	21	n1	854	109	60		954	67	14	n2	892	80	35
	911	69	20		877	87	40		924	80	26	d1	903	67	19
	905	73	23	n2	862	81	38	f1	901	101	49		904	67	20
	865	98	47		874	86	42	f3	935	75	23		895	65	18
f2	880	95	44		882	82	38		901	90	37		870	86	39
f3	911	80	28	n3	921	76	24		897	90	37		840	91	45
	877	95	43		884	78	30	m2	895	109	58	d2	924	67	19
m1	923	88	40	d1	915	70	21		898	90	41	d3	918	66	19
	978	65	16		915	79	28	m3	807	139	93		926	59	12
m2	964	91	40		885	75	27		822	142	93		887	77	29
	936	84	34	d2	834	98	51		805	140	93		921	65	17
m3	894	102	51	d3	883	80	32	a1	731	181	140				
a1	921	94	42		930	65	16	jl2	784	132	87	e11	904	77	28
	903	97	46		893	80	29	s1	859	112	63	e2	895	97	44
a2	806	157	110		948	59	10	s3	657	120	104		936	73	22
a3	804	112	68						864	91	48		901	73	24
my1	837	142	88	e10	919	67	18		882	68	26	e3	928	66	15
my3	848	117	68		919	67	18		910	68	24		867	86	36
j1	876	92	44	e2	933	71	20	o3	932	66	16	m1	948	73	24
jl2	810	104	59		871	90	39		935	63	14	m3	934	63	15

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
	938	81	33		824	82	39	e12	897	70	24	a1	851	137	84
a2	837	138	86	n2	927	55	10		867	78	33		901	97	46
j3	807	131	85		909	62	18	e2	892	92	44		825	124	77
jl2	831	109	63		917	58	14		914	102	48		880	103	54
jl3	829	119	71		891	72	30	e3	873	88	35		893	106	55
s2	827	131	83		892	77	35	f1	850	101	56	a2	860	114	65
o1	896	75	30		898	65	23	f2	923	87	35		889	86	57
	787	75	33	n3	923	59	12	f3	891	96	45	my1	886	89	40
o2	787	87	46	d1	916	64	15	m2	882	108	59		895	85	36
	924	58	11		924	68	19		905	87	39	j1	816	136	89
n1	863	85	41					m3	940	80	30	j2	742	195	152

Tabla XII. Datos totales de radiación y turbididad para las 11:30 A.M.

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
e183	829	136	85	a1	721	215	176		805	145	96		886	85	40
	842	132	81		715	222	182		862	104	55	n2	834	127	86
e2	839	129	78	a2	781	171	127		905	92	41	n3	922	77	26
	809	154	102		711	206	171	e2	874	109	57		855	113	62
	844	125	74		786	162	119	f1	881	105	58		921	74	24
	841	124	73	my3	734	206	166	f3	773	148	101	d1	915	81	31
	852	119	67	ag1	731	192	153	m1	874	123	67		881	96	46
	758	155	107	ag2	762	178	135		872	141	80		909	89	38
e3	781	149	99	s2	735	201	161	m2	767	167	130	d2	899	98	47
f1	861	129	80	s3	810	172	126		760	195	153		828	125	77
	870	120	70		693	212	180	m3	777	186	142		814	136	88
f2	748	216	168		718	203	169		799	160	115	d3	866	113	63
	849	134	84	o1	774	166	171	a1	855	121	74				
	849	125	76	n1	904	79	32		937	87	37	e185	962	60	11
	791	164	116		858	124	76	a3	849	132	83		921	72	23
	812	150	102	n2	807	127	87	my3	873	93	46		936	75	25
m1	849	127	74	d1	888	115	62		860	136	89	e2	907	101	48
	855	131	77	d3	810	96	55	ag2	815	120	78		910	91	40
	865	128	73		852	116	67		893	74	28		865	125	70
	830	155	98		795	143	97	s2	868	109	63	e3	883	105	52
	795	174	117					o3	885	109	59		890	100	47
m2	823	149	107	e184	923	77	28	n1	840	135	89		843	127	73
	826	141	99		915	76	27		875	114	67		910	94	39
m3	861	125	79		911	81	32		907	92	45		919	82	29

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
f2	829	101	57	e186	879	140	83	m2	953	81	33	e187	911	87	37
f3	899	150	87		881	101	54		923	96	48		916	78	29
m2	882	112	66	e2	883	93	47		867	121	75		929	82	31
	883	125	77		967	59	10	m3	885	98	53		967	67	16
	901	110	62		773	116	79		915	103	55	e2	886	102	50
	867	105	61		932	75	26		894	103	56	e3	911	86	34
m3	945	73	25		903	86	38	a1	889	104	57		875	89	39
	808	158	116		953	91	38		816	152	108		931	77	25
a1	923	87	58	e3	955	70	17		846	133	86		923	81	28
a2	919	98	48		962	68	15	a2	879	118	69	f1	943	76	26
my1	846	133	87		956	69	16		855	121	74		910	89	40
	830	141	96	f1	926	78	30		811	145	102	f2	919	88	39
my3	828	130	87		957	78	28		919	84	36		922	85	36
jl2	846	142	96		974	77	26	s3	911	84	38		895	97	48
	741	178	141	f3	815	129	81	o2	913	86	37		883	98	49
	862	104	59		891	101	50	o3	850	114	65		912	92	42
ag3	811	168	120		860	138	81		873	116	66	f3	890	101	49
s2	846	138	95		880	124	71	n2	912	138	77	m1	898	100	47
o1	874	98	56	m1	884	119	65	d1	856	122	70		902	111	55
n2	825	131	82		946	81	28	d2	860	110	61	m2	888	106	61
d1	871	96	47		947	82	29		945	72	22		922	88	41
	901	80	32		922	89	36	d3	937	73	23		898	110	63
d3	923	80	31		888	126	69		893	85	37		936	88	40
					925	92	38					m3	852	131	83

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
a1	865	105	59		875	91	44		800	146	104		795	155	104
	861	121	74						831	133	89	e2	801	143	94
	811	140	97	e188	910	81	32	my2	760	160	122	e3	842	149	90
	827	135	90	e2	858	91	43	j2	906	97	49	f2	948	80	28
my3	882	93	48	e3	937	74	22		837	113	72	f3	949	83	30
s3	832	125	83		937	74	22	ag2	762	150	101		917	87	36
o1	820	143	88		937	74	22		821	168	119		964	69	17
o2	919	80	29	f1	937	75	26	ag3	801	170	125		977	63	11
	865	107	56		935	81	31	s2	889	103	58		943	84	34
	863	104	54	f2	951	79	28	o1	885	105	62		921	92	39
	907	81	31		926	88	37	o3	769	164	121	m1	881	121	66
	903	78	29	f3	943	85	32		697	138	112		950	69	17
	802	129	82		955	81	27	n1	908	83	36		953	72	19
o3	783	163	116	m1	960	80	26	n2	929	72	26		957	78	23
	886	97	49		879	111	58		789	116	81	m2	940	91	43
	911	74	27		917	88	34	n3	734	120	83		947	82	33
n1	800	153	108	m2	946	78	31	d1	875	104	54		953	85	36
	921	73	26		890	138	87	d2	837	160	104		871	129	83
n2	901	92	46	a1	880	124	75		925	94	42		920	132	79
d1	921	69	20		825	138	94		784	131	87	m3	875	127	79
	901	75	37	a3	798	146	105		921	76	27		893	105	57
	890	99	49		919	87	38	d3	928	97	44		932	93	43
	828	120	73	my1	791	153	112					a2	875	147	95
d2	902	90	40		806	171	125	e189	845	103	57		917	88	40

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
a3	893	102	54		845	129	83		961	77	26	d3	794	152	104
	811	143	100	a1	843	167	115		936	91	40		781	164	115
	829	130	86	a2	821	126	84		949	84	33				
	848	125	79	j1	762	126	91	m1	914	97	43	e192778	162	114	
	855	116	69	ag1	809	135	91		879	115	61		772	165	117
my3	868	95	51	s2	821	165	118		954	85	30		775	163	115
j3	725	156	127	s3	899	137	86		962	77	22		781	168	118
ag2	836	146	99	o1	890	101	58	m2	939	85	37	e2	700	219	172
s2	902	89	42	o3	919	71	24		926	86	38		813	158	104
o3	943	61	13	n1	858	104	59		925	96	47	e3	761	182	128
	924	69	21		924	74	28		943	85	36		740	201	146
n1	853	100	55	n2	939	58	13	m3	914	97	48	f1	764	186	144
	942	62	16	n3	906	97	44		948	81	31		795	169	125
n2	887	98	52	d1	935	67	19	a2	699	219	185		774	182	137
n3	859	99	50	d2	854	100	53	my2	743	232	188		804	165	118
	930	60	12		903	86	37	j2	770	160	123	f2	784	183	133
d1	943	78	28	d3	945	71	21	s1	740	203	162	f3	739	196	148
	961	53	5					o3	750	181	135		758	193	140
	972	54	5	f191	916	96	48	n1	756	176	137	m1	772	210	149
	965	88	35		953	84	34	n2	767	169	129		804	170	113
					956	79	28		709	198	165		807	187	125
m190923		86	33		888	101	52	n3	754	175	125		757	206	148
m2	792	175	129		927	87	37		736	179	132		762	199	141
m3	904	101	52	f2	943	82	32	d1	810	150	101	m2	778	188	147

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
	824	164	119	d1	784	132	87		893	117	60	d2	911	85	36
	795	170	129	d2	873	114	64	m2	802	155	116		940	73	31
m3	811	174	127		825	125	78		874	115	70		913	83	35
	815	169	123	d3	856	141	87		852	139	93		875	93	46
	731	211	172		906	99	48		898	106	58		888	92	44
	796	165	121		821	119	73		898	102	54		947	79	29
	815	169	122					m3	883	124	76	d3	927	83	33
	737	200	162	e193	911	94	44		802	175	129				
a1	770	188	147		902	92	43		863	154	104	e194	924	103	50
a2	794	171	126		761	161	115		832	165	118		914	83	34
a3	777	182	140	e3	902	119	61		851	151	102	f1	890	130	77
j3	751	192	154		881	103	50		834	145	99		931	90	38
	752	176	138		917	89	36	a1	830	146	99	f3	921	113	57
	792	155	115		894	105	51		909	110	60		936	100	45
jl2	710	203	171		927	92	37	a2	740	194	156	m1	911	98	45
ag1	710	211	176		914	92	37		772	173	131		920	100	45
ag2	734	223	179	f1	921	93	45	my2	779	149	113		924	101	45
	820	144	101		880	116	68	my3	722	183	158	m2	910	108	60
s3	805	165	123		945	89	38	j3	810	134	95	m3	918	100	52
	830	123	84		911	96	47	s2	816	109	71		948	92	42
o2	872	137	82	f2	883	116	81	o1	833	145	103		942	93	43
n1	871	111	65		925	103	48	n3	894	92	42	a1	919	117	73
n2	814	143	103	f3	899	108	55		914	90	39	a2	845	131	85
n3	816	178	121	m1	826	147	94		912	79	30		873	115	67

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
my1	810	139	96		950	101	46	a3	769	177	137		977	60	8
my2	822	119	77	e3	878	121	70	my1	882	101	55	m2	962	77	30
ag1	844	203	147		880	139	84	my2	758	176	136		958	85	37
	699	220	192		948	70	27	ag3	911	74	28		933	108	60
o2	933	128	70	f1	907	85	38		856	128	83		939	97	49
n1	941	103	55		913	75	28	n3	840	152	96		947	93	45
n2	929	79	34		790	124	86	d1	936	125	66	m3	919	98	51
	857	107	67		924	81	33	d2	822	116	71		923	94	47
d2	944	70	22	f2	827	101	61		858	138	86		947	86	37
	941	91	40		681	50	21					a1	893	113	66
	855	99	55		954	120	64	e196	961	61	11		917	109	59
d3	875	67	24	f3	987	77	26	e2	973	63	13	a2	853	112	66
	894	100	52		987	104	48		970	73	21	my3	758	156	122
	908	88	40		1004	90	35		972	65	14	j1	693	200	180
	878	108	61		843	99	47	f1	937	89	40	ag1	808	195	146
	904	95	47		993	100	44		906	97	48		809	135	95
	908	88	40	m1	948	77	24		939	111	56	o3	915	86	37
	912	88	40		915	103	48	f2	905	105	56	n2	939	60	14
	934	77	29		934	88	34	f3	921	105	52		933	66	21
					831	99	53		932	131	71		943	74	31
e195	882	78	32	m2	933	75	30		918	137	77		965	58	15
e2	950	72	22	m3	971	77	29	m1	857	123	72	d2	918	74	33
	897	97	47		909	86	43		927	97	43		932	67	19
	940	86	34	a2	864	119	73		960	64	12				

continuación

mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$	mes	I	D	$\beta$
e197	892	64	16		908	90	39	e199	919	85	33		913	85	39
e2	864	68	17		927	90	36	e2	918	90	38		888	87	44
f1	859	96	48	f1	875	147	93		935	72	21	n3	936	83	30
m2	923	135	84	f2	944	74	26	f2	931	84	32		920	74	24
m3	921	117	70		917	83	35	f3	932	84	32	d1	934	73	23
	918	99	54	f3	811	123	75		869	124	69		929	81	29
	983	63	14	m2	874	107	66	m1	937	96	40		914	75	25
	940	84	35		888	100	57		1011	60	6	d2	849	114	65
a1	953	79	30		984	69	22	m2	964	97	47	d3	938	71	21
a2	907	102	54	m3	853	126	81		953	81	32		887	99	48
my1	856	112	67		841	130	84	m3	935	85	36		954	79	27
s1	882	83	39	a1	856	125	80	a1	886	118	69		934	72	22
o1	786	119	85	a2	910	87	40		921	87	39		968	62	12
d1	892	84	34		869	110	65	a2	806	157	125				
d2	902	89	39	a3	814	150	105	a3	843	107	63	e10	945	68	18
	923	77	28	my2	802	150	108	my1	815	145	99		945	68	18
	799	135	90	jl1	783	139	101	jl1	896	85	39	e2	952	71	19
	935	68	19	ag1	753	140	135	jl2	788	145	103		923	89	35
	969	62	13	n3	817	109	62	jl3	791	170	125	e3	946	73	21
d3	953	61	12	d1	928	73	23	ag2	822	139	94		935	76	24
				d2	932	60	12	s1	817	187	135		906	92	38
e298	904	89	38	d3	960	59	10	o3	937	64	15		850	114	61
	933	78	27		945	66	16		925	65	17		947	78	24
e3	929	78	28					n2	891	83	39		938	83	28

continuación

mes	I	D	$\beta$												
f1	919	110	57	n2	882	101	55	m3	946	66	18		941	72	22
f3	844	127	75	d1	896	89	39		952	87	40				
	901	119	62		838	93	48	my1	821	129	85	e12	900	78	30
m2	891	129	79		930	65	16	j3	844	122	77		909	76	28
	881	107	61		882	88	40	jl1	825	167	118	e3	930	79	24
m3	857	136	88	d2	922	82	31	jl2	785	157	115	f1	925	101	50
	843	143	96	d3	930	69	20	jl3	775	156	115	f3	871	117	64
	851	144	95		907	65	18	s1	935	64	17	m2	843	139	95
my1	832	145	99		924	90	39	o1	912	77	32		891	139	88
jl2	809	150	105		939	72	22		919	73	29		914	112	62
s1	894	92	45					o2	831	146	94	m3	940	91	41
o2	859	123	69	e11	939	79	28	n1	828	129	84	a1	920	93	44
	913	75	25	e2	930	93	39		818	101	59		840	126	80
	915	68	21		949	79	26	n2	942	59	13		889	110	61
o3	894	89	40		929	72	21		911	76	31		887	132	81
	934	71	22	e3	940	71	18		932	65	19	a2	851	128	81
	949	61	12		915	83	30		874	103	59		857	107	98
	772	149	107	f1	901	133	78		843	108	68	my1	899	84	37
n1	895	87	40		916	114	61		918	66	22		907	85	37
	928	73	25	f3	897	141	80	n3	934	64	14	j1	819	147	103
	819	120	78	m1	968	72	18	d1	936	67	16	j2	782	169	130

**Tabla XIII. Datos totales de radiación y turbididad para las 12:30 P.M.**

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
e283	796	145	97		776	193	150	e184	904	77	30	s2	859	108	65
	830	129	79		756	181	144		733	164	124	o3	895	100	55
	843	122	71	a1	800	166	123		914	86	36	n1	878	106	64
	844	121	70	a2	838	134	89		880	98	49		904	78	35
e3	787	146	97		722	196	163	e3	855	108	55	n2	893	86	44
	790	159	106		768	168	130	f2	933	86	34	n3	857	106	60
	799	154	98	my3	828	160	118	f3	891	117	63	d1	895	88	41
f1	806	154	109		729	177	146		763	137	81		895	89	42
	837	141	93	j2	768	89	41	m1	881	104	52	d3	879	93	46
	860	124	75	jl1	747	161	129		875	126	70				
f2	862	118	68	ag3	780	198	179		925	98	42	e185	945	64	16
	808	155	105		780	198	155	m2	700	232	196		887	88	40
f3	794	161	112	s1	700	212	179		647	229	207	e2	878	100	51
m1	848	126	74	o2	875	107	57		868	122	76		884	92	41
	858	132	78		863	115	67		795	160	119		853	136	80
	866	125	70		858	111	64		777	165	124		949	78	25
	849	135	80	n1	881	95	51	a1	911	94	46	e3	842	120	69
	756	187	134		891	80	37		858	112	67		940	81	26
	760	181	129		866	96	54		927	88	40	f1	851	199	137
m2	827	143	101	n3	851	124	74	a3	891	108	60	m1	873	113	58
	857	126	83	d1	820	146	97		858	125	78	m2	890	101	56
	752	199	160	d3	860	102	56	my3	881	129	86		897	112	65
	821	153	110		681	100	77	ag2	853	122	76	m3	932	75	29
m3	890	113	66		.				910	70	24		797	157	118

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
	860	116	72		957	63	15	m2	910	81	36		905	95	46
	827	167	120		765	124	90	m3	864	108	65		883	86	39
a1	886	103	57		950	71	22		900	103	57				
	909	99	51		943	77	28	a1	892	102	56	e187	929	73	24
a2	925	91	42	e3	952	70	17		808	152	111		939	76	26
my1	828	134	92		928	101	44	a2	850	126	81		973	65	15
	798	138	100		934	73	20		908	99	51	e3	918	84	32
	837	110	70	f1	911	108	58		808	131	90		925	79	27
j12	793	133	94		905	90	43		872	111	65		944	74	21
	892	187	137		913	106	56		777	151	114		918	81	28
	813	152	102		932	86	36	j2	658	271	240	f1	923	76	28
ag2	852	103	60		961	80	29	j2	860	143	95		924	81	32
ag3	875	104	59		915	106	54		898	84	39		926	83	34
s2	824	114	75	f2	883	132	78	s1	862	100	57	f2	925	84	35
o1	903	92	50	f3	879	115	63	s3	886	84	42		931	81	32
o2	821	158	108		887	113	60	n3	912	89	39	f3	909	91	39
n2	833	89	47		918	106	54	d1	863	96	50	m1	885	102	50
d1	819	122	78		940	117	65		913	80	32		853	112	61
d2	927	96	45	m1	868	118	66	d2	856	93	48	m2	875	121	76
d3	939	74	26		939	82	29		862	95	50		931	84	37
					950	80	27	d3	923	76	28		917	93	46
e186	889	106	55		908	89	37		820	122	77	m3	856	128	83
	854	108	64		913	103	48		888	84	37		852	134	89
e2	902	121	70		944	83	29		932	89	38		816	141	100

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
	826	136	92		881	115	86	j2	855	105	64		736	170	128
a1	856	116	72	d3	875	168	106	ag2	827	220	168		767	148	103
my3	885	91	58						734	202	163	e2	770	147	102
ag1	887	88	43	e388	946	74	22		750	146	104		773	153	104
s1	800	164	123		946	74	22	ag3	776	101	63	f3	952	81	29
s3	853	106	66	f1	931	78	29		878	131	81		916	90	39
	872	111	69	f2	932	87	36	s2	758	143	111		952	73	21
o2	756	126	89	f3	949	82	29	o1	712	166	148		970	61	12
	852	111	64		952	81	27		712	166	148		961	76	23
	885	94	46	m1	953	83	29	n1	685	153	129		920	92	39
	898	81	34		917	90	37		735	184	149	m1	921	93	39
	889	79	33		914	87	34		821	125	84		952	70	17
	777	134	94		813	153	98		781	163	122		944	75	22
o3	838	104	62	m2	881	128	81		735	201	162		909	91	37
	759	138	104		941	76	29	n2	933	72	26	m2	928	95	47
	871	84	42		873	148	99		878	90	48		948	87	38
n1	782	135	100	m3	820	139	96	d1	780	125	83		961	83	34
	902	76	33	a1	855	136	88		831	168	112		880	112	67
	922	67	23	a2	849	104	58	d2	865	95	48	m3	877	101	57
n2	900	86	43	a3	852	105	59		834	115	70		868	111	65
n3	881	96	48		914	88	40		910	79	32		865	118	71
	894	108	68		775	181	139	d3	711	137	108	a2	913	89	40
d2	908	84	37	my1	825	133	89					a3	967	115	68
	878	86	41		850	120	75	e189	879	121	68		817	138	94

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
	862	126	78		825	143	98	f2	939	83	33				
	872	114	67	a1	798	184	137		945	82	31	e192	763	166	119
	832	115	71		785	149	110		935	90	39		768	167	119
my3	808	137	96		838	146	98		956	80	29		788	158	109
j3	799	129	90	a2	930	94	44	m1	910	95	42		803	159	108
	727	212	174	ag1	663	98	56		886	109	55	e2	740	197	143
ag1	825	142	96	s2	761	180	140		958	80	26	e3	770	181	127
s2	897	89	43	o1	846	131	90		958	78	24		772	170	117
	913	80	34	o3	906	89	41	m2	950	79	31		716	218	161
o3	948	59	11		886	86	40		942	79	31	f1	785	175	133
	916	68	21	n1	871	112	64		901	104	57		781	169	128
n1	856	101	55		926	76	29		935	90	41		766	182	138
	922	70	24	n2	925	74	28		924	91	43		813	160	113
n2	807	112	73	n3	932	65	16	m3	900	99	52		670	220	188
d1	947	64	16		921	70	21		924	92	45	f3	754	180	134
	959	53	5	d1	937	68	19		789	170	128		800	171	119
	967	55	7	d2	870	93	46	a2	734	191	154		756	190	139
	967	54	5	d3	940	71	21	my3	729	206	170	m1	818	163	107
								s1	704	227	189		763	211	151
f190	869	117	69	e291	774	129	86	o1	679	214	189		754	193	138
f2	912	100	48	e3	920	85	33	o3	758	223	167	m2	763	195	156
	918	85	32	f1	924	96	47	n3	740	177	129		813	166	123
m3	848	125	80		957	90	38	d1	809	150	101		807	166	124
	890	102	55		911	88	39	d3	776	165	117	m3	824	165	119

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
	809	168	124		924	88	33	n3	925	82	32	j3	800	139	98
	748	198	160	f1	916	95	47	d2	931	76	26	jl2	683	150	135
	760	191	151		861	115	69		939	74	25		658	200	188
	783	179	135		900	111	61		900	86	38	jl3	681	200	182
	802	179	133		954	89	38		958	77	26		840	100	56
	730	209	172	f2	867	120	70					ag2	650	180	170
a1	797	171	126		916	106	51	e194	934	87	36	s1	607	177	180
j3	625	190	181	f3	887	115	62		928	81	31		653	180	170
	779	153	115		900	107	54		919	85	35	d1	911	82	35
	729	195	160	m1	850	134	80	f3	864	147	90	d3	845	88	46
jl1	723	215	175		817	148	95		873	99	49		864	86	42
s3	841	129	88		913	110	52		880	118	65		886	84	39
o1	763	185	148	m2	842	124	81		826	136	85		839	112	68
n1	868	112	66		832	148	103		909	134	75		874	93	48
n2	793	185	141		895	107	59	m1	936	94	39		894	93	47
	852	126	83		902	98	50		930	95	40		895	85	39
d2	893	99	50	m3	793	164	121	m2	925	123	72		912	78	31
d3	902	100	49		825	151	105		885	113	67				
				a1	846	132	86		899	109	62	e295	934	70	21
e193	876	112	62	a2	804	154	111	m3	921	99	51		826	118	73
	910	95	45	jl1	857	110	67		919	99	50		876	118	67
e3	904	97	43	ag3	861	127	80		886	134	83		933	84	33
	927	87	33	s2	857	117	74		865	125	78		940	79	28
	929	92	36	n2	887	128	81	my1	819	136	94	e3	917	101	49

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
	908	107	55		873	106	60		947	85	36	my3	862	101	56
f1	917	73	26		869	107	63	a1	927	94	46	jl1	843	134	87
	920	81	40	o1	805	181	138		875	111	65	s1	906	75	29
f2	706	50	19	d2	789	128	87	a3	886	116	68	d1	923	99	44
	929	85	36		890	99	52	jl2	754	101	58		864	100	50
f3	968	82	31	d3	864	87	44	ag1	829	153	107	d2	903	133	74
	999	67	16					o1	914	85	40		908	97	45
	958	110	56	e196	911	84	36	n2	929	69	27		920	80	29
	933	120	66		949	63	15	d2	938	66	18		935	76	28
	968	91	39		945	65	16		933	70	21		966	68	19
m1	918	89	36	e2	968	64	14					d3	907	91	41
	832	99	53		963	65	15	e197	944	110	53		842	113	66
	752	74	37		861	125	74		944	65	16		919	80	29
m3	969	92	43	f1	939	83	36	e2	941	73	23				
	968	96	46	f3	969	89	34		910	80	30	e298	927	90	36
	969	92	43	m1	908	124	67		924	87	34		947	69	17
a2	858	123	77		927	96	42		947	69	18	e3	929	79	28
a3	763	178	139		970	67	15	f1	940	116	67		914	86	34
my1	792	149	108	m2	952	80	33	m3	913	104	55		935	79	25
jl2	829	154	108		944	88	41		973	67	17	f1	915	95	47
	665	179	168		944	96	48	a1	843	174	122		934	72	24
jl3	842	112	69		955	92	43	a2	896	103	55	f2	944	82	32
ag2	873	123	75		945	92	44	my1	894	97	49		949	73	24
ag3	915	69	23	m3	925	95	48		823	126	83		841	111	59

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
f3	806	128	78	m1	954	85	30		953	63	13		835	145	96
m2	839	130	90		996	63	9		967	64	14	a2	887	116	67
	883	103	59	m2	944	92	43					my3	815	139	94
	949	84	37		914	111	65	e10	930	73	24	o2	921	72	22
	904	112	62		905	83	38	e2	930	81	29	n1	906	78	31
	829	143	97		916	86	39	e3	943	75	23		934	72	24
m3	906	99	49	m3	939	113	64		938	75	23		948	65	17
	903	95	45		942	78	29		817	124	74	n3	845	119	75
a1	806	149	104	a1	945	79	30		908	91	38	d1	927	64	15
	821	145	101		881	120	72		879	113	58	d3	936	67	18
	855	127	80		871	147	94		946	79	25				
a2	918	84	35	a3	866	134	84		958	74	20	e11	757	155	109
	895	104	54	j1	895	83	37	f1	819	161	113		888	131	74
my2	746	184	146	ag3	842	131	84		942	89	38	e2	934	72	21
jl1	820	132	89	o3	933	66	17	f2	889	121	68		920	99	44
ag1	704	151	148	n2	906	87	42		894	117	63		936	78	25
	875	100	51		899	88	44	f3	809	119	74	e3	954	89	33
	873	81	35	n3	862	96	46		954	80	27		956	66	13
					862	112	60		908	114	58		916	80	27
e199	847	110	61		893	103	51		880	111	57		895	110	51
e2	876	89	40	d1	932	72	22	m2	842	148	101	m1	948	84	30
	919	120	60		946	73	22		912	95	47		948	85	30
f2	948	74	23		914	71	22	a1	836	169	118		961	79	24
f3	937	81	29	d3	952	66	16		868	143	94		963	77	22

continuación

mes	G	D	$\beta$												
m2	892	107	60	s1	922	76	29						850	129	74
m3	939	68	20	s2	891	101	53	e12	828	92	47	m2	912	98	49
	964	79	32	o1	892	89	44		934	70	19	m3	896	115	66
	948	88	41		855	115	73	e2	848	151	93		886	117	67
my1	830	126	82	n2	930	67	20		866	147	87	a1	920	94	44
	737	189	151	n3	929	68	17	e3	904	114	56		851	155	103
	749	174	136		951	61	10		861	132	74	my1	885	111	61
my3	877	103	57		890	123	66		925	81	26		910	90	41
j3	849	120	75	d1	942	66	15	f1	841	128	79	j1	854	120	73
j12	813	131	88		959	71	19	f3	933	97	40	j2	874	108	61
j13	792	149	107	d2	882	130	74	m1	911	113	55				

Tabla XIV. Datos totales de radiación y turbiedad para las 1:30 P.M.

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
e283	800	125	78	a2	795	135	93	d3	820	114	72	my3	858	130	88
	810	120	73		754	164	125		865	88	44	ag2	867	103	56
	822	117	68		707	183	151						867	87	42
e3	778	137	90		730	167	132	e184	873	79	34		846	114	69
	779	146	93	my1	653	218	192		828	96	53	s1	775	165	122
f1	777	148	106		674	195	168		894	82	34	s2	861	94	52
	852	116	68	j1	746	170	132		850	96	50		640	216	196
	832	127	78	j2	759	83	44	f2	898	87	36	o1	870	99	61
f2	817	122	74	jl1	630	176	183	f3	846	111	61		882	83	45
	779	151	103		713	185	162	m1	788	120	83	n1	802	116	84
f3	756	158	111	s1	781	172	127		852	104	61		811	91	59
m1	825	123	82		708	187	153		848	110	67		899	69	29
	827	131	89		682	192	164		896	92	45	n2	876	80	42
	838	127	84	s3	740	164	133	m3	855	108	62	n3	886	80	37
	825	131	88		779	127	95		731	174	139	d1	862	92	50
	691	204	171	o2	860	97	60	a1	889	91	44		820	95	56
	787	153	112	o3	732	188	151		778	144	103		890	73	30
m2	775	159	118	n1	854	86	48		676	190	161	d3	893	82	37
	828	122	79		860	79	40		859	101	56				
	779	158	117		832	95	59		898	89	42	e185	826	120	74
m3	874	110	63	n2	639	181	174	a3	837	115	71		933	59	12
	778	163	120	n3	793	135	93		767	140	101	e2	889	81	34
	731	171	135		810	107	67		695	194	161		888	88	39
a1	800	158	119	d2	730	137	104	my1	729	165	131		841	121	69

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
	885	119	63	o2	824	116	84		835	117	67	my1	635	206	187
e3	866	90	41	n1	715	169	144		865	110	54	my2	683	206	184
	912	77	25	n2	833	73	34		885	100	41		798	126	86
f1	902	93	45	d1	804	117	78	m1	869	109	66		717	150	120
f2	819	112	65	d2	910	76	31		921	80	34		820	123	78
f3	896	93	40	d3	910	73	28		926	80	44	ag3	662	207	174
m1	896	103	55						908	84	38		681	227	191
m2	871	102	57	e186	800	120	76		897	99	53		755	196	150
	893	101	53		937	73	26		929	80	33		744	121	88
m3	886	94	48	e2	956	102	58		859	130	82	s1	826	100	59
	904	89	42		943	59	12	m2	890	86	41	s3	837	93	55
a2	773	161	120		754	116	84		703	221	182		723	177	154
my1	742	150	117		923	70	23		840	156	105	o2	798	120	93
	793	131	95		910	79	32	m3	848	97	54	n3	775	121	83
	711	162	134	e3	913	73	22		863	122	75		885	71	28
	834	97	57		925	76	24		838	106	63	d1	890	79	35
my2	851	125	80		921	72	20	a1	854	104	60	d2	864	80	38
jl2	788	133	91	f1	921	82	33		785	143	104		908	81	35
ag2	823	100	58		899	86	38		770	143	106	d3	891	76	32
	748	158	119		866	96	49		843	120	75		775	116	78
	882	81	35		934	82	32	a2	827	118	75		902	76	30
ag3	740	141	107		871	128	75		819	121	78		913	70	24
s2	841	99	58	f2	828	125	77		805	130	88		865	91	46
o1	877	89	51	f3	869	101	51		785	138	98		882	78	33

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
e187	913	69	23		786	139	98		851	82	42		696	213	184
	916	74	27	a1	857	101	57		841	92	51	a3	849	110	62
	952	63	15	a2	707	181	148		823	112	69		883	93	44
e3	847	99	50	my3	792	91	55		710	176	134	my1	808	126	81
	908	77	27	jl3	840	107	63	d3	910	87	36		827	120	74
	919	77	26	ag1	876	93	47					my2	720	196	155
	900	78	27	s2	854	101	58	e388	932	71	20	j2	671	141	122
	898	83	31		723	148	120		932	71	20		845	100	55
f1	912	74	26	s3	817	142	101	f1	912	81	32	jl3	840	107	63
	931	72	23		860	94	55	f2	896	92	42		755	154	113
	905	81	32	o2	780	119	91	f3	876	121	67		645	177	156
f2	897	84	36		805	118	88		944	75	22		760	105	63
	909	79	31		878	77	41		938	76	23	ag3	847	109	64
f3	889	87	36		871	73	37	m1	920	86	40	o1	713	146	123
m1	863	106	62	o3	884	104	53		915	93	46		713	146	123
	860	98	55		854	93	53		893	85	39	o2	627	230	219
m2	866	111	66		882	75	34		795	145	103	n1	725	124	91
	928	76	29	n1	797	111	78	m2	882	101	54		583	188	182
	910	85	38		886	69	29		920	76	29		921	67	21
m3	846	113	69		902	63	22		841	137	90		670	127	107
	791	149	107	n2	888	79	40	m3	794	136	92	n2	903	79	34
	835	118	74	n3	816	81	42	a1	834	130	82		805	103	66
	840	119	74	d1	814	114	74	a2	785	150	106	d1	697	133	102
	732	172	137	d2	872	83	41		838	114	67		901	165	98

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
d2	925	74	25		908	99	50						852	79	33
	857	100	57	m3	904	88	39	f190	869	106	58		922	64	17
	880	77	34		904	88	39	f2	907	88	38	d2	737	118	80
d3	836	95	54		822	138	90	m1	904	83	37	d3	902	72	24
	599	169	156	a2	885	96	47	m2	830	121	76				
				a3	862	105	57	m3	829	114	69	e291	837	122	71
e189	830	106	61		794	134	89		862	105	57		848	103	53
	890	89	39		836	113	66		787	146	101	e3	920	85	27
	807	125	76		874	95	47	a1	796	183	130	f1	925	86	31
e2	810	158	99		841	106	59		795	145	101		945	72	23
f2	895	88	38	j3	737	139	103		897	94	45		898	93	44
f3	944	74	23	jl3	794	149	102	a2	914	85	35	f2	905	85	37
	882	93	43	s2	902	72	26	j1	718	204	160		924	77	28
	923	74	23		894	78	31	jl3	772	149	105		920	86	36
	964	60	9	o1	686	149	125	ag1	833	92	47		924	82	32
	938	77	25	o2	830	122	83	s3	695	186	154	m1	896	94	49
	912	84	32		876	79	38		789	158	117		877	104	59
m1	886	96	50		927	60	12	o3	873	92	45		940	78	31
	930	73	26		905	70	23		894	74	27		920	83	36
	930	75	27	n1	822	98	57	n1	886	85	38	m2	932	76	29
	902	96	48	n3	954	58	10		908	74	28		904	84	37
m2	913	93	44		936	53	6	n2	868	88	45		889	95	48
	931	83	34		951	52	5		826	111	70		901	96	48
	928	86	37		946	53	6	n3	917	62	14		873	97	51

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
m3	890	92	45		742	169	128	n2	764	136	100		887	96	47
	907	85	38		771	160	116		768	116	82	m3	803	152	104
	782	152	109		672	210	174	n3	803	160	106		821	147	97
a2	741	169	128	f3	770	168	118	d2	830	109	63	a1	877	120	68
my3	791	131	89		784	162	111		881	97	49	a2	744	192	147
j1	736	137	101	m1	791	158	117	d3	851	104	57	my3	685	196	180
s1	711	211	166		811	155	111					j1	830	128	77
	713	203	160		743	183	146	e393	869	104	50		817	127	76
	685	221	185		787	165	122		912	84	31	ag3	758	143	104
o1	715	198	161	m2	708	204	169		897	93	38		769	151	109
o2	703	138	102		776	164	123		911	85	31	s2	817	152	107
n3	717	173	127		776	163	122	f1	900	93	45	o3	759	139	101
d1	773	144	99	m3	814	153	106		780	143	100	n2	823	118	79
d3	746	158	114		753	173	133		894	101	51	n3	913	74	26
					733	185	146		912	93	42		877	81	35
e192	732	164	121		735	183	144	f2	834	118	70	d2	911	75	26
	734	163	120		778	170	125		873	110	56		890	83	36
	765	151	105	a1	657	220	192	f3	894	106	64		901	80	32
	766	159	112		756	176	132		874	106	54				
e2	674	200	156	j3	753	156	117	m1	802	139	99	e194	858	87	37
e3	690	183	139	s1	771	204	149		786	141	87		916	77	28
	743	164	115	o3	810	143	95		874	113	65		886	85	37
	751	165	112	n1	733	165	126	m2	831	126	80	e2	855	142	90
f1	751	173	133		811	134	90		858	109	62	f3	860	112	60

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
	899	97	44		837	82	41		898	120	68	e2	940	66	19
	889	103	50	d3	856	65	23		996	100	43		917	68	21
	877	112	58		843	78	36	m1	901	89	43	f1	834	100	62
	864	105	53		845	79	37		865	95	52	f3	942	85	31
m1	925	89	41		805	100	61		689	74	50		887	128	70
	911	97	49		845	82	40	m3	983	97	44	m1	894	105	59
m2	860	118	71		863	75	32	a2	847	117	69		879	103	58
	866	109	62		851	84	41	a3	656	183	163		938	72	25
	858	116	69		875	75	31		723	183	144	m2	915	89	42
m3	887	102	54					my1	811	140	92		936	84	36
	900	97	48	e295	900	73	26	my2	694	174	141		878	113	67
	836	103	58		770	121	82	jl2	849	140	91		947	87	38
	845	120	72		847	124	74		753	132	99		917	93	45
a2	849	126	76		899	80	32	ag2	865	127	76	m3	875	103	57
my1	746	150	113		891	84	36	ag3	908	66	19		934	80	32
j2	741	164	126	e3	942	75	25	s2	818	146	98	a1	910	89	41
jl3	648	175	159		922	77	28		865	92	47		897	96	48
	855	150	111	f1	902	73	26	o1	894	96	50	a3	858	103	57
s3	654	250	218		899	82	35	d2	822	108	67		842	116	70
o1	675	163	153	f2	715	77	48		864	75	33	my3	804	130	86
o2	636	247	236		822	65	25	d3	919	65	20	j3	812	158	108
	643	212	204	f3	834	130	84					jl1	824	92	50
	684	205	187		960	74	24	e196	887	79	35	s1	857	100	52
d1	669	122	101		978	140	75		919	64	11	o1	867	89	45

continuación

mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$	mes	G	D	$\beta$
n2	879	74	34		937	77	28						848	133	77
d2	899	71	24	d3	880	90	41	e299	911	77	27	d1	895	74	26
	880	79	32		853	95	48	f2	935	71	20		918	75	25
					901	80	29	f3	931	78	26		888	77	29
e197	925	76	26					m1	943	77	29	d2	736	132	94
	916	78	28	e298	931	79	26		955	68	20	d3	741	106	70
e2	936	66	16		899	68	18	m2	937	80	31		935	63	15
	926	68	19	e3	907	77	26		913	120	69		947	57	9
	905	87	35		893	87	35		934	74	25		962	57	8
	924	68	18		934	72	19		933	73	24				
m3	930	83	32	f1	909	88	39	m3	937	107	56	e10	868	82	35
	962	66	15		948	63	14		927	76	26	e2	885	89	39
a1	828	146	96	f2	932	77	26	a1	907	90	40		859	102	52
a2	870	107	57		932	71	21		923	84	34	e3	920	72	22
my1	870	103	53	m2	872	121	74		861	123	73		926	73	22
	859	106	57		929	99	50	a3	843	134	82		858	112	58
my3	818	114	68		887	107	55		830	133	82		891	86	34
s1	919	61	13		863	111	61	j1	902	70	23		883	100	46
n1	679	168	138	a1	812	137	89	ag3	840	100	54		930	75	22
d1	848	98	48		829	124	74	o1	749	163	127		940	68	16
d2	547	91	40	a2	881	97	45	o3	910	69	34	f1	863	81	37
	882	96	44		877	103	50	n2	899	81	36		901	87	39
	896	81	31	ag3	861	98	50		899	83	38	f2	898	111	57
	990	87	33		936	64	15	n3	878	87	37		885	118	63

continuación

mes	G	D	$\beta$												
f3	938	97	44	d3	930	61	13		806	129	84	e2	916	89	34
	863	111	58					my3	848	114	66		924	78	24
	934	91	35	e11	837	111	61	j12	844	99	52	e3	899	95	40
m2	838	109	64		931	70	20	s1	924	55	8		833	98	46
	891	97	50	e2	908	85	33	s2	856	103	55	f3	869	100	44
m3	854	128	78		907	89	36	o1	965	106	59	m1	855	130	80
a1	860	118	68		920	70	19		838	103	59		878	118	67
	832	152	102	e3	934	80	26	n2	875	81	34	m2	883	112	54
	818	139	89		892	75	24	n3	919	70	18		846	132	81
a2	821	125	78		865	79	30		923	70	18	m3	898	102	51
my3	798	133	87	m1	939	79	31		874	92	41		923	85	32
s3	911	69	25		944	77	28	d1	930	63	13	a1	860	104	53
n1	922	73	24		939	79	31		937	74	22		858	110	57
	932	67	19		920	84	36	d2	869	106	54		894	94	44
	942	57	10	m3	945	79	31					my1	865	128	74
n3	887	84	33	a1	897	87	37	e12	754	111	68		887	91	40
d1	907	64	16	a2	808	128	81		903	72	21	j1	770	180	128

## CONCLUSIONES

1. El resultado de la medición directa de la turbidatión atmosférica con el piroheliometro de Ångström fue muy difícil de obtener, pues por varias semanas del mes de julio de 2,002 solo pudo coincidir la labor de medición con 27 minutos de sol directo sin nubes.
2. Una vez completada la medición, el capítulo 2 concluye que los resultados caen dentro del rango para el coeficiente de turbidatión atmosférica  $\beta$  de 0.06 a 0.1, mientras que el cálculo del coeficiente  $\beta$  con la radiación medida y la ayuda del nomograma de la figura 2, con  $I_H = 727 \text{ Watt/m}^2$ ,  $D = 183 \text{ Watt/m}^2$  y  $m = 1.1$ , arroja un coeficiente de turbidatión  $\beta = 0.125$  y una incertidumbre aproximada a las incertidumbres de la figura 8.
3. La turbidatión atmosférica calculada de los datos solares presenta variaciones que la validan por acontecimientos de orden natural, como es el caso de las erupciones volcánicas y la fuerza natural de los vientos en la dimensión de un huracán.
4. El coeficiente de correlación múltiple para la turbidatión como variable dependiente y la razón de radiación entre la difusa y directa y el camino óptico como variables dependientes es  $R = 0.918996302$  y el  $R^2 = 0.844554203$ .
5. Los aerosoles de origen antropogénico como el humo de los carros y las fábricas no tienen la capacidad suficiente como para evidenciar cambios en la atmósfera de Managua que afecten la turbidatión, pues fuera de los cambios estacionales y las variaciones mencionadas, el coeficiente  $\beta$  tiene tendencia al descenso.
6. La mejor época para realizar un estudio de turbidatión es durante los meses de noviembre a marzo, cuando las variaciones por interferencia de las nubes son mínimas, y el bimestre óptimo es diciembre y enero puesto que el promedio de desviaciones durante los 20 años que duró el estudio fue de  $\beta = 0.005$ . Además es en esos

meses cuando segun la prueba estadística t de Student, un 33% de las mediciones corresponden a la turbididad atmosférica del lugar en esos meses.

7. INSIVUMEH no tiene record de radiación difusa ni radiación directa, por lo que no es posible realizar estudios de turbididad mediante este método, hasta ahora, en Guatemala.

## RECOMENDACIONES

1. Que se comiencen a realizar mediciones de radiación difusa en donde ya se realizan mediciones de radiación Global.
2. Que se de seguimiento a la propuesta de medir la turbididad atmosférica en Guatemala a entidades públicas y privadas.
3. Que se realicen correlaciones entre variables atmosféricas medidas y digitadas en Nicaragua con la turbididad atmosférica calculada en el presente trabajo.



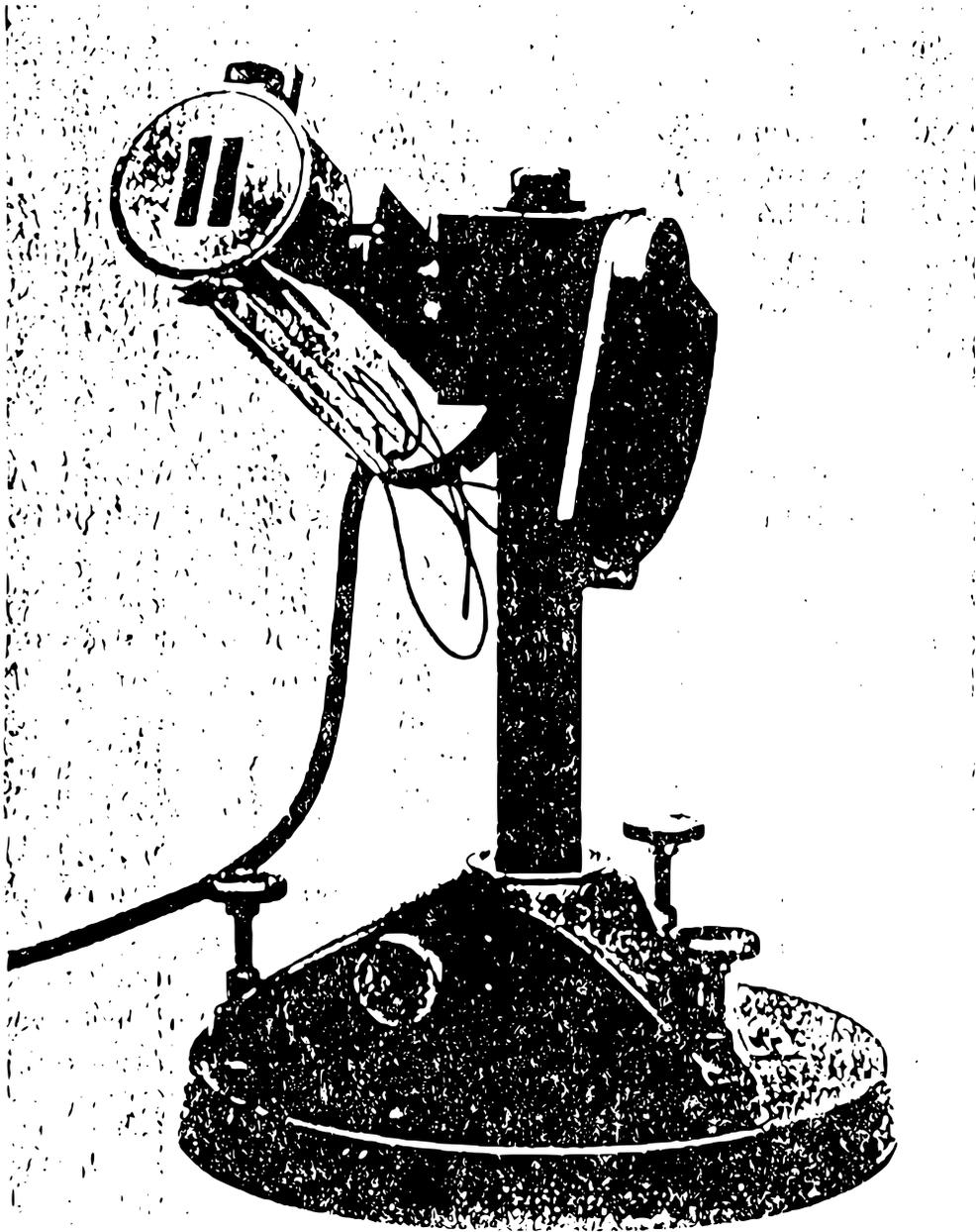
## BIBLIOGRAFÍA

1. Fermi, Enrico. **Thermodynamics**. Estados Unidos sdb.
2. Feynman, Richard. **The Feynman Lectures on Physics, Part I**. Estados Unidos Ed. Addison Wesley,1963.
3. Iqbal, Med. **An Introduction to Solar Radiation**. Canadá Ed. Academic Press,1983.
4. Leckner, B. "The spectral distribution of solar radiation at the earth surface - elements of a model." **Solar Energy**, Estados Unidos: **20**(2). 1978.
5. Rangarajan S. & Mani A. "A new method for the determination of atmospheric turbidity" **Tellus**, India: 36B. 1984.
6. Zemansky, Mark. **Calor y Termodinámica**. Estados Unidos Ed. Mcgraw-hill,1968.



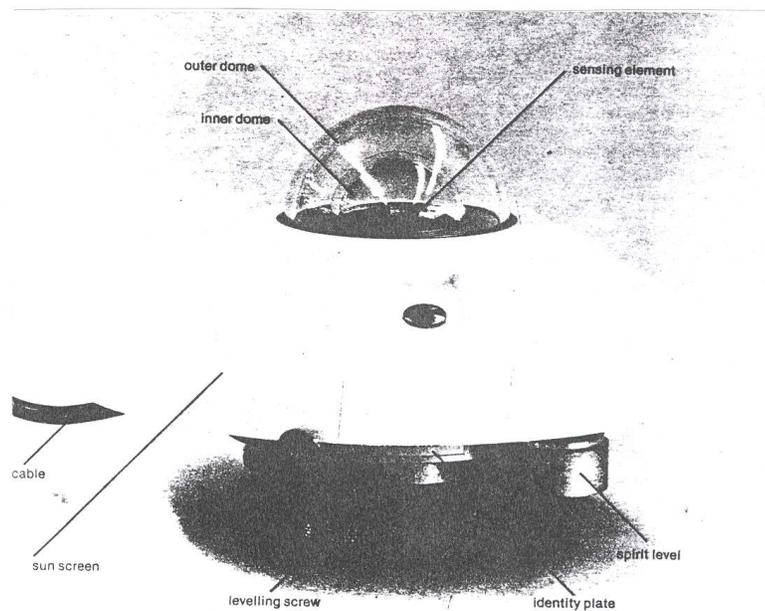
## ANEXO

**Figura 10. Pirheliómetro de Angstrom**  
Tomado de Rhode, Bertil "The Angstrom Compensation Pyrheliometer Instruction

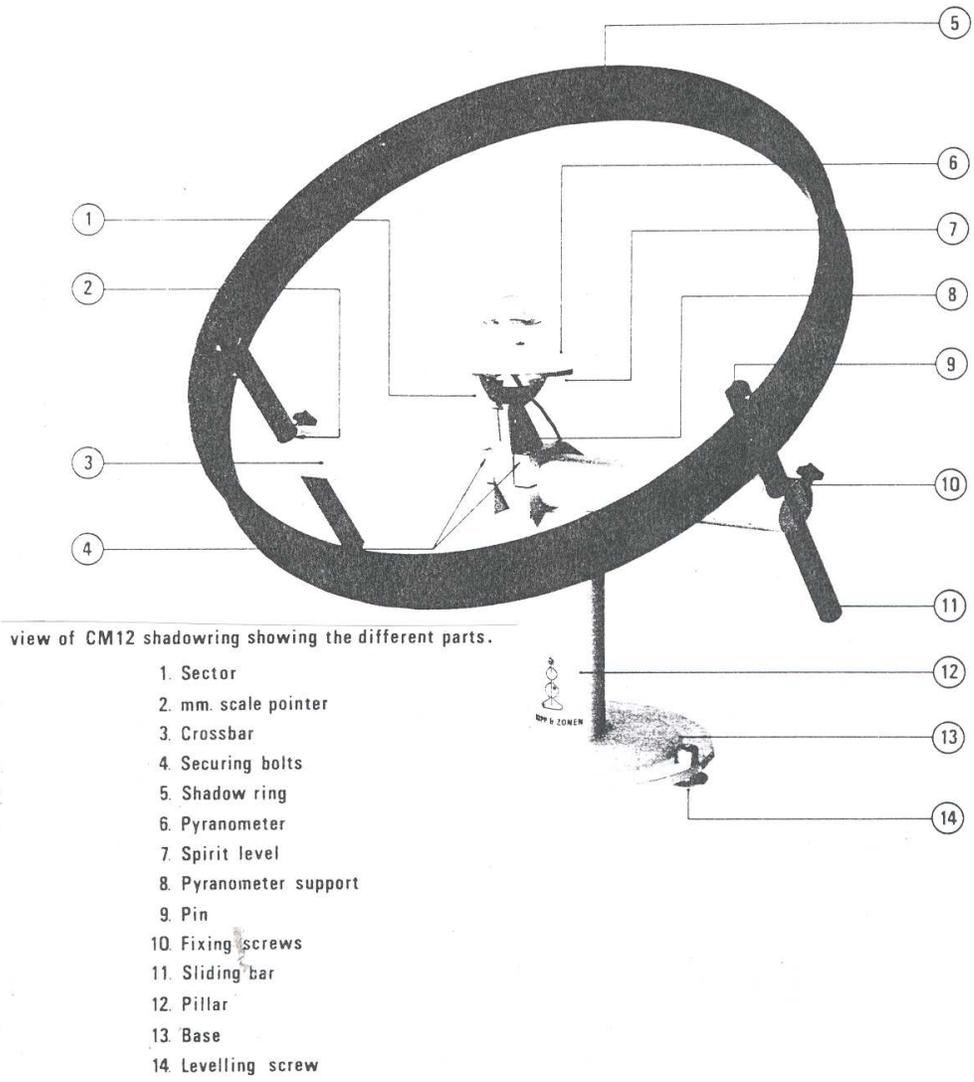


Manual”

**Figura 11. Piranometro**  
Tomado de Kipp and Zonen CM11 Instruction Manual



**Figura 12. Anillo de Sombra**  
 Tomado de Kipp and Zonen CM12 Instruction Manual





# QUOTATION

**Kipp & Zonen**  
 125 Wilbur Place  
 Bohemia, NY 11716  
 USA  
 P: +1(631) 589-2065 x 38  
 F: +1(631) 589-2068  
 E-mail: robert.dolce@kippzonen.com

<b>Customer:</b>  Freddy Rodriguez Santa Ana Sugar Holdings Guatemala E-mail: frodriguez@santaana.com.gt	<b>Date:</b> 05-12-05	<b>Quotation No:</b> 50512RD4	<b>Valid Until:</b> 60 Days
	<b>Currency:</b> US \$	<b>Delivery Terms:</b> F.O.B. Bohemia, NY	<b>Delivery Date:</b> 8 - 10 Weeks
	<b>Payment Terms:</b> Bank wire transfer, or Visa / MC	<b>Warranty:</b> Two years parts and labor.	
	<b>Customer Reference:</b>	<b>Notes:</b>	

ITEM	PART NO.	QTY	PRODUCT DESCRIPTION	UNIT COST	COST EXT
1	1305952-002	1	<b>CM11 Pyranometer (ISO Secondary Standard)</b> Double glass domes. Integrated levelling. Sun shield. Spectral range 310-2800 nm (50% points), response time < 12 sec (95%), non-linearity < 0.6% (0 - 1000 W/m <sup>2</sup> ), directional error < 10 W/m <sup>2</sup> (80° at 1000 W/m <sup>2</sup> ), sensitivity 4-6 μV/W/m <sup>2</sup> (variation < 1% from -10°C to +40°C), operating temperature -40°C to +80°C. Thermopile detector. Detailed calibration certificate. Instructions.	\$2,235.00	\$2,235.00
<b>Total Cost (line item 1)</b>				<b>XXXXXXXX</b>	<b>\$2,235.00</b>

	<b>AUTHORIZING SIGNATURE:</b> <i>Robert S. Dolce</i>
--	---



# QUOTATION

**Kipp & Zonen**

125 Wilbur Place  
 Bohemia, NY 11716  
 USA  
 P: +1(631) 589-2065 x 38  
 F: +1(631) 589-2068  
 E-mail: robert.dolce@kippzonen.com

<b>Customer:</b>  Freddy Rodriguez Santa Ana Sugar Holdings Guatemala E-mail: frodriguez@santaana.com.gt	<b>Date:</b> 05-18-05	<b>Quotation No:</b> 50518RD2	<b>Valid Until:</b> 60 Days	
	<b>Currency:</b> US \$	<b>Delivery Terms:</b> F.O.B. Bohemia, NY	<b>Delivery Date:</b> 8 Weeks	
	<b>Payment Terms:</b> Bank wire transfer, or Visa / MC			<b>Warranty:</b> Two years parts and labor.
	<b>Customer Reference:</b>			<b>Notes:</b>

ITEM	PART NO.	QTY	PRODUCT DESCRIPTION	UNIT COST	COST EXT
1	1305952-002	1	<b>CM11 Pyranometer (ISO Secondary Standard)</b> Double glass domes. Integrated levelling. Sun shield. Spectral range 310-2800 nm (50% points), response time < 12 sec (95%), non-linearity < 0.6% (0 - 1000 W/m <sup>2</sup> ), directional error < 10 W/m <sup>2</sup> (80° at 1000 W/m <sup>2</sup> ), sensitivity 4-6 μV/W/m <sup>2</sup> (variation < 1% from -10°C to +40°C), operating temperature -40°C to +80°C. Thermopile detector. Detailed calibration certificate. Instructions.	\$2,235.00	\$2,235.00
2	0346900	1	<b>CM121B Shadow Ring</b>	\$2,360.00	\$2,360.00
<b>Total Cost (line item 1)</b>				XXXXXXXX	\$4,595.00

	<b>AUTHORIZING SIGNATURE:</b> Robert S. Dolce
--	--