

T 7/55



UNIVERSIDAD DE GRANADA  
Facultad de Ciencias  
Fecha 3-05-96  
ENTRADA N.º 905

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**DEPARTAMENTO DE FISICA APLICADA**

**CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE  
LA RADIACION DIFUSA DEL CIELO  
SOBRE SUPERFICIES CON  
CUALQUIER ORIENTACION  
E INCLINACION**

**TOMO I**

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA  
GRANADA  
N.º Documento 613656417  
N.º Copia 115729163

Memoria presentada por el Licenciado  
**D. Jerónimo Vida Manzano**, para optar  
al grado de Doctor en Ciencias.  
(Sección Físicas)

UNIVERSIDAD DE GRANADA  
26 MAR. 1996 Granada, 1996  
COMISION DE... FONDO

**CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE  
LA RADIACION DIFUSA DEL CIELO  
SOBRE SUPERFICIES CON  
CUALQUIER ORIENTACION E INCLINACION**

**TOMO I**

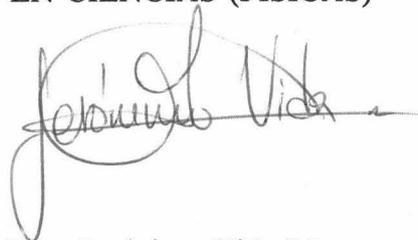
Visado en Granada, a 26 de Abril de 1996

**DIRECTOR DE LA MEMORIA**



Fdo: Lucas Alados Arboledas  
Profesor Titular de la  
Universidad de Granada

**Aspirante al GRADO de DOCTOR  
EN CIENCIAS (FISICAS)**



Fdo. Jerónimo Vida Manzano  
Profesor Asociado de la  
Universidad de Granada

*"Doy gracias a Dios por haberme dado vida  
y la fuerza necesaria para llegar al final de esta tesis,  
con la misma ilusión y fe que el día que la empecé.*

*Expreso mi más sincero agradecimiento  
a aquellas personas que me ayudaron,  
a mi familia*

*y por encima de todo,  
mi amor hacia la persona a la que debo este trabajo,  
mi mujer"*

*a Raquel*

INDICE DE CAPITULOS

<b><u>1. INTRODUCCION</u></b>	8
1. INTRODUCCIÓN .....	9
2. SISTEMA SOL-TIERRA .....	11
3. LA ATMOSFERA TERRESTRE .....	18
4. OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO .....	22
<b><u>2. FUNDAMENTO TEORICO. SCATTERING</u></b>	25
1. INTRODUCCIÓN .....	26
2. LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE RADIATIVO .....	28
2.1) Absorción y Scattering .....	28
2.2) Balance de Radiación en un Elemento de Volumen .....	32
2.3) Función Fuente de Scattering y de Emisión .....	34
2.4) Aproximación de la Ecuación de Transporte Radiativo ..	35
3. SCATTERING DEBIDO A MOLÉCULAS Y PARTÍCULAS .....	37
4. SCATTERING DE RAYLEIGH .....	40
4.1) Base Teórica .....	41
4.2) Radiación Natural .....	44
4.3) Radiación Linealmente Polarizada .....	45
4.4) Anisotropía Molecular .....	46
5. SCATTERING DE MIE .....	46
5.1) Base Teórica .....	47
5.2) Resultados. Scattering de Mie y Polarización .....	49
5.3) Radiación Natural y Linealmente Polarizada .....	51
6. RADIACIÓN REFLEJADA POR EL SUELO .....	52

<b><u>3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL</u></b>	<b>57</b>
1. INTRODUCCION . . . . .	58
2. DESCRIPCION TECNICA . . . . .	60
2.1) La Estación Móvil . . . . .	60
2.2) Instrumentos . . . . .	60
2.2.1) El Seguidor Solar . . . . .	61
2.2.2) El Radiómetro Absoluto . . . . .	62
2.2.3) El Espectrorradiómetro . . . . .	63
2.2.4) El Mastil Telescópico . . . . .	63
2.2.5) Piranómetros . . . . .	64
2.2.6) Fotómetros . . . . .	65
2.2.7) Parámetros Meteorológicos. Cámara fotográfica . . . . .	68
2.3) Calibrados . . . . .	68
2.4) Sistema de adquisición de datos. El ordenador . . . . .	71
3. EL PROGRAMA DE MEDIDAS . . . . .	72
3.1) Realización de las medidas . . . . .	72
3.1.1) Seguidor Solar . . . . .	72
3.1.2) Radiómetro absoluto . . . . .	73
3.1.3) Piranómetros . . . . .	73
3.1.4) Fotómetros . . . . .	74
3.1.5) Parámetros Meteorológicos. Cámara fotográfica . . . . .	75
3.2) Programa de transferencia . . . . .	75
4. INSTALACION Y OPERACION. CAMPAÑAS DE SABINAL Y VELETA . . . . .	75
<b><u>4. CAMPAÑAS DE SABINAL Y VELETA</u></b>	<b>77</b>
1. INTRODUCCION . . . . .	78
2. SELECCION DE LA BASE DE DATOS . . . . .	80
3. PARAMETROS METEOROLOGICOS. . . . .	86
Temperatura, Humedad y Presión	

4. VARIACION DIARIA DE LA IRRADIANCIA DIRECTA . . . . .	88
Medidas espectrales y no espectrales	
5. VARIACION DIARIA DE LAS CONDICIONES DE TURBIEDAD	94
Análisis de TL, Kt, Kd y K	
6. VARIACION DIARIA DE LA IRRADIANCIA GLOBAL . . . . .	95
7. ANALISIS DE LA DISTRIBUCION ANGULAR DE LA RADIANCIA E IRRADIANCIA DEL CIELO . . . . .	96
7.1) Irradiancia Global . . . . .	96
7.2) Radiancia del Cielo . . . . .	97
8. RADIANCIA DEL CIELO. ASPECTOS ESTADISTICOS . . . . .	98
8.1) Distribución Log-Normal de la radiancia del cielo . . . . .	101
8.2) Radiancia del cielo en Sabinal . . . . .	103
8.3) Radiancia del cielo en Veleta . . . . .	104
9. ANALISIS GRAFICO DE LA RADIANCIA DEL CIELO: DIFERENCIAS ENTRE SABINAL Y VELETA . . . . .	105
9.1) Análisis Global . . . . .	105
9.2) Almucántar Solar y Plano Solar . . . . .	107
9.3) Radiancia en función de la Elevación . . . . .	108
9.4) Radiancia en función de la Altura Solar . . . . .	109
10. RADIANCIA EN EL CENIT Aspectos estadísticos y análisis gráfico . . . . .	111
11. RADIANCIA CIRCUNSOLAR Aspectos estadísticos y análisis gráfico . . . . .	118
12. ANALISIS EN FRECUENCIAS DE LA BASE DE DATOS . . . . .	124
<b><u>5. RADIANCIA EN EL HORIZONTE</u></b>	<b>126</b>
1. INTRODUCCION . . . . .	127
2. SELECCION DE LOS DATOS. ANALISIS ESTADISTICO . . . . .	130
2.1) Selección previa . . . . .	130
2.2) Selección definitiva . . . . .	135

3. ESTABLECIMIENTO DEL HORIZONTE BRILLANTE . . . . .	137
3.1) Horizonte Brillante . . . . .	137
3.2) Determinación del Horizonte Brillante en Sabinal y Veleta . . . . .	138
4. DEPENDENCIA ACIMUTAL Y CON EL GRADO DE TURBIEDAD DE LA RADIANCIA EN EL HORIZONTE . . . . .	143
4.1) Elevaciones solares altas . . . . .	144
4.2) Elevaciones solares bajas . . . . .	145
<b><u>6. MODELOS DE RADIANCIA DEL CIELO</u></b> . . . . .	149
1. INTRODUCCION . . . . .	150
2. RELACION LUMINANCIA-RADIANCIA DEL CIELO . . . . .	153
3. OTRAS BASES DE DATOS SOBRE DISTRIBUCION ANGULAR DE LA RADIANCIA DEL CIELO . . . . .	157
4. MODELOS DE LA DISTRIBUCION ANGULAR DE LA RADIANCIA DEL CIELO . . . . .	163
4.1) Modelo Isótropo . . . . .	164
4.2) Modelo Heliocéntrico . . . . .	165
4.3) Modelo de Weller . . . . .	165
4.4) Modelo de Forgan . . . . .	166
4.5) Modelo Combinacional Fijo . . . . .	166
4.6) Modelo Combinacional Variable . . . . .	167
4.7) Modelo de Pokrowski . . . . .	168
4.8) Modelo de Dogniaux . . . . .	169
4.9) Modelo de Steven . . . . .	170
4.10) Modelo de Kittler . . . . .	171
4.11) Modelo de Gusev . . . . .	174
4.12) Modelo de Harrison & Coombes . . . . .	174
4.13) Modelo TCCD . . . . .	176
4.14) Modelo de Siala . . . . .	178
4.15) Modelo de la CEE . . . . .	180
4.16) Modelo de Valko . . . . .	182
4.17) Modelo de Brunger & Hooper . . . . .	186

4.18) Otros modelos . . . . .	188
4.18.1) Modelo de Liebelt . . . . .	189
4.18.2) Modelo de Gueymard . . . . .	191
4.18.3) Modelo de Perez . . . . .	193
4.18.4) Modelo de Perraudou . . . . .	196
5. PRUEBA DE LOS MODELOS. ANALISIS DE RESULTADOS . . . . .	198
5.1) Introducción . . . . .	198
5.2) Modelos que normalizan con respecto a Dh . . . . .	202
5.2.1) Modelo de Dogniaux . . . . .	203
5.2.2) Modelo de Steven . . . . .	207
5.2.3) Modelo de Valko . . . . .	210
5.2.4) Modelo TCCD . . . . .	215
5.2.5) Modelo de Harrison & Coombes . . . . .	219
5.2.6) Modelo de Brunger & Hooper . . . . .	223
5.3) Modelos que normalizan con respecto a Lz . . . . .	232
5.3.1) Modelo de Kittler . . . . .	232
5.3.2) Modelo de Gusev . . . . .	236
5.3.3) Modelo de la CEE . . . . .	239
5.4) Otras formulaciones . . . . .	245
5.4.1) Modelo de Siala . . . . .	245
6. RESUMEN DE RESULTADOS. COMPARACION . . . . .	250
<b><u>7. PROPUESTA DE UN MODELO UNIVERSAL</u></b>	
<b><u>DE RADIANCIA DEL CIELO</u></b>	258
1. INTRODUCCION . . . . .	259
2. CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO DE SIALA . . . . .	261
2.1) La función de fase de Henyey-Greenstein . . . . .	261
2.2) Aproximación de scattering simple en el modelo de Siala . . . . .	264
3. RECALIBRADO DEL MODELO DE SIALA . . . . .	264
3.1) Recalibrado para Sabinal . . . . .	266
3.2) Recalibrado para Veleta . . . . .	268

---

4. MODIFICACIONES PROPUESTAS AL MODELO DE SIALA .	270
4.1) Dependencia con el grado de turbiedad de la atmósfera .	270
4.2) Modificación Simple del Modelo de Siala . . . . .	272
4.3) Modificación General del Modelo de Siala . . . . .	275
5. PRUEBA DEL MODELO DE SIALA MODIFICADO . . . . .	279
5.1) Cálculo de las constantes $h_1$ y $h_2$ . . . . .	279
5.2) Comprobación del Modelo de Siala Modificado . . . . .	280
6. PROPUESTA DE UN MODELO UNIVERSAL - MURAC . . . . .	281
6.1) Dependencias de las nuevas constantes $h_1$ y $h_2$ . . . . .	281
6.2) Propuesta de MURAC. Comprobación . . . . .	283
<b><u>8. CONCLUSIONES</u></b>	288
<b><u>9. BIBLIOGRAFIA</u></b>	296
<b><u>NOMENCLATURA</u></b>	318

**1. INTRODUCCION**

1. INTRODUCCIÓN

2. SISTEMA SOL-TIERRA

3. LA ATMOSFERA TERRESTRE

4. OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO

## 1. INTRODUCCION

Estudiar la energía procedente del sol y todo lo relacionado con ella constituye una interesante tarea en la cual, si se quiere llegar a un objetivo determinado, es necesario *lidiar* con un elemento que, si bien no es hostil (todo lo contrario), resulta bastante complicado de entender, al menos en su totalidad: La Atmósfera. Es evidente que la vida en la Tierra no existiría si no fuera por la presencia de la atmósfera. Tan obvio es esta afirmación, que la historia de la Tierra se escribe identificada con la de la atmósfera y viceversa.

Durante las últimas décadas, ha aumentado considerablemente la necesidad y demanda de medidas detalladas y minuciosas de radiación solar directa y difusa, denominada radiación de onda corta ( $0.3 - 3.5\mu\text{m}$ ), así como también de radiación térmica atmosférica, también denominada radiación de onda larga ( $3.5 - 100\mu\text{m}$ ). Este aumento viene provocado tanto por la creciente demanda de información sobre radiación solar con vistas a su aprovechamiento energético, como por el

aumento de estudios teóricos de la radiación solar y su relación con los diversos parámetros atmosféricos, en especial estudios sobre el balance de radiación en la tierra y su posible alteración por contaminación atmosférica y cambios en el contenido de CO<sub>2</sub>.

Por otro lado, también se necesita información radiométrica sobre el cielo y nuestra atmósfera para estimar, por mencionar solo algunos ejemplos, índices de evaporación en superficies de agua, suelo y vegetación, para estudios de crecimiento agrícola, estudios de balance de calor para las distintas formas de vida animal y vegetal, en el estudio de atmósferas planetarias, tecnología de edificios, etc., por no dejar de mencionar la comprobación de los diversos tipos de modelos para la radiación atmosférica que se han venido proponiendo durante los últimos años.

Normalmente, el estudio experimental de los flujos radiativos sobre superficies con distintas orientaciones e inclinaciones implica una gran cantidad de complicaciones de tipo instrumental. Es este hecho el que ha condicionado que en el pasado, la mayoría de las estaciones de medida, no demasiado abundantes, emplearan instrumentación relativamente simple que, debido a esta circunstancia, posibilitaba solo la obtención de datos sobre radiación global de onda corta (directa y difusa) para todo el hemisferio superior, sobre superficie horizontal. Si analizamos la bibliografía, un número relativamente pequeño de estaciones de medida incluyen, además, datos sobre radiación de onda larga ó de radiación total (onda corta y larga), por no mencionar que es aún menor el número de estaciones que realizan medidas para superficies de cualquier inclinación y orientación.

No es ésta la situación en los aspectos teóricos del problema que sí han sido objeto de un gran número de estudios basados en cálculos de la irradiación a partir de datos de insolación (Page, 1961), o bien en integración de la ecuación

del transporte radiativo (Kondratyev et al., 1960; Dave, 1977, 1979), ó en modificaciones de tipo empírico o semiempírico de la hipótesis isótropa (Liu et al., 1960; Temps et al., 1977; Klutcher, 1979; Hay, 1979; Ma et al., 1983; Wilmott, 1982; Pérez et al, 1987). El denominador común es que siempre se observa un gran defecto de datos experimentales para todo el espectro en condiciones meteorológicas distintas.

Además hay que tener en cuenta que una gran parte de los datos recopilados cuando no se disponía de la tecnología adecuada, o en cualquier caso, de la que actualmente disponemos, son medidas realizadas en unidades fotométricas. Este hecho reduce su aplicabilidad general ya que actualmente la resolución de los problemas de tipo científico ó de ingeniería, requieren datos en unidades radiométricas.

Como tendremos ocasión de comentar, la razón de *luminancia a radiancia* puede variar hasta un factor de tres ó más simplemente de un punto del cielo a otro, incluso en términos relativos. Es por ello que gran parte de las bases de datos existentes tengan menos utilidad en virtud de los requerimientos actuales de información sobre radiación solar.

## 2. SISTEMA SOL-TIERRA

Sin pretender entrar en la teoría sobre la formación de los planetas, el sistema solar y las estrellas, se puede afirmar que la presencia de gases alrededor de un planeta depende de su masa por un lado y del peso molecular de los gases por otro. Por otro lado, si deseamos describir la interacción de la atmósfera terrestre con la radiación solar, necesitamos entender las particularidades de la actividad solar y la composición de esos gases que conforman la atmósfera.

La Tierra gira a una distancia media de  $1.496 \times 10^{11}$  m del Sol, cuyas características, sin pretender describir el sol como estrella, podemos resumir como sigue:

<i>formación:</i>	hace aproximadamente $4.6 \times 10^9$ años.
<i>diámetro:</i>	sobre $1.392 \times 10^9$ metros.
<i>masa:</i>	aproximadamente $1.99 \times 10^{35}$ Kilos.
<i>composición:</i>	Hidrógeno ( $\approx 75\%$ ), Helio ( $\approx 25\%$ ) y una pequeña cantidad de elementos más pesados como hierro, silicio, neón y carbón.
<i>temperatura:</i>	desde $5 \times 10^6$ K en su centro hasta unos 5770 K en su superficie, según los últimos datos (WMO, 1981), considerando que el sol radia como un cuerpo negro.
<i>energía radiada:</i>	según la Ley de Einstein, ( $E = mc^2$ ), sobre $5 \times 10^{12}$ gramos por segundo son radiados en forma de energía electromagnética.

Recientemente se ha podido constatar que el sol es una estrella casi invariable, cuya única variabilidad procede del hecho de que su diámetro, y por ello su brillo, cambian periódicamente. Sin embargo, se puede establecer como cierto que el cambio en el brillo total del sol no sobrepasa el 0.3 % en períodos de 2.5 minutos a 22 años, aunque no se han podido determinar las variaciones de brillo durante períodos más largos de tiempo, por la ausencia de observaciones de radiación solar suficientemente prolongadas en el tiempo. No obstante, esta variabilidad está más acusada en la zona espectral del ultravioleta, rayos X, ondas de radio y en el caso de radiación corpuscular, pero la energía de la radiación en estas zonas es pequeña en comparación con el flujo total.

El sol gira sobre su eje de una forma relativamente lenta, una vez cada 25 días. Por otro lado, la órbita de la Tierra alrededor del sol puede describirse mediante una trayectoria elíptica, situando al sol en uno de sus focos. La cantidad de radiación solar que llega a la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia al sol, por lo que una correcta determinación de la distancia media Tierra-Sol es, por ello, importante. La distancia media Tierra-Sol,  $r_0$ , se denomina *Unidad Astronómica* (AU) y viene expresada de forma precisa por:

$$1 \text{ AU} = (149\,597\,890 \pm 500) \text{ Kilómetros}$$

El valor mínimo es del orden de 0.983 AU y el máximo alcanza 1.017 AU, valores que corresponden, respectivamente, al perihelio, aproximadamente el 3 de Enero, y al afelio, aproximadamente el 4 de Julio. Por otro lado, la Tierra se sitúa a la distancia media de 1 AU sobre el 5 de Octubre y el 4 de Abril (equinoccios). La atracción de otros cuerpos celestes sobre la Tierra produce un movimiento de precesión sobre los equinoccios con una periodicidad de unos 21.000 años (figura 1).

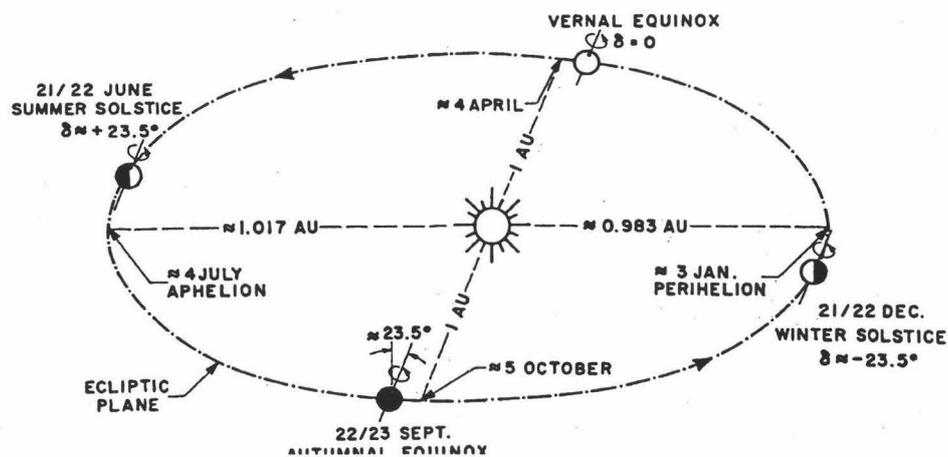


Figura 1: Movimiento de la Tierra alrededor del Sol (de Iqbal, 1983).

El plano de revolución de la Tierra alrededor del sol se denomina *eclíptica* y la Tierra gira sobre sí misma alrededor de un eje, el eje polar, el cual está inclinado aproximadamente  $23.5^\circ$  respecto a la normal al plano de la eclíptica (figura 1).

La distribución de la radiación electromagnética emitida por el sol que incide sobre el límite superior de la atmósfera, en función de la longitud de onda se denomina *espectro solar*, y la emisión que recibimos procede principalmente de la superficie solar (fotosfera). La figura 2 muestra la curva de distribución de irradiancia espectral obtenida en el límite superior de la atmósfera a partir de las medidas de Thekaekara (Thekaekara, 1976).

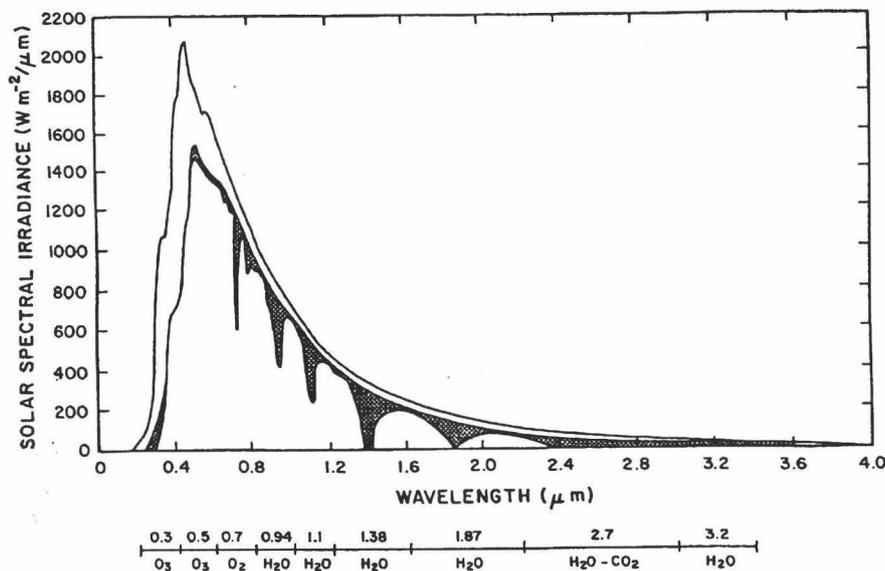


Figura 2: Espectro Solar (de Kou N. Liou, 1980)

Como puede apreciarse, cerca del 50 % de la energía emitida se distribuye en las longitudes de onda mayores que las de la región visible, 40 % en la zona visible ( $0.4 - 0.7 \mu\text{m}$ ) y un 10 % en longitudes de onda menores que las visibles.

La curva inferior corresponde a la irradiancia espectral observada a nivel del mar. Las zonas sombreadas representan la absorción debida a diferentes gases presentes en la atmósfera y la curva que las envuelve la reducción de irradiancia debida al *scattering* (capítulo 2).

Datos más recientes y detallados del espectro solar los podemos encontrar en el libro de Iqbal, (Iqbal, 1983), en forma de tabla de distribución de irradiancia espectral extraterrestre de 5 en 5 nm, adaptada de un trabajo de Fröhlich (Fröhlich et al., 1981a). Igualmente podemos encontrar en el texto de Lenoble (Lenoble, 1993), referencia a otro trabajo más reciente del mismo autor en donde encontramos esta misma distribución normalizada a la constante solar de 1367 W/m<sup>2</sup>. Aproximadamente el 8% de la radiación solar se distribuye en la zona UV, el 39% en el visible y el 53% en el IR próximo (Fröhlich et al., 1986).

La *constante solar*,  $I_{sc}$ , es el nombre dado a la cantidad total de energía solar, en todo el rango espectral, que llega al límite superior de la atmósfera. Se define como el flujo radiante (energía solar por unidad de tiempo) sobre una superficie de área unidad (un metro cuadrado) situada perpendicularmente al haz solar a la distancia media Tierra-Sol (1 AU). En realidad, la constancia de la *constante solar* es una buena cuestión. Medidas realizadas desde aviones a altas cotas, globos sonda, cohetes y satélites, permiten estimar el valor de  $I_{sc}$  con una precisión de hasta  $\pm 0.3\%$ . Es importante destacar que la determinación exacta de la *constante solar* ha sido uno de los desafíos más grandes de este siglo en radiometría y que, aunque se tenga actualmente un valor recomendado, el valor "final" de esta constante está aún por determinar.

Prueba del interés que suscita la determinación de  $I_{sc}$  puede darlo la siguiente tabla de Thekaekara, 1973, (Tabla 1), según se muestra en Iqbal, 1983, en la que se listan los valores de  $I_{sc}$  calculados por diferentes autores y de la que

se muestran datos más significativos. En ella se puede apreciar un mayor valor para los cálculos realizados desde tierra, los cuales pueden venir afectados de errores que se evitan mediante estimaciones realizadas a altas cotas de altura (atenuaciones por polvo, vapor de agua, incertidumbres en la composición de la atmósfera, etc...)

<b>Autor</b>	<b>Método</b>	<b>Valor (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Error (W/m<sup>2</sup>)</b>
<u>A partir de medidas realizadas a altas cotas</u>			
Murcray	Globo Epply NIP	1338	6
McNutt y Riley	NASA 711 Å 6618	1343	26
Duncan y Webb	NASA 711 Å 7635	1349	40
McNutt y Riley	NASA 711 Å, Hy-Cal	1352	22
Plamondon	Mariner	1353	20
Kondratyev et al.	Globo	1353	14
Krunker	NASA 711	1358	24
Laue y Drummond	X-15, NASA 711, B-57B	1360	13
Willson	Globo	1368	7
<u>De medidas realizadas en tierra y revisiones de valores anteriores</u>			
Stair y Ellis	Mauna Loa 0.31-0.53 $\mu$ m	1359	68
Labs y Neckel	Jungfrauoch 0.33-1.25 $\mu$ m	1365	27
Gast	Revisión	1390	-
Johnson	Mt. Lemmon, Smithsonian	1395	28
Makarova y Kharitonov	Revision	1418	35

**Tabla 1:** Evaluaciones más importantes de la Constante Solar.

Actualmente, la Organización Meteorológica Mundial (WMO), ha adoptado una nueva escala, denominada Referencia Mundial Radiométrica (WRR), como base común para todas las medidas meteorológicas. Usando esta nueva referencia, Fröhlich y otros investigadores, (Fröhlich et al, 1981a; Fröhlich et al, 1981b), examinaron ocho medidas de la constante solar realizadas desde 1969 hasta 1980 (Tabla 2).

Fecha	Plataforma (Instrumento) Referencia radiométrica	Valor (W/m <sup>2</sup> )
Agosto-1969	Globo (ACR III) / WRR	1369
Junio-1976	Cohete (ACR 402A) / ACR	1369
Noviembre-1978	Cohete (ACR 402A) / WRR	1365
Junio-1979	Globo (PMO 6-9) / WRR	1366
Mayo-1980	Cohete (ACR 402A) / WRR	1365
Junio-1980	Globo (PMO 6-9) / WRR	1367
Febrero/Julio-1980	Satélite (ACRIM A) /ACRIM	1367
	Media	1367
	Desviación Estándar	1.6

**Tabla 2:** Determinaciones revisadas de la Constante Solar desde 1969 hasta 1980.

Después de este estudio se recomendó, finalmente, el valor que hoy día es más aceptado y fiable:

$$I_{sc} = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$$

Si bien las medidas de  $I_{sc}$  y el estudio de su variabilidad continuará durante muchos años, no se esperan cambios significativos en su valor, pero probablemente sí en su distribución espectral, pues aún existen indeterminaciones asociadas con los datos espectrales (Lenoble, 1993).

### 3. LA ATMOSFERA TERRESTRE

Hasta ahora hemos hablado del sol, su actividad y someramente de la geometría Sol-Tierra. Necesariamente, hemos de describir a continuación lo que sucede desde el límite superior de la atmósfera hasta la superficie terrestre, es decir, tratar de entender como afecta la atmósfera a esta energía procedente del sol. Si observamos la segunda curva de la Figura 2, la distribución espectral de la irradiancia solar a nivel del mar pierde esa "distribución continua" para mostrar en esta ocasión huecos, (zonas sombreadas), que representan la absorción debida a los diferentes gases constituyentes de una atmósfera limpia. La cubierta exterior de las zonas sombreadas dan idea de la reducción de la irradiancia solar debido al *scattering* (ambos tipos de procesos, por su importancia dentro del contexto de este trabajo, serán descritos en profundidad más adelante).

Esta atenuación depende, parcialmente, de la distancia que se ha de recorrer dentro de la atmósfera y también en parte del estado de la masa de aire. Aunque la máxima radiación sobre la tierra se da bajo condiciones de cielo despejado, en ciertas condiciones típicas de cielo nuboso en las que el sol queda visible entre las nubes, se ha llegado a constatar que la radiación solar total supere los valores de un día totalmente despejado (Meinel et al, 1976). Incluso se han llegado a constatar variaciones locales e instantáneas, en las que se superaba la constante solar (Dalimin et al, 1987). Es decir, existe una gran variabilidad en la cantidad de energía solar que llega desde el tope de la atmósfera tras atravesar la cubierta atmosférica y alcanzar el nivel del mar, y esta variabilidad debemos entenderla en función de la interacción radiación-atmósfera, con todo lo que ello implica.

La atmósfera se compone, casi de forma permanente, de gases tales como Nitrógeno (78.084 % en volumen), Oxígeno (20.948 % en volumen), Argón

(0.934 % en volumen) y, en menor cantidad, dióxido de carbono, monóxido de carbono, neón, helio, krypton, xenón, hidrógeno, metano, óxido nítrico, etc.... Sin embargo, de extrema importancia son los gases tales como CO<sub>2</sub>, el vapor de agua, ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, etc., algunos de los cuales presentan una concentración variable, cuyas emisiones radiativas y procesos de absorción juegan un papel destacado en el clima de la Tierra.

Además, la atmósfera contiene también diversas partículas sólidas y líquidas en suspensión, tales como aerosoles, gotas de agua y cristales de hielo cuya concentración y distribución es altamente variable en el espacio y en el tiempo. Aunque existen otras divisiones, podemos considerar la atmósfera formada por cuatro capas:

**Troposfera** cuyo límite, la tropopausa, se sitúa a unos 10 Km.

**Estratosfera** cuyo límite, la estratopausa, se sitúa a unos 48 Km.

**Mesosfera** cuyo límite, la mesopausa, se sitúa sobre los 83 Km.

**Termosfera** cuyo límite, la termopausa, está situada a varios cientos de kilómetros de altura.

Puesto que partimos de medidas realizadas en tierra, solo son de interés para nuestro estudio las dos primeras capas, pues en ellas se concentran los constituyentes más variables y también, los que más afectan ó pueden afectar, a los resultados que obtengamos, es decir, **aerosoles, ozono y vapor de agua**, de cuyas características hablaremos a continuación:

El **ozono** procede de las reacciones:



que se producen bajo la acción de las radiaciones ultravioleta extremas (para  $\lambda < 0.24 \mu\text{m}$ ), así como por causa de las descargas eléctricas y la radiactividad. Absorbe toda la radiación de longitud de onda inferior a  $0.32 \mu\text{m}$  y se comporta así como una pantalla filtrante, dejando pasar aquellas radiaciones solares necesarias para perpetuar la vida, deteniendo las que ejercen una acción nociva sobre los microorganismos y los vegetales. Su concentración máxima se sitúa hacia los 22000 metros de altura (Lenoble, 1993).

El **vapor de agua** está concentrado especialmente en la proximidad del suelo. La capa de 0 a 5000 metros contiene el 95% del vapor de agua que existe en toda la atmósfera y la capa de 0 a 2000 metros contiene ya el 50%. Por encima de los 20 Km, el contenido del vapor de agua en el aire es extremadamente débil, aunque todavía existen nubes, pudiéndose admitir que su desaparición es total por encima de los 70 Km. Sus *bandas de absorción* en la zona del espectro solar, se encuentran centradas en longitudes de onda de:

0.94, 1.1, 1.38, 1.87, 2.7 y  $3.2 \mu\text{m}$

La absorción por otros gases, por ser bastante bien conocida, no la detallaremos en esta introducción. Mención significativa merecen las partículas de materia; **aerosoles**, tales como el polvo, hollín, gotas de agua ó cristales de hielo. Normalmente, a la hora de determinar la transmitancia de la atmósfera con respecto a la radiación solar, la atmósfera es dividida en tres grupos: *moléculas de aire seco, vapor de agua y aerosoles*.

La radiación solar que penetra en la atmósfera es atenuada por cada uno de estos grupos y de todos ellos, la composición y distribución más difícil de determinar es la de los aerosoles. Llevan el movimiento del aire dentro de ciertos límites. Obviamente, no consideramos aerosoles la lluvia, nieve y el granizo. Sin

embargo, las moléculas condensadas de vapor de agua que siguen el movimiento del aire sí se consideran aerosoles (Iqbal, 1983).

En contraste con las moléculas de gases atmosféricos permanentes, las partículas suspendidas en la atmósfera presentan una considerable diversidad en volumen, tamaño, distribución, forma y composición material. Estas partículas pueden ser de origen humano ó naturales pero, en cualquier caso, pueden ser *terrestres* (humos industriales, polen, resultado de fuegos, etc...) ó de *origen marino* (cristales de sal, spray oceánico ó núcleos de sales higroscópicas en las que el agua se concentra, por ejemplo). El agua suspendida y las partículas de hielo en la niebla y nubes están en el límite de lo que se puede considerar como partículas aerosoles.

Las partículas aerosoles varían en radio desde  $10^{-3}$  a  $10^2 \mu\text{m}$ , pudiendo clasificarlas como sigue:

Partículas muy pequeñas ( <i>partículas Aitken</i> )	de $10^{-3}$ a $10^{-1} \mu\text{m}$
Partículas grandes	de 0.1 a $1 \mu\text{m}$
Partículas gigantes	de 1 a $10^2 \mu\text{m}$
Gotas de lluvia	$\approx 10^3 \mu\text{m}$
Granizo	$\approx 10^4 \mu\text{m}$

A veces, la cantidad de aerosoles en la atmósfera se especifica en términos de *número de partículas por centímetro cúbico*. Aunque el número de partículas de polvo suele ser mayor sobre tierra que sobre agua, y mayor en las épocas secas, también suele ser más pequeño en las zonas frías polares y árticas y mayor en las zonas tropicales. Un resumen de las fuentes naturales y artificiales de emisión de partículas nos llevan a los valores de la Tabla 3, expresados en

megatoneladas. Todas estas estimaciones están extraídas de SMIC, 1971. La forma de interaccionar los aerosoles atmosféricos con la radiación solar es completamente diferente a como lo hacen los gases constituyentes atmosféricos. En el siguiente capítulo se describe de forma más detallada los fundamentos físicos relacionados con este fenómeno.

<b>Fuentes Naturales de emisión de partículas</b>	
Volcanes	25-150
Hidrocarburos de plantas	15-200
Sulfatos de H <sub>2</sub> S	130-200
Sales marinas	≈ 300
Nitratos de NO <sub>x</sub>	30-35
Fuegos forestales y agrícolas	3-150
<b>Fuentes humanas de emisión ó producción</b>	
Emisión directa de partículas	10-90
Partículas de Hidrocarburos	15-90
Sulfatos de SO <sub>2</sub>	130-200
Sales de amoníaco	80-270
Derrumbes y escombros	100-150

**Tabla 3:** Fuentes de emisión de partículas (MTm).

#### **4. OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO**

Hecha esta pequeña introducción sobre generalidades de nuestra atmósfera y el sistema Sol-Tierra, podemos establecer los **objetivos del presente estudio**: pretendemos caracterizar la atmósfera de alta montaña en contraste con una atmósfera a nivel del mar, centrándonos en el estudio de la distribución angular de la radiancia del cielo. Este estudio es fundamental para el conocimiento de la radiación difusa del cielo sobre superficies inclinadas. Para ello disponemos de los datos obtenidos de flujos radiativos sobre superficies de cualquier inclinación

y orientación obtenidos mediante un sistema móvil. Después de entrar en el detalle del fundamento teórico del trabajo que vamos a exponer, lo cual constituye el capítulo 2º de esta memoria, describimos en profundidad el Sistema Móvil empleado, sus instrumentos y el programa de medida en el capítulo 3º.

Mediante estas medidas, realizadas en el marco de una campaña común entre el Instituto Meteorológico Suizo (Dr. Peter Valko) y la Universidad de Granada (Grupo de Física de la Atmósfera), durante Mayo y Junio de 1988, procederemos a evaluar y a interpretar las diferencias entre ambas atmósferas mediante el estudio gráfico cualitativo, y en la medida de lo posible también cuantitativo, involucrando todos los componentes de la radiación solar. Como se ha dicho, más adelante centraremos nuestro estudio en la **distribución angular de la radiancia del cielo** bajo condición de cubierta nubosa cero, esto es, cielos totalmente despejados. Por el interés de las medidas realizadas y por su aplicabilidad en estudios de múltiple naturaleza, en el capítulo 4º realizaremos una profunda comparación de los datos obtenidos en Sabinal y en Veleta.

En el capítulo 5º estudiamos en detalle la radiancia del horizonte, abarcando el cinturón que comprende los primeros 20 grados de elevación. En virtud de una mejora en el programa de medida que enriquece el número de datos en esta zona, disponemos de una gran cantidad de datos que nos permitirá extraer interesantes resultados sobre el llamado *horizonte brillante*

En el capítulo 6º buscamos diferencias y semejanzas entre distribuciones de luminancia y radiancia y realizamos un estudio detallado de los modelos teóricos y empíricos más recientes para la distribución angular de la radiancia del cielo, incluyendo el modelo actualmente adoptado por la Comunidad Económica Europea en el diseño de sus Atlas de Radiación. Este estudio nos permitirá encontrar la mejor formulación teniendo en cuenta los resultados del análisis de

nuestros datos llevado a cabo en el capítulo cuarto. La riqueza de resultados experimentales en este sentido, nos permitirá abordar con éxito el **objetivo final** de este trabajo, que no es otro que la **búsqueda de un modelo propio para la radiancia del cielo despejado**.

Efectivamente, en el capítulo 7º exponemos nuestra propuesta sobre un Modelo Universal para la radiancia del cielo, y que hemos *bautizado* como **MURAC** . A partir de los resultados experimentales, de nuestros estudios anteriores y de la comprobación de las propuestas de otros autores, manifestamos nuestros resultados en la forma de un modelo propio, con carácter de universal, por su no dependencia del lugar de aplicación (en este caso Sabinal y Veleta) y por la no dependencia local (Sabinal y Veleta) de las constantes involucradas.

Las conclusiones de este trabajo, en el capítulo 8º, resume los resultados obtenidos a partir de una campaña de medidas, interesante por el alto contenido tecnológico del material empleado en su desarrollo así como por su originalidad en nuestro país en lo que al empleo de sistemas móviles se refiere. La abundancia de datos obtenidos y los contactos establecidos con otros investigadores a raíz de este estudio, permite igualmente anunciar el trabajo en el futuro más inmediato.

La comprobación de la *universalidad* de MURAC, mediante el empleo de una base de datos distinta a la nuestra y la relación con su autor (Dr. Brunger), así como el análisis de la radiancia para el hemisferio inferior (datos muy interesantes y escasos), es decir, la radiancia procedente del suelo y todo lo relacionado con la radiación solar reflejada, constituye la continuación de lo que hemos realizado y ahora presentamos.

## 2. FUNDAMENTO TEORICO. SCATTERING

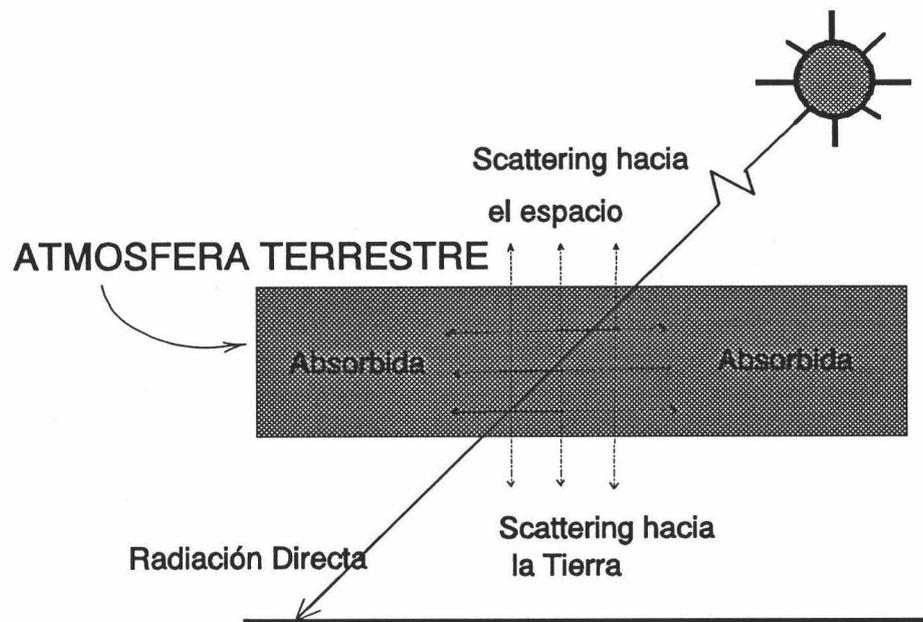
1. INTRODUCCIÓN
2. LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE RADIATIVO
3. SCATTERING DEBIDO A MOLÉCULAS Y PARTÍCULAS
4. SCATTERING DE RAYLEIGH
5. SCATTERING DE MIE
6. RADIACIÓN REFLEJADA POR EL SUELO

## 1. INTRODUCCION

El problema general de la transferencia radiativa en un medio que absorbe, emite y dispersa es extremadamente complejo. Todos los acercamientos desarrollados hasta la presente han implicado algún tipo de suposición simplificadora. Podemos restringir nuestra discusión al caso de la radiación solar en el sistema atmósfera-superficie terrestre aunque, por supuesto, los principios básicos son aplicables a otros planetas y a cualquier medio en general. Además, podemos hacer énfasis en el régimen de radiación solar y olvidarnos del problema completo de la radiación terrestre (onda larga) debida a la emisión por parte de la materia a las temperaturas típicas del entorno natural de la Tierra.

En el estudio de la atmósfera terrestre, el problema fundamental es la determinación de las propiedades del medio, usando las medidas de radiación. Cuando la radiación solar penetra en la atmósfera terrestre, parte de la energía incidente se pierde debido al scattering y parte debido a la absorción. Todos los

componentes atmosféricos contribuyen, en mayor o menor medida, a la atenuación de la radiación solar directa en su paso hacia la superficie de la Tierra. Los mecanismos de absorción y scattering afectan al espectro solar, modificando considerablemente la distribución espectral que atraviesa la atmósfera. La radiación resultado del scattering se denomina **radiación difusa**. Parte de esta radiación difusa vuelve al espacio y parte llega a la superficie terrestre. La radiación que llega al suelo en línea directa desde el disco solar se denomina **radiación directa** (figura 1).



**Figura 1:** Distribución de la radiación solar absorbida, directa y difusa.

El conocimiento de la irradiancia espectral (directa y difusa) que llega a la superficie terrestre es muy importante desde el punto de vista del diseño de ciertas aplicaciones de energía solar como por ejemplo las aplicaciones fotovoltaicas. Por otro lado, la cantidad total, esto es, integrada para todas las longitudes de onda, de radiación directa y difusa es necesaria en arquitectura para

cálculos de calentamiento y enfriamiento de edificios, en el diseño de colectores solares , etc.. Puesto que la atmósfera es iluminada desde abajo por la luz reflejada por las superficies inferiores como agua, suelo, nieve, vegetación, etc..., las propiedades de reflexión de las superficies naturales juegan también un papel destacado en el contexto global del problema radiativo.

En resumen, el problema de la transferencia de radiación a través de un medio tal como la atmósfera de la Tierra se centra en el estudio de la interacción de la radiación con la materia. Nuestro primer objetivo, para ello, será describir los procesos de *scattering* y *absorción* para, posteriormente, establecer la Ecuación de Transporte Radiativo. Ya hemos comentado en el capítulo primero las principales características de nuestra atmósfera como paso previo para comprender el problema de la transferencia radiativa en el caso particular de la atmósfera terrestre y los aspectos generales de la radiación solar y el balance energético en la Tierra. La descripción de las magnitudes con las que se va a trabajar se realizará en el momento de introducirlas procurando, durante toda la memoria, emplear el sistema internacional de unidades (SI).

## **2. LA ECUACION DE TRANSPORTE RADIATIVO**

### **2.1) Absorción y Scattering**

Desde el punto de vista radiativo la materia se caracteriza porque es capaz de reflejar, absorber y difundir radiación, propiedades éstas que dependen de la longitud de onda. Dado que la terminología sajona se emplea con bastante frecuencia, mantendremos en ocasiones el término *scattering* por *difusión*. Si consideramos la propagación de radiación por un medio dado (figura 2) y seleccionamos una capa de espesor  $dx$  perpendicular a un haz de radiación o *radiancia*  $L_\lambda$ , ( $W/m^2sr$ ), generalmente dentro de la materia la energía radiante

sufre alguna disminución debido a su conversión en otras formas de energía (absorción) y debida a la difusión por inhomogeneidades del medio (scattering).

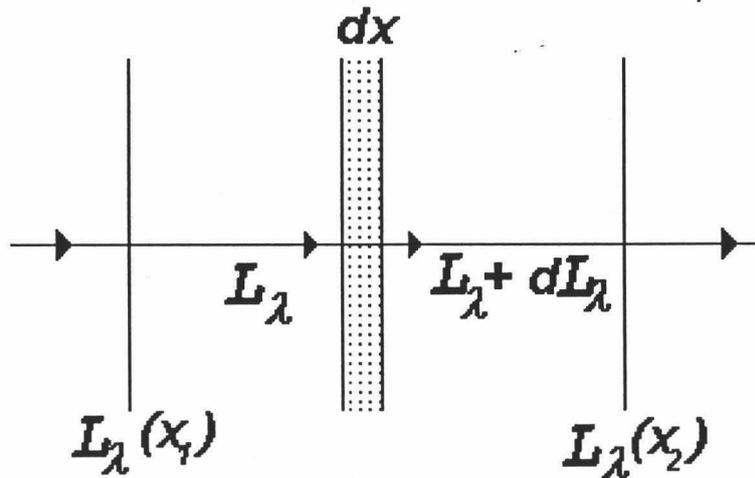


Figura 2: Definición del coeficiente de extinción.

Al contrario que la absorción, la energía radiante que ha sido difundida es del mismo tipo que la incidente, pero se pierde con respecto a la dirección de propagación del haz incidente. Por estos dos procesos, tras atravesar el camino  $dx$  la radiancia ha cambiado y vale,  $(L_\lambda + dL_\lambda)$ , en donde,

$$dL_\lambda = -(\sigma_{a\lambda} + \sigma_{s\lambda}) L_\lambda dx \quad (2.1.1)$$

La ecuación anterior define el *coeficiente de absorción*,  $\sigma_{a\lambda}$  y el *coeficiente de scattering*,  $\sigma_{s\lambda}$ , (ambos  $m^{-1}$ ). Así, tras atravesar un camino finito entre  $x_1$  y  $x_2$ , integrando la ecuación anterior obtenemos,

$$L_\lambda(x_2) = L_\lambda(x_1) [ \exp(-\delta_{a\lambda}) + \exp(-\delta_{s\lambda}) ] \quad (2.1.2)$$

en donde,

$$\delta_{a\lambda} = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_{a\lambda}(x) dx \quad , \quad \delta_{s\lambda} = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_{s\lambda}(x) dx \quad (2.1.3)$$

definen, respectivamente, el *espesor óptico de absorción*,  $\delta_{a\lambda}$  y *de scattering*,  $\delta_{s\lambda}$ , (adimensionales). Tanto en el caso de la absorción como en el del scattering, los coeficientes de absorción y de scattering dependen de la densidad del medio por lo que podemos introducir los respectivos coeficientes másicos de la forma,

$$\begin{aligned} \text{coeficiente másico de absorción} \quad (\text{m}^2/\text{Kg}) & \quad k_{a\lambda} = \sigma_{a\lambda}/\rho \\ \text{coeficiente másico de scattering} \quad (\text{m}^2/\text{Kg}) & \quad k_{s\lambda} = \sigma_{s\lambda}/\rho \end{aligned}$$

Los fenómenos de absorción y scattering ocurren simultáneamente, porque todos los materiales difunden, al menos a través de sus moléculas, y absorben, incluso si esta absorción solo puede ser detectada para caminos extremadamente largos. Dicha atenuación de la energía radiante en un medio real se expresa mediante un *coeficiente de extinción*  $\sigma_{e\lambda}$ , el cual engloba a los dos fenómenos descritos por lo que tendrá una componente debida al scattering y otra debida a la absorción:

$$\sigma_{e\lambda} = \sigma_{a\lambda} + \sigma_{s\lambda} \quad (2.1.4)$$

Para caracterizar la importancia relativa del scattering frente a la absorción, se define el *albedo de scattering simple*,  $\bar{\omega}_\lambda$ , de tal forma que teniendo en cuenta la ecuación (2.1.4), entonces,

$$\bar{\omega}_\lambda = \sigma_{s\lambda}/\sigma_{e\lambda} \quad , \quad 1 \leq \bar{\omega}_\lambda \leq 0 \quad (2.1.5)$$

por lo que,

$$\sigma_{s\lambda} = \bar{\omega}_\lambda \sigma_{e\lambda} \quad \text{y} \quad \sigma_{a\lambda} = (1 - \bar{\omega}_\lambda) \sigma_{e\lambda} \quad (2.1.6)$$

El caso límite  $\bar{\omega}_\lambda = 1$  se denomina *caso conservativo*. Aunque un caso puramente conservativo nunca se da, puede ser una aproximación para medios con muy poca absorción en los que  $\bar{\omega}_\lambda$  sea muy próximo a la unidad.

Por otro lado, el coeficiente de atenuación debido al scattering,  $\sigma_{s\lambda}$ , puede calcularse a partir de la función  $f(\psi)$ , denominada *función de scattering*, en donde  $\psi$  indica el ángulo comprendido por dos direcciones  $l$  y  $l'$ . Esta función caracteriza la distribución angular de los fotones que han sido difundidos. Estamos suponiendo que las partículas no introducen ninguna asimetría alrededor de la dirección de incidencia, el caso más general. Si esto no fuese así, la función de scattering dependería también del ángulo acimutal, lo cual se verifica cuando se consideran los *fenómenos de polarización* que se comentarán más adelante. Así,

$$\sigma_{s\lambda} = \iint_{\text{espacio}} f(\psi) d\omega \quad (2.1.7)$$

Por conveniencia se introduce la *función de fase*,  $p(\psi)$ , relacionada con la función de scattering mediante,

$$p(\psi) = f(\psi) 4 \pi / \sigma_{s\lambda} \quad (2.1.8)$$

verificándose entonces que,

$$\iint_{\text{espacio}} p(\psi) d\omega = 4\pi \quad (2.1.9)$$

La *función de fase* depende de las características de las partículas que provocan el scattering pero no de su densidad, la cual únicamente afecta a  $\sigma_{s\lambda}$ .

## 2.2) Balance de Radiación en un Elemento de Volumen

La ecuación básica de transporte radiativo gobierna la transferencia o transporte de energía radiante que se propaga por cualquier medio y es consecuencia directa del Principio de Conservación de la Energía. Consideremos un campo radiativo caracterizado por su *radiancia monocromática*,  $L_\lambda$ , en un punto  $M$ , propagándose en una dirección determinada  $l$ , en un material caracterizado por una *densidad*  $\rho$  y un *coeficiente másico de extinción*  $k_{e\lambda}$  (en el caso general de un material no homogéneo,  $k_{e\lambda}$  varía con la posición del punto considerado).

En estas condiciones, la variación de la radiancia  $L_\lambda$  en un camino  $dl$  a lo largo de  $l$  se expresa como  $(dL_\lambda/dl)dl$  y es el resultado de la interacción de las ondas electromagnéticas con la materia. Evidentemente, como ya se ha comentado, la atenuación que tiene lugar viene caracterizada por el *coeficiente de extinción*  $\sigma_{e\lambda} = k_{e\lambda} \rho$ .

De esta forma, la energía radiante que penetra en el elemento de volumen  $dSdl$  (ver figura 3) por unidad de tiempo en un ángulo sólido  $d\omega$ , es:

$$\Phi_1 = L_\lambda(M, l) dS d\omega \quad (2.2.1)$$

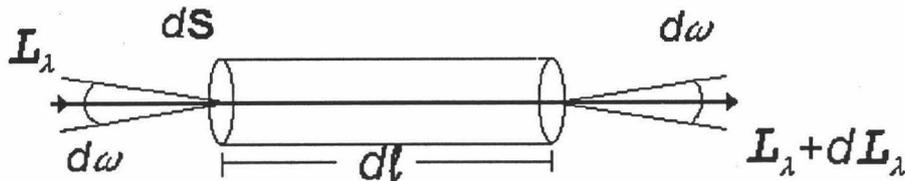


Figura 3: Variación de la radiancia en un elemento de volumen.

La energía que sale de  $dSdl$  será:

$$\Phi_2 = \{ L_\lambda(M, l) + (dL_\lambda(M, l)/dl)dl \} dS d\omega \quad (2.2.2)$$

El flujo radiante perdido por absorción y scattering a lo largo de  $dl$  puede expresarse como:

$$\Phi_3 = -k_{e\lambda} \rho L_\lambda(M, l) dS dl d\omega \quad (2.2.3)$$

En general, en este balance se gana algún flujo a lo largo de  $dl$  por emisión térmica del propio volumen considerado y scattering múltiple procedente de otras direcciones en la dirección dada por  $l$ . Estas contribuciones son, por supuesto, proporcionales a  $d\omega$  y al volumen  $dSdl$ . Se suele expresar por medio del *coeficiente de función fuente*  $j_\lambda$ , el cual tiene un significado físico semejante que  $k_{e\lambda}$ , de la forma:

$$\Phi_4 = j_\lambda \rho dS dl d\omega \quad (2.2.4)$$

en donde,

$$j_\lambda = k_{e\lambda} J_\lambda(M, l)$$

siendo  $J_\lambda$  la **Función Fuente**, debida a los dos procesos: *función fuente de scattering* y *función fuente de emisión*, es decir,

$$J_\lambda = J_\lambda^{sc} + J_\lambda^{em} \quad (2.2.5)$$

La aplicación del Principio de Conservación de la Energía nos lleva a la ecuación,

$$\Phi_2 - \Phi_1 = \Phi_4 - \Phi_3 \quad (2.2.6)$$

lo cual, sustituyendo las expresiones (2.2.1), (2.2.2), (2.2.3) y (2.2.4) nos

conduce a que la radiancia que emerge por el otro extremo del volumen considerado se ha modificado en,

$$dL_{\lambda}(M, l)/dl = -k_{e\lambda} \rho [L_{\lambda}(M, l) - J_{\lambda}(M, l)] \quad (2.2.7)$$

Esta ecuación representa la ecuación fundamental para cualquier proceso de transferencia radiativo. En ella tenemos dos contribuciones: una pérdida debida a la absorción por el material y al scattering, y un aumento debido a la emisión por el material y al scattering múltiple. Esta ecuación, junto con las condiciones de contorno, definen completamente la radiancia  $L_{\lambda}(M, l)$  en el medio.

### 2.3) Función Fuente de Scattering y de Emisión

Si tenemos en cuenta que el flujo radiante ganado en el volumen  $dSdl$  en la dirección  $l$  debido al scattering de la radiación incidente desde una dirección  $l'$  (en lo que sigue se han omitido algunas dependencias, en aras de una mayor claridad en la notación) es,

$$d\Phi_4 = f(\psi) L_{\lambda} d\omega' dS dl d\omega \quad (2.3.1)$$

integrando y empleando las ecuaciones (2.1.6) y (2.1.8) obtenemos,

$$\Phi_4 = \sigma_{e\lambda} \left[ \frac{\bar{\omega}_{\lambda}}{4\pi} \iint_{\text{espacio}} p(\psi) L_{\lambda} d\omega' \right] dS dl d\omega \quad (2.3.2)$$

lo cual implica, por comparación con (2.2.4), que la *función fuente para el scattering* vale,

$$J_{\lambda}^{sc} = \frac{\bar{\omega}_{\lambda}}{4\pi} \iint_{\text{espacio}} p(\psi) L_{\lambda} d\omega' \quad (2.3.3)$$

La *función fuente para la emisión* es normalmente más compleja. En general la atmósfera terrestre no está en equilibrio termodinámico y la temperatura así como el campo de radiación, cambia de un punto a otro. Una región que se considere, intercambia radiación con su entorno a una temperatura diferente. Sin embargo, en la Troposfera y en la zona inferior media de la Estratosfera (hasta 50 o 60 km), las emisiones pueden considerarse que obedecen la Ley de Kirchhoff a la temperatura local (T). Esta situación es la que se conoce como de **equilibrio termodinámico local**. Bajo estas condiciones la *función fuente para la emisión* adopta la forma (Lenoble, 1993),

$$J_{\lambda}^{em} = [1 - \bar{\omega}_{\lambda}(M)] L_{\lambda}^B(T(M)) \quad (2.3.4)$$

en donde  $L_{\lambda}^B(T)$  es la radiancia del cuerpo negro a la temperatura T. Evidentemente, en esta circunstancia  $J_{\lambda}^{em}$  es independiente de la dirección  $l$ .

#### 2.4) Aproximaciones de la Ecuación de Transporte Radiativo

Es evidente que si despreciamos la contribución del scattering y la emisión por el medio, entonces la ecuación (2.2.7) se nos reduce a la *Ley de Beer-Bouguer-Lambert*:

$$dL_{\lambda}/dl = -k_{e\lambda} \rho L_{\lambda} \quad (2.4.1)$$

Si integramos sobre el espesor total de la capa, la radiancia emergente será:

$$L_\lambda = L_{o\lambda} \exp \left( - \int_0^l k_{e\lambda} \rho \, dl \right) \quad (2.4.2)$$

donde  $L_{o\lambda}$  es la radiancia incidente en  $l=0$ .

Si el medio es, además, homogéneo  $k_{e\lambda}$  es independiente de  $l$  y teniendo en cuenta que el *camino óptico* ó *masa óptica* viene dado por:

$$m = \int_0^l \rho \, dl \quad (2.4.3)$$

nos quedará,

$$L_\lambda = L_{o\lambda} \exp( -k_{e\lambda} m ) \quad (2.4.4)$$

siendo  $(k_{e\lambda} m)$  el *espesor óptico de extinción*,  $\delta_{e\lambda}$ , adimensional.

La geometría más simple que se puede considerar para un medio que absorbe y difunde es el de una capa limitada por dos planos infinitos y paralelos, en donde las propiedades del material son constantes en un plano paralelo a los límites y la radiación es constante en los dos límites. Esta es la situación del denominado *caso plano-paralelo*, y constituye en muchas ocasiones una buena aproximación de una atmósfera planetaria, en la que las variaciones verticales son mucho más rápidas que las horizontales para todas las magnitudes que se consideren. Sin embargo, esta aproximación no contempla la esfericidad del planeta, por lo que no se puede aplicar para observaciones en el horizonte. Para una *atmósfera plano-paralela*, la única variable es la altura  $z$ , y la dirección viene definida por el ángulo cenital  $\theta$  y el acimut  $\phi$  (figura 4), por lo que en este caso  $dl = dz/\cos(\theta)$ . Si denominamos  $\mu = \cos(\theta)$ , la ecuación de transferencia se expresa entonces como,

$$\mu \, dL_\lambda/dz = -k_{e\lambda} \rho [L_\lambda - J_\lambda] \quad (2.4.6)$$

Para esta ecuación, las condiciones de contorno vienen dadas por la radiancia hacia abajo en el límite superior de la atmósfera plano-paralela y por la radiancia hacia arriba en el límite inferior.

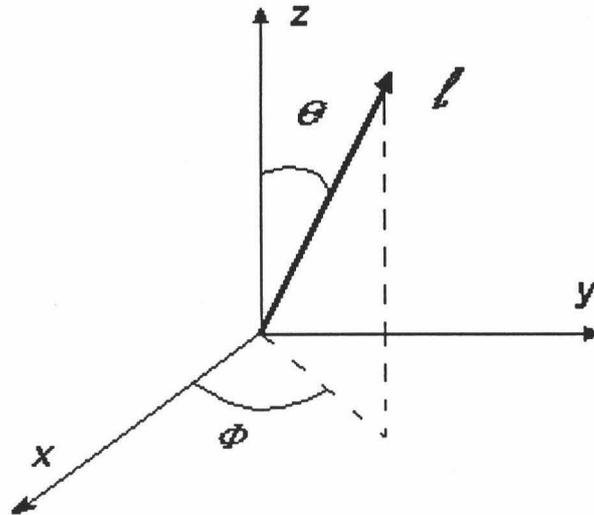


Figura 4: Coordenadas Polares para la dirección  $l$ .

### 3. SCATTERING DEBIDO A MOLECULAS Y PARTICULAS

Dado el objetivo de nuestro trabajo, que no es otro que la estudio y caracterización de la distribución angular de la radiancia del cielo, hemos introducido de forma general los fenómenos de scattering y absorción. Por el interés práctico de nuestro trabajo, nos centramos ahora de forma algo más concreta y profunda en el tema del scattering.

Ya hemos comentado que cualquier inhomogeneidad en el medio de propagación produce scattering en todas direcciones de la radiación electromagnética incidente. En un gas la estructura molecular misma es una causa

fundamental de inhomogeneidad. En realidad, todas las partículas de la naturaleza, desde el tamaño de un electrón a un planeta, difunden la radiación. Esta energía dispersada, denominada como sabemos *radiación difusa*, puede obtenerse teóricamente a partir de la **Ecuación de Onda de Maxwell**.

Sin embargo, se puede obtener una solución particularmente simple cuando la partícula es esférica y mucho más pequeña que la longitud de onda de la radiación incidente. Este es el caso de la *Teoría de Rayleigh* (scattering molecular o de Rayleigh) en honor a que a finales del siglo XIX *Lord Rayleigh* obtuvo por primera vez este resultado. En la atmósfera existen muchas otras partículas sólidas y líquidas, con tamaños que varían desde el de varias moléculas hasta varios milímetros. En estos casos, 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 es más complicada de obtener. Fue *Gustav Mie* el primero que tuvo éxito en este empeño a principios de este siglo, constituyendo la *Teoría de Mie* de la que la solución de Rayleigh es, en realidad, un caso particular.

Por todo ello, es de esperar que partículas de diferentes tamaños e índices de refracción posean diferentes propiedades de scattering. Como hemos comentado, en muchos casos pueden tomarse aproximaciones que hacen la teoría más tratable, debido a su gran complejidad. Los dos parámetros más utilizados son el de tamaño,  $x$ , definido como la razón entre el tamaño real transversal de la partícula y la longitud de onda de la radiación,  $x=2\pi r/\lambda$ , y el índice de refracción de la partícula,  $m$ , que es un número complejo si el medio es absorbente, es decir,  $m = m_r - jm_i$ , donde  $m_r$  y  $m_i$  son la parte real e imaginaria, respectivamente.

Desafortunadamente, no conocemos  $m$  con precisión para gran parte de los aerosoles existentes en la atmósfera real. Coulson (1988) presenta una

---

recopilación de estos índices, para múltiples compuestos, basada en los estudios realizados por diversos autores en los últimos treinta años, así como sus variaciones para las distintas longitudes de onda de la luz. Los índices para las gotas de vapor de agua, por el contrario, se han determinado con exactitud gracias a los trabajos de Hale y Querry (1973), para la región del espectro solar predominante, así como a las de Irvine y Pollack (1968) en las longitudes de onda del infrarrojo.

Sobre la base de estos parámetros, se han definido una serie de dominios de scattering determinados por los diferentes tipos de partículas de la siguiente forma:

1. El *Scattering de Rayleigh*: Cuando  $x \ll 1$  y  $m$  es arbitrario. Esta aproximación se usa frecuentemente cuando trabajamos con moléculas de gases atmosféricos y explica satisfactoriamente el fenómeno de la polarización y la intensidad de la luz en la atmósfera de la Tierra.

2. El *Scattering de Rayleigh-Gans*: Se produce cuando  $(m - 1) \ll 1$  y  $2x(m - 1) \ll 1$ . Como podemos observar es más restrictivo que el de Rayleigh pues requiere que el índice de refracción de las partículas no sea muy diferente al del medio circundante. Esta teoría de scattering no es muy utilizada en problemas atmosféricos debido a que los aerosoles tienen generalmente un índice de refracción mucho más alto que el del aire.

3. *Difracción Anómala*: Se produce cuando  $(m - 1) \ll 1$  y  $x$  es arbitraria y corresponde a los estudios de la aureola solar y problemas similares, en los que la radiación procedente del scattering se concentra en la región de pequeños ángulos de scattering.

4. *Optica Geométrica*: Cuando  $x \rightarrow \infty$  y  $m$  es real. Este es el caso clásico para el estudio normal de la refracción, reflexión y difracción de fenómenos ópticos tales como el arco iris. En ellos se pueden aplicar las leyes de la óptica clásica.

5. *Scattering de Mie*:  $x$  y  $m$  arbitrarios, pero sólo para esferas. Esta teoría de Mie cubre el rango total de tamaño, desde el scattering de Rayleigh hasta la óptica geométrica, siendo a este respecto completamente general. Sus aplicaciones se han estudiado ampliamente en atmósferas planetarias y, particularmente, en la Tierra.

#### 4. SCATTERING DE RAYLEIGH

En 1871 Lord Rayleigh formuló las leyes que gobiernan la difusión de la luz al tratar de explicar el color azul del cielo. Los descubrimientos de Rayleigh son aplicables para el scattering de la radiación solar incidente no polarizada, por partículas esféricas más pequeñas que su longitud de onda.

Supongamos que el campo eléctrico,  $\mathcal{E}_0$ , de la onda electromagnética (EM) incidente sobre una molécula le induce un momento dipolar eléctrico,  $\mathcal{P}$ , el cual oscila a la frecuencia de la onda incidente. De acuerdo con la teoría clásica electromagnética, el dipolo oscilante emite siempre a la misma frecuencia. Ya que estamos considerando moléculas y partículas de tamaño mucho menor que la longitud de onda de la radiación, podemos considerar el campo eléctrico constante alrededor de la partícula. En el caso de átomos, la distorsión ocasionada por el campo eléctrico hace que éste sea un pequeño dipolo eléctrico, cuyo momento dipolar  $\mathcal{P}$  tiene la misma dirección que  $\mathcal{E}_0$ , siendo directamente proporcionales a través de una constante característica del átomo,  $\alpha$ , llamada *polarizabilidad*

*atómica*. El resultado en este caso es que el átomo se ha polarizado, o que el campo eléctrico ha inducido un momento dipolar. A cada átomo le corresponde un valor de  $\alpha$ .

El comportamiento de las moléculas frente al campo eléctrico es diferente. En este caso, el momento dipolar inducido no tiene, normalmente, la misma dirección que el campo aplicado, salvo que la molécula sea isótropa. No se puede hablar entonces de una constante de polarizabilidad como en el caso de los átomos. En este caso  $\mathcal{P}$  y  $\mathcal{E}_0$  están relacionados por el *tensor de polarizabilidad*,  $[\alpha]$ .

$$\mathcal{P} = [\alpha] \mathcal{E}_0 \quad (4.1)$$

Los elementos de este tensor dependen del sistema de ejes elegido, pero la relación entre  $\mathcal{E}_0$  y  $\mathcal{P}$  será la misma. De los nueve elementos de  $[\alpha]$  solamente son independientes seis (matriz simétrica), por lo que siempre es posible encontrar unos ejes de tal forma que sean nulos todos los elementos excepto los de la diagonal principal.

#### 4.1) Base Teórica

Si consideramos moléculas isótropas, podemos tratar  $\alpha$  como un coeficiente constante. En este caso y según la teoría clásica electromagnética, la energía emitida por el dipolo depende directamente de  $\mathcal{P}$  y vale,

$$W = \frac{ck^4}{12\pi\epsilon_0} |\mathcal{P}|^2 \quad (4.1.1)$$

siendo  $k=2\pi/\lambda$ . Por otro lado, el flujo radiante incidente por unidad de superficie, esto es, la *Irradiancia incidente*, depende de  $\mathcal{E}_0$  en la forma,

$$E_o = \frac{c\epsilon_o}{2} |\mathcal{E}_o|^2 \quad (4.1.2)$$

en donde  $\epsilon_o$  y  $c$  son la constante dieléctrica y la velocidad de la luz en el vacío respectivamente. Si  $W$  se interpreta como la energía difundida en todas direcciones por la molécula, el *coeficiente de scattering molecular* siendo  $N$  el número de moléculas por unidad de volumen es,

$$k_{s\lambda}^{mol} = \sigma_{s\lambda}/N = W/E_o = (k^4 \alpha^2)/6 \pi \epsilon_o^2 \quad (4.1.3)$$

Por otro lado, el campo eléctrico debido a la emisión del dipolo,  $\mathcal{E}_s$ , a una distancia  $r$  del mismo, con  $r \gg \lambda$ , viene dado por la expresión,

$$\mathcal{E}_s = \frac{k^2 \mathcal{P}}{4\pi\epsilon_o r} \text{sen}\gamma e^{(-jkr)} \quad (4.1.4)$$

siendo  $\gamma$  el ángulo entre el momento dipolar  $\mathcal{P}$  y la dirección de observación  $l$ . El vector eléctrico incidente,  $\mathcal{E}_o$ , puede ser descompuesto en sus componentes paralela y perpendicular (o normal),  $\mathcal{E}_{op}$  y  $\mathcal{E}_{on}$ , al *plano de scattering* formado por la dirección de incidencia,  $l_o$ , y la de scattering,  $l_s$ , siendo  $\psi$  el *ángulo de scattering* (figura 5). La componente paralela incidente genera la componente paralela dispersada y lo mismo ocurre con la componente normal de forma que, teniendo en cuenta la ecuación (4.1) y que  $\gamma = \pi/2 - \psi$ , obtendremos para  $\mathcal{E}_{sp}$  y  $\mathcal{E}_{sn}$ , las siguientes expresiones,

$$\mathcal{E}_{sp} = \frac{k^2 \alpha \mathcal{E}_{op}}{4\pi\epsilon_o r} \cos\psi e^{(-jkr)} \quad (4.1.5)$$

$$\mathcal{E}_{sn} = \frac{k^2 \alpha \mathcal{E}_{on}}{4\pi\epsilon_o r} e^{(-jkr)} \quad (4.1.6)$$

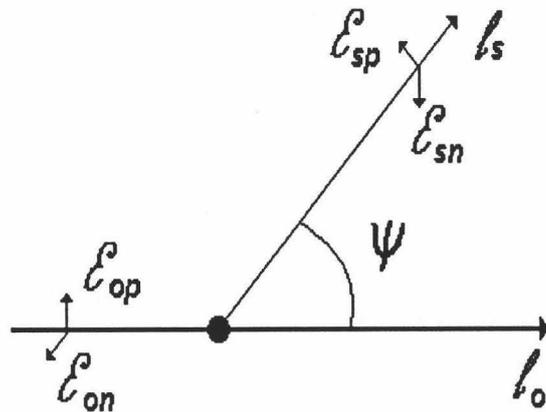


Figura 5: Descomposición del Campo Eléctrico.

La *Irradiancia difundida*,  $E_s$ , recibida en un plano perpendicular situado a una distancia  $r$  de la molécula, se expresa en término de sus componentes como,

$$E_{sp} = \frac{c\epsilon_o}{2} |E_{sp}|^2 \quad (4.1.7)$$

$$E_{sn} = \frac{c\epsilon_o}{2} |E_{sn}|^2 \quad (4.1.8)$$

que corresponde con el flujo radiante difundido dentro de un ángulo sólido  $d\omega = 1/r^2$ . Teniendo en cuenta que este flujo se puede escribir como,

$$d\Phi = f(\psi) E_o dS dl d\omega \quad (4.1.9)$$

junto con las ecuaciones (4.1.7) y (4.1.8) en (4.1.9), por comparación, obtenemos las *funciones de scattering* para los dos casos de polarización del haz incidente, paralelo y perpendicular al plano de scattering,

$$f_p(\psi) = \frac{k^4 \alpha^2}{16\pi^2 \epsilon_0^2} \cos^2 \psi \quad (4.1.10)$$

$$f_n(\psi) = \frac{k^4 \alpha^2}{16\pi^2 \epsilon_0^2} \quad (4.1.11)$$

#### 4.2) Radiación Natural

Si es el caso de **luz natural** (evidentemente no polarizada), las dos componentes de  $\mathcal{E}_0$  son incoherentes verificándose que  $E_{on} = E_{op} = E_0/2$ . Sin embargo, la radiación difundida está, en virtud de (4.1.10) y (4.1.11) linealmente polarizada en parte, por lo que la emisión de la molécula considerándola fuente puntual, esto es, la *Intensidad Radiante* (flujo radiante por unidad de ángulo sólido), vale en función de la Irradiancia incidente,

$$I_{sp} = \frac{k^4 \alpha^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2} \cos^2 \psi E_0 \quad (4.2.1)$$

$$I_{sn} = \frac{k^4 \alpha^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2} E_0 \quad (4.2.2)$$

respectivamente para los dos estados de polarización. El *grado de polarización*,  $P$ , se define como,

$$P = \frac{I_{sn} - I_{sp}}{I_{sn} + I_{sp}} \quad (4.2.3)$$

que en nuestro caso queda como,

$$P = \frac{1 - \cos^2\psi}{1 + \cos^2\psi} \quad (4.2.4)$$

Para la energía total difundida,  $I_s = I_{sp} + I_{sn}$ , la función de scattering será, a partir de (4.2.1) y (4.2.2),

$$f(\psi) = \frac{k^4 \alpha^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2} (1 + \cos^2\psi) \quad (4.2.5)$$

lo que conduce a la **función de fase molecular** (o de Rayleigh),

$$p(\psi) = \frac{f(\psi)4\pi}{k_{s\lambda}^{mol}} = \frac{3}{4} (1 + \cos^2\psi) \quad (4.2.6)$$

### 4.3) Radiación linealmente polarizada

Si se tratara de **radiación incidente linealmente polarizada**, entonces el campo eléctrico incidente,  $\mathcal{E}_0$ , subtiende un ángulo  $\chi$  con el plano de scattering, vibrando sus componentes normal y paralela en fase. Esta característica permanece en el proceso de scattering y la radiación dispersada permanece linealmente polarizada. La **función de fase** que se obtiene en este caso es (Lenoble, 1993),

$$p(\psi, \chi) = \frac{3}{2} (\text{sen}^2\chi + \cos^2\chi \cos^2\psi) \quad (4.3.1)$$

en donde cabe destacar que la polarización de la radiación incidente rompe la simetría que existe alrededor de la dirección de incidencia para la radiación natural. Es por ello que la función de fase depende de  $\Psi$  y de  $\chi$ .

#### 4.4) Anisotropía Molecular

Como una molécula generalmente no es isótropa, de un modo más exacto habría que considerar  $\alpha$  como un tensor. El efecto más fácilmente observable de esta anisotropía molecular es una ligera despolarización de la radiación difundida a  $90^\circ$  del ángulo de incidencia de la luz natural. Por ello, en este caso la función de fase molecular, ecuación (4.2.6), se modifica para tomar la forma,

$$p(\psi) = \frac{3}{2} \frac{1}{2+d} [(1-d)\cos^2\psi + (1+d)] \quad (4.4.1)$$

en donde  $d$  es el *factor de despolarización* el cual toma generalmente valores pequeños, aunque resulta bastante difícil de medir, (Lenoble, 1993).

### 5. SCATTERING DE MIE

Las características de la atmósfera son tales que la *Teoría de Rayleigh* no puede explicar, por si sola, la interacción de la energía procedente del sol con la materia, en presencia de partículas aerosoles cuyas dimensiones son apreciables comparadas con la longitud de onda de la radiación incidente. Para resolver el scattering debido a partículas de cualquier tamaño y forma, Mie desarrolló en 1908 su teoría del scattering, a partir de las ecuaciones clásicas del electromagnetismo junto con condiciones de continuidad en la frontera entre la partícula considerada y su entorno. En la práctica, sin embargo, solo es posible tratar matemáticamente de forma fácil formas geométricas simples tales como esferas, cilindros o elipses. En realidad la teoría de Mie fue desarrollada, en un principio, para explicar el scattering debido a partículas esféricas homogéneas, lo que constituye el caso en el que más se emplea. Nosotros nos limitaremos también a esta situación.

### 5.1) Base Teórica

Si los campos Eléctrico y Magnético ( $\mathcal{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ) son periódicos en el tiempo con una frecuencia angular  $\omega$ , deben satisfacer la ecuación de onda vectorial,

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 m^2 \vec{A} = 0 \quad (5.1.1)$$

en donde  $\vec{A}$  representa  $\mathcal{E}$  o  $\mathbf{B}$ ,  $k=2\pi/\lambda=\omega/c$ , y  $m$  es el índice de refracción. Dentro de la geometría esférica,  $\mathcal{E}$  y  $\mathbf{B}$  pueden expresarse mediante una combinación lineal de vectores, cada uno de ellos definidos en términos de las soluciones elementales de la ecuación de onda escalar,

$$\nabla^2 \Psi + k^2 m^2 \Psi = 0 \quad (5.1.2)$$

En este contexto, las soluciones generales elementales de la ecuación escalar (5.1.2) puede obtenerse por separación de variables y expresarse, en coordenadas esféricas ( $\theta$ ,  $\phi$ ,  $r$ ), de la forma,

$$\Psi_{ln}^c = \cos(l\phi) P_n^l(\cos(\theta)) z(mkr) \quad (5.1.3)$$

$$\Psi_{ln}^s = \text{sen}(l\phi) P_n^l(\cos(\theta)) z(mkr) \quad (5.1.4)$$

en donde,

$$z(mkr) = \sqrt{\frac{\pi}{2mkr}} Z_{n+1/2}(mkr) \quad (5.1.5.a)$$

siendo  $Z_{n+1/2}(mkr)$  la *función de Bessel*,  $J$ , (y  $z$  se designaría por  $j_n$ ), o *de Hankel*,  $H$ , (y  $z$  se designaría  $h_n$ ) de orden  $(n+1/2)$ , para ondas propagándose hacia el origen o en dirección contraria respectivamente, y  $P_n^l$  es la función de Legendre asociada con el polinomio de Legendre  $P_n(x)$  mediante la ecuación,

$$P_n^l(x) = (1-x^2)^{l/2} \frac{d^l P_n(x)}{dx^l} \quad (5.1.5.b)$$

Consideremos una onda incidente linealmente polarizada llegando a una partícula esférica de radio  $R$  e índice de refracción de su entorno  $m$ , tal y como se muestra en la figura 6. El campo EM incidente puede escribirse,

$$\vec{\mathcal{E}}_o = \mathcal{E}_o e^{-j(kz - \omega t)} \hat{i}_x \quad (5.1.6)$$

$$\vec{B}_o = -\frac{\mathcal{E}_o}{c} e^{-j(kz - \omega t)} \hat{i}_y \quad (5.1.7)$$

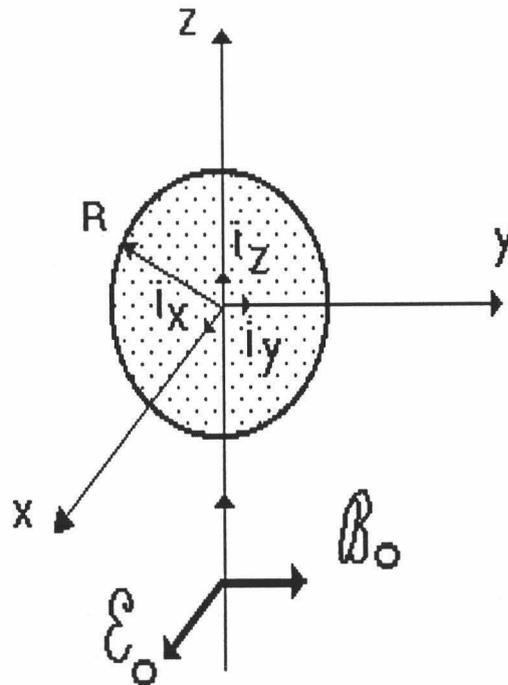


Figura 6: Onda linealmente polarizada sobre una partícula esférica.

Si tenemos en cuenta que  $z = r \cos \theta$  y proyectamos  $\hat{t}_x$  e  $\hat{t}_y$  sobre un sistemas de coordenadas esféricas, podemos llegar a las componentes de  $\mathcal{E}$  y  $\mathbf{B}$  en términos de las soluciones elementales (ecuaciones (5.1.3 y 4)), las cuales solo contienen funciones con  $l=1$ . El campo EM es parcialmente transmitido dentro de la partícula,  $(\mathcal{E}_i, \mathbf{B}_i)$  y parcialmente difundido,  $(\mathcal{E}_s, \mathbf{B}_s)$ . Estos campos se expresan de forma semejante al incidente pero con unos coeficientes desconocidos, que son los que permiten que se cumplan las condiciones de contorno en la superficie de la esfera. El cálculo de estos coeficientes, por complejo, será omitido presentándose únicamente el resultado.

### 5.2) Resultados. Scattering de Mie y Polarización

A una distancia  $r$  de la partícula, las componentes normal ( $n$ ) y paralelas ( $p$ ) al plano de scattering del campo eléctrico difundido se pueden escribir,

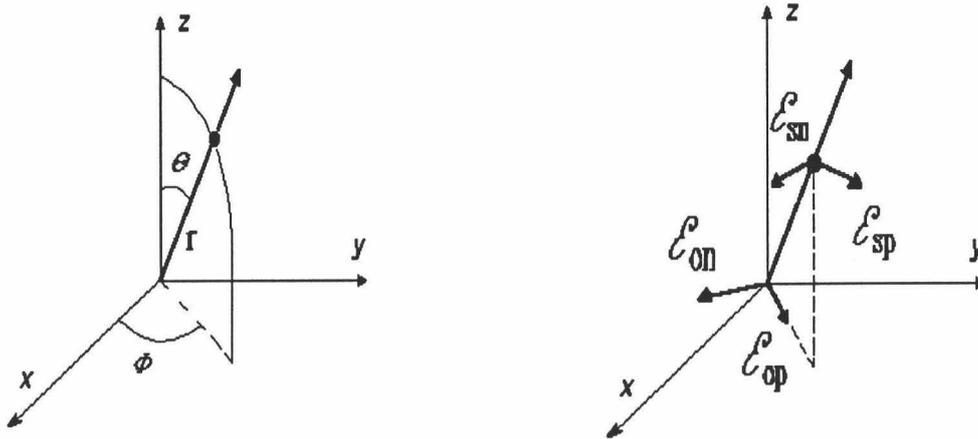
$$\mathcal{E}_{sn} = \frac{j}{kr} e^{(-jkr)} S_1(\theta) \mathcal{E}_{on} \quad (5.2.1)$$

$$\mathcal{E}_{sp} = \frac{j}{kr} e^{(-jkr)} S_2(\theta) \mathcal{E}_{op} \quad (5.2.2)$$

en donde  $S_1$  y  $S_2$  se expresan de la siguiente forma:

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \Pi_n(\cos \theta)] \quad (5.2.3)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \tau_n(\cos \theta) + a_n \Pi_n(\cos \theta)] \quad (5.2.4)$$



**Figura 7:** Coordenadas esféricas y separación en componentes normal y perpendicular del campo eléctrico incidente y difundido.

donde

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^1(\cos\theta) \quad (5.2.5)$$

$$\Pi_n(\cos\theta) = \frac{1}{\sin\theta} P_n^1(\cos\theta) \quad (5.2.6)$$

Los coeficientes Mie  $a_n$  corresponden a las oscilaciones magnéticas y los  $b_n$  a las eléctricas. A partir de las condiciones de contorno en la superficie de la partícula, las expresiones que se obtienen para ellos son:

$$a_n = \frac{[xj_n(x)]' j_n(mx) - [mxj_n(mx)]' j_n(x)}{[mxj_n(mx)]' h_n(x) - [xh_n(x)]' j_n(x)} \quad (5.2.7)$$

$$b_n = \frac{[mxj_n(mx)]' j_n(x) - m^2 [xj_n(x)]' j_n(mx)}{m^2 [xh_n(x)]' j_n(mx) - [mxj_n(mx)]' h_n(x)} \quad (5.2.8)$$

en donde  $m$  es el índice de refracción de la partícula con respecto a su entorno y  $x=2\pi R/\lambda$  es el denominado *parámetro Mie de tamaño*. La "prima" indica derivada de la función y  $h_n$  y  $j_n$  indican las funciones de Hankel y de Bessel según la ecuación (5.1.5.a). Los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$ , y por lo tanto las funciones  $S_1$  y  $S_2$ , son cantidades complejas, incluso en el caso en que  $m$  sea real. Las intensidades difundidas vienen dadas en función de la irradiancia incidente de la forma ( $S^*$  indica *complejo conjugado*):

$$I_{sn} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} S_1 S_1^* E_{on} \quad (5.2.9)$$

$$I_{sp} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} S_2 S_2^* E_{op} \quad (5.2.10)$$

### 5.3) Radiación Natural y Linealmente Polarizada

En el caso de **radiación incidente natural**, no polarizada,  $E_{op}=E_{on}=E_o/2$  y a partir de las ecuaciones (5.2.9 y 10) se obtiene la *función de scattering*

$$f(\theta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} (S_1 S_1^* + S_2 S_2^*) \quad (5.2.11)$$

La luz difundida está parcialmente linealmente polarizada, paralela o perpendicular al plano de scattering, con un grado de polarización

$$P = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{|S_1 S_1^* - S_2 S_2^*|}{S_1 S_1^* + S_2 S_2^*} \quad (5.2.12)$$

Si la radiación incidente está linealmente polarizada con un vector campo eléctrico formando un ángulo  $\chi$  con el plano de scattering, la *función de scattering* que se obtiene en este caso es, (Lenoble, 1993),

$$f(\theta, \chi) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} (S_1 S_1^* \sin^2 \chi + S_2 S_2^* \cos^2 \chi) \quad (5.2.13)$$

Por último, ya que las funciones  $S_1$  y  $S_2$  suelen ser números complejos, introducen una diferencia de fase entre los campos incidentes y difundidos. Por ello, cuando las componentes paralela y normal del campo eléctrico incidente oscilan en fase, las componentes difundidas presentan una diferencia de fase determinada por lo que la radiación difundida está elípticamente polarizada. A partir de los coeficientes de Mie se pueden evaluar directamente algunas cantidades importantes como son el *factor de eficiencia de scattering de Mie*,  $Q_s$ , y en el caso de que exista absorción por parte del material ( $m$  complejo), el *factor de eficiencia de atenuación Mie*,  $Q_e$ , dados respectivamente por,

$$Q_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n + 1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (5.2.14)$$

$$Q_e = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n + 1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (5.2.15)$$

en donde  $\operatorname{Re}$  significa "parte real".

## 6. RADIACION REFLEJADA POR EL SUELO

Aunque solamente hemos comentado los procesos de *absorción* y *scattering*, otra de las características radiativas de la materia es la de la **reflexión**. Ya que este tema no se va a tratar en esta memoria, comentaremos a continuación

de forma más breve el fenómeno e introduciremos algunos conceptos que se suelen emplear. Cuando un haz de flujo radiante incide sobre una determinada superficie, parte de la radiación es reflejada, es decir, vuelve al medio por el cual ha llegado hasta la superficie. Esta reflexión puede ser *especular* en la frontera entre dos medios de diferente índice de refracción o también puede darse el caso de que exista alguna penetración en el material y posteriormente alguna difusión en las partículas o moléculas que lo constituyen.

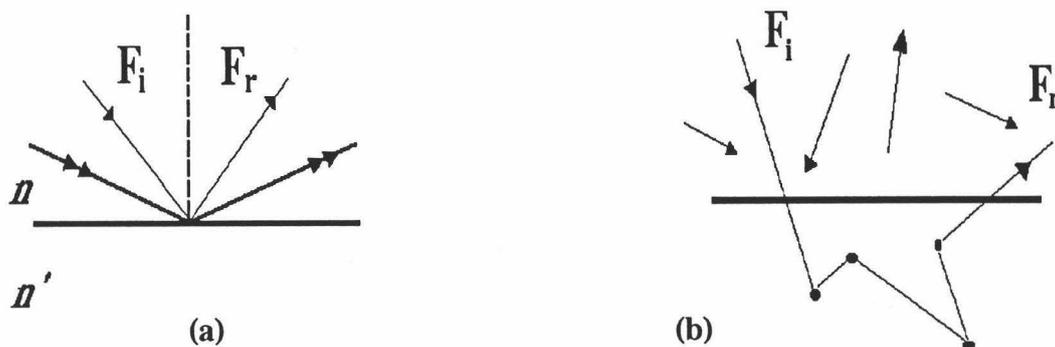


Figura 8: (a) Reflexión especular. (b) Reflexión difusa.

En el primero de los casos se verifica la **Ley de Fresnel**, (figura 8.a), y en el segundo de los casos una **reflexión difusa**, (figura 8.b), la cual se verifica, por ejemplo, en la superficie de una hoja de papel o una pared pintada o en la *superficie* de una nube o de una atmósfera planetaria, aunque la palabra superficie pierda un poco su significado en estos últimos casos

Sin profundizar más en los distintos y variados procesos de reflexión definiremos la **Reflectancia** a partir del **flujo radiante incidente** ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $F_{i\lambda}$ , y el **flujo reflejado**,  $F_{r\lambda}$ , como,

$$\rho = \frac{F_{r\lambda}}{F_{i\lambda}} \quad (6.1)$$

La Reflectancia,  $\rho$ , generalmente depende de la dirección de incidencia, del ángulo de incidencia, y a veces es denominado *Albedo* en Meteorología y designado por la letra  $A$ . Si consideramos ahora la **Radiancia reflejada**,  $L_{r\lambda}$ , en la dirección dada por  $l$  para un flujo incidente,  $F_{i\lambda}$ , desde la dirección dada por  $l_0$ , se define la **Reflectancia Bidireccional** como,

$$\rho(l, l_0) = \frac{\pi L_{r\lambda}(l)}{F_{i\lambda}(l_0)} \quad (6.2)$$

Las funciones de distribución de la Reflectancia Bidireccional, el valor del Albedo en una multitud de posibles ángulos de visión en un tiempo o posición solar dada, han tenido un gran interés en los últimos años, más aún en lo referente a estudios realizados a través de satélite (Walthall et al., 1985). El problema básico se centra en el hecho de que la componente reflejada por el suelo depende radicalmente del lugar específico donde se mide. Evidentemente, la única metodología para calcular el flujo reflejado es la integración de la radiancia reflejada sobre todas las direcciones, aplicando las mismas técnicas que para el hemisferio superior (Page, 1986). Estos resultados se utilizan para calcular el valor efectivo de la reflectancia en diferentes direcciones (Palz, 1984).

Un reflector cumple la *Ley de Lambert* si la reflexión es la misma en todas las direcciones e independiente del ángulo de incidencia. En este caso,  $\rho(l, l_0)$  es una constante,  $\rho$ , y la radiancia reflejada viene dada por,

$$L_{r\lambda} = \rho F_{i\lambda} / \pi \quad (6.3)$$

Ningún reflector real cumple esta ley, pero es una aproximación conveniente para muchos reflectores de tipo difuso. Cuando la radiancia procedente del suelo no es isotrópica, el albedo efectivo es función de la pendiente de la superficie, de la orientación y de la hora del día (Page, 1986).

La *Reflectancia Planetaria*,  $\rho^*$ , es la razón entre el flujo radiante total reflejado por el planeta y el flujo radiante total recibido por el planeta, es decir,

$$\rho^* = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad (6.4)$$

De nuevo, si el planeta cumple la *Ley de Lambert*,  $\rho^*$  es simplemente igual a  $\rho$ . La radiación que no es reflejada en la superficie penetra dentro del material y, como se ha comentado ya, es transmitida con o sin desviación o absorbida. En el caso planetario ( $1 - \rho^*$ ) es la fracción de energía solar absorbida por el planeta.

Se han utilizado diversos modelos complejos de transferencia radiativa para identificar las componentes esenciales del albedo para superficies homogéneas de plantas o en suelo descubierto (Suits, 1972; Smith y Ranson, 1979; Norman y Welles, 1983). Los modelos que normalmente se presentan son en gran parte experimentales, para superficies con unas determinadas características de homogeneidad y considerando siempre días despejados. De forma general, los resultados que suelen encontrarse son:

- a) La Reflectancia aumenta generalmente cuando aumenta el ángulo cenital, y esto para todos los ángulos acimutales
- b) El mayor aumento de la Reflectancia se encuentra en el plano principal descrito entre el acimut del Sol y el cenit
- c) El aumento del ángulo cenital solar tiende a aumentar la Reflectancia.

Como podemos observar, cada una de estas propiedades depende fuertemente de las propiedades fisiológicas y morfológicas del entorno, así como de sus propiedades ópticas. En estos momentos se desarrollan estudios que tienden

a la identificación y determinación del papel que juega cada una de estas propiedades y nosotros profundizaremos en un futuro en este estudio, por la disponibilidad de este tipo de medidas experimentales, presentes en nuestra base de datos.

### **3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL**

1. INTRODUCCION

2. DESCRIPCION TECNICA

3. EL PROGRAMA DE MEDIDAS

4. INSTALACION Y OPERACION. CAMPAÑAS DE SABINAL  
Y VELETA

## 1. INTRODUCCION

Como se decía en el capítulo primero de esta memoria, en los últimos años ha crecido la demanda de datos y medidas de radiación solar, principalmente sobre superficies inclinadas y con una distribución temporal y espacial lo más amplia posible. Sin embargo esta disponibilidad no es siempre fácil de conseguir pues la realización de las campañas de medida implica, normalmente, superar dos grandes problemas: un elevado grado de dificultad técnica y un alto coste económico.

Es verdad que la instrumentación ha ido evolucionando rápidamente en los últimos años, permitiendo estaciones de medidas más capaces y completas. El otro factor, quizás el más delicado, ha impedido la proliferación de medidas sobre la distribución angular de la radiancia del cielo, así como de la irradiancia y, en general, de medidas de los distintos flujos radiativos sobre superficies inclinadas. Así, el factor económico unido a la práctica inviabilidad de realizar tales medidas manualmente a partir de instrumentos más simples y, por ello, más baratos

condicionan dicha disponibilidad. Por todo ello se imponía, y podríamos decir que actualmente también se impone, el diseño y desarrollo "personalizado", es decir, en función de objetivos concretos y bien definidos, la construcción del dispositivo experimental bajo unas condiciones que se podrían denominar "de artesanía".

Con esta situación general, nació en 1969, en el Instituto Meteorológico Suizo (Zürich), un proyecto cuyo único objetivo era establecer una extensa base de datos experimentales. En su fase preliminar se desarrolló un equipo instrumental que ha ido modificándose a lo largo de los años. Se pretendía que tal equipo instrumental fuese autónomo, dentro de unos límites precisos, que recogiera medidas de gran cantidad de flujos radiativos, que fuera transportable y que todos los instrumentos midiesen de una manera coordinada (Bener et al., 1973; Valko et al., 1980).

Desde 1979 hasta ahora se han realizado diversas campañas de medida en diferentes lugares de Europa, desde los 0 a los 3250 metros sobre el nivel del mar, incluyendo las diferentes estaciones del año y una gran variedad de condiciones de cielo (Valko et al., 1989a y b). Con tal cantidad de datos se pretende emplear los registros de radiancia del cielo, de radiancia reflejada y de irradiancia global para estudiar las diversas soluciones empíricas de las funciones de distribución. Asimismo podrían estudiarse los resultados a la luz de los distintos parámetros atmosféricos y de la geometría angular.

Algunos resultados preliminares ya han sido publicados a lo largo de estos años. Tal es el caso de los trabajos de Valko (Valko et al., 1980; Valko, 1980, 1982 y 1986a y b), y las publicaciones de la WMO (WMO, 1981) o los más recientes de nuestro grupo de investigación (Olmo et al., 1990 y 1991; Vida et al., 1992; Vida et al., 1996; Foyo et al., 1996). Otros autores han utilizado también parte de estos datos para comparar con otras medidas o para realizar

comprobaciones de modelos de distribución (Gueymard, 1986; Page, 1986; Bourges, 1986; Kittler, 1986; Kittler et al., 1993). El comité "Average Sky as a Standard" de la CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) ha considerado también estos resultados en el trabajo presentado por Matsuura (1985).

A continuación describiremos el equipo instrumental utilizado a lo largo de las diversas campañas y que es la base de nuestro trabajo.

## **2. DESCRIPCION TECNICA**

### **2.1) La Estación Móvil**

El centro de operación automática de la estación móvil se localiza en una caravana, montada sobre un chasis de doble eje, que se equilibra horizontalmente mediante un sistema hidráulico. Totalmente cargada su peso es, aproximadamente, de cuatro toneladas, con unas dimensiones externas de 6.0 x 2.3 x 2.6 m. Las paredes de las ventanas están especialmente aisladas para conseguir un acondicionamiento de aire en su interior, el cual es necesario para el correcto funcionamiento del sistema electrónico y de la unidad central del ordenador. Un compartimiento especial, accesible desde el techo, que se eleva hidráulicamente, se reserva para colocar el seguidor solar. El sistema se alimenta eléctricamente a través de la red general ó, si es necesario, por un generador móvil instalado en la parte superior de un camión (3 x 380v., 10 A.). Una primera impresión del sistema situado en Sabinal puede observarse en las fotografías de la figura 1.

### **2.2) Instrumentos**

La estación móvil (que denominaremos a partir de ahora *MORAS* = *MO*bile *R*adiation *A*cquisition *S*ystem) ha sido ya descrita en profundidad por Bener (Bener et al, 1973) y objeto de numerosos estudios e intercomparaciones

(Heimo et al, 1976; IEA Task IV Report, 1980). Aunque no se empleó toda la instrumentación de que dispone en las campañas de Sabinal y Veleta, haremos una descripción general del sistema, con especial énfasis en la instrumentación que sí se empleó en estas campañas.

### **2.2.1) El Seguidor Solar**

Este sistema sigue el principio del montaje ecuatorial controlado por el reloj de cuarzo de la estación. Si se ajusta para la latitud local, la declinación solar y el tiempo solar, el motor recibe un pulso cada segundo enviado por el sistema central del ordenador. El ajuste se sigue mediante la ayuda de un sensor de cuatro cuadrantes montado en el seguidor, el cual corrige el ángulo horario y las posibles desviaciones en la declinación. En este sistema son posibles dos modos de operación: el modo activo, cuando el Sol está completamente despejado, y el modo pasivo, si está cubierto por nubes. El cambio que se produce entre los dos modos de operación es automático. La intensidad umbral entre ambos modos puede ajustarse de manera que actúe un modo u otro dependiendo del estado del cielo. En el modo pasivo el seguidor se gobierna directamente desde el ordenador central mediante un programa de cálculo que introduce coordenadas astronómicas. En la plataforma del seguidor solar pueden instalarse varios instrumentos de medida como son un radiómetro absoluto, un espectrorradiómetro, un fotómetro y un piranómetro. El sistema completo se coloca, normalmente, fijo a una de las dos plataformas móviles del compartimiento trasero de la caravana. Para condiciones de trabajo especiales este sistema puede situarse en cualquier lugar (como el tejado de un edificio, por ejemplo) con la única limitación de la longitud de los cables, la cual se establece en 100 metros para un transporte óptimo de la señal. En la figura 2 puede observarse el seguidor solar extraído en el techo de la caravana, así como un detalle de los instrumentos por él soportados.

### 2.2.2) El Radiómetro Absoluto

El radiómetro absoluto integrado en el MORAS se encarga de medir la radiación directa con incidencia normal y es, a decir de sus diseñadores, uno de los instrumentos más importantes y en cualquier caso el mejor de los que operan en el sistema móvil. Ha sido desarrollado en el Centro Radiométrico Mundial en Davos (WRCD) -Suiza- y es uno de los miembros de la nueva familia de radiómetros de cavidad activa absoluta (PMO4). Una descripción detallada del mismo puede obtenerse en Bener et al., 1973. Nosotros nos limitaremos a destacar las principales características: posee un doble cono invertido, eléctricamente calentado, de tal forma que se mantiene una diferencia de temperatura entre la parte irradiada y la cavidad calentada. La apertura, que subtiende 4.7 grados de arco, se abre y se cierra alternativamente. La diferencia entre las dos potencias de calentamiento eléctrico, multiplicadas por los diferentes factores de calibración, da la medida de la irradiancia del sol con un error estimado del 0.2%. La calidad de esta familia de instrumentos ha permitido, de hecho, definir la nueva Referencia Radiométrica Mundial (WRR - World Radiometric Reference), actualmente adoptada por la OMM, cuya exactitud es de un 2.2% superior a la antigua referencia IPC58.

Para estudiar el comportamiento de la turbiedad atmosférica se dispone de tres filtros actinométricos y un filtro de cuarzo delante de la abertura del radiómetro. Por simple rotación, gobernada por el *Programa de Medida* del que se hablará más adelante, se obtiene la siguiente composición:

- Posición 1 : sin filtro, absorción de cuerpo negro.
- Posición 2 : filtro OG1. Transmisión: 525 - 2400 nm.
- Posición 3 : filtro RG2. Transmisión: 610 - 2400 nm.
- Posición 4 : filtro RG8. Transmisión: 730 - 2800 nm.
- Posición 5 : filtro de cuarzo. Transmisión: 310 - 4000 nm.

El intervalo de longitudes de onda de estos filtros se determinaron, de forma muy precisa, mediante un espectrorradiómetro del Instituto Tecnológico de Zürich. Desgraciadamente, estos filtros poseen una dependencia conocida con la temperatura, la cual es importante debido a los cambios de temperatura ambiental y la duración del período de irradiación durante las medidas, que pueden desviar significativamente la posición de los límites de transmisión de los filtros. Este hecho ha de tenerse en cuenta cuando se calcule la turbiedad con el método de los filtros actinométricos (Schüepp, 1948; Valko, 1961).

### 2.2.3) El Espectrorradiómetro

El espectrorradiómetro que incorpora el MORAS es un instrumento prototipo desarrollado también en el WRCD (Valko et al., 1980, WMO, 1981). Ya que este instrumento no se empleó en las campañas de Sabinal y Veleta, no daremos en esta memoria más detalles. Una descripción detallada del mismo así como resultados de su empleo y posteriores referencias pueden encontrarse en Heimo, 1984. Tampoco hablaremos en esta memoria del *Fotómetro D-500* que se emplea, debido a su simplicidad y estabilidad, para comprobar los resultados del espectrorradiómetro en la banda de los 500 nm.

### 2.2.4) El Mástil Telescópico

Con el fin de realizar medidas de radiación reflejada, los instrumentos deben ser elevados a una altura conveniente por encima del suelo. Para este propósito se emplea un mástil telescópico que, a través de un sistema hidráulico, puede alcanzar una altura de hasta 10 metros sobre el nivel del suelo. Una visión detallada del mástil, la cruz del mástil y los instrumentos en ella instalados puede observarse en la serie de fotografías de la figura 3 y figura 4, tomadas también durante la campaña de Sabinal. La cruz del mástil posee un sistema mecánico-electrónico de autocorrección sobre la horizontal de tal manera que se corrige automáticamente la horizontalidad cuando las condiciones atmosféricas

-fuerte viento- son capaces de desviarlo. No obstante, la máxima desviación permitida sobre la horizontal es de 7.5 grados. La instrumentación situada en los extremos de la cruz puede rotar sobre su eje horizontal y vertical, en virtud de los motores y mecanismos electrónicos que incorpora, y alcanzar todas las inclinaciones y orientaciones posibles del hemisferio inferior. Aunque en Sabinal y Veleta se empleó una cruz con dos brazos, el diseño permite situar hasta cuatro brazos con instrumentos de medida.

### 2.2.5) Piranómetros

La estación móvil cuenta con siete piranómetros desarrollados igualmente en Davos. Estos instrumentos miden la radiación global incidente sobre una superficie plana. Están contruidos con un sistema de termopila (contactos bimetalicos) que se protegen de los efectos de convección y del infrarrojo mediante dos cúpulas de cristal (WG8, Schott).

Los primeros cuatro piranómetros están montados sobre un dispositivo (que denominaremos *flor*) dotado de rotación en torno al eje vertical. Asimismo, cada unidad, puede rotar en torno al eje horizontal de tal manera que se puede completar un barrido de todo el hemisferio superior. Cada 20 segundos cambia la posición de estos cuatro piranómetros, consiguiendo en 6 minutos y 20 segundos un total de 77 valores de la irradiancia global (77 puntos ó posiciones distintas). La figura 5 (superior) presenta la *flor de piranómetros* y el mecanismo que permite su movimiento.

El quinto instrumento está colocado en uno de los brazos del mástil telescópico. Este censor mide la irradiancia global reflejada. Un barrido completo consta también de setenta y siete medidas, aunque el intervalo temporal es de 25 minutos y 20 segundos, debido a que sólo hay un instrumento.

El sexto está montado sobre el sistema seguidor solar y mide la irradiancia global que llega a una superficie orientada normalmente a la dirección del haz solar (una medida cada 20 segundos, con un total también de 77 medidas en cada barrido).

El séptimo y último piranómetro mide en posición horizontal, (figura 6 superior) aunque puede colocarse en cualquier otra dirección. El interés de la posición horizontal radica en sus posibles comparaciones con las redes de piranómetros horizontales. Además, podemos comprobar los resultados de la *flor* de piranómetros si consideramos su posición horizontal.

Como se ha comentado, todos los piranómetros realizan una medida/rotación cada 20 segundos. Este tiempo es el resultado del compromiso entre un tiempo suficiente para superar la constante de tiempo de este tipo de instrumentos (aproximadamente 3 segundos) y el barrido más rápido posible guiado por los motores de avance discreto. Las posibles fuentes de error en las medidas con piranómetros son: temperatura, ángulo de incidencia, posición de los instrumentos, la no linealidad de la respuesta, absorción espectral, efectos de convección, etc. En cualquier caso, no se puede suponer una precisión en las medidas mejor que un 2-3%, teniendo en cuenta todas estas posibles causas de error.

#### 2.2.6) Fotómetros

La estación móvil está equipada con cinco fotómetros. Cada uno de ellos subtende un **ángulo completo de visión de 5 grados** (lo que equivale a un Campo de visión de  $2.5^\circ$  ( $=0.006$  sr)). A cada uno puede colocársele un sistema giratorio de cinco filtros que pueden cambiarse con facilidad y de manera automática. El primero de estos filtros corrige la curva de absorción espectral del fotodiodo, obteniéndose así una curva de respuesta más o menos plana dentro del

rango de sensibilidad del diodo, lo que permite posibles comparaciones, al menos de forma relativa, con instrumentos tales como el radiómetro absoluto o los piranómetros. Los tres filtros siguientes son filtros interferenciales (368nm, 500 nm, 778 nm) con un ancho de banda de unos 20 nm y la última posición del sistema de filtros rotantes no contiene ningún tipo de filtro. Esta medida puede ser importante cuando se trabaje en la línea de futuras aplicaciones fotovoltaicas. Durante las campañas de Sabinal y Veleta se tomaron medidas solo con el filtro corrector.

Los primeros cuatro fotómetros están montados en una *flor* similar a la descrita para los piranómetros (figura 5 inferior), excepto que los instrumentos están más cerca unos de otros debido al menor ángulo de visión, que impide que puedan "verse" unos a otros. Las medidas pueden tomarse más rápidamente, debido a que la constante de tiempo de los diodos es más pequeña que la de los piranómetros. Cada barrido del cielo dura, en el programa de medida original, 2 minutos y 10 segundos durante los cuales se toman 121 medidas. Esta cantidad fue aumentada posteriormente, incluyendo nuestra campaña, incrementando el número de medidas realizadas en el cinturón más bajo del cielo para estudios de horizonte. Actualmente cada barrido dura 2 minutos y 48 segundos, tomándose un total de 172 medidas en intervalos de 4 segundos.

El quinto diodo está montado sobre uno de los brazos del mástil telescópico, siguiendo el mismo recorrido que el piranómetro situado en el extremo opuesto y, al igual que éste, realiza una medida cada 20 segundos.

Ya que no se realizó un calibrado absoluto de los fotómetros, se estimó un valor teórico a partir de ajustes ópticos, las curvas de sensibilidad de los diodos y las curvas de transmisión del filtro corrector. Los factores de escala obtenidos se vuelven a comparar mediante integración de los valores de radiancia del

hemisferio superior y comparando los resultados con la radiación difusa medida en la superficie horizontal por el séptimo piranómetro. Cálculos realizados en el Instituto Meteorológico Suizo, (Brusa, 1983, Brusa et al, 1981, Fröhlich et al., 1978, Heimo, 1984), muestran que la parte perdida del espectro en la región infrarroja representa un 10-20% de la respuesta total, dependiendo principalmente del contenido de vapor de agua en la atmósfera, (Heimo, 1984). Según este mismo autor, los factores de calibrado deducidos de esta manera pueden considerarse correctos y proporcionarían valores absolutos de radiancia útiles para otros estudios. En la Tabla 1 presentamos un ejemplo de los factores de calibración para los fotodiodos (Heimo, 1984). En la figura 7 se muestra la sensibilidad de los fotómetros calculada a través de las curva de sensibilidad de los diodos y las curvas de transmisión del filtro corrector.

Dh/Gh	Altura Solar (°)	Valor Integrado (W/m <sup>2</sup> )	Valor Medido (W/m <sup>2</sup> )	Factor de Calibrado
0.12	39.8	66.1	76.4	1.16
0.19	16.4	37.8	43.8	1.16
0.20	64.6	160.2	177.9	1.11
0.31	22.9	78.0	92.2	1.18
0.41	41.1	217.4	238.0	1.10

**Tabla 1:** Comparación de la irradiancia difusa sobre superficie horizontal integrada y medida. (Heimo, 1984)

Aunque no se realizó un calibrado absoluto de los fotómetros, dado el tipo de análisis que hemos realizado esta circunstancia no nos afecta de forma significativa. En este análisis hemos centrado nuestro interés en distribuciones relativas de radiancia del cielo, teniendo además la precaución de contrastar las medidas de los cuatro fotómetros dirigidos hacia un mismo punto de forma periódica y comprobando la coincidencia dentro de un margen.

### 2.2.7) Parámetros Meteorológicos. Cámara fotográfica.

En las proximidades de la estación se miden continuamente la temperatura, la humedad y la presión mediante sensores electrónicos convencionales. Durante las medidas se tomaron fotografías del cielo con una cámara NIKON F2S equipada con un objetivo *ojo de pez* con 180 grados de campo de visión (figura 6 inferior). La cámara se coloca en posición horizontal, de tal manera que registre todo el hemisferio celeste con el mismo ángulo que el piranómetro horizontal. Estas fotografías constituyen una información muy relevante en la evaluación final de resultados. Aunque es una técnica aún en estado de desarrollo, estas fotografías abren el camino a un proceso de digitalización para el estudio preciso de la influencia de las nubes en los valores de radiación difusa (Valko et al., 1989a). Los resultados de este proceso podrían ser importantes cuando tratamos de obtener modelos en el campo de la irradiancia. De todos modos, la determinación de las características ópticas del objetivo y la sensibilidad espectral de la película fotográfica empleada, constituye un problema de difícil solución.

### 2.3) Calibrados.

Para obtener resultados fiables, es necesario distinguir entre dos tipos de calibrados. Los circuitos electrónicos constituyen, ciertamente, la parte más variable en los canales de medida. De hecho, en cada caso, tenemos diferentes niveles de amplificación enlazados por diferentes tipos de cables, lo que representa diferentes impedancias en la red de comunicaciones.

El primer nivel de amplificación se localiza, normalmente, en la inmediata proximidad del instrumento, es decir fuera, por lo que temperatura y efectos externos como mala estabilidad de la red ó estaciones de radiodifusión deben tenerse en cuenta a la hora del calibrado. Esto se resuelve usando un procedimiento especial de simulación controlada de la señal del instrumento: al

ordenador se le dan las características de los sensores y envía las señales adecuadas (normalmente en torno a 100), cubriendo su rango dinámico al convertidor analógico-digital. Las señales se transmiten entonces a la posición más cercana posible del censor, el cual no está conectado. Un voltímetro digital lee los voltajes en este punto y los transmite de vuelta al ordenador en forma digital. La respuesta de toda la cadena de medida se lee como bajo condiciones normales de operación. Por simple regresión entre los dos conjuntos de datos se calculan los diferentes factores de escala, habiéndose integrado todos los posibles efectos en el procedimiento (por ejemplo, la no linealidad de uno de los componentes).

Este procedimiento de calibración se repite regularmente durante una campaña para tener en cuenta los posibles efectos derivados de grandes períodos temporales de funcionamiento. Cuando se realizan comparaciones con las distintas campañas se tiene una idea del estado real del sistema, de tal modo que cualquier cambio cualitativo se detecta inmediatamente. Es evidente que este procedimiento es válido en tanto en cuanto el sistema se mantenga en buenas condiciones, aunque no es muy práctico para la localización de componentes defectuosos. Durante la campaña de Sabinal, debido a la alta humedad durante todo el período y también a la salinidad del ambiente, los componentes electrónicos sufrieron bastante, siendo necesario un control exhaustivo de los mismos.

Un segundo tipo de calibrado es el calibrado de cada instrumento en concreto y se realiza de forma diferente. Cada unidad se compara con el estándar WRCD como mínimo una vez cada dos años. Durante las campañas se realizan rutinariamente comparaciones internas para seguir la estabilidad de las razones de sensibilidad que hayan podido perjudicarse durante los períodos de transporte e instalación:

\* El radiómetro absoluto se compara directamente con el estándar PMO2 de Davos, realizando un test cada cinco años durante las Comparaciones Pirheliométricas Internacionales. Del mismo modo, es posible actualmente desarrollar una caracterización de la cavidad sobre bancos ópticos empleando tecnología láser, un método particularmente útil cuando se necesitan valores de alta precisión, por ejemplo para experimentos desde satélites.

\* Los piranómetros son mucho más delicados de calibrar. El calibrado se realiza normalmente comparando directamente, midiendo en posición horizontal, con el estándar WRCD. Este procedimiento requiere que las condiciones atmosféricas sean muy estables, las cuales no se encuentran cuando se desea, así como un cuidadoso procedimiento de instalación. Normalmente se producen numerosos efectos que perturban las medidas, tales como la dependencia con la temperatura, el efecto coseno (representado para dos días en la figura 8), la no horizontalidad de las termopilas, la convección, etc. Como el método se usa sólo para unas específicas distribuciones espectrales y espaciales de radiación difusa, además de un limitado rango de intensidad directa, no se pueden excluir a priori una posible no linealidad de la respuesta para otros rangos de intensidad. La tolerancia mejor que usualmente se acepta es un error cuadrático medio del 2-3%, valor que es ciertamente optimista en el caso de una estación móvil con instrumentos rotantes.

Del calibrado del espectrorradiómetro no hablaremos por ser un instrumento que no empleamos en nuestra campaña, y con respecto al calibrado de los fotómetros, ya ha sido comentado en 2.2.6.

#### 2.4) Sistema de adquisición de datos. El ordenador

La estación móvil está equipada con un mini-ordenador destinado a la adquisición, organización, control y primera evaluación de los datos (figura 9). Su configuración es la siguiente:

- Un mini-ordenador PDP8/E (DEC - Digital Equipment Corporation) con 32 K de memoria.
- Un procesador aritmético para la aceleración en el cálculo.
- Dos unidades de cintas magnéticas (DEC).
- Una unidad de discos (RK05, 1 Mbyte).
- Tres interfases digitales Entrada/Salida.
- Seis interfases digitales de entrada.
- Un convertidor multiplexor analógico/digital para 16/32 canales.
- Un convertidor digital/analógico (1 canal).
- Un reloj de cuarzo con salida digital.
- Un terminal de campo para comprobaciones "in situ".
- Una impresora lineal (600 líneas/minuto).
- Dos interfases para los motores de avance discreto.

Los instrumentos están conectados a la estación mediante un cable de 100 metros para la transmisión de señales en ambas direcciones. Asimismo existe un panel central, enlace entre el ordenador y el sistema de sensores, de forma que se visualiza en cualquier instante el estado y posición de los instrumentos, así como su operatividad. La movilidad del sistema requiere un alto grado de robustez del mismo ya que la precisión en los resultados finales será sólo tan buena como lo sea la precisión de la peor parte de la cadena en el proceso de medida. La estación está en continuo desarrollo y puede admitir otros sistemas diferentes de medida. Actualmente, el programa de medidas con el MORAS se encuentra temporalmente suspendido, en espera de una modernización del sistema.

### **3. EL PROGRAMA DE MEDIDAS**

Al comienzo de cada serie de medidas todos los instrumentos deben ser colocados en su posición cero inicial. Para tal fin, mediante el panel de control de cada sensor ó sistema de sensores se realiza este ajuste inicial y se comprueba si es necesario algún tipo de reparación (figura 10). Si se detecta alguna anomalía de funcionamiento, el instrumento en cuestión puede ser anulado directamente desde el panel central sin que esto interfiera en el resto del sistema de medidas.

La primera versión del programa de medidas fue desarrollada por EPS (Elektronische Prozesssteuerung in Wil), tras el análisis desarrollado por la WRCD. Posteriormente fue ampliado, mejorado y actualizado por el equipo que gestiona el MORAS, al tiempo que los métodos de medida también iban mejorándose.

En un primer paso el programa lee todas las tablas de interrupciones y de tiempo que contienen la información necesaria, y sus comandos, para realizar medidas en intervalos de cuatro segundos. Una vez que todos los pasos han sido realizados, automáticamente se pone en funcionamiento el programa de transferencia para la organización y almacenado de los datos en la unidad de discos.

#### **3.1) Realización de las medidas**

##### **3.1.1) Seguidor solar**

El seguidor solar se controla, tras cada serie de medidas, a través de un espejo semi transparente. Cuando se desajusta a causa de los cambios de temperatura se anula electrónicamente.

### 3.1.2) Radiómetro absoluto

Como ya se ha dicho, se realiza una medida cada 20 segundos, cerrándose y abriéndose alternativamente la abertura, dando una medida de la irradiancia cada 64 segundos. Esta irradiancia se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$I = K * [I(o,n) - (I(c,n+1) - I(c,n-1)) / 2.0]$$

en donde:

I =	irradiancia en W/m <sup>2</sup>
I(o,n) =	potencia eléctrica medida en estado abierto
I(c,n) =	potencia eléctrica medida en estado cerrado
K =	factor de calibrado (Bener et al, 1973)

Cuando las condiciones atmosféricas son de cielo totalmente despejado los filtros se colocan delante de la abertura, para evaluaciones de turbiedad. La secuencia es:

c, 1, c, 2, c, 3, c, 4, c, 5, c, 1, c, 2, c, 3, ...

donde "c" representa *cerrado* y los números la elección del filtro. Para cielos con nubes, cuando son imposibles los cálculos de turbiedad, la secuencia es:

c, 1, c, 1, c, 1, ...

### 3.1.3) Piranómetros

Todos los piranómetros realizan una medida cada veinte segundos. Los cuatro piranómetros que forman la *flor* siguen, por supuesto, el mismo patrón de rotación aunque con un cambio de 90 grados en acimut de un censor a otro. De esta forma el barrido es cuatro veces más rápido que si se realiza con un solo instrumento. En la figura 11 se ilustra el patrón seguido por los piranómetros y destacado la senda del primero de ellos.

La quinta unidad montada en el mástil telescópico posee un patrón de rotación diferente, siendo cuatro veces más lento que los anteriores para completar el mismo barrido de 77 puntos de medida. Los últimos dos piranómetros no son móviles y miden cada 20 segundos.

#### 3.1.4) Fotómetros

En el programa original, los cuatro fotómetros montados en la *flor* realizaban una medida cada cuatro segundos, siguiendo un patrón similar al de los piranómetros (figura 12). En cada serie se realizaban cuatro barridos completos, con un minuto de parada entre cada uno para rotar los filtros y ajustar las amplificaciones. En total se conseguían 121 puntos en 132 segundos. En Febrero de 1983, el programa de adquisición se modificó para obtener barridos del cielo más detallados a lo largo de la franja más baja del cielo, moviéndose entonces los cuatro fotómetros a elevaciones desde 2 hasta 12 grados, a diferentes intervalos de acimut, lo cual proporcionó entre 60 y 75 puntos adicionales de medida, dependiendo de la serie. Concretamente el esquema de elevaciones que se empleó en Sabinal y Veleta fue:

0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 36, 54, 72 y 90

a intervalos de acimut de 15° para algunas elevaciones y 18° para otras, obteniéndose cuatro barridos completos en cada serie de medidas. La figura 13 presenta este nuevo patrón.

El quinto instrumento, montado en la cruz del mástil, sigue el mismo patrón de medida que su piranómetro opuesto, con 180 grados de desviación en acimut. Del mismo modo, las obligaciones mecánicas del mástil y la constante de tiempo del piranómetro fuerzan al fotómetro a tomar una medida cada veinte segundos.

### **3.1.5) Parámetros meteorológicos. Cámara fotográfica**

En la mitad del tiempo de duración de cada serie se mide la temperatura, la humedad relativa y la presión. Se toma solo una foto en el punto medio de cada serie si las condiciones atmosféricas son de cielo despejado. Cuando el cielo presenta nubes, esto es, cuando el radiómetro absoluto mide sin filtros, se realizan tres fotos repartidas igualmente en el intervalo temporal, para conseguir una mejor información sobre las variaciones en el campo de radiación.

### **3.2) Programa de Transferencia**

Para leer los valores contenidos en la memoria de ordenador, se emplea un programa de transferencia el cual organiza los datos, decodifica los diferentes indicadores y almacena toda la información en la unidad de disco siguiendo un formato específico. Al final de cada día todos los ficheros se transfieren a cintas magnéticas.

## **4. INSTALACION Y OPERACION.**

### **LAS CAMPAÑAS DE SABINAL Y VELETA**

En general, en la organización de las diferentes campañas de medida realizadas con el MORAS se puso especial cuidado a la hora de elegir los lugares de medida. Hay que tener en cuenta que pueden existir muchas interferencias externas que afecten a la estación móvil (Heimo, 1984). No obstante, si no son necesarias medidas especiales, se pueden tomar como buenos los siguientes criterios:

Horizonte despejado, para facilitar la evaluación de la interfase suelo-atmósfera en las medidas de irradiancia global-difusa.

Ausencia de obstáculos en las cercanías de la estación, que afectarían los resultados desde el punto de vista de reflexiones exageradas (blanco de edificios, árboles, etc.).

El albedo debe ser tan homogéneo como sea posible, observando la constitución del suelo para evitar patrones de reflexión complicados ó combinados. Por ello, lugares como zona marítima, desierto, zonas nevadas, cimas de montañas, etc..., son ideales.

Por otro lado, desde el punto de vista de esta estación móvil, el lugar ha de ser accesible para un camión con remolque en gran variedad de condiciones atmosféricas. El acceso a la red eléctrica, teléfono y otras facilidades es, por supuesto, sin condicionante desde luego muy aconsejable. Digamos también que este lugar debe estar lejos del alcance de visitantes curiosos o animales, por su incidencia en las medidas.

Siguiendo estos criterios generales, y con unos objetivos determinados, se eligió finalmente para la campaña española la zona marítima costera de Sabinal, desierta en su mayor parte, con el único obstáculo cercano del Faro de Punta Sabinal y una zona montañosa en la lejanía al Noroeste. Por otro lado, la zona de alta montaña del Pico del Veleta presentaba la facilidad del acceso por carretera (la carretera más alta de Europa), y la ausencia de nieve y condiciones climáticas extremas durante el período de medidas.

#### **4. CAMPAÑAS DE SABINAL Y VELETA**

1. INTRODUCCION
2. SELECCION DE LA BASE DE DATOS
3. PARAMETROS METEOROLOGICOS.  
Temperatura, Humedad y Presión
4. VARIACION DIARIA DE LA IRRADIANCIA DIRECTA  
Medidas espectrales y no espectrales
5. VARIACION DIARIA DE LAS CONDICIONES DE TURBIEDAD  
Análisis de TL, Kt, Kd y K
6. VARIACION DIARIA DE LA IRRADIANCIA GLOBAL
7. ANALISIS DE LA DISTRIBUCION ANGULAR  
DE LA RADIANCIA E IRRADIANCIA DEL CIELO
8. RADIANCIA DEL CIELO. ASPECTOS ESTADISTICOS
9. ANALISIS GRAFICO DE LA RADIANCIA DEL CIELO:  
DIFERENCIAS ENTRE SABINAL Y VELETA
10. RADIANCIA EN EL CENIT  
Aspectos estadísticos y análisis gráfico
11. RADIANCIA CIRCUNSOLAR  
Aspectos estadísticos y análisis gráfico
12. ANALISIS EN FRECUENCIAS DE LA BASE DE DATOS

## 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo vamos a realizar un estudio comparativo minucioso y detallado de las campañas de Sabinal y Veleta. Este análisis va a realizarse desde un punto de vista estadístico y también gráfico, presentando la evolución diaria de las diferentes componentes de la radiación solar y los parámetros meteorológicos que se midieron durante dichas campañas. Con este estudio pretendemos dar una visión global y general del comportamiento y evolución de la radiación solar para los días despejados durante la campaña de Sabinal y Veleta, de forma que nos sirva como punto de partida para los posteriores estudios, que presentamos en esta memoria.

Las medidas sistemáticas de radiancia solar para los  $4\pi$  esterorradianes, suplementadas con medidas de irradiancia mediante pirheliómetro y piranómetros son esenciales para el desarrollo y comprobación de modelos empíricos y teóricos de irradiancia global y difusa sobre superficies inclinadas, para diferentes horas

del día y épocas del año, así como bajo diferentes situaciones de cubierta nubosa y turbiedad atmosférica. Aunque tales medidas son de gran interés desde el punto de vista de la ciencia atmosférica básica, lo son también en otros terrenos y disciplinas como, por ejemplo, aplicaciones prácticas de ingeniería, arquitectura, iluminación, aprovechamiento de energía solar, modelización del comportamiento de cubiertas vegetales, etc..

La disponibilidad de datos fiables y, sobre todo, adecuados para los diferentes propósitos científicos y prácticos, ha sido durante mucho tiempo escasa ó imposible. Este hecho, aunque cada vez en menor medida, es aún hoy tangible, por lo que campañas como las desarrolladas con el MORAS adquieren una especial relevancia, tanto por la calidad y tecnología de su instrumentación como por el carácter móvil de la estación.

Los lugares elegidos en la campaña española (Sabinal y Veleta) ofrecen diferencias entre sí, pero mínimas desde el punto de vista del horizonte despejado para los instrumentos de medida. La selección se hizo buscando diferencias de elevación, pero tratando que los efectos locales de horizonte fuesen muy semejantes. En esta selección jugaba un papel importante la proximidad geográfica de los emplazamientos con gran diferencia de altura. Evidentemente, ambos lugares se ajustaban a nuestras exigencias.

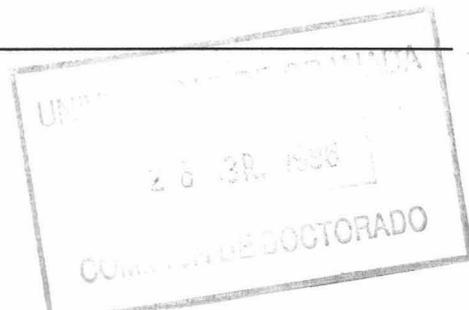
Además, presentan un gran interés añadido desde el punto de vista científico, en tanto en cuanto uno es un emplazamiento de alta montaña (Veleta) y el otro una zona a nivel del mar (Sabinal) con acusadas diferencias de condiciones climáticas y medioambientales. Estas diferencias afectarán a las distribuciones de las distintas componentes de la radiación solar, que analizamos a continuación.

**2. SELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS**

Atendiendo a la información que se tiene sobre cubierta de nubes durante la campaña de Sabinal y Veleta, se han elegido aquellos días ó parte de días que presentaron una cubierta nubosa cero. Esta selección dio lugar, en una primera etapa, a la base de datos "en bruto" con la que se desarrolla el presente trabajo y que resumimos en las Tablas 1 y 2. En ellas se reflejan el número de día y las series de ese día que cumplen el requisito anterior.

DÍA	SERIES	TOTAL
148	2,3	2
149	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,17	14
150	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18	18
152	1,3,4,5,6,7,8,9,11,17	10
153	6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19	14
154	1,2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16	15
162	19,20,21,22	4
163	3,4,11,12,15,16,17,18,19,20,21	11
165	8,9	2
166	1,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,22,23	21
168	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	12
169	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	21
170	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	21
171	7,8,9,10,13	5
172	1,2,3,4,5,6,7,15	8
173	1,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12	11
175	7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20	14
17	<b>SABINAL</b>	<b>203</b>

Tabla 1: Días y series seleccionadas en Sabinal con cubierta nubosa cero.



En total obtenemos 17 días en Sabinal y 12 días en Veleta que arrojan un total de 203 series de barridos en Sabinal y 166 en Veleta. En el caso del hemisferio superior, para la *Radiancia del cielo* estas series se traducen en 853 barridos del cielo (scanes) para Sabinal y 670 barridos para Veleta.

DÍA	SERIES	TOTAL
184	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12	11
185	10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23	14
186	18,19,20	3
188	7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22	16
189	3,4,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22	19
190	1,2,3,4,5,6,8,10,11,12,13,14,15,16,18,19,20,21	18
192	1,2,3,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,18,19,20,21	19
193	1,2,3,4,5,6,7,8,9	9
194	20,21,22	3
195	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24	24
196	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14,15,16,17,18,19,20,22,23,24,25	23
197	1,2,3,4,5,6,9	7
12	VELETA	166

**Tabla 2:** Días y series seleccionadas en Veleta con cubierta nubosa cero.

Estos números resultan de la distinción entre 162 series normales y 41 series tipo "ID" en Sabinal y 160 series normales y 6 series tipo "ID" en Veleta. Recordemos que las series normales están constituidas por 4 barridos cada una, mientras que las series ID están constituidas por 5 barridos. Durante estos barridos "ID" se registraron un mayor número de datos, repitiendo las posiciones del cielo en las que se tomaban datos, para luego promediar en el análisis informático de los mismos.

Si expresamos esta extensa base de datos en términos de **datos puntuales** de *Radiancia del cielo*, obtenemos **163.936** datos en Sabinal y **117.760** datos puntuales en Veleta. En el caso de la *Irradiancia Global*, el número de datos puntuales es menor, por ser menor el número de datos que componen cada barrido, como ya se ha visto en el capítulo 3. Para el hemisferio inferior el número de barridos se reduce al número de series por haberse tomado un barrido por serie. También es menor el número de datos por contener menos valores cada barrido.

Es necesario indicar también que la hora de comienzo de cada serie es distinta de un día a otro aunque con ligeras variaciones, ya que el sistema se iniciaba de forma manual y no siempre se realizaba esta operación a la misma hora, sino que dependía de la persona encargada. No obstante, se puede considerar como de 20 a 24 las series tomadas durante un día sin incidencias especialmente reseñables.

El número de barridos realizados dentro de cada serie, así como su duración viene condicionado, como se vio al comentar el dispositivo experimental, por la magnitud que se está midiendo y por el instrumental empleado. En la Tabla 3, se indica la hora de comienzo (TSV) del primer barrido dentro de la primera serie de datos de los días seleccionados que figuran en las Tablas 1 y 2.

Con el objeto de caracterizar nuestra base de datos, y eliminar casos dudosos ó series con datos erróneos de alguna de las variables que se midieron durante la campaña, se ha realizado un estudio y filtrado de la base "en bruto" mediante la representación gráfica de alguna de estas variables y el empleo de paquetes estadísticos. En concreto, la variación diaria de la *Irradiancia Directa* nos ha permitido obtener una impresión visual del carácter nuboso o despejado de cada uno de los días, y la localización de errores en las medidas. De esta

forma, junto con las fotografías "ojo de pez" de los días seleccionados a partir del fichero de nubes realizamos una segunda selección, eliminando los barridos de datos erróneos por fallo del sistema u otras causas. Igualmente, se analizaron diferentes índices para caracterizar el estado de turbiedad de la atmósfera.

DIA	SERIE	HH.MM.SS	DIA	SERIE	HH.MM.SS
148	2	09.29.10	184	1	11.36.37
149	2	07.17.03	185	10	11.01.26
150	1	08.01.56	186	18	16.33.13
152	1	07.45.39	188	7	10.57.55
153	6	09.46.29	189	3	07.14.47
154	1	06.28.21	190	1	05.40.38
162	19	17.10.49	192	1	08.03.20
163	3	07.59.42	193	1	06.20.12
165	8	11.34.16	194	20	17.40.01
166	1	06.27.06	195	1	06.04.57
168	1	08.52.39	196	1	05.24.50
169	1	07.06.27	197	1	06.30.44
170	1	07.29.14			
171	7	11.49.58			
172	1	07.48.48			
173	9	15.12.31			
175	7	10.44.07			

**Tabla 3:** Hora de comienzo de la primera serie de cada día seleccionado (TSV).

Si llamamos Gh a la Irradiancia Global sobre superficie horizontal, Dh la Irradiancia Difusa sobre superficie horizontal y Gh<sub>0</sub> la Irradiancia Extraterrestre sobre superficie horizontal, los índices que hemos elegido vienen definidos por:

- Índice de claridad atmosférica:  $K_t = Gh/Gh_0$
- Relación Difusa - Extraterrestre:  $K_d = Dh/Gh_0$
- Fracción Difusa:  $K = Dh/Gh$
- Coeficiente de Turbiedad de Linke: **TL**

En nuestro estudio se filtraron durante una tercera etapa todos aquellos casos que presentaron valores inferiores o superiores a:

$$K_t < 0.650 \text{ , } K_d > 0.350 \text{ , } K > 0.300$$

considerando que esos valores constituyen el límite que nos garantiza que estamos trabajando en condiciones de cielo totalmente despejado. En honor a la verdad, se permitió en la base de datos un caso, el día 150, serie 16, scan 5 con  $K_t=0.629$  y  $K=0.307$  por la proximidad a los valores límites.

En este desarrollo, automáticamente quedaron eliminados también los casos de elevación solar menores que  $10^\circ$  y de coeficiente de Turbiedad de Linke (Linke, 1922) mayores que 10, aunque en el primer caso solo se trataba de 30 barridos en Sabinal y 61 en Veleta y en el segundo casi siempre correspondía a fallos en las medidas de Irradiancia Directa.

Todo este proceso nos llevó finalmente a un total de **593 barridos en Sabinal** y de **507 en Veleta** para el desarrollo de nuestros propósitos, con un total de **117.536** y **89.724** datos puntuales de radiancia del cielo respectivamente. Dado que nuestro objetivo esencial es la comprobación y validación de las diferentes formulaciones empíricas y teóricas recientemente propuestas para la distribución angular de la Radiancia del Cielo, procedimos a dividir nuestra base de datos final en 1/3 parte y 2/3 partes. De esta forma nos reservamos una parte de los datos para la comprobación de las propuestas que pudiéramos desarrollar sobre modificaciones a modelos existentes, para adaptarlos a nuestro entorno, o sobre el desarrollo de un modelo propio. Esta división se realizó entresacando dos barridos de cada tres, para asegurar una muestra representativa sobre toda la base y no solo las 2/3 partes del principio o del final del total de datos. El resultado final en números se expresa en la Tabla 5.

Otros datos de interés sobre nuestra base de datos aparecen reflejados en la Tabla 4. Hemos incluido información estadística sobre la Irradiancia Global y Difusa sobre superficie horizontal, Gh y Dh, así como sobre la Irradiancia Horizontal Difusa Integrada para cada barrido, a partir de los datos distribución de radiancia del cielo, IHDI. Esta información nos servirá para futuros comentarios.

Base SABINAL		1/3 Base (SA)	2/3 Base (SA)	Base Total (SA)
Gh (W/m <sup>2</sup> )	Media	794.6	791.0	792.2
	Mediana	855.9	857.1	857.1
	Moda	981.5	1002.8	1004.7
	Máximo	1032.9	1032.9	1032.9
	Mínimo	301.4	265.6	265.6
Dh (W/m <sup>2</sup> )	Media	113.8	113.3	113.4
	Mediana	114.6	113.9	114.2
	Moda	116.7	115.3	85.6
	Máximo	205.4	197.1	205.4
	Mínimo	55.9	63.0	55.9
IHDI (W/m <sup>2</sup> )	Media	128.6	128.0	128.2
	Mediana	126.4	127.2	126.7
	Moda	126.4	141.2	141.2
	Máximo	192.8	192.8	192.8
	Mínimo	68.0	63.0	63.0
Base VELETA		1/3 Base (VE)	2/3 Base (VE)	Base Total(VE)
Gh (W/m <sup>2</sup> )	Media	791.6	788.9	789.8
	Mediana	848.2	854.8	853.8
	Moda	1095.0	1052.7	1088.1
	Máximo	1133.1	1134.5	1134.5
	Mínimo	171.6	169.6	169.6
Dh (W/m <sup>2</sup> )	Media	67.1	66.6	66.8
	Mediana	44.6	43.0	43.9
	Moda	44.8	42.4	42.4
	Máximo	193.6	192.2	193.6
	Mínimo	17.2	13.9	13.9
IHDI (W/m <sup>2</sup> )	Media	65.3	65.1	65.1
	Mediana	49.2	50.3	49.8
	Moda	48.7	50.1	48.7
	Máximo	153.1	153.5	153.5
	Mínimo	25.7	24.7	24.7

Tabla 4: Valores de Gh, Dh e IHDI (ver texto) para Sabinal (SA) y Veleta (VE).

Base SABINAL	1/3 Base (SA)	2/3 Base (SA)	Base Total (SA)
Datos puntuales	39.348	78.188	117.536
Barridos	198	395	593
Base VELETA	1/3 Base (VE)	2/3 Base (VE)	Base Total(VE)
Datos puntuales	29.908	59.816	89.724
Barridos	169	338	507

Tabla 5: La Base de Datos de Radiancia del Cielo en cifras. Sabinal y Veleta.

Por otro lado, el estudio de los diferentes *parámetros meteorológicos* nos ha permitido definir las condiciones generales de medida durante cada uno de los días seleccionados para este trabajo. Analizamos a continuación, de forma detallada, las condiciones de medida en esta campaña a la luz del estudio de las diferentes magnitudes que se registraron.

### 3. PARÁMETROS METEOROLOGICOS

#### Temperatura, Humedad y Presión

Las variaciones de Temperatura, Humedad y Presión fueron bastante diferentes durante las campañas de Sabinal y Veleta. Este hecho, en realidad, era de esperar como corresponde a dos emplazamientos tan diferentes. En el conjunto de gráficos de las figuras 1-3, pueden observarse los rangos de Temperatura, Humedad y Presión obtenidos de forma coincidente con las medidas de radiación, para cada uno de los días de la campaña. En estas figuras se han incluido TODOS los días y no sólo los seleccionados como despejados.

Con respecto a la **temperatura**, es de destacar la relativa estabilidad del rango dentro de cada día en Sabinal, que contrasta claramente con la situación en Veleta de abultadas diferencias entre máximos y mínimos como corresponde a una zona de alta montaña. En Sabinal estas diferencias nunca superaron los 4 grados, diferencia máxima que se dio durante el día 154, llegándose a dar el caso de un día (170) en el que esta diferencia fue de 1.1 grados centígrados (ambos días están seleccionados e incluidos en nuestra base de datos). En Veleta la diferencia mínima de 2.3 °C, día 184, contrasta con el valor máximo de 7.3 grados de diferencia el día 193.

Esta misma situación se verifica cuando analizamos la variación de la **humedad relativa**. Destacan los casos de humedad cercana al 100% en Sabinal así como los casos de humedad cercana al 0% en Veleta. Concretamente, destaca el día 188 en Veleta, con un valor mínimo de la humedad relativa de 3.6% y un valor máximo de 62.8%, y el día siguiente, 189, con unos valores de 0.1% y 17.9% respectivamente (también ambos días figuran seleccionados e incluidos en nuestra base de datos). Estas circunstancias nunca se dieron en Sabinal, en donde el comportamiento no fue nunca tan extremo, si bien en ningún caso se bajó de una humedad del 47.5%.

Finalmente, las variaciones de **presión** durante el período de campaña fueron muy pequeñas, como cabría esperar, siendo las únicas diferencias entre Sabinal y Veleta las propias debidas a la diferencia de altura entre ambos emplazamientos. Dada la época del año durante la campaña, verano, hubo lógicamente una preponderancia de altas presiones.

Si analizamos con detalle la variación diaria de cada uno de estos parámetros, la evolución de la temperatura siguió el patrón esperado de valores máximos en torno al mediodía y mínimos en los extremos. Sin embargo, la

evolución diaria de la humedad fue más irregular, con variaciones aleatorias que fueron más acusadas en Veleta que en Sabinal. Incluso puede observarse como la relación Humedad-Temperatura no es, en ocasiones, la que cabría esperar, de una disminución de la humedad al aumentar la temperatura. A título de ejemplo, se muestran los gráficos de estas variaciones para algunos días señalados de Sabinal y Veleta en las figuras 4-7.

#### **4. VARIACIÓN DIARIA DE LA IRRADIANCIA DIRECTA**

##### **Medidas espectrales y no espectrales**

Como ya se ha descrito en el capítulo anterior, la componente directa de la radiación que atraviesa la atmósfera es medida mediante un radiómetro absoluto sobre todo el espectro solar (sin filtro alguno), así como en las bandas espectrales de los filtros OG1 (525-2400 nm), RG2 (610-2400 nm), RG8 (730-2800 nm) y CUARZO (310-4000 nm). Como puede observarse en la serie de gráficos de las figuras 8 a la 13, existe un comportamiento típico para la Irradiancia Directa de un día despejado que contrasta claramente con un día parcial o totalmente nuboso. En estas figuras la nomenclatura empleada para los distintos filtros (cuyos rangos de transmisión se explicaron en la página 62) ha sido:

- FILTRO 1: medidas sin filtro
- FILTRO 2: medidas con OG1
- FILTRO 3: medidas con RG2
- FILTRO 4: medidas con RG8
- FILTRO 5: medidas con CUARZO

Para resaltar la importancia de estos gráficos en lo que al filtrado de datos se refiere, hemos incluido un día prácticamente cubierto durante su totalidad (162), presentando 6 y 7 octas de nubes hasta casi las 14 horas (TSV), para ir

despejándose paulatinamente y quedar totalmente despejado a partir de las 17 horas (TSV). En otro caso, como el día 168 de Sabinal, la cubierta nubosa era cero pero las series de datos fueron interrumpidas a las 12.30 (TSV) para reanudarse posteriormente a las 16 horas (TSV) con la consecuente pérdida de datos, probablemente debidas a un fallo del sistema. Esto mismo que comentamos para Sabinal, puede apreciarse en la figura 12 y 13 de los días 190, 193 y 194. Los valores medios de algunas magnitudes de cada uno de los días presentados en las figuras 8-13 se presentan en las Tabla 6.a y 6.b, con el fin de situar unos días con respecto a otros y poder realizar comparaciones:

	150	154	162	168	170	173
T(°C)	21.7	25.3	22.4	21.5	23	24.5
H(%)	67.7	51	63.9	63.8	68.3	62.5
P(mb)	1004.9	1007.8	1004.6	1007	1007.3	1008.7
TL	3.5	4	-	3.2	4	6.5
K <sub>t</sub>	0.755	0.746	-	0.767	0.745	0.719
K <sub>d</sub>	0.109	0.122	-	0.108	0.127	0.200
K	0.143	0.165	-	0.115	0.172	0.278

**Tabla 6.a:** Valores medios de las magnitudes que se indican para los días de **SABINAL** presentados en las figuras 8-13.

Como puede observarse, es posible contrastar de forma fácil la información que se posee de nubes, pues éstas ocasionan desviaciones muy claras y evidentes del comportamiento normal de la Irradiancia Directa para un día despejado. Por otro lado, aunque se mantuvo una vigilancia constante durante el tiempo de medidas experimentales, el funcionamiento anormal del radiómetro es también fácil de detectar al analizar este tipo de gráficos pues, como puede verse

en el caso del día número 175 en Sabinal o el 195 en Veleta (figura 14), la representación evidencia el comportamiento atípico al combinar estas medidas con el resto de la información que se posee.

	185	189	190	193	194	196
T(°C)	9.2	12.3	13.7	17.8	17.3	14.1
H(%)	37.8	10.1	10.4	21	25	25.7
P(mb)	685.1	693.9	693.5	697.8	696.6	693.7
TL	2.4	2.4	2.2	5.5	-	2.5
K <sub>t</sub>	0.856	0.846	0.845	0.791	-	0.825
K <sub>d</sub>	0.064	0.055	0.046	0.160	-	0.056
K	0.075	0.065	0.055	0.204	-	0.068

**Tabla 6.b:** Valores medios de las magnitudes que se indican para los días de VELETA presentados en las figuras 8-13.

Los valores máximos en Sabinal están siempre por debajo de los valores máximos en Veleta, como era de esperar por la diferencia de masa óptica, contenido de agua precipitable y aerosoles, destacando los más de 1000 vatios por metro cuadrado de Veleta durante la mayor parte del día. Aun en el caso de una atmósfera sin nubes, los flujos de radiación se pueden ver reducidos de forma considerable. La extinción de radiación por neblinas, partículas aerosoles de polvo y vapor de agua son la causa principal de esta atenuación en estos casos. Sabinal y Veleta se diferencian claramente en este aspecto.

En la tabla siguiente se ha recopilado diversa información para cada uno de los lugares de medida que permite observar tales diferencias. Aunque el horizonte es, como ya se ha visto, predominantemente libre de obstáculos en

ambos casos, la proximidad de Sabinal a una zona urbana y turística unido al hecho de que se trata de un emplazamiento a escasos metros del mar (spray marítimo , polvo, dunas ...), contrasta enormemente con la atmósfera de alta montaña del pico del Veleta, más alejado de fuentes contaminantes. Para elaborar la Tabla 7 se han empleado únicamente los barridos con cielo despejado obtenidos después de todo el filtrado que hemos comentado ya, es decir, es información relativa a nuestra base de datos final y no a un promedio de toda la campaña.

Estación	S A B I N A L				V E L E T A			
	Kt	Kd	K	TL	Kt	Kd	K	TL
Media	0.750	0.114	0.154	3.70	0.832	0.074	0.09	2.93
Mediana	0.762	0.108	0.143	3.63	0.841	0.054	0.065	2.52
Moda	0.785	0.099	0.186	3.66	0.884	0.042	0.033	2.54
Varianza	0.0013	0.0009	0.002	0.43	0.0018	0.0024	0.0038	1.22
RMSE	0.036	0.03	0.047	0.66	0.042	0.05	0.062	1.1
Máximo	0.803	0.213	0.307	6.7	0.908	0.227	0.3	5.62
Mínimo	0.629	0.063	0.079	2.74	0.679	0.013	0.016	1.71
Rango	0.174	0.15	0.23	3.96	0.229	0.214	0.284	3.91

**Tabla 7:** Información de los parámetros que se indican para Sabinal y Veleta. Valores medios para los casos que forman nuestra base de datos.

Como puede observarse, sistemáticamente los valores medios que aparecen en la Tabla 7 son superiores para Sabinal con respecto a Veleta, salvo Kt que es inferior. Sin embargo, aunque algunos resultados son obvios por el carácter de ambas estaciones, es necesario un análisis más profundo y detallado de la Tabla 7. Aunque los valores indican que en Veleta los días despejados son más limpios y transparentes (menor TL, Dh/Gh, Kd y mayor Kt), consecuencia de una menor

masa óptica debido a la altura así como a la contribución del vapor de agua y la existencia en Sabinal de núcleos higroscópicos, que implican un mayor tamaño de aerosoles, es interesante destacar que se da una mayor diferencia entre los valores máximos y mínimos de estos parámetros en todos los casos, indicando una situación atmosférica más variable que la de Sabinal. La semejanza de Media, Mediana y Moda en Sabinal así como unos valores inferiores de la desviación estándar apoyan este comentario.

Analizando parámetro por parámetro, podemos destacar un coeficiente de Turbiedad de Linke mínimo de 1.71 en Veleta. Aunque en esta estación fueron pocos los casos que presentaron un TL inferior a 1.9, éstos se dieron esencialmente a primeras horas del día, para elevaciones solares bajas. En concreto TL=1.71 se verificó en la primera serie de medidas del día 190, a las seis de la mañana (TSV), con una altura solar de  $10.86^\circ$ . De igual forma, tampoco fue frecuente un TL mayor de 4.5. En especial, los días 192 y 193 presentaron esta circunstancia, correspondiendo TL=5.62 a la serie 8 del día 193, sobre las 10:30 (TSV). Todos estos detalles se verán reflejados, como veremos, al analizar la variación diaria de la Irradiancia Directa. Continuando el análisis del TL medio para Sabinal y Veleta, observamos como las diferencias de altura y de transparencia atmosférica se traducen en el incremento medio de 1 punto en TL, destacando el máximo TL=6.7 que corresponde a las horas centrales (TSV) de día 173.

Por otro lado, si bien los valores máximos no difieren tanto entre Sabinal y Veleta, sí lo hacen los valores mínimos, especialmente en lo que respecta a  $K_d$  y  $D_h/G_h$ . Concretamente, es de nuevo durante el día 190 (horas centrales) cuando se verifica  $K_d=0.013$  y  $D_h/G_h=0.016$  (TL=2.54) y para una altura solar de  $75^\circ$ . Estos valores no se dieron nunca en Sabinal aunque, como apuntábamos antes, las situaciones no fueron tan extremas.

Trasladando toda esta información al análisis de la Irradiancia Directa, podemos entender ciertos aspectos de la variación diaria que hemos observado. Esta variación diaria es más suave en Veleta, observándose mesetas planas y un rápido ascenso hasta los valores en torno a los 1000 W/m<sup>2</sup> así como un descenso acusado en torno a las 18:00 horas (TSV). Estas variaciones no son tan acusadas en el caso de Sabinal, presentándose un valor máximo más destacado en torno al mediodía. Esto sucede así con independencia de las condiciones de turbiedad de la atmósfera, representadas especialmente por TL. Se modifican sustancialmente los valores máximos pero no la evolución de la Irradiancia Directa durante el día. Este hecho puede apreciarse en los gráficos de las figuras 8 a 13. Incluso cuando esta variación no es tan uniforme y suave, por presencia de pequeñas formaciones nubosas de carácter temporal, el comportamiento sigue verificando las tendencias que hemos comentado.

Con respecto a estas pérdidas de uniformidad ó desestabilizaciones, es interesante destacar que se producen especialmente en la primera mitad del día y que son menos intensas en el caso de Veleta. La causa puede estar en la condición de Sabinal como zona marítima polvorienta y también cercana a un núcleo urbano que puede dar lugar a tasas más altas de contaminación. En cualquier caso, estas variaciones se detectan en las medidas sin filtro, pero van disminuyendo y son menos pronunciadas en las medidas con filtro. Las tendencias para cada uno de los filtros es, como puede observarse, idénticas con la única salvedad de la diferencia de valores como consecuencia de los distintos anchos espectrales. De todas formas, sería necesario un estudio espectral detallado del fenómeno para encontrar una explicación precisa, y el análisis de estas medidas espectrales no ha sido aun desarrollado.

Todo lo que hemos comentado indica que las medidas de radiación directa nos pueden dar una buena idea sobre la estabilidad de la atmósfera, pero es

necesario ser cuidadoso de forma especial si se quieren extraer resultados y extrapolarlos a otras condiciones y lugares. Así en el caso de fuertes variaciones, para las que la constante de tiempo del instrumento es demasiado alta, (días con nubes), la última gráfica ilustra lo delicado que puede ser extraer precisas conclusiones e intentar calcular otros parámetros.

## **5. VARIACION DIARIA DE LAS CONDICIONES DE TURBIEDAD**

### **Análisis de TL, Kt, Kd y K**

Ligado a la variación de la Irradiancia Directa para cielos despejados, está la variación del coeficiente de Turbiedad de Linke, así como de Kt, Kd y K. El estudio paralelo de su variación puede ayudarnos a interpretar las variaciones de Irradiancia Directa y extraer otras conclusiones. A tal efecto, se ha procedido a representar la variación diaria de estos índices con el resultado que se aprecia en los gráficos de las figuras 15-22.

Del análisis de estos gráficos puede extraerse un dato significativo que no es otra cosa que la menor variabilidad de los índices TL y Kt frente a las variaciones más acusadas de Kd y K. Estos dos últimos índices presentan un comportamiento idéntico con la diferencia lógica debida a la atmósfera terrestre ( $G_h$  frente a Gh en Kd frente a K). Esta diferencia se hace mucho menos evidente en Veleta como consecuencia de una menor masa óptica y una menor contaminación reflejada en unos valores muy inferiores de TL. Por otro lado, Kt y TL son bastante estables dentro de la serie de datos, siendo más visibles las alteraciones de TL debidas a un aumento de la turbiedad, que incluso puede ser debida a una disminución de la Irradiancia Directa por condensaciones o por la presencia de un "*cúmulo viajero*", no registrado en el fichero de nubes (día 196) y que tan solo se detectó de forma casual al analizar las fotografías ojo de pez.

La unión de estos resultados nos permiten afirmar la conveniencia de una combinación Kt-K o Kt-Kd a la hora de buscar una posible modelización del campo de la radiancia, frente al empleo único de cualquiera de estos índices, incluyendo TL.

## **6. VARIACION DIARIA DE LA IRRADIANCIA GLOBAL**

En la mayoría de los casos, un buen conocimiento de las características que presenta la Irradiancia Directa es suficiente para obtener conclusiones sobre la Irradiancia Global. Esta afirmación se apoya en el hecho de que cometer un error de hasta el 50% en la estimación de la Irradiancia Difusa en un día despejado (para valores típicos de unos 200 W/m<sup>2</sup>), repercute en un error relativo de tan solo el 10% en valores típicos de unos 1000 W/m<sup>2</sup> de Irradiancia Global (Heimo, 1984). La magnitud de estos errores es en muchos casos aceptable y representa una aproximación suficiente. Efectivamente, en un estudio no demasiado antiguo ya se demostraba que la mejor forma de obtener valores de las tres componentes (global, directa y difusa) era medir la directa y la difusa y calcular a partir de las dos la irradiancia global (Selby et al., 1978). Evidentemente, mientras mejor se realicen las medidas de difusa mejor podremos modelizar la radiación global.

No obstante, hemos preferido en esta ocasión analizar para algunos de los días que venimos comentando, cuáles han sido estas variaciones y en qué márgenes nos hemos movido. Las medidas de sistemas como el MORAS pueden ayudar de forma muy efectiva a cualquier intento de modelización precisamente por la variedad de condiciones encontradas con el mismo sistema. En este sentido, las figuras 23-26 muestran la marcha diaria de la irradiancia global para las diferentes superficies que se indican.

Evidentemente la irradiancia global en incidencia normal (seguidor solar) presenta los mayores valores, así como la mayor variabilidad en las zonas centrales del día. Las condiciones de turbiedad condicionan fuertemente los valores obtenidos así como, por supuesto, la diferencia de altura de ambos emplazamientos, tal y como comentábamos en el caso de la Irradiancia Directa. Es de destacar las fluctuaciones que se dan en la irradiancia global en incidencia normal, incluso dentro de los 20-30 segundos, presentando una gran sensibilidad a las variaciones de turbiedad (figuras 15-22). De nuevo, es importante destacar el hecho de que las variaciones asociadas a situaciones transitorias (por ejemplo el cúmulo de las horas centrales del día 196), influyen a la hora de interpolar valores de irradiancia directa o sacar otras conclusiones. Tan solo se pueden poner de manifiesto por la abundancia de esta base de datos, que permite un análisis de este tipo (Vida et al., 1992).

Por otro lado, cabe destacar también la simetría existente para superficies verticales orientadas según Norte, Sur, Este y Oeste, poniéndose de manifiesto la variación semejante en Veleta y en Sabinal, salvo valores absolutos, del seguidor y del piranómetro colocado horizontalmente.

## **7. ANALISIS DE LA DISTRIBUCION ANGULAR DE LA RADIANCIA E IRRADIANCIA DEL CIELO**

### **7.1) Irradiancia Global**

El análisis realizado hasta ahora ha estado limitado a evoluciones diarias de los diferentes parámetros. Sin embargo, con vistas a su modelización es necesario disponer, además, de un conocimiento detallado de su distribución angular, (Heimo et al., 1976). En el caso de la Irradiancia Global, además de las propiedades integradas que hemos comentado en el apartado anterior, el análisis

de su distribución angular en una representación 2D pone de manifiesto la variación del gradiente de las isolíneas al cambiar la elevación solar, así como la gran simetría de las mismas con respecto a la posición solar, en condiciones de cielo despejado. En los gráficos de las figuras 27-32 se pone de manifiesto las diferencias entre Sabinal y Veleta. Por otro lado, en las figuras 33-36 obtenemos una impresión 3D de algunos de estos casos, que refuerzan la impresión de simetría que obteníamos antes.

### **7.2) Radiancia del Cielo**

Más interesante para nosotros es el análisis de la distribución angular de la radiancia del cielo, por cuanto en el capítulo 6 vamos a analizar las propuestas más recientes para su modelización. En este caso también aparecen claras diferencias entre Sabinal y Veleta. Hemos canalizado este estudio a través de dos días concretos de Sabinal y Veleta, escogidos por ser los más completos de datos en cada emplazamiento y presentar los casos de mayor y menor Coeficiente de Turbiedad de Linke, TL, en ocasiones cercanos e incluso coincidentes, dentro de los que constituyen nuestra base de datos final: son los días 166 y 170 en Sabinal y el 190 y 192 en Veleta. Para situar el análisis, en las figuras 37 y 38 se muestra la evolución de T, H y P, mientras que la información relativa a los índices TL, Kt, Kd y K de estos días se observan en las figuras 17, 18 y 21. Estos datos servirán de referencia y apoyo a comentarios posteriores.

En las figuras 39-44 se muestran los gráficos 2D correspondientes a la variación diaria de la distribución angular de la radiancia del cielo para los días 166 y 170. Es importante destacar como la diferencia de turbiedad se manifiesta en unos valores menores de la radiancia en el cenit durante el día 166, incluso cuando el sol se sitúa próximo a él. También la depresión situada en el plano solar, a unos 90° de la posición del sol se hace más profunda (valores más bajos) en el caso del día más transparente.

En un gráfico 3D (figuras 45-48) estos hechos se manifiestan en forma de un pico más acusado y un mayor efecto de horizonte en el día 166. Idénticos comentarios pueden realizarse entre los días 190 y 192, en donde la presencia del Pico del Veleta es claramente apreciable a la izquierda de los diagramas 2D (figuras 49-54) y también en los 3D (figuras 55-58). Una comparación Sabinal-Veleta nos lleva a apreciar mayores gradientes en Veleta, incluso para días con semejante TL en Sabinal (166-192).

## **8. RADIANCIA DEL CIELO. ASPECTOS ESTADÍSTICOS**

Después de haber realizado la comparación Sabinal-Veleta en lo que se refiere a las condiciones meteorológicas y de evolución de algunas magnitudes, vamos a centrarnos ahora en el estudio estadístico de la radiancia del cielo que es, en definitiva, el objetivo principal de este trabajo. Pretendemos analizar las diversas formulaciones propuestas en la bibliografía, y para ello es importante que veamos cual es el comportamiento que se observa experimentalmente.

Una característica sobresaliente de la radiancia del cielo es su alta variabilidad. Esta variabilidad natural implica que cualquier modelización solo sea capaz de representar de forma satisfactoria, y en el mejor de los casos, las variaciones que son explicables de la distribución angular de la radiancia del cielo. Estas *variaciones explicables* son las debidas a cambios de tipo meteorológico o a parámetros tales como la posición solar (ángulo cenital y acimutal) y las condiciones de turbiedad atmosférica o la cubierta nubosa.

Sin embargo, existe una parte de esa variabilidad que no es explicable. Recientemente, Brunger (Brunger et al, 1993), en un análisis de su base de datos (SKYSCAN'83/84), bastante parecida a la nuestra en cuanto a las características

del detector empleado, establecen que esta parte no determinista representa una desviación media del 20-40% y que es debida a factores tales como la posición aleatoria de las nubes en la cúpula celeste.

En nuestro caso, dado que trabajamos sobre la base de cielos despejados, teóricamente esta influencia no determinista se ve reducida al mínimo. De todas formas, aunque tengamos que exigir más al comportamiento de los modelos que vamos a analizar, siempre va a existir una parte de desviación media no explicable.

Por todo ello, y debido a las variaciones que encontramos en las diferentes áreas del cielo, se decidió realizar tres subdivisiones de la base de datos que íbamos a emplear en este estudio (recordemos que en realidad está formada por las 2/3 partes de la base de datos total). Esta división debía resaltar la influencia que cada zona del cielo tiene sobre la distribución angular de radiancia por lo que finalmente se optó por distinguir diferentes categorías según el criterio que se expone a continuación:

- A) Por un lado se realizó una **división por altura solar** de  $10^\circ$  en  $10^\circ$ .
- B) Una segunda división fue considerar **tres cinturones en el cielo** delimitados por la elevación del punto considerado, según el siguiente esquema:
  - cinturón 1: de  $0$  a  $20^\circ$  grados de elevación
  - cinturón 2: de  $20^\circ$  a  $40^\circ$  grados de elevación
  - cinturón 3: de  $40^\circ$  a  $90^\circ$  grados de elevación
- C) Por último, se procedió a una tercera subdivisión por **distancia angular al sol**, según el siguiente esquema:
  - zona 1: de  $0$  a  $20^\circ$  ángulo de scattering
  - zona 2: de  $20^\circ$  a  $70^\circ$  ángulo de scattering
  - zona 3: de  $70^\circ$  a  $120^\circ$  ángulo de scattering
  - zona 4: de  $120^\circ$  en adelante

en donde el *ángulo de scattering*,  $\Psi$ , define la distancia angular entre la dirección del sol y el punto del cielo considerado y se expresa en función del ángulo cenital y acimutal solar,  $(\theta_s, \phi_s)$ , y las coordenadas polares del punto con respecto al suelo,  $(\theta, \phi)$ , como:

$$\Psi = \arccos[\cos\theta \cos\theta_s + \sin\theta \sin\theta_s \cos(\phi - \phi_s)]$$

Debido a esta división, el número total de datos se reparte de la siguiente manera en función de la agrupación considerada. En el primer caso el número de datos en los grupos así obtenidos son:

<u>- Altura solar (°)</u>	<u>Datos SABINAL</u>	<u>Datos VELETA</u>
0 - 20	768	5.308
20 - 30	7.448	7.748
30 - 40	10.236	8.792
40 - 50	11.024	8.188
50 - 60	13.644	8.456
60 - 70	14.636	9.616
70 - 80	20.432	11.708

En el segundo caso, al dividir la cúpula del cielo en tres bandas o cinturones, da lugar a los siguientes grupos:

<u>- Cinturón (°)</u>	<u>Datos SABINAL</u>	<u>Datos VELETA</u>
0 - 20	50.816	41.120
20 - 40	10.340	7.160
40 - 90 (Cenit)	17.032	11.536

En el tercer caso se han considerado las siguientes agrupaciones:

<u>- Ángulo de Scattering (°)</u>	<u>Datos SABINAL</u>	<u>Datos VELETA</u>
0 - 20	4.186	3.058
20 - 70	35.589	25.698
70 - 120	34.183	25.986
120 - >	4.230	5.074

Con toda la base de datos y con estas subdivisiones, se ha procedido a realizar un estudio por zonas de las medidas de radiancia, así como de la distribución en frecuencias de los datos experimentales.

### 8.1) Distribución *Log-Normal* de la Radiancia del cielo

Es frecuente encontrar autores que al realizar algún tipo de prueba empleen la representación con escala logarítmica de la radiancia del cielo experimental y la generada por el modelo que proponen (Harrison et al., 1988a). También es frecuente encontrar en la literatura autores que destacan el carácter *log-normal* de la distribución de valores de radiancia y recurran en el análisis estadístico al logaritmo del modelo que proponen y de los valores experimentales que emplean (Siala et al, 1990; Brunger et al, 1993). En unos casos de forma más justificada y en otros de forma menos explícita, la cuestión es que tanto la representación como el análisis estadístico mejoran al emplear el logaritmo, como tendremos ocasión de ver. En nuestro caso hemos querido comprobar la distribución estadística que presenta la radiancia del cielo, para justificar así los análisis posteriores.

En las figuras 59 y 60 tenemos la representación en frecuencias de la radiancia del cielo en valor absoluto y normalizada con respecto a IHDI (Irradiancia Difusa Horizontal Integrada) y con respecto a Lz (radiancia del cenit) para Sabinal y Veleta respectivamente. Comparando los diferentes gráficos, en los tres casos comprobamos que las medidas presentan una distribución *Log-Normal*, ya que al tomar el logaritmo, la distribución se aproxima claramente a una distribución normal. El comportamiento de los datos es también semejante al normalizar.

A continuación ofrecemos el resultado del estudio estadístico detallado para Sabinal y Veleta de la radiancia del cielo, y en apartados posteriores el mismo

estudio para la radiancia en el cenit y la radiancia circunsolar. En cada caso la clave para las distintas magnitudes que aparecen en ellos es:

Datos	Número de datos experimentales
ADEV	Desviación Media
SDEV	Desviación Estándar
SKEW	Coficiente Pearsoniano de asimetría
CURT	Curtosis
MAX	Valor Máximo
MIN	Valor Mínimo

El *Coficiente Pearsoniano de asimetría* y *Curtosis* son, respectivamente, medidas de la asimetría y de la longitud de la cola de una curva de distribución. El valor esperado para una distribución normal es, lógicamente, cero para ambos índices.

Para el cálculo de estos índices, así como de la Media, Mediana y Moda, Valor Máximo y Mínimo, se ha empleado el programa 2D del paquete estadístico BMDP. El resto de la información estadística aportada se ha calculado mediante programación personal en FORTRAN. En concreto, las expresiones empleadas para el cálculo de la desviación media y de la desviación estándar son las siguientes:

$$ADEV = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{N} \quad , \quad SDEV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

### 8.2) Radiancia del Cielo en Sabinal

En la tabla siguiente hemos reflejado las características más relevantes de la radiancia del cielo en Sabinal, tanto en valor absoluto como normalizada con respecto a la irradiancia horizontal difusa integrada (IHDI) o al valor en el cenit (Lz). En todos los casos se ha incluido también el resultado para el logaritmo de la magnitud considerada:

A=Rad, B=Ln(Rad), C=Rad/IHDI, D=Ln(Rad/IHDI), E=Rad/Lz, F=Ln(Rad/Lz)

<u>SABINAL</u>	A(W/m <sup>2</sup> sr)	B	C (sr <sup>-1</sup> )	D	E	F
Datos	78188		78188		78188	
MEDIA	41.03	3.50	0.34	-1.32	1.65	-0.03
MEDIANA	31.50	3.45	0.25	-1.40	0.97	-0.04
MODA	29.00	3.37	0.25	-1.39	1.00	0.00
ADEV	20.97	0.44	0.18	0.44	1.34	0.76
SDEV	37.36 (91%)	0.60 (17%)	0.33 (99%)	0.59 (45%)	2.57 (155%)	0.97 (-)
SKEW	3.98	0.75	4.54	1.15	5.44	0.42
CURT	20.18	1.52	28.30	2.02	41.61	0.15
MAX	294.8	5.67	4.64	1.54	38.95	3.66
MIN	6.70	1.90	0.08	-2.58	0.09	-2.38

**Tabla 8:** Características de la Radiancia del Cielo en Sabinal.

La desviación estándar de la muestra es aproximadamente del mismo orden de magnitud que el valor medio y supone en la mayoría de los casos hasta un 100% de la media. En el caso del logaritmo de las magnitudes consideradas, este porcentaje disminuye considerablemente. En el caso de la normalización con respecto a Lz, al ser el valor medio prácticamente cero, SDEV no tiene sentido en tanto por ciento. Aunque el coeficiente de asimetría (SKEW) y el curtosis (CURT) no llegan a adoptar el valor cero de una distribución normal, es evidente

que las distribuciones se centran al tomar el logaritmo natural. Es significativo como en la normalización con respecto a  $L_z$ , se alcanza el grado más parecido a una distribución normal al tomar logaritmo, reflejados en sus valores de SKEW y CURT. Es También en este caso cuando se aprecia más similitud entre media, mediana y moda, siendo el único caso en el que estos valores están incluidos en el 95% de intervalo de confianza de la media.

### 8.3) Radiancia del Cielo en Veleta

En el caso de Veleta, nuestro estudio presenta los valores que aportamos en la tabla siguiente:

A=Rad, B=Ln(Rad), C=Rad/IHDI, D=Ln(Rad/IHDI), E=Rad/Lz, F=Ln(Rad/Lz)

VELETA	A(W/m <sup>2</sup> sr)	B	C (sr <sup>-1</sup> )	D	E	F
Datos	59816		59816		59816	
MEDIA	27.31	3.06	0.47	-0.99	2.65	0.57
MEDIANA	21.85	3.08	0.36	-1.01	1.59	0.46
MODA	13.70	2.62	0.19	-1.67	0.94	0.07
ADEV	14.51	0.54	0.25	0.52	1.90	0.70
SDEV	24.56 (90%)	0.69 (23%)	0.45 (95%)	0.65 (65%)	3.42 (129%)	0.85 (147%)
SKEW	4.98	0.05	7.23	0.41	8.09	0.41
CURT	41.65	0.41	101.4	0.37	122.5	-0.05
MAX	293.6	5.68	11.05	2.40	84.61	4.43
MIN	2.40	0.88	0.07	-2.66	0.17	-1.76

Tabla 9: Características de la Radiancia del Cielo en Veleta.

Como puede observarse, en Veleta la situación es similar a Sabinal en cuanto al carácter Log-Normal de las distribuciones. En todos los casos se verifican unos índices SKEW y CURT que indican la tendencia a una distribución

normal al tomar el logaritmo natural de la magnitud. No obstante es de destacar que en Veleta las medidas presenta un comportamiento más extremo que en Sabinal en cuanto a la asimetría y colas, antes y después de tomar el logaritmo. Es mucho más acusado el carácter log-normal. Si observamos los valores máximos de radiancia, vemos que son parecidos en Sabinal y Veleta. Sin embargo, al normalizar con respecto a IHDI, el valor máximo casi se triplica en Veleta con respecto a Sabinal, evidenciando una atmósfera más limpia. Al normalizar con respecto a la radiancia del cenit obtenemos un valor máximo y mínimo casi el doble que en Sabinal, así como una gran diferencia entre media, mediana y moda. Este resultado nos demuestra que el cielo de Veleta ofrece más contrastes y un gradiente en los valores de radiancia más brusco que en Sabinal, a medida que nos alejamos del sol. Este carácter altamente variable se manifiesta en que en ninguna de las normalizaciones la moda esté incluida en el 95% de intervalo de confianza de la media.

## **9. ANALISIS GRAFICO DE LA RADIANCIA DEL CIELO: DIFERENCIAS ENTRE SABINAL Y VELETA**

### **9.1) Análisis Global**

En primer lugar hemos analizado la base de forma global, buscando las características más relevantes de la radiancia del cielo, y hemos encontrado que son la posición del sol con respecto al punto del cielo considerado, esto es, el ángulo de scattering ya definido ( $\Psi$ ) y el estado de turbiedad de la atmósfera, los factores que más afectan a su distribución. Si observamos la figura 61, podemos extraer, en principio, cuatro resultados importantes:

- a) Existe claramente una dependencia con TL, dándose un mayor rango de variación de la radiancia con TL en Veleta que en Sabinal.

- b) La radiancia del cielo presenta una clara dependencia con el ángulo de scattering,  $\Psi$ , lo cual encierra una dependencia con la posición relativa sol-punto del cielo. Aunque la distribución de los datos presenta una gran anchura, fácilmente se adivina una dependencia exponencial de L con  $\Psi$ .
- c) Efectivamente, existe una zona de valores mínimos en torno a un ángulo de scattering de  $90^\circ$ . Salvo una serie de datos extraños, en principio, alejados del patrón esperado en Veleta, y para los que encontraremos una explicación más adelante.
- d) En la anchura de la distribución que antes se comentaba, podemos apreciar una clara dependencia con la elevación del punto considerado en la cúpula del cielo,  $\gamma$ . La distribución de los datos en forma de "pinceladas de brocha" evidencian las diferentes elevaciones del patrón adoptado en el programa de toma de datos. Recordemos que este patrón venía definido por:  $\gamma = 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 36, 54, 72, \text{ y } 90$  grados.

Para completar este análisis, hemos procedido a estudiar el comportamiento de los datos al normalizar con respecto a IHDI y Lz. Si observamos las figuras 62 y 63 de nuevo podemos obtener algunos resultados de forma clara y evidente. En concreto estos cinco resultados:

- a) La dependencia con  $\Psi$  se mantiene de tipo exponencial con un valor mínimo en torno a los  $90^\circ$ .
- b) La dependencia con TL queda considerablemente suavizada.
- c) La dependencia con  $\gamma$  disminuye de forma importante.

- d) La "*anchura de la distribución*" en Veleta es mayor que en Sabinal en ambas normalizaciones, evidenciando una mayor irregularidad y diferencia entre valores extremos observada ya en las Tablas 5, 8 y 9.
- e) En el caso de Veleta, la dispersión de los datos en torno a  $\Psi=90^{\circ}$ - $120^{\circ}$  queda anulada en el caso de la normalización con respecto a Lz, pero no así al normalizar con respecto a IHDI.

### 9.2) Almucántar Solar y Plano Solar

En virtud de lo que hemos comentado, y con vistas a comprobaciones posteriores, hemos extraído de nuestra base de datos tanto en Sabinal como en Veleta, aquellos datos experimentales correspondientes al *ALMUCANTAR SOLAR* (los datos de cada barrido correspondientes a la altura solar para cualquier acimut) y al *PLANO SOLAR* (los datos de cada barrido correspondientes al acimut solar para cualquier elevación). Como trabajamos con un patrón experimental que ya hemos comentado, tendríamos muy pocos datos que exactamente estuvieran en el plano solar y almucántar solar. Es por ello que la selección se realizó sobre la base de considerar un cierto intervalo (10 grados).

Por todo lo antes expuesto, nuestro análisis continúa con la comparación Sabinal-Veleta de la radiancia del cielo en el Almucantar Solar en función del ángulo de scattering,  $\Psi$ , y del Coeficiente de Turbiedad de Linke, TL. La figura 64 muestra el resultado para la radiancia y las figuras 65 y 66 para la radiancia normalizada con respecto a IHDI y Lz respectivamente. Los comentarios que se han realizado en el punto anterior son totalmente aplicables a estos datos aunque ahora, lógicamente, la anchura de la distribución disminuye. El comportamiento exponencial idéntico para todas las alturas solares registradas durante la campaña (incluidas en la figura 64), pone de manifiesto que la dependencia con el ángulo de scattering,  $\Psi$ , va a marcar las diferencias existentes.

En las figuras 67-69 observamos el comportamiento de la radiancia en el *plano solar*, de nuevo en función del ángulo de scattering. Encontramos, básicamente, los mismos resultados que anteriormente, estos es, dependencia con la elevación del punto del cielo,  $\gamma$ , y con TL principalmente en Veleta. Los dos tipos de normalización que hemos considerado reducen la dependencia con TL y disminuyen considerablemente la dependencia con  $\gamma$ .

### 9.3) Radiancia en función de la Elevación

Para estudiar la otra gran dependencia encontrada en la figura 61, se ha procedido a representar la radiancia del cielo experimental en función de  $\Psi$  para cada una de las elevaciones que se han considerado. Son las figuras 70-72 para Sabinal y 73-75 para Veleta.

Efectivamente, y aunque el patrón exponencial con mínimo a  $\Psi=90^\circ$  se mantiene, ahora el ancho de la distribución disminuye considerablemente, haciéndose compacto y nuevamente dependiente de TL de forma más acusada en Veleta que en Sabinal. Las dos "ramas" que se observan en Veleta corresponden a valores de  $TL \leq 4$  y valores de  $TL > 4$ .

De nuevo encontramos los datos experimentales que antes veíamos y que se apartan de la tendencia general, pero en este caso confinados a elevaciones de  $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $6^\circ$ , y  $9^\circ$ . Parece lógico pensar que sean debidos al **Pico Veleta**, presente en el horizonte de los sensores en el cuadrante de acimut con respecto al Sur, ( $\phi$ ), de  $180 < \phi < 270$ . En la serie de figuras 76-79 hemos extraído este cuadrante de los otros tres. confirmando nuestras sospechas de forma clara y evidente.

Estas dependencias quedan suavizadas de forma considerable cuando se procede a normalizar con respecto a IHDI ó Lz. Nuevamente es la normalización con respecto a Lz la que disminuye de forma más efectiva el efecto del Pico. La

serie de gráficos 80-89 nos muestran para cada elevación el efecto de ambas normalizaciones en Sabinal y Veleta.

#### 9.4) Radiancia en función de la Altura Solar

Aunque hasta el momento hemos centrado nuestro análisis gráfico en la dependencia de la radiancia con el ángulo de scattering,  $\Psi$ , vamos a estudiar ahora la dependencia con la altura solar,  $\gamma_0$ . En la figura 64, ya comentada, observábamos cómo, independientemente de la altura solar  $\gamma_0$ , el comportamiento de la radiancia procedente de los puntos del cielo con igual altura ( $\gamma = \gamma_0$ ), sigue un patrón exponencial claramente definido en función de  $\Psi$ .

Para el estudio de la dependencia con  $\gamma_0$ , hemos fijado dos parámetros. Por un lado hemos considerado las elevaciones del cielo constantes 18, 36, 54 y 72 grados, ya que los datos del horizonte serán tratados en un capítulo posterior, y por otro los diferentes planos con respecto al sol, definidos por el *acimut relativo al sol*  $\alpha_s = |\phi - \phi_0|$  de 0° (plano solar), 30°, 60°, 90°, 120° y 180° (plano solar).

También hemos elegido la magnitud  $L/L_z$  para estas representaciones. Esta elección ha venido motivada por el hecho de que la dependencia de la radiancia con TL, según se ha visto, queda bastante reducida al normalizar (con respecto a IHDI ó  $L_z$ ), pero no podemos afirmar que se verifica una total independencia con TL. Sin embargo, nos parece menos dependiente la normalización con respecto a  $L_z$ . De este estudio pretendemos, además, extraer resultados sobre las zonas del cielo donde la dependencia de la radiancia relativa con TL es mayor, menor o nula.

Para la interpretación de los gráficos 90-95 hemos de tener en cuenta que la selección de los datos se realizó de nuevo sobre los valores medidos

experimentalmente, esto es, no se ha realizado ningún tipo de interpolación. Por este motivo, no siempre existe para un valor de acimut relativo  $+\alpha_s$ , otro  $-\alpha_s$ . También, y por la misma razón, hemos tenido que considerar un determinado intervalo de  $\alpha_s$  dentro de cada categoría. Este intervalo ha sido de  $5^\circ$ . Por último, no se han realizado ningún tipo de promedio para valores correspondientes a una misma altura solar. Los datos de Sabinal y de Veleta se presentan conjuntamente en cada gráfico.

La influencia de la altura solar sobre la radiancia normalizada es evidente y nos permite sacar las siguientes conclusiones:

- a) Podemos establecer dos comportamientos diferenciados para  $\alpha_s \leq 30^\circ$  (figuras 90 y 91) o  $\alpha_s \geq 60^\circ$  (figuras 92-95). En el primer caso, no aparecen diferencias significativas entre Sabinal y Veleta, mientras que en el segundo los datos de Sabinal se diferencian claramente de los de Veleta. Dado que estamos trabajando con valores normalizados, este hecho pone de manifiesto una dependencia con TL de la radiancia normalizada conforme aumenta el acimut relativo  $\alpha_s$ .
- b) La influencia de la elevación solar,  $\gamma_o$ , es mucho más intensa en el *plano solar* para  $\alpha_s = 0^\circ$  y disminuye conforme aumentamos  $\alpha_s$ . En cualquier caso, más acusada para elevaciones del cielo pequeñas,  $18^\circ$  y  $36^\circ$ , disminuyendo conforme nos acercamos al cenit.
- c) Existe un valor máximo de la radiancia normalizada en torno a  $\gamma_o = \gamma$ . En el caso del plano solar, este hecho es evidente pues estamos ante datos de la *aureola solar*. De todas formas, el fenómeno también está presente, aunque no de forma tan acusada, para  $\alpha_s$  de  $30^\circ$  y  $60^\circ$ , mostrando las gráficas una ligera elevación en esa zona.

- d) Para  $\alpha_s \geq 60^\circ$  la dependencia de los valores con  $\alpha_s$  disminuye, pero las diferencias entre Sabinal y Veleta con la turbiedad, TL, se hace más evidente. Disminuye la radiancia relativa en Sabinal, que mostraba, como hemos visto, un mayor TL que Veleta en términos generales. Evidentemente, conforme aumenta la altura solar y la elevación del punto del cielo también disminuye L/Lz.
- d) La serie de gráficos 90-95 indica también un fenómeno interesante: la radiancia relativa aumenta de forma especial en las zonas del cielo cerca del horizonte,  $\gamma = 18^\circ$ , especialmente en el plano solar (definido por  $\alpha_s = 0^\circ$  y  $\alpha_s = 180^\circ$ ). Este efecto de *horizonte brillante*, es característico de los cielos despejados, por lo que será objeto de un estudio más extenso.

## **10. RADIANCIA EN EL CENIT PARA SABINAL Y VELETA**

### **Aspectos estadísticos y análisis gráfico**

El estudio de la radiancia procedente del cenit, Lz, adquiere un especial interés por cuanto puede dar una idea del carácter isótropo del cielo. Efectivamente, la razón Lz/Dh ayuda a comprender en qué extensión la irradiancia de un cielo real difiere de la de un cielo isótropo (ideal). En nuestro caso este cociente no podía calcularse directamente, dadas las diferencias espectrales entre los instrumentos de medida.

Como ya se ha comentado en otras ocasiones, por esta razón procedimos a calcular la Irradiancia Horizontal Difusa Integrada, IHDI, a partir de los datos experimentales de cada barrido. Al igual que anteriormente, en un primer análisis estadístico sobre los datos de Lz en nuestra campaña, hemos obtenido los resultados de la Tabla 10 para Sabinal y Tabla 11 para Veleta:

<b>SABINAL</b>	<b>Lz (W/m<sup>2</sup>sr)</b>	<b>Ln(Lz)</b>	<b>Lz/IHDI (sr<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ln(Lz/IHDI)</b>
<b>Datos</b>	6272		6272	
<b>MEDIA</b>	49.20	3.53	0.36	-1.29
<b>MEDIANA</b>	30.50	3.42	0.23	-1.47
<b>MODA</b>	11.60	2.45	0.12	-2.12
<b>ADEV</b>	34.99	0.75	0.22	0.60
<b>SDEV</b>	42.33 (86%)	0.86 (24%)	0.28 (78%)	0.71 (55%)
<b>SKEW</b>	1.16	0.20	1.24	0.42
<b>CURT</b>	0.43	-1.22	0.73	-1.14
<b>MAX</b>	208.6	5.34	1.46	0.38
<b>MIN</b>	7.30	1.99	0.09	-2.40

Tabla 10: Características de la Radiancia del Cenit en Sabinal.

<b>VELETA</b>	<b>Lz (W/m<sup>2</sup>sr)</b>	<b>Ln(Lz)</b>	<b>Lz/IHDI (sr<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ln(Lz/IHDI)</b>
<b>Datos</b>	4848		4848	
<b>MEDIA</b>	16.92	2.49	0.23	-1.57
<b>MEDIANA</b>	11.73	2.46	0.19	-1.67
<b>MODA</b>	5.90	1.78	0.14	-1.99
<b>ADEV</b>	11.12	0.64	0.09	0.40
<b>SDEV</b>	17.36 (103%)	0.77 (31%)	0.12 (52%)	0.46 (29%)
<b>SKEW</b>	2.71	0.59	1.30	0.53
<b>CURT</b>	8.09	-0.18	1.46	-0.86
<b>MAX</b>	102.3	4.63	0.73	-0.32
<b>MIN</b>	3.33	1.20	0.10	-2.28

Tabla 11: Características de la Radiancia del Cenit en Veleta.

Prácticamente, los mismos comentarios generales observados al estudiar la radiancia del cielo de forma global, son aplicables en este caso. De nuevo apreciamos una gran variabilidad, con diferencias muy acusadas entre media, mediana y moda. Igualmente, la distribución se normaliza al tomar el logaritmo, reflejándose este hecho en los valores de SDEV sobre la media, y los coeficientes SKEW y CURT (explicados anteriormente). La diferencia de altura entre Sabinal y Veleta, y consecuentemente la diferencia de masa óptica, se ve reflejada en un valor medio muy superior en Sabinal. Evidentemente, la atmósfera de Veleta más limpia y transparente en términos generales, como ya se ha visto, contribuye a este hecho, así como en que exista un mayor rango entre valores máximo y mínimo. En Sabinal ambos llegan a ser incluso el doble que en Veleta para el caso de la radiancia del cenit. Al normalizar con respecto a IHDI, esta situación se ve suavizada, reduciéndose SDEV a la mitad y el rango entre valores extremos también, lo cual evidencia una menor contribución de la radiancia del cenit a la irradiancia difusa total.

En la figura 96 podemos observar la dependencia de  $L_z$  con respecto al ángulo de scattering,  $\Psi$ . La dependencia exponencial es semejante, lógicamente, al patrón ya encontrado y de nuevo vemos como en Sabinal se refleja la dependencia con el índice de turbiedad de Linke, TL, mientras que en Veleta esta dependencia nos sugiere de nuevo hacer dos divisiones, por encima y por debajo de  $TL=4$ . En este caso, dado que el ángulo de scattering coincide con el ángulo cenital solar,  $\theta_0$ , el valor mínimo de  $L_z$  corresponde a los casos en los que el sol se sitúa cerca del horizonte ( $\Psi=\theta_0=90^\circ$ ). En la figura 97, hemos realizado esta misma representación para la normalización con respecto a IHDI. En este caso, la dependencia con TL se reduce muy considerablemente en Sabinal. En Veleta, al igual que ya ocurriera en el caso general, la dependencia con TL queda suavizada al tiempo que aparece una desestabilización en torno a  $\Psi=18^\circ$ . Por la característica de estos datos, no puede haber en este caso influencias del

horizonte, por lo que interpretamos este comportamiento algo característico del cielo de Veleta en la zona cercana al sol durante nuestra campaña. Ya se ha comentado que en Veleta observamos en ocasiones pequeños cúmulos circulando muy rápidamente, de forma que no afectaba prácticamente en la catalogación del barrido como despejado, pero sí en el cálculo de IHDI por los mayores valores puntuales de la radiancia, (J.Vida et al., 1992). También puede ser debido a que para los TL bajos, la contribución de  $L_z$  a la irradiancia difusa es muy pequeña, por el rápido decaimiento observado en la zona circunsolar.

En las figuras 98 y 99, en una representación similar a la de la figura 96, hemos superpuesto los datos de Sabinal y Veleta correspondientes a cada TL. La dependencia del lugar es evidente, correspondiendo de forma sistemática valores superiores de  $L_z$  en Sabinal, independientemente de  $\Psi$ . En algunos casos el número de datos no permite observar, pero si intuir, el clásico carácter exponencial de la dependencia con  $\Psi$ .

Decíamos al principio que el estudio de  $L_z$  presenta el atractivo adicional de que la razón  $L_z$ /IHDI nos permite estudiar lo que podríamos denominar una especie de *grado de isotropía* del cielo en cada caso. Efectivamente, multiplicado por  $\pi$  expresaría precisamente un parámetro indicativo de hasta que punto el carácter del cielo es, en ese momento, el de un cielo ideal en el sentido de aproximar el cálculo de la difusa (IHDI) por  $\pi L_z$ . En la figura 100 tenemos el resultado de nuestro análisis. Hemos de recordar que no se trata de un dato para cada barrido, sino la totalidad de los datos de  $L_z$ , empleando el IHDI calculado del campo de radiancia de cada barrido con los datos  $L_z$  de ese barrido. Recordemos aquí también, que la posición cenit se alcanzaba 3 ó 4 veces en cada barrido, dependiendo de que se tratara de un barrido par ó impar. Para su mejor interpretación, hemos señalado la línea ideal  $(\pi L_z$ /IHDI)=1.

Es evidente que se da una gran desviación con respecto a este caso ideal. No se observa, al igual que en la figura 97, una gran dependencia con TL. La nube de puntos sigue claramente una distribución exponencial con la altura solar,  $\gamma_0$ . A medida que el sol va ganando altura en el cielo, éste va acercándose al caso ideal. Cuando el sol se encuentra bajo, se tiende al valor 0.4. Cuando el sol se encuentra alto en el cielo obtenemos los valores más elevados. En estos casos la radiancia del cenit está asociada con la radiancia de la *aureola solar*, la cual es mucho mayor lógicamente que en el resto de la cúpula celeste.

Sin embargo, tanto en Sabinal como en Veleta, parece ser que  $\gamma_0=65^\circ$  establece ese carácter ideal en el sentido que antes comentábamos. La desestabilización antes mencionada parece que prolonga en Veleta los casos en torno al valor 1. Dada la latitud de nuestra zona de campaña, las alturas solares que se han verificado aquí superan bastante las que pueden darse en el resto de Europa. No obstante, los estudios de Valko y las comprobaciones de Page coinciden en este valor en torno a  $\gamma_0=60^\circ$  como la altura solar de un cielo ideal (Page, 1986).

En la figura 101, hemos superpuesto los datos de Sabinal y de Veleta, comprobando que no existe una significativa dependencia de  $(\pi L_z/IHDI)$  con el lugar de medida. Evidentemente, en este caso la dependencia con la altura solar es la dominante, definiéndose en la figura 101 de forma clara e independiente de TL y del lugar de medida. Por lo tanto la radiancia del cenit,  $L_z$ , podría ser calculada conocida la forma matemática de la curva de ajuste en la figura 101,  $f(\gamma_0)$ :

$$f(\gamma_0) = (\pi L_z/IHDI)$$

mediante

$$L_z = (1/\pi) IHDI f(\gamma_0)$$

El estudio que nosotros hemos realizado de esta función nos lleva a que una parametrización en  $\gamma_o^4$  resulta ser la mejor opción. No obstante ofrecemos a continuación las diferentes posibilidades que hemos planteado y dejamos para un futuro estudio la validación de estos ajustes empleando el tercio de datos que hemos reservado u otras bases de datos a las que podamos acceder, así como la bondad de los mismo en el cálculo de Dh. En concreto, los ajustes que hemos probado han sido:

$$\begin{aligned} f(\gamma_o) &= 1.272 - 0.058\gamma_o + 8.84E-4\gamma_o^2 & R^2 &= 0.7605 \\ f(\gamma_o) &= -0.337 + 0.074\gamma_o - 2.26E-3\gamma_o^2 + 2.26E-5\gamma_o^3 & R^2 &= 0.7922 \\ f(\gamma_o) &= 1.303 - 0.122\gamma_o + 5.48E-3\gamma_o^2 - 1.01E-4\gamma_o^3 + 6.81E-7\gamma_o^4 & R^2 &= 0.8004 \\ f(\gamma_o) &= 0.06022 \exp(\gamma_o/21.70599) & R^2 &= 0.7519 \\ f(\gamma_o) &= 0.0000121 \gamma_o^{2.765} & R^2 &= 0.7055 \end{aligned}$$

Evidentemente, también puede invertirse el razonamiento y calcular a partir de estas expresiones el valor de la irradiancia difusa sobre superficie horizontal, a partir de la función  $f(\gamma_o)$  y  $Lz$ .

Mediante un razonamiento parecido al anterior, si consideramos el cociente entre la irradiancia difusa sobre superficie horizontal y la radiancia del cenit,  $Dh/Lz$ , en el caso de un cielo ideal de radiancia uniforme tomaría el valor  $\pi(=3.1416)$ . Este cociente, el inverso del anterior, es también muy importante, pues permitiría un cálculo sencillo de las relaciones entre la irradiancia difusa y la radiancia procedente de cualquier punto del cielo.

En efecto, tal y como tendremos ocasión de exponer en el capítulo 6, son diversos los autores que han realizado propuestas matemáticas, empíricas y teóricas, en este sentido (en su mayoría del cociente  $L/Lz$ ). Mediante la

integración de sus modelos, Page calcula el cociente Dh/Lz y compara con los datos experimentales de Valko (Page, 1986). La respuesta de las diferentes formulaciones es semejante, y a partir de todas ellas propone el siguiente algoritmo (Page, 1986):

$$\frac{Dh}{Lz} = \sum_{i=0}^4 \left[ \sum_{j=0}^2 a_{ij} (T_L^j) \right] \gamma_o^i$$

aplicable para valores de TL entre 2 y 8, y para alturas solares por debajo de 70°, valor a partir del cual la expresión anterior puede generar hasta un 4% de error para alta turbiedad, según su autor.

i \ j	0	1	2
0	7.670	-0.2415	0.04375
1	-1.352 x 10 <sup>-2</sup>	3.202 x 10 <sup>-2</sup>	-2.006 x 10 <sup>-3</sup>
2	-1.283 x 10 <sup>-3</sup>	-1.003 x 10 <sup>-3</sup>	1.437 x 10 <sup>-5</sup>
3	1.133 x 10 <sup>-5</sup>	7.637 x 10 <sup>-6</sup>	5.188 x 10 <sup>-7</sup>
4	-3.488 x 10 <sup>-8</sup>	-8.237 x 10 <sup>-9</sup>	-4.890 x 10 <sup>-9</sup>

**Tabla 12:** Coeficientes a<sub>ij</sub> del algoritmo Dh/Lz, (Page, 1986).

A partir de la expresión anterior, y dado que Dh (irradiancia difusa horizontal para cielo despejado) es una magnitud comúnmente medida en las estaciones radiométricas, puede calcularse el valor de Lz. Con este valor y cualquiera de las formulaciones L/Lz (el autor propone el modelo de la CEE, que tendremos ocasión de estudiar), puede calcularse de forma fácil la radiancia procedente de cualquier punto del cielo.

Empleando los datos de radiancia en el cenit de Sabinal y Veleta conjuntamente, hemos realizado un ajuste del mismo tipo al sugerido por Page. Aunque no se observan diferencias con TL, hemos dividido el conjunto de datos por intervalos del Coeficiente de Turbiedad de Linke. Hemos encontrado que en realidad cada zona de la curva en la figura 101 corresponde a uno de esos intervalos y que se solapan formando dicha curva. El ajuste en  $\gamma^4$  nos ha dado como resultado coeficientes bastante distintos a los de Page, obteniendo  $R^2$  superiores a 0.9 en la primera fase del análisis. Sin embargo en la segunda fase disminuye  $R^2$  desde 0.98 para  $i=0$  hasta 0.75 para  $i=4$ , para cualquier  $j$ . Esto sugiere que quizás sería conveniente incluir otro orden más en el algoritmo. Estos hechos serán comprobados en el futuro. En cualquier caso, los coeficientes resultantes son:

$i \setminus j$	0	1	2
0	73.855	-42.112	6.451
1	-11.946	6.694	-0.899
2	1.0142	-0.5324	0.0667
3	$-3.882 \times 10^{-2}$	$1.996 \times 10^{-2}$	$-2.441 \times 10^{-3}$
4	$5.232 \times 10^{-4}$	$-2.678 \times 10^{-4}$	$3.252 \times 10^{-5}$

Tabla 13: Coeficientes calculados de  $a_{ij}$  para el algoritmo de Page.

## **11. RADIANCIA CIRCUNSOLAR PARA SABINAL Y VELETA.**

### **Aspectos estadísticos y análisis gráfico**

El estudio de esta región del cielo resulta bastante conflictiva, por cuanto el número de datos de que disponemos no es tan abundante como en otras zonas.

Añadimos a esta circunstancia el estudio de la calidad de los datos, debido a que los detectores de silicio no responden correctamente, como se explicó en el capítulo 3, ante un estímulo superior a los 300 W/m<sup>2</sup>sr. En este caso el detector alcanza su nivel de saturación y el programa de medida automáticamente rechazaba esos valores. El campo de visión de los detectores es, como se dijo, de 5°, lo que hizo posible el que en ocasiones alguno de los detectores coincidiera cerca de la posición solar, sin estar contaminado directamente por él.

Para situarnos en esta región, seleccionamos el primer conjunto de datos correspondiente a la división que hicimos por ángulo de scattering, es decir para  $\Psi \leq 20^\circ$ , y los analizamos estadísticamente en la forma que hemos hecho con el resto. Estos datos ofrecen el resultado, presentado en las Tablas 14 y 15 para Sabinal y Veleta respectivamente.

A=Rad, B=Ln(Rad), C=Rad/IHDI, D=Ln(Rad/IHDI), E=Rad/Lz, F=Ln(Rad/Lz)

SABINAL	A(W/m <sup>2</sup> sr)	B	C (sr <sup>-1</sup> )	D	E	F
Datos	4186		4186		4186	
MEDIA	149.21	4.88	1.21	0.03	5.60	1.01
MEDIANA	122.00	4.80	0.92	-0.08	1.98	0.68
MODA	292.10	5.68	0.63	-0.42	0.83	-0.04
ADEV	63.55	0.42	0.60	0.48	5.40	1.03
SDEV	76.72 (51%)	0.50 (10%)	0.74 (61%)	0.56 (-)	7.12 (127%)	1.17 (115%)
SKEW	0.84	0.21	1.33	0.43	1.84	0.53
CURT	-0.61	-0.91	1.60	-0.89	3.02	-1.11
MAX	294.8	5.69	4.64	1.54	38.95	3.66
MIN	34.4	3.54	0.34	-1.09	0.39	-0.95

Tabla 14: Características de la Radiancia Circunsolar en Sabinal.

Al igual que en los otros estudios, de nuevo la Media supera en todos los casos a la Mediana. Esta circunstancia queda también reflejada en un valor positivo del índice de asimetría (SKEW). De la misma forma, la desviación estándar (SDEV) es del orden de la Media en todos los casos.

Sin embargo, destaca la gran diferencia entre Media, Mediana y Moda y el gran rango entre valores extremos. Al tomar el logaritmo, el comportamiento, al igual que en los estudios anteriores, se "suaviza", tendiendo a una *distribución normal*, siendo este hecho más acusado en la normalización con respecto a la irradiancia horizontal difusa integrada (IHDI) que en la normalización con respecto a la radiancia del cenit (Lz).

A=Rad, B=Ln(Rad), C=Rad/IHDI, D=Ln(Rad/IHDI), E=Rad/Lz, F=Ln(Rad/Lz)

VELETA	A(W/m <sup>2</sup> sr)	B	C (sr <sup>-1</sup> )	D	E	F
Datos	3058		3058		3058	
MEDIA	66.07	3.87	1.18	-0.18	7.30	1.28
MEDIANA	42.50	3.75	0.72	-0.33	3.51	1.26
MODA	292.1	5.68	0.40	-1.11	1.03	0.03
ADEV	44.35	0.60	0.80	0.65	6.51	1.06
SDEV	66.23 (100%)	0.75 (19%)	1.30 (110%)	0.77 (428%)	10.56 (145%)	1.18 (93%)
SKEW	2.32	0.78	3.44	0.66	3.57	0.34
CURT	4.86	-0.04	15.08	0.005	16.14	-1.04
MAX	293.6	5.68	11.05	2.40	84.61	4.44
MIN	13.9	2.63	0.21	-1.55	0.71	-0.34

Tabla 15: Características de la Radiancia Circunsolar en Veleta.

En las figuras 102-104 hemos representado estas tres magnitudes (L, L/IHDI, L/Lz) en función del ángulo de scattering,  $\Psi$ , para Sabinal y Veleta. La

dependencia claramente exponencial observada en los estudios anteriores, no es apreciable en este caso. En la figura 102 vemos una gran diversidad de valores que tienden a disminuir conforme disminuye  $\Psi$ , pero que no demuestran una dependencia claramente definida. Esta dependencia, en cualquier caso, podemos comprobar que nuevamente ofrece "dos ramas" en el caso de Veleta, las cuales corresponden, como antes, a los casos por encima y por debajo de  $TL=4$ . En Sabinal no se aprecia esta división.

Las medidas de radiación circumsolar tanto monocromáticas como en banda ancha (Eiden, 1983; Deepak et al., 1978; Deepak et al., 1982), así como pruebas realizadas mediante modelos (Box et al., 1981) indican, según estos autores, que la radiancia circumsolar está adecuadamente representada por la siguiente expresión:

$$L(\Psi) = N_0(1^\circ) \quad (0^\circ < \Psi < 1^\circ) \quad (1)$$

$$L(\Psi) = N_0 \Psi^{-K} \quad (1^\circ < \Psi < 20^\circ) \quad (2)$$

en donde  $N_0$  y  $K$  son constantes que dependen principalmente de la turbiedad de la atmósfera y del ángulo cenital solar,  $\theta_0$ . Sobre la base de medidas realizadas en una atmósfera continental limpia, Eiden adoptó el valor  $K=0.5$  (Eiden, 1983). Para  $N_0$  adoptó el valor calculado a partir de las medidas por comparación de la expresión (2). En nuestro caso apenas tenemos datos con  $\Psi < 1^\circ$ , que han sido excluidos en cualquier caso. Empleando nuestros datos y realizando un ajuste potencial semejante al modelo de la expresión (2), obtenemos los siguientes valores para esas constantes:

$N_0 = 821.06$	$K = 0.70$	SABINAL
$N_0 = 781.77$	$K = 0.73$	VELETA, $TL \leq 4$
$N_0 = 607.33$	$K = 1.06$	VELETA, $TL > 4$

No obstante el ajuste no es muy bueno, aunque sí es la mejor representación posible para los datos de esta región del cielo. Nuevamente, dejaremos un estudio más profundo de este tema para un trabajo futuro.

Al normalizar con respecto a IHDI, figura 103, se evidencian las diferencias entre Sabinal y Veleta. En el primer caso, una mayor turbiedad en la atmósfera (TL medio de 3.7 frente a 2.9 en Veleta) unido a un mayor espesor óptico consecuencia de la diferencia de altura, se traduce en valores superiores de IHDI (IHDI medio de 128 W/m<sup>2</sup> frente a 65.1 en Veleta). El resultado es una representación plana, totalmente independiente de  $\Psi$  en Sabinal. En Veleta sin embargo, los valores L/IHDI aumentan drásticamente al disminuir  $\Psi$ . Por encima de un ángulo de scattering  $\Psi=10^\circ$ , los valores son semejantes en Sabinal y Veleta.

Prácticamente se observa la misma situación al normalizar con respecto a la radiancia del cenit, figura 104. En este caso, debido a una atmósfera más limpia, en las cercanías del sol el cociente "se dispara" en Veleta, mientras que a partir de  $\Psi=10^\circ$  las representaciones son idénticas para Sabinal y Veleta (prácticamente una representación plana). De nuevo podríamos destacar el hecho antes referido que es mucho más brusca la disminución de la radiancia circunsolar al alejarnos del sol en Veleta que en Sabinal.

Las figuras 102-104 se corresponden con las 105-107. En estas últimas, hemos representado L, L/IHDI y L/Lz en función de la altura solar,  $\gamma_o$ . Podemos comprobar cómo no existe dependencia alguna de la radiancia con  $\gamma_o$  (figura 105). En Sabinal tenemos valores generalmente superiores para un mismo valor de  $\gamma_o$ , salvo valores máximos, y más uniformemente distribuidos que en Veleta. En la figura 106, al hilo de los comentarios sobre la figura 103, observamos una masa de puntos semejante en Sabinal y Veleta, pero una serie de valores mayores en

Veleta para  $\gamma_0 \approx 10^\circ$ ,  $\gamma_0$  de  $30^\circ$ - $40^\circ$  y  $\gamma_0 > 65^\circ$ . Estos casos ponen de manifiesto días extremadamente limpios en Veleta y valores de  $\Psi \leq 5^\circ$ , que destacan sobre los demás. Dado el horizonte más despejado de Veleta, obtuvimos casos de elevación solar pequeña ( $\gamma_0 \approx 10^\circ$ ) y los sensores dirigidos a la zona circunsolar. Estos casos se corresponden con valores mínimos de IHDI que no se dieron en Sabinal.

Finalmente, en la figura 107, de nuevo la distribución en Sabinal es diferente a la de Veleta. Conforme aumenta  $\gamma_0$ , la radiancia se acerca a la del cenit, y el cociente  $L/L_z$  tiende a la unidad. Por ello, aparece una tendencia más lineal que exponencial de  $L/L_z$  frente a  $\gamma_0$ . Sin embargo, valores mínimos de  $L_z$  para  $\gamma_0 \approx 10^\circ$  producen los valores extremos de Veleta en esta zona, que no se aprecian en Sabinal.

La nube de los datos a partir de  $\gamma_0 = 20^\circ$  es semejante, salvo, de nuevo, esos días extremadamente limpios que destacan sobre los demás en  $\gamma_0$  de  $30^\circ$  a  $40^\circ$  y  $\gamma_0 > 65^\circ$ . Se observa una disminución del máximo al aumentar  $\gamma_0$ , consecuencia de un aumento de  $L_z$  al aumentar la altura solar.

Por estas circunstancias y consecuencia del análisis que hemos presentado, en nuestros estudios posteriores sobre el comportamiento de modelos, hemos descartado todos aquellos valores por encima de los  $250 \text{ W/m}^2\text{sr}$ . Adicionalmente, para evitar datos erróneos excluirémos también aquellos datos correspondientes a un ángulo de scattering,  $\Psi$ , menor ó igual a  $7.5^\circ$ , con lo que eliminamos  $15^\circ$  alrededor del sol. Todo este tipo de precauciones son consecuencia de que la región que hemos estudiado es una de las más conflictivas en la cúpula celeste, y las que más margen de error puede generar

## 12. ANÁLISIS EN FRECUENCIAS DE LA BASE DE DATOS

Para terminar con la presentación y el análisis de nuestros datos, hemos considerado oportuno completar este estudio incluyendo un análisis en frecuencias. Este análisis nos permitirá definir por completo las características y distribución de nuestra base de datos. Si elegimos los índices TL, Kt y K como representativos de las condiciones de turbiedad que se han dado en cada barrido, una representación 3D de estos índices pueden darnos una idea de la situación global de la campaña en Sabinal y Veleta. Esto es lo que hemos hecho en las figuras 108 y 109 respectivamente. Claramente se observa en Veleta unos casos bien definidos del resto, correspondientes a un  $TL > 4$ . En Sabinal la distribución resulta más uniforme, abarcando más o menos todas las combinaciones. Estos hechos ya los hemos podido comprobar en los estudios de la radiancia anteriores.

Para observar mejor estas diferencias, hemos representado las proyecciones sobre cada plano de las figuras anteriores. Son las figuras 110-112. En la figura 110, observamos que no existe relación entre el coeficiente de turbiedad de Linke, TL, y la Fracción Difusa,  $K = Dh/Gh$ , aunque en Sabinal se aprecia una mayor "harmonía" de los datos. Destaca la gran cantidad de casos con valores mínimos de K en torno a 0.05 en Veleta, frente a los de Sabinal en torno a 0.1. Lo mismo ocurre en la figura 111 de TL en función del Índice de Claridad,  $Kt = Gh/Gh_0$ . Al igual que en la figura 110, destacan los casos de elevado TL bien diferenciados del resto y los valores máximos de Kt cercanos a 0.91 en Veleta frente a 0.78 en Sabinal.

En la figura 112 observamos la relación entre K y Kt. En este caso se aprecia una relación lineal más o menos bien definida en Sabinal, que contrasta con la ausencia total de relación en Veleta. Incluso en este caso es posible apreciar los dos conjuntos de datos que comentamos anteriormente. Esta última

representación pone de manifiesto la situación tan cambiante y variable de la atmósfera en Veleta, como hemos venido comentando al hilo de otros análisis.

En la figura 113 y 114, hemos representado la variación de estos índices (TL, Kt y k) y de la Relación Difusa-Extraterrestre,  $K_d = D_h / G_h$ , en función de la altura solar,  $\gamma_0$ . De nuevo apreciamos en Veleta un comportamiento más irregular de los datos. En el caso de Veleta aparecen otra vez claramente definidos los casos por encima y por debajo de  $TL=4$ . Mientras en Sabinal al aumentar la altura solar, de forma generalizada aumenta  $G_h$  y disminuye  $D_h$ , originando una variación esperada, en Veleta la dispersión de los datos en cada uno de los dos conjuntos mencionados nos animan a considerar el coeficiente de turbiedad de Linke, TL, como un buen representativo del estado de turbiedad de la atmósfera. En este mismo sentido, la combinación de los índices Kt y K constituye también una buena forma de establecer las condiciones de turbiedad.

Por ello, en la figura 115 hemos representado finalmente la distribución en frecuencias para Sabinal y Veleta en base a este binomio. Los datos se sitúan claramente agrupados en torno al intervalo Kt-K de (0.80-0.15) en Sabinal y (0.90-0.05) en Veleta, lo que constituye una base de datos muy interesante al presentar valores inalcanzables de estos índices en otros lugares de Europa.

## **5. RADIANCIA EN EL HORIZONTE**

1. INTRODUCCION
2. SELECCION DE LOS DATOS. ANALISIS ESTADISTICO
3. ESTABLECIMIENTO DEL HORIZONTE BRILLANTE
4. DEPENDENCIA ACIMUTAL Y CON EL GRADO DE TURBIEDAD LA RADIANCIA EN EL HORIZONTE

## 1. INTRODUCCIÓN

En el estudio de la distribución angular de la radiancia del cielo, adquiere una especial importancia la franja comprendida entre los  $0^\circ$  y los  $20^\circ$  de elevación. Tal es el caso del cálculo de la irradiancia global o difusa sobre superficies inclinadas. La contribución de esta zona al campo de radiancia presenta una especial dificultad en su estudio, debido a la lógica influencia que cada horizonte específico ejerce sobre ella. Por ello, sería conveniente disponer de una correcta modelización de esta franja bajo condiciones de horizonte despejado, para poder realizar las correcciones y adaptaciones a situaciones reales concretas.

Para la medida de la radiancia de esta zona del cielo, es necesario un sistema muy sofisticado, tecnológica y mecánicamente hablando. Esta es una causa adicional por lo que este tipo de medidas en particular, y las de radiancia en general, sean bastante escasas. Como ya hemos comentado en el capítulo 3, en nuestra campaña empleamos unos fotómetros con un campo de visión de  $0.006$

esterorradianes (2.5°). Debido a que el ángulo sólido subtendido por los fotómetros es pequeño, las medidas realizadas en torno al horizonte pueden considerarse como representativas de esta franja de cielo. Recordamos aquí que el patrón de medidas se enriqueció en esta campaña, para incluir más registros en esta zona. Así, las elevaciones del horizonte consideradas han sido:

$$\gamma = 0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ \text{ y } 18^\circ$$

Sin embargo, cuando las obstrucciones son importantes, montañas, edificios etc., es imposible evitar la contaminación de las medidas por estos factores. Es esta circunstancia la que convierte a las campañas de Sabinal y Veleta en especialmente atractivas por lo *limpio* de sus horizontes. Factores como el *Pico Veleta* ó el *Faro* en menor medida son fácilmente reconocibles en los diagramas que veremos a continuación, como únicos elementos perturbadores en las medidas. Este hecho hace que los resultados que hemos obtenido puedan ser extrapolables fácilmente a otros lugares con características semejantes, pudiendo tratar el horizonte específico como una modificación particular a los hechos que vamos a exponer.

Independientemente de la radiancia reflejada por las superficies que limiten el horizonte, debido a las circunstancias orográficas particulares de cada lugar, el aumento de la radiancia en esta zona del cielo cercana al horizonte se pone de manifiesto de forma muy clara cuando analizamos gráficos del estilo al presentado en la figura 1. En esta figura ofrecemos una representación en dos y tres dimensiones del campo de radiancia bajo condiciones de cielo despejado, correspondiente a un barrido de nuestra base de datos en Veleta.

La típica forma de *sombrero mejicano* resalta el denominado *horizonte brillante* consecuencia del scattering producido por un mayor espesor óptico de

la atmósfera conforme aumenta el ángulo cenital (Kondratyev, 1969). Es también de destacar en esta figura el aumento de la radiancia procedente de la posición solar y de su entorno, formando la denominada *aureola solar ó radiación circunsolar*, estudiada ya en el capítulo anterior.

La representación bidimensional y tridimensional de las medidas de radiancia, al igual que las de irradiancia, presenta bastantes ventajas a la hora de extraer conclusiones e interpretar los datos obtenidos, (Olmo et al., 1990, 1991). El aumento de las medidas realizadas por el MORAS en torno al horizonte permite obtener una mejor representación de la distribución angular de la radiancia en esta zona *conflictiva* por naturaleza. Centrándonos en la radiancia procedente del horizonte, y analizando el ejemplo de la figura 1, se distingue de forma clara el *Pico Veleta* al NE, así como un aumento de la radiancia el cual se hace máximo a una cierta elevación que posteriormente trataremos de delimitar, para disminuir formándose un valle en torno a los valores máximos del diagrama correspondientes a la posición solar y sus cercanías. En el caso de la figura 3, que representa un barrido de Sabinal, cualitativamente la distribución es semejante. En este caso, y por razón de escala, se distingue el *Faro* al NW en el diagrama 2D, mejor que en el 3D.

Como hemos dicho, el patrón descrito corresponde al comportamiento típico para un día despejado. El *Pico Veleta* es fácilmente reconocible en el Noreste del diagrama como único elemento perturbador de este horizonte particular. Si ahora comparamos esta figura con las figuras 2.a , 2.b y 2.c, las cuales representan el mismo caso ilustrado en la 1, pero generadas a partir de los modelos TCCD (Hooper et al., 1987), de Harrison (Harrison et al, 1988a) y el modelo de Brunger (Brunger et al., 1993), podemos darnos cuenta de que, independientemente de lo bien ó mal que estos modelos puedan reproducir el campo de radiancia para el hemisferio superior, incluso reproduciendo el mismo

comportamiento que el observado experimentalmente, presentan un comportamiento realmente *pobre* en la región del horizonte (idénticos comentarios podemos hacer en las figuras 4.a, b y c). La prueba y comparación de modelos se realiza en el siguiente capítulo de esta Memoria, por lo que no vamos a profundizar ahora dando más ejemplos. Sirvan estas figuras como muestra de lo mal que, en líneas generales, se comportan los modelos de radiancia del cielo en torno al horizonte, en parte, como comentábamos anteriormente, por la dificultad inherente de esta zona del cielo, y por no disponer de datos fiables que permitan mejorar su entendimiento para posteriormente incluir sus efectos en un modelo de cálculo empírico.

Con el objeto de sacar conclusiones lo más generales posibles sobre la distribución del horizonte, se ha procedido, sobre la base de la interpretación bidimensional y tridimensional, al estudio de esta franja para Sabinal y Veleta para días despejados, centrándonos en los siguientes aspectos fundamentales:

- Establecer el alcance del llamado *horizonte brillante*.
- Dependencia de la distribución con la posición solar,  $(\gamma_o, \phi_o)$ .  
(elevación y acimut respectivamente)
- Dependencia de la distribución con el ángulo acimutal  $(\phi)$  y el grado de turbiedad de la atmósfera.

## **2. SELECCION DE LOS DATOS. ANALISIS ESTADISTICO**

### **2.1) Selección previa**

Para el desarrollo de este estudio, hemos empleado los datos correspondientes al primer cinturón en la división por elevación descrita en el capítulo anterior. Este conjunto abarca, como se ha dicho, las elevaciones de 0,

3, 6, 9, 12, 15 y 18 grados. De esta selección resultó un total de 50.816 datos puntuales en Sabinal y 41.120 datos puntuales en Veleta, correspondientes a los días despejados de estas campañas, como ya se comentó en el capítulo 4. De forma semejante a entonces, un primer análisis estadístico de estos datos nos ofrece los resultados de las tablas 1 y 2 para Sabinal y Veleta respectivamente:

SABINAL	L (W/m <sup>2</sup> )	L/Lz	L/IHDI (sr <sup>-1</sup> )
Datos	50816		
MEDIA	40.71	1.82	0.34
MEDIANA	33.50	1.08	0.26
MODA	28.80	0.31	0.22
SDEV	26.55 (65%)	2.67 (147%)	0.29 (84%)
SKEW	4.03	5.11	5.38
CURT	22.90	38.75	44.23
MAX	292.1	38.95	4.64
MIN	15.8	0.12	0.11

Tabla 1: Características de la Radiancia en el Horizonte en SABINAL.

VELETA	L (W/m <sup>2</sup> )	L/Lz	L/IHDI (sr <sup>-1</sup> )
Datos	41120		
MEDIA	31.31	3.22	0.56
MEDIANA	26.20	2.29	0.44
MODA	21.30	0.81	0.31
SDEV	20.61 (66%)	3.72 (115%)	0.45 (81%)
SKEW	4.13	7.81	7.86
CURT	33.44	114.03	117.73
MAX	292.1	84.61	11.05
MIN	2.4	0.23	0.07

Tabla 2: Características de la Radiancia en el Horizonte en VELETA.

Como se aprecia en las tablas, destaca el que la radiancia normalizada,  $L/IHDI$  o  $L/Lz$ , presenta una mayor asimetría en Veleta que en Sabinal, así como valores máximos muy superiores a los de Sabinal. Esto evidencia nuevamente la mayor transparencia de la atmósfera en Veleta, que se traduce en una menor radiancia en el cenit y menor irradiancia difusa, así como una mayor anisotropía de la distribución en Veleta.

Este ha sido el comportamiento observado para todo el campo de radiancia, que ahora se reproduce en el caso del horizonte. La desviación estándar también llega a valores en torno a la media y solo en el caso de  $L/IHDI$  los valores de media, mediana y moda se aproximan entre sí.

Los datos correspondientes a una elevación  $\gamma=0^\circ$  solo se registran en los cuatro puntos cardinales. Suponen 1580 datos puntuales en Sabinal y 1352 en Veleta y no han sido considerados en este estudio ya que incluyen contaminación del suelo. Los datos para  $\gamma=15^\circ$  también son escasos (ver patrón de medida en el capítulo 3), aunque sí se han empleado.

Teniendo esto en cuenta hemos realizado un estudio estadístico semejante al anterior, pero detallado para cada elevación considerada. En este caso ofrecemos también el **Rango Intercuartilar (R.I.)**. Un valor mayor o menor de R.I. viene a indicar la mayor o menor concentración de la serie en torno a la media, lo cual está relacionado también con la divergencia o convergencia de media, mediana y moda que antes comentábamos. Este estudio se presenta en las Tablas 3, 4 y 5 para Sabinal y en las Tablas 6, 7 y 8 para Veleta. En estas Tablas ofrecemos los datos estadísticos para cada una de las elevaciones consideradas en el patrón de medida experimental, comentado en el capítulo 3 de esta memoria.

L	Media	Mediana	Moda	Max	Min	SDEV	R.I.
$\gamma=3^\circ$	45.98	38.80	38.70	251.4	23.00	24.72	13.1
$\gamma=6^\circ$	45.18	37.50	34.10	285.9	24.10	24.65	14.2
$\gamma=9^\circ$	41.81	34.00	29.00	292.1	21.80	24.41	13.9
$\gamma=12^\circ$	38.50	30.60	26.20	292.10	19.70	24.88	13.3
$\gamma=15^\circ$	39.17	26.50	24.70	292.10	17.80	37.70	10.0
$\gamma=18^\circ$	34.44	26.10	20.60	292.10	15.80	29.07	13.4

**Tabla 3:** Características de la Radiancia en el Horizonte en SABINAL, considerando las distintas elevaciones.

L/Lz	Media	Mediana	Moda	Max	Min	SDEV	R.I.
$\gamma=3^\circ$	2.01	1.25	0.31	31.03	0.15	2.59	1.97
$\gamma=6^\circ$	2.00	1.25	0.31	33.59	0.15	2.58	1.95
$\gamma=9^\circ$	1.84	1.13	0.29	38.95	0.14	2.50	1.78
$\gamma=12^\circ$	1.72	1.03	0.25	38.95	0.13	2.52	1.62
$\gamma=15^\circ$	1.98	0.97	0.23	38.95	0.14	3.85	1.40
$\gamma=18^\circ$	1.60	0.89	0.22	38.95	0.12	2.85	1.35

**Tabla 4:** Características de L/Lz en el Horizonte en SABINAL, considerando las distintas elevaciones. (Lz-Radiancia en el cenit)

L/IHDI	Media	Mediana	Moda	Max	Min	SDEV	R.I.
$\gamma=3^\circ$	0.38	0.30	0.25	3.70	0.14	0.27	0.12
$\gamma=6^\circ$	0.37	0.30	0.25	4.01	0.15	0.27	0.13
$\gamma=9^\circ$	0.35	0.27	0.25	4.64	0.14	0.26	0.12
$\gamma=12^\circ$	0.32	0.24	0.22	4.64	0.13	0.27	0.10
$\gamma=15^\circ$	0.34	0.22	0.19	4.64	0.12	0.43	0.07
$\gamma=18^\circ$	0.29	0.21	0.17	4.64	0.11	0.31	0.10

**Tabla 5:** Características de L/IHDI en el Horizonte en SABINAL, considerando las distintas elevaciones.  
(IHDI-Irradiancia Difusa Horizontal Integrada)

L	Media	Mediana	Moda	Max	Min	SDEV	R.I.
$\gamma=3^\circ$	41.87	37.3	34.7	194.3	2.4	19.35	13.9
$\gamma=6^\circ$	36.35	29.9	26.2	236.6	4.8	19.16	14.2
$\gamma=9^\circ$	29.67	24.2	21.0	274.3	7.4	16.50	12.0
$\gamma=12^\circ$	26.63	20.5	18.4	291.9	11.2	19.90	11.3
$\gamma=15^\circ$	24.35	17.6	15.7	243.8	9.8	18.58	11.9
$\gamma=18^\circ$	22.00	15.8	-	292.1	8.5	21.31	9.6

**Tabla 6:** Características de la Radiancia en el Horizonte en VELETA, considerando las distintas elevaciones

L/Lz	Media	Mediana	Moda	Max	Min	SDEV	R.I.
$\gamma=3^\circ$	4.32	3.17	1.37	41.25	0.23	3.62	4.37
$\gamma=6^\circ$	3.68	2.83	1.25	60.81	0.24	3.28	3.49
$\gamma=9^\circ$	3.01	2.33	0.96	68.57	0.24	3.01	2.70
$\gamma=12^\circ$	2.76	2.05	0.94	84.61	0.25	4.21	2.31
$\gamma=15^\circ$	2.49	1.79	0.75	19.98	0.26	2.42	1.90
$\gamma=18^\circ$	2.29	1.60	-	70.76	0.23	4.01	1.76

**Tabla 7:** Características de L/Lz en el Horizonte en VELETA, considerando las distintas elevaciones. (Lz-Radiancia en el cenit)

L/IHDI	Media	Mediana	Moda	Max	Min	SDEV	R.I.
$\gamma=3^\circ$	0.75	0.69	0.34	5.01	0.07	0.42	0.44
$\gamma=6^\circ$	0.64	0.57	0.57	8.24	0.09	0.39	0.33
$\gamma=9^\circ$	0.52	0.46	0.44	8.33	0.09	0.34	0.23
$\gamma=12^\circ$	0.47	0.39	0.38	11.05	0.10	0.51	0.19
$\gamma=15^\circ$	0.42	0.34	0.34	2.12	0.16	0.28	0.14
$\gamma=18^\circ$	0.39	0.30	0.28	8.27	0.09	0.48	0.14

**Tabla 8:** Características de L/IHDI en el Horizonte en VELETA, considerando las distintas elevaciones.  
(IHDI-Irradiancia Difusa Horizontal Integrada)

## 2.2) Selección definitiva

Para desarrollar este trabajo, hemos considerado importante la comparación de la radiancia en el horizonte con respecto a otro punto significativo en la cúpula celeste, como es el **cenit**. También, con el objetivo planteado de analizar su dependencia con el ángulo acimutal, hemos centrado nuestra atención en la posición solar y considerado diferentes planos con respecto al sol. Estos planos viene caracterizados por el acimut relativo  $\alpha_s = | \phi - \phi_o |$ , siendo  $\phi$  el acimut del punto del cielo considerado y  $\phi_o$  el acimut solar. Concretamente hemos elegido los planos dados por  $\alpha_s = 0, 30, 60, 90, 120$  y  $180$  grados.

Al igual que en el capítulo anterior, dado que trabajamos con medidas experimentales, sin ningún tipo de interpolación ni promedio, hemos tenido que elegir un cierto intervalo dentro de cada  $\alpha_s$ . En este sentido, para considerar un dato perteneciente a un plano determinado hemos aceptado un margen de  $\pm 5^\circ$ . Lógicamente, esto reduce el número de datos REAL para cada elevación. Así, el número total de datos para cada elevación considerada, contenido en cada una de las agrupaciones, puede resumirse según mostramos en las tablas 9 y 10:

SAB	$\alpha_s=0^\circ$	$\alpha_s=30^\circ$	$\alpha_s=60^\circ$	$\alpha_s=90^\circ$	$\alpha_s=120^\circ$	$\alpha_s=180^\circ$	TOT
$\gamma=3^\circ$	259	230	234	236	230	250	1439
$\gamma=6^\circ$	227	236	232	223	236	221	1375
$\gamma=9^\circ$	259	230	232	234	230	249	1434
$\gamma=12^\circ$	226	236	231	222	236	222	1373
$\gamma=15^\circ$	109	34	36	105	34	107	425
$\gamma=18^\circ$	312	283	272	303	283	304	1757
<b>TOT</b>	1392	1249	1237	1323	1249	1353	7803

**Tabla 9:** Número de datos para SABINAL, en función de la elevación sobre el horizonte ( $\gamma$ ) y el acimut relativo al sol ( $\alpha_s = | \phi - \phi_o |$ ).

VEL	$\alpha_s=0^\circ$	$\alpha_s=30^\circ$	$\alpha_s=60^\circ$	$\alpha_s=90^\circ$	$\alpha_s=120^\circ$	$\alpha_s=180^\circ$	TOT
$\gamma=3^\circ$	221	238	243	242	238	221	1403
$\gamma=6^\circ$	201	179	185	219	179	201	1164
$\gamma=9^\circ$	221	239	243	242	239	219	1403
$\gamma=12^\circ$	199	177	184	220	177	198	1155
$\gamma=15^\circ$	67	21	25	73	21	67	274
$\gamma=18^\circ$	213	263	255	231	263	212	1437
TOT	1122	1117	1135	1227	1117	1118	6836

**Tabla 10:** Número de datos para VELETA, en función de la elevación sobre el horizonte ( $\gamma$ ) y el acimut relativo al sol ( $\alpha_s = | \phi - \phi_o |$ ).

Por otro lado, al haber disminuido el número de datos empleado en este capítulo, además del análisis estadístico realizado para la totalidad de los datos y que se presentó antes, hemos considerado oportuno comentar el análisis estadístico de los DATOS REALES de radiancia normalizada al cenit ( $L/L_z$ ) seleccionados de esta forma. El resultado obtenido puede apreciarse en las tablas 11 y 12. Al compararlas con las tablas 4 y 7 anteriores, vemos que la estadística es semejante. No obstante, los valores dentro de cada categoría son más *uniformes* y para cada magnitud representada en las tablas ahora son más parecidos o del mismo orden.

L/Lz	Media	Mediana	Moda	Max	Min	SDEV	R.I.
$\gamma=3^\circ$	2.21	1.27	0.28	26.19	0.22	2.76	1.98
$\gamma=6^\circ$	2.22	1.36	0.38	13.21	0.16	2.42	2.02
$\gamma=9^\circ$	2.03	1.16	0.25	30.43	0.19	2.72	1.71
$\gamma=12^\circ$	1.90	1.14	0.34	12.53	0.14	2.15	1.64
$\gamma=15^\circ$	2.45	1.53	1.66	13.29	0.18	2.74	1.27
$\gamma=18^\circ$	1.83	0.91	0.21	32.82	0.14	3.17	1.38

**Tabla 11:** Características por elevaciones de los datos de  $L/L_z$  en el Horizonte, *seleccionados* en SABINAL.

L/Lz	Media	Mediana	Moda	Max	Min	SDEV	R.I.
$\gamma=3^\circ$	4.60	3.11	1.39	41.25	0.24	4.38	4.60
$\gamma=6^\circ$	4.03	2.67	1.16	60.81	0.27	5.10	3.38
$\gamma=9^\circ$	3.57	2.38	0.86	68.57	0.28	5.01	2.97
$\gamma=12^\circ$	3.80	1.94	1.13	84.61	0.29	9.14	2.28
$\gamma=15^\circ$	2.84	2.15	2.17	13.92	0.26	2.45	1.78
$\gamma=18^\circ$	3.57	1.82	0.67	70.76	0.24	8.87	1.89

Tabla 12: Características por elevaciones de los datos de L/Lz en el Horizonte, *seleccionados* en VELETA.

### 3. ESTABLECIMIENTO DEL HORIZONTE BRILLANTE

#### 3.1) Horizonte Brillante

Diversos autores señalan que la distribución de radiancia del cielo para días despejados, presenta un aumento conforme consideramos puntos del cielo de mayor elevación, hasta llegar a un punto a partir del cual este aumento se invierte formando en el diagrama tridimensional una depresión como paso previo a la zona de valor máximo en torno a la posición del Sol (por ejemplo Iqbal, 1983). Este efecto, denominado *Horizonte Brillante* (Horizon Brightening), es más acusado dependiendo de las condiciones de turbiedad del día y de la cubierta nubosa, desapareciendo para cielos completamente cubiertos ó disminuyendo sensiblemente para días con turbiedad elevada (Brunger et al., 1991).

Para nuestra comprobación, elegimos dos días en Sabinal y dos en Veleta, y en cada uno hemos seleccionado dos barridos con semejante altura solar. Hemos procurado escoger el día con menor y mayor coeficiente de turbiedad de Linke, coincidiendo con la selección del capítulo 4, y una altura solar elevada ( $\gamma_0 \approx 75^\circ$ ) y mediana ( $\gamma_0 \approx 45^\circ$ ). En las figuras 5 y 6 para Sabinal y 7 y 8 para

Veleta, ofrecemos el corte en el plano solar para los barridos indicados (recordamos que en las figuras 2D, el Sur está en el extremo superior). Observamos que la altura solar es determinante, influyendo decisivamente en la distribución en el caso de  $\gamma_0 \approx 45^\circ$ . Lógicamente, para alturas solares inferiores el horizonte cercano a la posición solar queda totalmente "enmascarado" por la radiancia circunsolar.

Independientemente del valor máximo, en los casos con semejante  $\gamma_0$  el aumento de TL (y Dh/Gh) se refleja en una mayor extensión de la zona circunsolar y valores claramente inferiores en la región de transición hacia el horizonte. También observamos que el horizonte presenta valores superiores de la radiancia en los barridos con mayor TL, que en los barridos con mayor transparencia atmosférica. En el caso de  $\gamma_0 \approx 45^\circ$ , este hecho se observa también en la zona del corte no contaminada por el sol.

En definitiva, confirmamos las referencias y volveremos a estos ejemplos más adelante. Sin embargo, lo que no se ha podido determinar con precisión es la elevación respecto al horizonte para la que se da este máximo de *Horizonte Brillante*, y como varía de unos lugares a otros. Para estudiar este hecho, y aprovechando la mayor cantidad de medidas experimentales realizadas en torno al horizonte, tras la selección antes detallada hemos empleado datos de radiancia normalizados a la radiancia en el cenit, para minimizar los efectos debidos a diferentes condiciones de turbiedad atmosférica.

### 3.2) Determinación del *Horizonte Brillante* en Sabinal y Veleta

Nuestra base de datos incluye una amplia gama de elevaciones solares que han permitido realizar los gráficos que se muestran a continuación. En estos gráficos representamos la radiancia normalizada a la del cenit, en función de la altura solar para cada una de las elevaciones sobre el horizonte consideradas ( $\gamma$ )

y para diferentes planos, definidos por la distancias acimutales respecto a la posición del Sol ( $\alpha_s$ ). En las figuras 9-14 ofrecemos para cada elevación ( $\gamma$ ) todos los casos contemplados para el acimut relativo ( $\alpha_s$ ) en Sabinal y Veleta. Debido a los valores encontrados, se ha preferido una representación logarítmica para poder representar todos los casos bajo la misma escala. Para estudiar hasta que punto la radiancia en el horizonte es más importante que en el cenit, hemos representado la línea  $L/L_z=1$ . Comparando la serie de figuras, observamos las siguientes características:

- a) Una mayor irregularidad de los datos en Veleta que en Sabinal, que puede estar ocasionada por la diferencia de altura y por lo tanto de un horizonte natural menos contaminado. Esta circunstancia también da lugar a una gran diferencia de masa óptica soportada por un observador situado en Sabinal y a una mayor anisotropía en Veleta. Este resultado se reflejaba ya en el análisis estadístico anterior.
- b) De forma sistemática el cociente  $L/L_z$  es mayor en  $\alpha_s=0^\circ$  para disminuir gradualmente hasta  $\alpha_s=120^\circ$ . En  $\alpha_s=180^\circ$  el comportamiento se invierte, aumentando en líneas generales. Este efecto es más acusado en Veleta, donde claramente se aprecian los datos correspondientes a esta categoría (●) frente a los demás.
- c) En Sabinal, y para todas las elevaciones, el horizonte aparece más brillante que el cenit para alturas solares inferiores a  $\gamma_o=40^\circ-50^\circ$ . Se observa también que  $L/L_z$  es, en la mayoría de los casos, mayor para  $\gamma=9^\circ$ .
- d) En Veleta, y para  $\gamma=3^\circ$  y  $\gamma=6^\circ$ , el cenit aparece más brillante para alturas solares inferiores al resto de los casos. Ante la posibilidad de

que esto fuese debido a la influencia del Pico, procedimos a eliminar los datos para esa zona (acimut entre 180 y 270 grados), confirmando nuestras sospechas (figura 15). Es decir, el Pico cuando no está iluminado por el sol produce una radiancia en el horizonte (reflejada en este caso) inferior a la que habría de no existir el Pico. En las demás elevaciones el comportamiento es semejante a Sabinal aunque no así en cuanto a los valores de  $L/Lz$ . El cociente resulta ser mayor para  $\gamma=3^{\circ}-6^{\circ}$  en la mayoría de los casos.

e) La elevación  $\gamma=18^{\circ}$  marca en nuestro estudio el límite de lo que podríamos considerar como horizonte. En este caso, tenemos un aumento considerable del cociente  $L/Lz$  en el plano solar ( $\alpha_s=0^{\circ}$ ) para elevaciones solares cercanas a  $18^{\circ}$ . Lo que reflejan los datos en este caso sería el comienzo de la zona circunsolar (*gorro mejicano*) en los barridos con  $\gamma_0$  cercano a  $18^{\circ}$ , por lo que no podemos considerar este aumento para establecer el límite del *horizonte brillante*.

En Veleta tenemos datos correspondientes a elevaciones solares inferiores a las de Sabinal. Es precisamente en esta zona donde observamos mayor irregularidad en la distribución, debido al Pico, mostrando la importancia de que el horizonte esté o no despejado en estos momentos. La influencia del horizonte es decisiva a primeras horas del día, cuando el sol está muy bajo. Entonces la radiancia se hace máxima para  $\alpha_s=0^{\circ}$  con respecto al cenit, para disminuir drásticamente al considerar otros  $\alpha_s$ . En los puntos del cielo opuestos al sol ( $\alpha_s=180^{\circ}$ ),  $L/Lz$  aumenta de nuevo. Este efecto no es tan acusado a partir de una elevación solar de  $20^{\circ}$ , pues también aumenta  $Lz$ , por lo que la forma *curva* de la distribución en esta zona no se observa en Sabinal. Además, no debemos olvidar la influencia del Pico en esta zona del cielo (figura 15).

Con el objetivo de comparar más detalladamente Sabinal y Veleta, hemos realizado los gráficos de las figuras 16-27. Cada gráfico incluye los datos de Sabinal y de Veleta para una combinación determinada de elevación sobre el horizonte ( $\gamma$ ) y plano acimutal ( $\alpha_s$ ). Los gráficos para  $\gamma=18^\circ$  son, lógicamente, los mismos presentados en el capítulo anterior, cambiando la escala lineal por logarítmica. Como ya se ha dicho, las diferencias entre los obstáculos en el horizonte de Veleta y el de Sabinal, consecuencia de la altura, nos llevan a tener en Veleta casos de altura solar inferior a la de Sabinal. Independientemente de este hecho, analizando estos gráficos podemos establecer resultados importantes:

- a) Para  $\alpha_s < 90^\circ$ , la zona del cielo en torno al horizonte aparece, en términos generales, más brillante que el cenit hasta elevaciones solares de  $\gamma_o=60^\circ-70^\circ$ . Para  $\alpha_s \geq 90^\circ$  la línea divisoria ( $L/Lz=1$ ) es rebasada con mayor intensidad en torno a  $\gamma_o=40^\circ-50^\circ$ . Esta tendencia no es idéntica en Sabinal y en Veleta, verificándose en Veleta esta situación con un *retraso* de unos  $5^\circ$  de más sobre los comentarios anteriores. Es decir, la atmósfera más limpia de Veleta da lugar a valores inferiores de  $Lz$  incluso para elevaciones solares altas.
- b) Comparando los gráficos correspondientes a Veleta dentro de cada figura, podemos observar que el cociente  $L/Lz$  es efectivamente, en líneas generales, semejante para  $\gamma=3^\circ$  y  $\gamma=6^\circ$ , y en cualquier caso mayor que para  $\gamma=9^\circ$  para todos los acimut ( $\alpha_s$ ) y casi todas las elevaciones solares. En el caso de Sabinal este comentario lo tenemos que hacer para  $\gamma=6^\circ$  y  $\gamma=9^\circ$  frente a  $\gamma=3^\circ$ . Tanto en Sabinal como en Veleta, este cociente decrece al aumentar  $\gamma$  hacia los  $18^\circ$ .
- c) Independientemente de la elevación sobre el horizonte y para  $\alpha_s < 90^\circ$  observamos el siguiente resultado: para una misma altura solar en

Sabinal y en Veleta, la radiancia relativa es mayor en Sabinal que en Veleta para valores pequeños de la altura solar. En torno a los  $40^{\circ}$ - $50^{\circ}$  se verifica una coincidencia de valores dando lugar a una inflexión en el comportamiento, para ser entonces el cociente mayor en Veleta que en Sabinal. Es decir, las dos curvas formarían una *hélice* en torno a  $\gamma_0 \approx 40^{\circ}$ . Este hecho puede atribuirse de nuevo al horizonte más transparente en Veleta (alta montaña), que da lugar a valores inferiores que en Sabinal de la radiancia para elevaciones solares pequeñas. De igual manera, los valores mayores en Sabinal de la radiancia en el cenit al aumentar  $\gamma_0$ , debidos a una zona circunsolar más extensa, ocasionarían la inflexión.

d) Para  $\alpha_s \geq 90^{\circ}$ , el cociente en Veleta es sistemáticamente mayor que en Sabinal, para cualquier altura solar y elevación sobre el horizonte. Este hecho pone de manifiesto la importancia relativa de la radiancia del cenit al alejarnos del plano solar ( $\alpha_s = 0^{\circ}$ ), y cómo varía ésta con los valores mayores de TL en Sabinal (mayor turbiedad atmosférica).

e) Se observa una distribución más simétrica y regular en el caso de Sabinal como contraste a las distribuciones que observamos en Veleta, mucho más irregulares principalmente para  $\alpha_s = 60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  y  $120^{\circ}$ . En estos últimos casos, y para  $\gamma = 3^{\circ}$ ,  $6^{\circ}$  y  $9^{\circ}$  obtenemos una distribución *curva*, indicando una mayor importancia del cenit frente a la radiancia del horizonte para elevaciones solares ( $\gamma_0$ ) pequeñas y elevadas. Como se ha comentado, en un caso por la influencia del Pico, y en el otro por el aumento de Lz.

Como resultado de este análisis, podríamos concluir que el llamado *horizonte brillante* es un fenómeno que no se da por igual, sino que depende de las condiciones de turbiedad, de la altura y de los obstáculos en el horizonte.

Estas tres características determinan fuertemente las condiciones de la campaña en Sabinal y Veleta. Por ello, el fenómeno prácticamente aparece desde las primeras medidas tomadas a  $\gamma=3^\circ$  y  $\gamma=6^\circ$  en Veleta, en donde encontramos esos valores máximos de radiancia en el horizonte, mientras que se retrasa al entorno de los  $10^\circ$  de elevación en Sabinal. Este último resultado coincide con las primeras estimaciones de Valko en la estación de EMPA, situada a una altura de 445 metros sobre el nivel del mar (Page, 1986). En Veleta el *horizonte brillante* aparece en las elevaciones más bajas, mientras que en Sabinal aparece en torno a los 6-10 grados de elevación.

#### **4. DEPENDENCIA ACIMUTAL Y CON EL GRADO DE TURBIEDAD DE LA RADIANCIA EN EL HORIZONTE**

Volvemos ahora con los ocho barridos empleados en el punto anterior. Son los casos extremos de turbiedad baja y alta en Sabinal (dos barridos día 166 y dos barridos día 170) y en Veleta (dos barridos días 190 y dos barridos día 192). En primer lugar hemos realizado las figuras 28 y 29, representando el corte para  $3^\circ$  de elevación sobre el horizonte, en los  $360^\circ$  de acimut (Sur=acimut cero). En el caso de los barridos con altura solar cercana a  $45^\circ$ , la radiancia en el horizonte queda bastante enmascarada en torno a la posición solar. De nuevo se intuye el Faro al NW en la figura 28 y el pico Veleta en la figura 29.

Por ello nos centraremos en los barridos con mayor altura solar (figuras 30 y 31). En este caso hemos realizado el corte a  $3^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $9^\circ$  y  $12^\circ$  de elevación en los  $360^\circ$  de acimut (Sur=acimut cero). Observamos que, efectivamente, la radiancia es mayor para una elevación de  $\gamma=3^\circ$  en Veleta, y en este caso concreto también en Sabinal, aunque con menor diferencia entre los cortes a 3 y 6 grados.

Aunque en el caso de los barridos de Sabinal, la diferencia de TL entre ellos (TL=3.61 y TL=4.01) no es tan acusada como en Veleta (TL=2.44 y TL=5.35), en ambas figuras es evidente la influencia que se ejerce en la distribución. En la figura 32, centramos nuestra atención sobre una elevación de 3 grados, y ofrecemos los cortes para cada barrido en Sabinal y Veleta. El aumento de radiancia con TL es evidente.

#### 4.1) Elevaciones solares altas

Ante estos resultados previos, hemos procedido a seleccionar todos los barridos de Sabinal y de Veleta con una altura solar comprendida entre 70° y 80° de elevación solar, obteniendo un total de 108 casos en Sabinal y 68 en Veleta. De estos barridos, hemos considerado solo uno por serie para nuestro estudio, lo que ha arrojado un total de 41 casos en Sabinal y 27 en Veleta. Al igual que antes, hemos representado los cortes a 3, 6, 9 y 12 grados de elevación, distinguiendo, por los valores obtenidos, dos rangos de TL en cada estación: 3-4 y 4-5 en Sabinal; 2-3 y mayor de 3 en Veleta. El resultado son las figuras 33-36 para Sabinal y 37-40 para Veleta.

En Sabinal observamos que la diferencia de turbiedad no da lugar a cortes tan diferenciados como en Veleta. Si superponemos las figuras vemos como, efectivamente, para  $\gamma=6^\circ$  la radiancia es, en términos generales, mayor que para el resto de las elevaciones. Esta aumenta de 3 a 6 grados, y disminuye al pasar a 9 y 12 grados. Sin embargo, hay un hecho destacado, que tiende a desaparecer en 9 y 12 grados, y es "*un rizo*" en el corte cerca del Norte.

Ante lo inesperado del resultado, comprobamos que se trata de dos barridos concretos (día/serie/barrido: 165/8/2 y 165/9/1). Recurrimos entonces a la representación tridimensional de los barridos, para identificar la causa de estos valores en el corte. Igualmente, acudimos a la fotografía "ojo de pez" que,

por suerte, existe para esos barridos. La figura 41 pone de manifiesto unos picos en el horizonte, en torno al Norte-Noroeste de la representación. Visualmente observamos la existencia de nubes en cantidad inferior a una octa.

Es decir, el día está catalogado como despejado, sin embargo la distribución de radiancia evidencia la presencia de formación nubosa en esos barridos. Este hecho resalta nuevamente la importancia del estudio de la distribución angular de la radiancia, como único medio de interpretar ciertos fenómenos que pasarían inadvertidos de otra forma. Igualmente pone de manifiesto la bondad de este método para detectar e interpretar las nubes y sus efectos (Vida et al, 1992).

Dejando a un lado estos dos barridos, en Sabinal no existe la diferencia tan acusada con el índice de turbiedad de Linke que observamos en Veleta (figuras 37-40). Con independencia del Pico, los valores de radiancia también permanecen constantes e independientes del acimut,  $\phi$ . El aumento de TL da lugar a un aumento prácticamente constante en todo el horizonte. Según podemos observar, en Veleta los cambios en TL definen de forma precisa el aumento o la disminución de radiancia. Efectivamente, los casos de TL entre 2 y 3 son todos próximos a tres y en cualquier caso mayor que 2.5. Para ellos, la radiancia es constante y disminuye con la elevación que se considere sobre el horizonte. Los casos de  $TL > 3$ , son todos alrededor de 5, salvo tres en torno a 3.5 (los cortes inferiores), y el comentario anterior se verifica de igual manera.

#### **4.2) Elevaciones solares bajas**

Cuando el sol se encuentra bajo en el horizonte, los cortes que obtenemos están muy condicionados por la posición solar. Ya hemos podido comprobar este hecho para alturas solares cercanas a  $45^\circ$ . Para extender este estudio, al igual que antes, hemos seleccionado los barridos con elevación solar,  $\gamma_0$ , inferior a  $20^\circ$ . En

total dos casos en Sabinal y ocho en Veleta. Evidentemente el corte presenta el máximo en el acimut cercano al sol, con independencia del "*cinturón*" considerado, lo que únicamente se refleja en los valores absolutos obtenidos. En la tabla 13 ofrecemos los datos más importantes de estos barridos.

En la figura 42 para Sabinal y en las figuras 43 y 44 para Veleta, hemos representado estos barridos en tres dimensiones, para observar el efecto del sol en estos casos. Como estos barridos corresponden a últimas horas de la tarde o a primeras horas de la mañana, el pico Veleta queda enmascarado por el sol en la figura 44 y está muy reducido su efecto en la figura 43. En cualquier caso, en estas figuras observamos que el efecto de *horizonte brillante* aún es poco perceptible y que está condicionado por la posición solar.

SABINAL	HH/MM/SS	$\gamma_0$ (°)	$\phi_0$ (°)	$K_t$	$K_d$	K	TL	IHDI (W/m <sup>2</sup> )	Dh (W/m <sup>2</sup> )	Gh (W/m <sup>2</sup> )	$\bar{L}_z$ (W/m <sup>2</sup> sr)
150/16/5	17/23/57	19.75	102.89	0.63	0.19	0.31	3.36	77.4	86.8	282.6	9.11
163/19/4	17/30/25	19.25	105.00	0.65	0.15	0.23	2.78	65.6	65.6	282.0	7.90

VELETA	HH/MM/SS	$\gamma_0$ (°)	$\phi_0$ (°)	$K_t$	$K_d$	K	TL	IHDI (W/m <sup>2</sup> )	Dh (W/m <sup>2</sup> )	Gh (W/m <sup>2</sup> )	$\bar{L}_z$ (W/m <sup>2</sup> sr)
184/12/1	17/44/34	16.55	106.62	0.75	0.08	0.10	1.91	35.5	29.7	283.9	4.26
185/22/1	18/02/23	13.12	108.95	0.73	0.11	0.15	1.95	28.7	33.7	219.5	3.83
188/19/1	17/40/52	17.05	105.80	0.75	0.08	0.10	1.97	35.6	29.7	290.9	4.27
189/19/3	17/28/43	19.33	104.08	0.83	0.11	0.13	1.95	37.5	47.1	363.0	4.53
190/1/3	5/53/38	12.11	250.89	0.70	0.08	0.12	1.73	28.1	22.4	194.5	3.79
196/2/1	5/58/50	12.63	252.28	0.70	0.05	0.07	1.76	30.8	13.9	202.8	3.92
196/3/2	6/34/42	19.52	257.15	0.77	0.05	0.06	1.86	38.9	22.9	352.6	4.73
197/1/1	6/30/44	18.67	256.75	0.75	0.05	0.07	2.03	38.7	22.5	316.5	4.74

Tabla 13: Principales características de los barridos seleccionados con  $\gamma_0 < 20^\circ$ , representados en las figuras 42-44.

En virtud de los resultados obtenidos en este estudio, y a modo de resumen, podríamos extraer las siguiente **conclusiones**:

- a) La radiancia en el horizonte está fuertemente condicionada por los obstáculos presentes (pico Veleta). Para elevaciones solares bajas, lógicamente, el sol anula o realza posibles irregularidades en la radiancia propias de obstáculos en el horizonte.
- b) La radiancia en el horizonte no depende del ángulo acimutal del punto del cielo considerado. Para cada elevación, presenta valores semejantes bajo condiciones semejantes de turbiedad. Para elevaciones solares bajas, es importante el acimut solar. Para elevaciones solares altas, no influye.
- c) Las diferencias de altitud entre nuestras dos estaciones de medida, se refleja en que los cambios de TL medidos a partir de la extinción de la irradiancia directa, nuestro caso, se traduce en modificaciones más acusadas de la transparencia en la zona del horizonte en Veleta que en Sabinal.
- d) La radiancia en el horizonte, por todas estas consideraciones, podría reflejarse en un modelo en la forma de una contribución constante para unas determinadas condiciones de turbiedad (TL) y posición solar, manifestada a partir del ángulo de scattering,  $\Psi$ , que tiene en cuenta la elevación y acimut con respecto a cada elevación sobre el horizonte,  $\gamma$ .

## **6. MODELOS DE RADIANCIA DEL CIELO**

1. INTRODUCCION
2. RELACION LUMINANCIA-RADIANCIA DEL CIELO
3. OTRAS BASES DE DATOS SOBRE DISTRIBUCION ANGULAR DE LA RADIANCIA DEL CIELO
4. MODELOS DE LA DISTRIBUCION ANGULAR DE LA RADIANCIA DEL CIELO
5. PRUEBA DE LOS MODELOS. ANALISIS DE RESULTADOS
6. RESUMEN DE RESULTADOS. COMPARACION

## 1. INTRODUCCIÓN

La gran variedad de aplicaciones que emplean datos de radiación solar se extiende a muchas disciplinas tales como ingeniería, hidrología, agricultura, climatología ó arquitectura. Por esta razón lo ideal sería disponer de este tipo de datos para superficies con una gran diversidad de orientaciones y pendientes, aunque normalmente, y por motivos diversos, estas medidas no se realizan así. En cualquier caso, se procura llevar a cabo las medidas de irradiancia para horizontes despejados, con la idea de reducir los efectos de condiciones locales, tales como obstáculos y variaciones en la naturaleza de la superficie del suelo. De esta manera los resultados podrían hacerse extensivos a otros lugares.

Cuando estas medidas no son suficientes, tanto por su distribución espacial como temporal, se recurre a la estimación mediante modelos de las diferentes componentes de la irradiancia sobre cualquier superficie. Este cálculo implica el tratamiento separado de las tres componentes de la radiación solar incidente sobre

cualquier superficie, a saber: la directa, la difusa por el cielo y la reflejada por el suelo dentro del campo de visión de dicha superficie. De estas tres componentes, la radiación difusa llega a ser muy importante en algunas disciplinas tales como la ingeniería de sistemas de energía solar (Siala y Hooper, 1990). La magnitud de la irradiancia difusa en la superficie de la Tierra es, normalmente, mayor de lo que pueda pensarse. Para altas latitudes, la componente difusa constituye una fracción mayor de la radiación solar total que incide, por ser mayor el camino óptico medio en la atmósfera. Para lugares situados entre 40° N y 60° N la fracción difusa ( $D_h/G_h$ ) está, en término medio, comprendida entre 0.4 y 0.6 (Hooper y Brunger, 1980).

Debido a que la distribución angular de la radiancia del cielo no es isótropa, como hemos tenido ocasión de comprobar en los capítulos 4 y 5 de esta memoria, el cálculo mediante modelos da lugar a una peor estimación cuando este hecho no se tiene en cuenta en el desarrollo del mismo. De hecho, estos errores pueden alcanzar hasta el 300 ó 400 por ciento en algunos casos, cuando se emplea la aproximación de distribución isótropa para la radiancia del cielo (Dave, 1979). Entre otros factores, las propiedades de los aerosoles en la atmósfera, posición del sol y orientación de la superficie de medida son responsables de la anisotropía que presenta la distribución de radiancia. Mientras que existe un acuerdo en la mayoría de los modelos para estimar la componente directa, existe una gran variedad de formulaciones para calcular la irradiancia difusa en función de la porción de hemisferio dentro del campo de visión de la superficie.

Cualquier modelo que se emplee debe de incluir en su formulación el carácter anisótropo de la distribución angular de la radiancia del cielo, pues es esta circunstancia la que más error puede causar en las determinaciones (Hay y Mckay, 1985a). La radiación difusa resulta como consecuencia de los complejos procesos de interacción entre la radiación solar que llega a la Tierra y la

atmósfera. Como se ha visto, los fenómenos de scattering simple ó múltiple así como la absorción que tiene lugar, junto ó separadamente, a todas las longitudes de onda, modifican el campo de radiación incidente y redistribuye la energía del sol. Estos procesos conducen a una distribución angular anisótropa de la radiancia difusa. Como consecuencia de esto, la irradiancia difusa sobre una superficie colectora es una función complicada de la distribución angular de la radiancia difusa, de la orientación geométrica del colector con respecto a la cúpula del cielo y del tiempo, puesto que esta distribución depende, entre otras cosas, de la posición del sol. La ecuación de transporte radiativo que gobierna el comportamiento de un campo de radiación al pasar por un medio absorbente, emisor y dispersor, ha sido tratada por diferentes autores, (Chandrasekhar, 1960; Kourganoff, 1963; Bergstrom y Viskanta, 1973; Dave, 1975; Greenstadt y Fillmore, 1980; Buriez y Fouquart, 1980; Waterman, 1981). En este tratamiento, se realiza normalmente la suposición de atmósfera plano paralela. Los procesos de scattering de Rayleigh y de Mie, así como el efecto de las nubes, dan lugar a la característica naturaleza anisótropa de la distribución angular de la radiancia difusa a lo largo del cielo.

Ya hemos comentado que la ecuación monocromática de transporte radiativo en su forma más general, esto es, teniendo en cuenta los efectos del scattering múltiple y los de polarización así como la consideración de atmósfera no plano-paralela, necesita para su solución un detallado conocimiento de la continua variación de los constituyentes químicos y físicos de la atmósfera en cada nivel y en cada dirección de la misma. Esto representa ya de por sí una gran dificultad pero, aún en el caso de que esta información fuera accesible, sería muy difícil obtener una expresión analítica para la distribución angular de la radiancia difusa integrada para todas las longitudes de onda. El cálculo de la irradiancia difusa del cielo y reflejada por el suelo a partir de la distribución angular de la radiancia constituye el método más preciso y fiable para la determinación de esta

componente. No obstante, y debido a los factores que comentábamos anteriormente, así como el que casi todas las medidas de radiación difusa se realicen para el caso horizontal (el menos interesante) y que las medidas para otras orientaciones e inclinaciones sean muy escasas y estén muy desigualmente distribuidas, han conducido al desarrollo de muchos modelos que intentan describir, con diferente grado de éxito como veremos, la distribución angular de la radiancia difusa.

Estas formulaciones, normalmente, responden a tres enfoques distintos: modelos analíticos, modelos empíricos (y soportados por lo tanto por un análisis estadístico de datos experimentales) y modelos combinados de las dos opciones anteriores. No vamos a considerar esta clasificación, sino que vamos a realizar una descripción lo más detallada posible de los modelos existentes en general. Posteriormente estudiaremos a fondo los, a nuestro juicio, más interesantes y recientes, dejando a un lado el resto por razones diversas que se argumentarán más adelante.

## **2. RELACION LUMINANCIA-RADIANCIA DEL CIELO**

Ligado a la tarea de la modelización de la distribución de la radiancia del cielo está la tarea de modelizar la distribución de luminancia del cielo, lo que es equivalente a modelizar en el ámbito de las longitudes de onda visibles. En realidad este trabajo fue asumido por los investigadores mucho antes que el estudio de la radiancia del cielo.

Según cita de Kittler (Kittler et al., 1993), las primeras distribuciones de luminancias fueron medidas hace 90 años por Schramm (Schramm, 1901) y ya entonces se apreciaba el carácter anisotrópico de la distribución. Poco después

Kähler, (Kähler, 1908), recopilaba más datos y estudiaba el comportamiento de la luminancia relativa con respecto a la recibida por una superficie horizontal. Estamos hablando de comienzos de 1900.

Treinta años después, los estudios de Moon y Spencer (Moon et al., 1942) sirven de base para la adopción del modelo standard ISO/CIE. Evidentemente los estudios en este sentido han continuado y con esta breve reseña histórica lo que pretendemos mostrar es que muchos de los estudios actuales sobre el campo de la radiancia del cielo, se han basado, necesariamente, en resultados y estudios anteriores sobre el campo de la luminancia del cielo.

Ya que el scattering de la radiación que tiene lugar en la atmósfera depende, como se ha visto, fuertemente de la longitud de onda, nada puede sugerir "a priori" que las distribuciones de radiancia y de luminancia sean iguales. No obstante, diversos autores vienen apuntando similitudes cualitativas entre ambas distribuciones, que son más acusadas en términos relativos. En este sentido Kondratyev (Kondratyev, 1969) señala semejanzas cualitativas entre las distribuciones radiométricas y fotométricas normalizadas para cielos despejados, pero indica bastantes diferencias desde el punto de vista cuantitativo. Este mismo autor señala que estas semejanzas se convierten en similitudes evidentes para el caso de cielos nublados debido a la extensión del scattering múltiple en este caso. En idénticos términos se expresa Valko (Valko, 1980), para el que las distribuciones de luminancias pueden considerarse aproximaciones de las distribuciones de radiancia.

Más recientemente, Michalsky y su grupo (Michalsky et al., 1991) aportan nuevas evidencias indicando que estas distribuciones no son muy diferentes una de otra. En este último trabajo se abordó la comparación de seis modelos de luminancia entre los que, en realidad, figuraba uno de radiancia del cielo (modelo

de Brunger y Hooper analizado en esta memoria), que al final resultaba ser de los que mejor reproducía la distribución de luminancia, en concreto superando a tres de los otros modelos seleccionados. Otro resultado interesante de este estudio fue el que una parametrización adecuada de las condiciones de insolación era tan importante como la formulación matemática en si para un buen comportamiento del modelo (radiancia o luminancia). La validez de estos resultados viene avalado por el empleo de casi 16.000 barridos del cielo, formados por 186 valores experimentales de luminancia cada uno (Kleckner et al., 1981)

Apoyándose en este resultado, Brunger (Brunger et al., 1993) concluye que la diferencia espectral entre medidas de radiancia y luminancia no afecta de forma significativa a los patrones de distribución angular resultantes. Por otro lado, continúa, considera que las diferencias que puedan producirse durante un largo período de tiempo (por variaciones temporales o locales), quedan enmascaradas ya que las medidas se realizan, lógicamente, durante un intervalo de tiempo menor.

En este sentido es de destacar también los trabajos de Harrison (Harrison et al., 1988a y 1988b). Estos autores proponen una formulación que, a su juicio, representa correctamente la distribución de radiancia del cielo normalizada a la Irradiancia Difusa Horizontal. A partir de ella generan un nuevo modelo de luminancia del cielo idéntico al de radiancia desde un punto de vista matemático, con la única diferencia de unos valores distintos de las constantes que en él aparecen, (Harrison, 1991). La evaluación de este modelo que realiza Harrison resulta muy satisfactoria y confirma la similitud formal de un modelo empírico para la luminancia o radiancia del cielo en términos relativos. Todos estos resultados tampoco son demasiado sorprendentes si partimos de la base que el modelo de Harrison para la radiancia fue obtenido, como veremos, a partir del modelo de Kittler para la luminancia del cielo.

Todo este razonamiento nos lleva a la conclusión de que podemos, incluso debemos, incluir en nuestro análisis algún modelo desarrollado para describir la distribución angular de la luminancia del cielo, en términos de normalización con respecto al valor en un punto determinado (llámese cenit) o con respecto a la iluminancia difusa sobre un plano horizontal, pues por respeto histórico estos estudios han contribuido al desarrollo de los modelos de radiancia, y para apoyar con nuestros resultados los comentarios sobre similitudes radiancia-luminancia que acabamos de realizar.

De todas formas los estudios sobre modelos de luminancia tienen actualmente un gran interés en sí mismo y no únicamente como antesala histórica al desarrollo de modelos de radiancia. Por todo lo antes comentado y por compartir, la radiancia y luminancia del cielo, el mismo origen y naturaleza, ambas distribuciones resultan prácticamente idénticas. Por ello es evidente que estos modelos son importantes desde el punto de vista del diseño para el aprovechamiento de lo que se conoce como "luz día" (*daylight*).

Desde el punto de vista del ahorro energético el diseño de edificios, por ejemplo, pasa ineludiblemente por el estudio de la disponibilidad de *daylight*. Las condiciones de "luz día" comprenden la luz procedente directamente de sol y también la luz difusa del cielo ocasionada por el scattering en la atmósfera. La condición de cielo despejado es de gran importancia desde el punto de vista del diseño de interiores pero, contrariamente a lo que sucede con la radiación solar, la "luz día" no es algo que se mida normalmente de forma rutinaria.

Dada la importancia de este tema y para solventar esta falta de datos la CIE organizó en 1993 el *IDMP* (International Daylight Measurements Program) con el objetivo de recoger datos de daylight a lo largo del mundo. Empleando estos datos y los procedentes de otros tres laboratorios se ha realizado

recientemente una comparación de 7 modelos de luminancia del cielo en donde, de nuevo, nos encontramos con que uno de los modelos propuestos es una formulación para la radiancia del cielo, (Ineichen et al., 1994): el modelo de Brunger y Hooper analizado en esta memoria.

### **3. OTRAS BASES DE DATOS SOBRE DISTRIBUCION ANGULAR DE LA RADIANCIA DEL CIELO**

Las observaciones experimentales han permitido un buen conocimiento de las características cualitativas de la distribución angular de la radiancia del cielo bajo diferentes condiciones. Si, como se ha comentado, consideramos las distribuciones de luminancia del cielo como una aproximación de lo que pueden ser las distribuciones de radiancia, (Dogniaux, 1994), tenemos que ya desde las medidas de luminancia espectral del cielo llevadas a cabo por Dorno (1919), estas distribuciones de luminancia muestran significativas desviaciones del caso isótropo, incluso para cielos cubiertos. Por lo general, todas las medidas realizadas demuestran su alta variabilidad y la dependencia del patrón obtenido con las diferentes condiciones atmosféricas.

Se han realizado, por ejemplo, medidas espectrales de la radiancia del cielo, despejado y cubierto, para las longitudes de onda 409, 561 y 620 nm, empleando un espectrofotómetro rotatorio de alta velocidad (Dehne, 1974). Kondratyev y Manolova (1959) realizaron estas medidas para todo el espectro, barriendo el cielo en 37 direcciones empleando un piranómetro modificado con un ángulo total de visión de 10°. Van Deventer y Joubert (1966) barrieron el cielo en 120 puntos durante un período de 30 minutos, empleando un radiómetro automático (termopila tipo Moll) con un ángulo total de visión de 10° y 12'. Otras medidas similares fueron desarrolladas por McArthur y Hay (1978)

empleando un actinometro Linke-Feussner de aproximadamente el mismo campo de visión, 0.0239 sr ( $10^\circ$ ), barriendo el cielo en 21 puntos en 14 minutos.

Sin embargo, podemos considerar las medida realizadas por Steven (1977a) como la primera base de datos más fiable y referenciada en la bibliografía. Steven realizó las medidas con un barrido de 34 puntos en 40 minutos. A partir de aquí, otros autores han venido realizando medidas sistemáticas de radiancia del cielo. Desgraciadamente, nos movemos en un círculo muy limitado de investigadores con bases de datos, los cuales pueden resumirse en la Tabla 1. El empleo del sistema automático *SKYSCAN* por parte del grupo de Hooper, (Brunger et al., 1983), es el resultado de un programa de medidas en la Universidad de Toronto que comenzó en 1978, realizando medidas con instrumentos movidos manualmente (Rosen et al., 1985). Esta base de datos fue ampliada en 1979, pero no es hasta 1982 cuando el sistema *SKYSCAN* comienza a funcionar, dando lugar a una buena base de datos denominada *SKYSCAN DATA SET* (Rosen et al., 1989; Brunger et al., 1991).

Por otro lado, el empleo de un radiómetro automático para todo el cielo por parte de Coombes y Harrison (Coombes et al., 1982) ha permitido aumentar considerablemente el número de medidas de este tipo, ya de por sí insuficientes para extraer conclusiones totalmente generales del campo de radiancia. Todas estas medidas junto con las llevadas a cabo por Valko en sus diferentes campañas europeas (Heimo et al., 1976; Valko, 1982; Valko, 1986a y b; Valko et al., 1989a y b;) y la campaña de Sabinal y Veleta en España, completan lo más destacado del panorama internacional en cuanto a bases de datos de radiancia del cielo.

Del análisis de estos datos se concluye que los principales factores que afectan a la distribución angular de radiancia del cielo son la posición solar,

cantidad y tipo de cubierta nubosa, turbiedad atmosférica y estación del año (Valko, 1983; Brunger, 1981). Para cielos despejados, la radiancia aumenta rápidamente en las proximidades del sol, lo cual genera un máximo de radiancia en la región cercana al sol, incluso para elevaciones solares pequeñas y para acimut elevados ( $30^\circ$ ) respecto al sol (Valko, 1982, Valko, 1983). Esta región, denominada región circunsolar, es debida al acentuado scattering hacia adelante ocasionado por los constituyentes atmosféricos. La radiancia también aumenta hacia el horizonte, debido al aumento del espesor óptico de la atmósfera al aumentar el ángulo cenital (Kondratyev, 1969).

Otra característica es que la distribución de radiancias depende del grado de turbiedad de la atmósfera (Coulson, 1975; Morris et al., 1971). Sin embargo, en términos de radiancia normalizada, con respecto a la radiancia del cenit como se ha visto en el capítulo 4 de esta memoria, disminuye con la turbiedad en líneas generales, presentando el horizonte un valor mayor que el cenit para elevaciones solares pequeñas. También se ha podido comprobar que cuando se normaliza con respecto a la irradiancia difusa sobre un plano horizontal, se suaviza la dependencia del patrón obtenido con la turbiedad atmosférica, tal y como afirma Steven (Steven, 1977a).

Para cielos despejados, las representaciones de radiancia normalizada arrojan también un resultado claro, y es la existencia de los gradientes más acusados para condiciones de cielo muy limpio. Al aumentar la turbiedad, estos gradientes disminuyen tanto en el plano del acimut solar (plano solar) como en el plano perpendicular (Brunger et al., 1991). En estos dos planos se verifica también una gran simetría de la distribución.

AUTOR	Nº Barridos	Puntos por barrido	Distribución	Tiempo de barrido	Instrumentación	Campo de Visión	Datos
STEVEN	67	34	Todo el cielo	40 min	Actinometro Linke-Feussner	0.025 sr (5° 6')	Jun-75 a Mayo-76
HOOPER BRUNGER CHAN	127	19 por plano	Planos solar y perpendicular (654+32)		Radiómetro Kipp-Zonen CA1	0.316 sr (18° 15')	Jun-78
	686						28/3 a 19/6 de 1979
HARRISON COOMBES	3166	121	Todo el cielo	12 min	Detector piroeléctrico Oriel Mod. 7084	0.025 sr	Jul-83 a Marzo-86
SKYSCAN DATA SET	2490	19 por plano	Plano solar y perpendicular (1222 + 1268)	5 min	Radiómetro piroeléctrico Molelectron PR200	0.024 sr (5°)	Feb-83 a Feb-84
VALKO GRANADA	1523 (*) <small>(*) Solo Cielos Despejados</small>	172	Todo el cielo	2 min 48'	Fotómetro con diodo de silicio	0.006 sr (2.5°)	27/5 a 15/7 de 1988

**Tabla 1:** Resumen de las más importantes bases de datos de radiancia del cielo

La anisotropía que comentábamos antes, indicada en tantos estudios (Kondratyev et al., 1955; Kondratyev, 1969; Steven 1977a; Valko , 1980, 1983; McArthur y Hay, 1981; Hay et al., 1985a; Page, 1986), siendo la principal característica de estos patrones de distribución, implica, desde el punto de vista de las aplicaciones energéticas, que la superficie horizontal es raramente la orientación para la cual se verifica el valor máximo de la radiación solar incidente. No obstante, numerosas medidas de radiación difusa se llevan a cabo precisamente sobre superficies horizontales. La falta de medidas para otras inclinaciones y orientaciones y la escasez de medidas publicadas de radiancia del cielo (Brunger et al., 1991), junto con la dificultad de resolver la ecuación de transporte radiativo en la atmósfera terrestre, han animado a los diseñadores de sistemas a emplear modelos, más ó menos simples, que permitan suplir esta falta.

La principal ventaja del desarrollo de un modelo de radiancia del cielo bien fundamentado, es que permitiría un cálculo muy preciso de la irradiancia difusa sobre una superficie con cualquier inclinación y orientación mediante un proceso de integración. Si consideramos un punto del cielo P de coordenadas polares  $(\theta_s, \phi_s)$ , ángulo cenital y acimut respectivamente respecto a un sistema de referencia solidario con la superficie inclinada, figura 1, la irradiancia difusa  $dD_s$  incidente en una superficie inclinada un ángulo  $\beta$  es:

$$dD_s = L(\theta_s, \phi_s) \cos\theta_s \sin\theta_s d\theta_s d\phi_s$$

en donde  $L(\theta_s, \phi_s)$  es la radiancia procedente de la dirección dada por  $(\theta_s, \phi_s)$ . Estos ángulos pueden relacionarse con el ángulo cenital y acimut de P con respecto al suelo,  $(\theta, \phi)$ , mediante las expresiones:

$$\theta = \arcsin(-\sin\beta \sin\theta_s \cos\phi_s + \cos\beta \cos\theta_s)$$

$$\phi = \arcsen \left( \frac{\text{sen}\phi_s \text{sen}\theta_s}{\text{sen}\theta} \right)$$

Dependiendo de que el punto P del cielo esté por encima del horizonte de la superficie o no, el valor de la radiancia será cero ó tomará algún valor. La irradiancia difusa total sobre la superficie inclinada,  $D_s$ , vendrá dada por la expresión:

$$D_s = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta_s, \phi_s) \cos\theta_s \text{sen}\theta_s d\theta_s d\phi_s$$

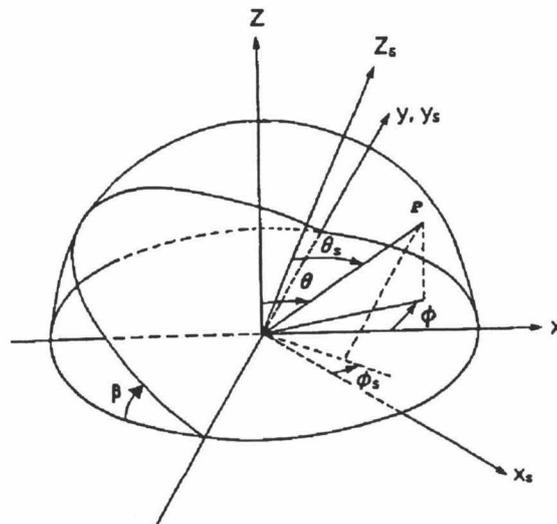


Figura 1: Radiancia sobre una superficie inclinada.

Si se trata de una superficie horizontal, con elevación  $\beta=0$ , tendremos:

$$D_h = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi) \cos\theta \text{sen}\theta d\theta d\phi$$

que en el caso isótropo, radiancia constante ( $L$ ), quedaría  $D_h = \pi L$ .

#### **4. MODELOS DE LA DISTRIBUCION ANGULAR DE LA RADIANCIA DEL CIELO**

Últimamente, diversos autores han realizado una gran cantidad de investigaciones en torno al aspecto cuantitativo de la distribución angular de la radiancia del cielo. Desde los primeros estudios sobre la transmisión en la atmósfera, se hizo evidente que su estado (transparencia, contenido de vapor de agua, despejada, nubosa, etc.) era de vital importancia. Las diferentes formulaciones siempre tratan de tener en cuenta información sobre el estado de la atmósfera y factores geométricos. Por ello incluyen información sobre la masa óptica en la dirección del sol o cualquier otro punto del cielo, la altura solar y la influencia de la cubierta nubosa (Kittler et al., 1990).

Algunos autores consideran que la formulación de un modelo de tipo empírico de la radiancia del cielo, puede ser respetuosa con la teoría y con la realidad si el scattering y las reflexiones causadas por partículas pequeñas en atmósferas más o menos turbias, se caracteriza mediante el "*indicador de scattering*" (*scattering indicatrix*) (Kittler, 1994). Este indicador, en términos relativos, representa la radiancia de un punto con respecto a la radiancia a  $90^\circ$  de distancia angular con respecto a la posición solar. Dentro de un modelo vendría a ser la parte dependiente del *ángulo de scattering*, el cual se definirá más adelante. Kittler en la formulación de su modelo, (Kittler, 1967), así como otros autores, (Pokrowski, 1929; Perrraudeau, 1988; Perez et al., 1993) hacen uso de este esquema en sus formulaciones, aunque otros autores prefieren un análisis estadístico de sus datos.

En cualquier caso, es obvio que para un cálculo fiable de la radiación incidente sobre un plano inclinado, todos los factores comentados influyen en un aspecto muy importante como es la distribución de la radiancia difusa. Como

quiera que estas medidas, según hemos visto, son escasas se recurre a la estimación mediante modelos, tanto aproximaciones empíricas como teóricas. Describimos seguidamente las más destacadas, aunque centraremos nuestro estudio posterior, como se ha comentado ya, sólo en algunos de los últimos modelos propuestos en la literatura.

#### 4.1) El Modelo Isótropo

La distribución más sencilla de radiancia que se puede considerar es la isótropa. Según este modelo, la radiancia difusa procedente de cualquier punto del cielo viene dada por la expresión:

$$L = \frac{D_h}{\pi} \quad (4.1)$$

en donde  $D_h$  es la irradiancia difusa sobre una superficie horizontal. El modelo isotrópico, aunque ha sido empleado por muchos autores, (Arnfield, 1982), en general no es una buena representación del campo de radiancia del cielo, lo cual se viene reconociendo ya al menos desde 1960 (Kondratyev et al., 1960). Se comprueba que da lugar a una subestimación de la radiación difusa incidente sobre una superficie con cualquier inclinación.

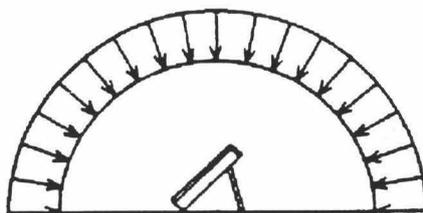


Figura 2: Modelo Isótropo.

#### 4.2) El Modelo Heliocéntrico

El caso contrario al modelo isótropo lo constituye el Modelo Heliocéntrico, en cuya formulación se considera mínima la dispersión de la radiación. Se supone que la radiación difusa tiene su origen por completo en la dirección del sol. Según este modelo, la radiancia difusa del cielo viene dada por la ecuación:

$$L = \frac{D_h}{\cos\theta_o} \delta(\cos\theta - \cos\theta_o) \delta(\phi - \phi_o) \quad (4.2)$$

en donde  $\theta_o$  y  $\phi_o$  son respectivamente, el ángulo cenital y el acimut solar, y  $\delta(x)$  es la función delta de Dirac.



Figura 3: Modelo Heliocéntrico.

#### 4.3) Modelo de Weller

El modelo que propone Weller para la distribución angular de la radiancia del cielo, (Weller, 1967), es totalmente independiente del ángulo acimutal. Para cualquier punto del cielo dado por su ángulo cenital  $\theta$  y acimut  $\phi$ , la radiancia procedente de ese punto viene dada por la expresión simple:

$$N(\theta, \phi) = \sec\theta \quad (4.3)$$

en donde  $N(\theta, \phi)$  representa la radiancia normalizada al valor de la radiancia en el cenit. Es un modelo que sólo va bien para valores medios del ángulo cenital, ya que asigna un valor infinito para  $\theta=90^\circ$ , lo cual es poco realista.

#### 4.4) Modelo de Forgan

Como propuesta intermedia entre el modelo Isótropo y el de Weller, Forgan nos presenta su modelo, (Forgan, 1979), el cual adopta la forma:

$$N(\theta, \phi) = \frac{1}{(\alpha + \beta \cos \theta)} \quad (4.4)$$

En este caso,  $N(\theta, \phi)$  también es la radiancia normalizada a la radiancia del cenit, y  $\alpha$  y  $\beta$  son dos constantes empíricas que toman los siguientes valores para *Adelaide*, en el sur de Australia, donde fueron calculadas por su autor:

$$\alpha = 0.25, \beta = 0.75$$

El origen de este modelo está en los resultados de Forgan, (Forgan, 1979), al estudiar la distribución de radiancia del cielo mediante el empleo de un fotómetro con un ángulo pequeño de visión (5% el área del Sol). En estos estudios, él encontró que los valores de radiancia aumentaban considerablemente en torno a los 8° del sol, pero que a mayores distancias permanecía prácticamente constante, dentro del 15%, para un ángulo cenital fijo al ir variando el ángulo acimutal. Los valores dados a estas constantes implica que la radiancia del horizonte es 4 veces la radiancia en el cenit, aunque modificando los valores de ambas constantes, podemos acercar el resultado del modelo a otras condiciones, comprendidas entre el valor isótropo ( $N=1$ ) y el de Weller.

#### 4.5) Modelo combinacional Fijo (*Hay-1*)

Este primer modelo propuesto por Hay (Hay, 1978), combina las suposiciones del Modelo Isótropo y del Modelo Heliocéntrico. En este sentido, considera que la mitad de la radiación difusa está isotrópicamente distribuida y la otra mitad originada directamente de la dirección del sol. La expresión que nos da la distribución angular de radiancia del cielo en este modelo es:

$$L = \frac{D_h}{2} \left( \frac{1}{\pi} + \frac{\delta(\cos\theta - \cos\theta_o)\delta(\phi - \phi_o)}{\cos\theta_o} \right) \quad (4.5)$$

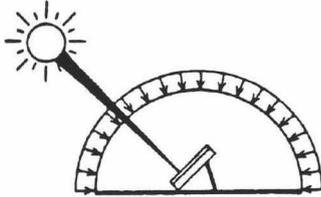


Figura 4: Modelo Hay-1.

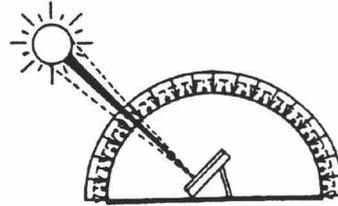


Figura 5: Modelo Hay-2.

#### 4.6) Modelo Combinacional Variable (Hay -2)

El segundo modelo propuesto por Hay es una mejora sobre el Modelo Combinacional Fijo. En vez de suponer iguales contribuciones al campo de radiancia por parte del modelo isótropo y Heliocéntrico, Hay define un *índice anisótropo*,  $k_h$ , el cual viene dado por:

$$k_h = \left( \frac{I}{I_o} \right)^{\frac{1}{m}} \cos\theta_o \quad (4.6)$$

en donde  $I$  e  $I_o$  son, respectivamente, la radiación solar directa incidente en la superficie de la Tierra y en el límite superior de la atmósfera y  $m$  la masa óptica. Aplicando el *índice anisótropo* a las componentes isótropa y heliocéntrica resulta la siguiente expresión para la distribución angular de la radiancia del cielo:

$$L = D_h \left( \frac{1-k_h}{\pi} + \frac{k_h \delta(\cos\theta - \cos\theta_o)\delta(\phi - \phi_o)}{\cos\theta_o} \right) \quad (4.6)$$

#### 4.7) Modelo de Pokrowski

Pokrowski (Pokrowski, 1929) según viene citado, entre otros autores, por Walsh (Walsh, 1961), desarrolló un modelo teórico para la distribución de la radiancia en condiciones de cielo despejado. Su modelo viene dado por:

$$L = a_1 \left( \frac{1 + \cos^2 \Psi}{1 - \cos \Psi} + a_2 \right) [1 - e^{-a_3 \sec \theta}] \quad (4.7-a)$$

en donde  $\Psi$  es el *ángulo de scattering*, el cual define la distancia angular entre la dirección del sol y el punto del cielo considerado y se expresa en función del ángulo cenital y acimutal solar,  $(\theta_o, \phi_o)$ , y las coordenadas polares del punto P con respecto al suelo,  $(\theta, \phi)$ , como:

$$\Psi = \arccos[\cos \theta \cos \theta_o + \sin \theta \sin \theta_o \cos(\phi - \phi_o)] \quad (4.7-b)$$

Por otro lado,  $a_1$  es simplemente un factor de escala,  $a_2$  es una constante empírica que da cuenta del scattering múltiple y  $a_3$  es un coeficiente de scattering. Los valores para  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  varían de unos autores a otros. En el modelo original de Pokrowski, el primer paréntesis constituye su *indicador de scattering*, en donde  $a_3 = 0.32$ , y la pareja  $(a_1, a_2)$  podía tomar los valores  $(1, 0)$  o  $(1/6, 5)$ , (Kittler, 1967), aunque otros valores sugeridos se resumen en la Tabla 2 (Steven, 1977a; Siala et al., 1990):

Fuente	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Pokrowski <sup>1</sup>	1/6	5	0.32
Hopkinson <sup>2</sup>	-	0	0.32
Steven <sup>2</sup>	0.49	11.7	0.92

**Tabla 2:** Valores recomendados para los parámetros del modelo de Pokrowski.

<sup>1</sup> Basados en medidas de Luminancia. <sup>2</sup> Basados en medidas de radiancia.

Los modelos anteriores son modelos para la radiancia del cielo desarrollados por personas que se dedican principalmente al estudio de la irradiancia global y difusa y han sido generados para emplearlos en esos cálculos. El modelo de Pokrowski puede considerarse como punto de partida de una serie de modelos desarrollados con una finalidad más radiométrica y por investigadores interesados de forma especial en el estudio de la radiancia.

#### 4.8) Modelo de Dogniaux

Para caracterizar la distribución angular relativa de la radiancia del cielo, y ante la general falta de medidas de radiancia del cielo, Dogniaux formula su modelo aceptando de entrada las mismas leyes de distribución angular relativa deducidas a partir de medidas fotométricas de luminancias (Dogniaux, 1986; Dogniaux, 1994). Justifica tal decisión argumentando que, debido a que las fuentes naturales, sol y cielo, a las que el ojo humano es sensible (380 - 780 nm), cubren una zona espectral bastante importante dentro de lo que es el espectro solar total, y que la principal información sobre la anisotropía de la distribución angular de la irradiancia difusa del cielo procede de medidas directas de luminancia, resulta conveniente e incluso justificable adoptar tal decisión.

Dogniaux (1975), según viene citado por Steven et al. (1979), en virtud de esta suposición, y partiendo de la ley de distribución de Kittler, (Kittler, 1967), para la luminancia del cielo, propone que la radiancia relativa viene dada por la ecuación:

$$\frac{L}{D_h} = \pi^{-1} \{ d_1 + d_2 \exp(d_3 \Psi) + d_4 \cos^2 \Psi \} \{ 1 - \exp(d_5 \sec \theta) \} \quad (4.8)$$

en donde, como en los casos anteriores,  $\Psi$  es el ángulo de scattering,  $\theta$  es el ángulo cenital. Esta forma de proceder ha dado muy buenos resultados en la parametrización de la radiación solar en Bélgica, (Dogniaux, 1986). Los valores

de los coeficientes  $d_i$  vienen expresados en función del ángulo cenital solar,  $\theta_0$ . Estos valores son:

$d_i \setminus \theta_0$	35°	45°	55°	65°
$d_1$	0.61±0.02	0.65±0.02	0.73±0.02	0.76±0.03
$d_2$	11.9±0.6	10.7±0.5	11.1±0.4	13.0±0.5
$d_3$	-2.97±0.09	-2.82±0.06	-2.97±0.06	-3.09±0.07
$d_4$	-0.12±0.20	-0.2±0.1	-0.07±0.06	-0.17±0.05
$d_5$	-0.45±0.03	-0.48±0.03	-0.48±0.02	-0.42±0.02

Tabla 3: Coeficientes  $d_i$  en el modelo de Dogniaux.

#### 4.9) Modelo de Steven

Steven resalta la importancia del cálculo de la Irradiancia Difusa sobre un plano horizontal a partir de la distribución angular de la radiancia del cielo, frente a los métodos clásicos de medir la irradiancia global y sustraer la componente directa, o a partir de instrumentos con banda de sombra (Steven et al., 1979). Ambos métodos pueden incluir errores significativos pero, como ya hemos comentado, la integración del campo de radiancia del cielo presenta el inconveniente de la escasez de medidas experimentales o la insuficiencia de estas, por estar realizadas solo para planos concretos en la mayoría de los casos (plano solar y perpendicular a éste). Por todo ello Steven, a partir de sus datos experimentales (Steven, 1977a) propone el siguiente modelo resultado del ajuste por mínimos cuadrados de estos datos (Steven, 1977b):

$$\frac{L}{D_h} = \pi^{-1} \left\{ \sum_1^{10} c_i f_i(\theta, \phi) + c_{11} \exp(-c_{12} \text{sen} \psi) \right\} \quad (4.9)$$

en donde los valores de los coeficientes  $c_i$  y las funciones  $f_i$  para el mejor ajuste

obtenido, en función del ángulo cenital y acimut del punto del cielo ( $\theta, \phi$ ), y el ángulo cenital solar,  $\theta_0$ , son:

$c_i \setminus \theta_0$	35°	45°	55°	65°
$c_1$	1.1±0.5	1.0±0.5	0.4±0.05	1.6±0.5
$c_2$	0.12±0.09	0.7±0.1	0.9±0.2	1.5±0.2
$c_3$	-2.6±0.7	-0.7±0.9	0.7±0.9	-1.6±0.9
$c_4$	0.04±0.04	0.26±0.04	0.38±0.05	0.42±0.06
$c_5$	-0.04±0.3	-0.5±0.4	-0.7±0.5	-2.0±0.4
$c_6$	1.4±0.5	-0.04±0.7	-1.3±0.7	0.2±0.6
$c_7$	0.01±0.01	0.04±0.02	0.09±0.02	0.12±0.02
$c_8$	-0.1±0.1	-0.3±0.1	-0.3±0.1	-0.32±0.08
$c_9$	-0.16±0.05	0.01±0.06	0.006±0.07	0.19±0.07
$c_{10}$	-0.6±0.2	0.06±0.2	0.6±0.2	0.1±0.2
$c_{11}$	5.6±0.6	5.8±0.3	7.0±0.5	9.8±0.8
$c_{12}$	2.3±0.5	3.9±0.6	4.4±0.6	5.2±0.5

Tabla 4: Coeficientes  $c_i$  en el modelo de Steven.

$$\begin{aligned}
 f_1 &= 1 & f_6 &= (3\cos^2\theta - 1)/2 \\
 f_2 &= \text{sen}\theta\cos\theta & f_7 &= \text{sen}^3\theta\cos 3\phi \\
 f_3 &= \cos\theta & f_8 &= \text{sen}^2\theta\cos\theta\cos 2\phi \\
 f_4 &= \text{sen}^2\theta\cos 2\theta & f_9 &= \text{sen}\theta\cos\phi(5\cos^2\theta - 1) \\
 f_5 &= \text{sen}\theta\cos\theta\cos\phi & f_{10} &= (5\cos^3\theta - 3\cos\theta)/2
 \end{aligned}$$

Tabla 5: Funciones  $f_i$  en el modelo de Steven.

#### 4.10) Modelo de Kittler

El modelo propuesto por Kittler, (Kittler, 1967), es el resultado de la búsqueda de un modelo estándar para la *Comisión Internacional de Iluminación*

(CIE) que representara la distribución de luminancia bajo condiciones de cielo despejado. Tras un detallado estudio de las diferentes propuestas realizadas hasta ese momento, las consideraciones de su trabajo le llevan a recomendar la siguiente fórmula en función del ángulo de scattering  $\Psi$ , el ángulo cenital para cualquier punto del cielo  $\theta$  y el ángulo cenital solar  $\theta_0$ , como:

$$\frac{L(\Psi)}{L_z} = \frac{(A + B e^{-m\Psi} + C \cos^2\Psi) (1 - e^{-\rho \sec\theta})}{0.27385 [A + B e^{-m\theta_0} + C \cos^2\theta_0]} \quad (4.10)$$

en donde  $L(\Psi)$  representa la luminancia de un punto cualquiera del cielo,  $L_z$  la luminancia en el cenit y  $\Psi$  está expresado en radianes. En esta expresión, el segundo factor es el mismo que en modelo de Pokrowski, ya que fue estudiado por él y adoptado por Kittler, (Kittler, 1967). Los valores que sugiere Kittler para las constantes que aparecen en su modelo son:

$$A=0.91, B=10, C=0.45, m=3 \text{ y } \rho=0.32$$

Solo bajo condiciones de cielo extremadamente limpio, con valores de  $TL < 1.5$  (por ejemplo la cima de una montaña), Kittler encontró un mejor ajuste para  $m=5$  (Kittler, 1992). Este modelo, basado en medidas fotométricas, fue originalmente desarrollado para cielos con condiciones de relativa baja turbiedad. En particular, para índices de turbiedad de Linke,  $TL$ , inferiores a 5. Este hecho se comprobará posteriormente.

Dado que este modelo no es sensible a los cambios de turbiedad, Kittler retoma la definición de su modelo en un posterior estudio de los coeficientes  $B$  y  $C$  en función del *índice de turbiedad de iluminación*,  $T_u$ . En este trabajo, Kittler nos ofrece el siguiente ajuste, (Kittler, 1985):

$$B = 4.3 T_u^{1.9} \exp(-0.35 T_u)$$

$$C = 0.71 / \sqrt{T_u}$$

El *índice de turbiedad de iluminación*,  $T_u$ , es el parámetro gemelo al de Linke, TL, en el rango visible y fue introducido por Robert Clear en 1982, (Kittler, 1985). Su principal diferencia con TL es la menor influencia del contenido de vapor de agua en el espectro visible, y por tanto en  $T_u$ . No obstante, y continuando con la correspondencia entre luminancia-radiancia antes comentada, recientemente Kittler emplea esta misma parametrización para las constantes **B** y **C**, pero en términos de TL, (Kittler, 1994).

El anterior ajuste da **B=10.011** y **C=0.454** para  $T_u=2.45$ , valores semejantes a los originales en el modelo. Por ello, TL=2.45 se toma como valor estándar de aplicación del modelo de Kittler en su formulación original. Para casos extremadamente limpios y claros cuando  $T_u=1.4$ , de acuerdo con las expresiones anteriores **B=5** y **C=0.6**. Para casos turbios o atmósferas contaminadas cuando  $T_u=5.5$ , entonces **B=16.001** y **C=0.303**.

Finalmente, comentar que aunque se trata de un modelo de luminancia es importante en nuestro estudio, pues constituye la base de muchos estudios posteriores. Por ejemplo, como se ha visto, Dogniaux sugiere que la distribución relativa de radiancia del cielo es igual que la de luminancia obtenida a partir del modelo del Kittler. Por otro lado, Harrison y Coombes, en el desarrollo de su modelo el cual exponemos a continuación, estudian la radiancia del cielo normalizada con respecto a la irradiancia difusa sobre superficie horizontal, basándose también en el modelo de Kittler (Harrison et al., 1988a), y empleando las mismas constantes que da el autor, desarrollan su propuesta. En nuestro análisis del modelo, dejaremos la posible mejora en los resultados debido a la anterior formulación para las constantes **B** y **C**, para un trabajo futuro.

#### 4.11) Modelo de Gusev

Gusev formula su modelo de forma muy semejante al de Kittler. Resulta, en realidad, una evolución del anterior para otras condiciones atmosféricas. Gusev representa la distribución de Luminancia del cielo de la forma:

$$\frac{L(\Psi)}{L_z} = \frac{(0.856 + 16e^{-3\Psi} + 0.3 \cos^2\Psi) (1 - e^{-0.32 \sec\theta})}{0.27385 (0.856 + 16e^{-3\theta_0} + 0.3 \cos^2\theta_0)} \quad (4.11)$$

en donde  $\Psi$  es, de nuevo, el ángulo de scattering en radianes,  $\theta$  el ángulo cenital del punto del cielo,  $\theta_0$  es el ángulo cenital solar y  $L_z$  es la radiancia en el cenit (CIE, 1973). Este modelo está formulado para factores de turbiedad de Linke alrededor de 8, es decir, ambientes bastante contaminados. Al igual que en el modelo de Kittler, el término exponencial del primer paréntesis está asociado al scattering hacia adelante en las cercanías de la aureola solar. El factor multiplicativo, 16, es mayor que en el modelo de Kittler, 10, como corresponde a altas turbiedades. Según vimos antes, las constantes **B** y **C** adoptan valores muy próximos a los propuestos por Gusev para el caso TL=5.5. Por ello se adopta este valor de TL como estándar de aplicación de este modelo. La exponencial en el segundo paréntesis representa el scattering múltiple en la atmósfera, el cual se hace más importante hacia el horizonte.

#### 4.12) Modelo de Harrison y Coombes

Como hemos dicho, sobre la base del modelo de Kittler Harrison y Coombes emplean los datos experimentales obtenidos con un radiómetro automático para todo el cielo (Coombes et al., 1982), para analizar la distribución angular de la radiancia del cielo. La comparación de los resultados obtenidos con los modelos sugeridos por algunos autores, les llevan a formular su modelo ampliando el de Kittler en el sentido de incluir la dependencia con el ángulo

cenital solar  $\theta_0$ . De sus estudios, (Harrison et al., 1988a), se desprende que esta dependencia debe ser de la forma:

$$\bar{N}(\Psi) = (A + B e^{-m\Psi} + C \cos^2 \Psi \cos \theta_0) (1 - e^{-\rho \sec \theta}) (1 - e^{-\delta \sec \theta_0})$$

**Ecuación (4.12)**

en donde  $\bar{N}(\Psi)$  representa la radiancia del cielo normalizada por la irradiancia difusa sobre superficie horizontal, calculada a partir de los propios datos experimentales de cada barrido y  $\Psi$  el ángulo de scattering en radianes. Los valores de las constantes que aparecen en el modelo son, según sus autores, los siguientes:

$$A=1.63, B=53.7, C=2.04, m=5.49, \rho=1.90, \text{ y } \delta=0.53$$

Estas constantes han sido determinadas para la zona rural donde se llevó a cabo la recopilación de los datos experimentales (Harrison et al., 1988a). En un estudio posterior incluyendo casos de cielos con nubes, el valor de la constante  $\rho$  se modifica a 0.19 dando mejores resultados (Harrison et al., 1988b). Sin embargo, no existen estudios sobre el comportamiento del modelo en otras zonas de características diferentes a las de la zona de las Montañas Rocosas canadienses para la que fue comprobado (Siala et al., 1990). La normalización llevada a cabo permite calcular la radiancia absoluta procedente de un punto del cielo sin mas que operar de la siguiente manera:

$$L(\theta, \phi) = \frac{\bar{N}(\Psi) D_h}{\pi}$$

en donde  $D_h$  es la irradiancia difusa sobre superficie horizontal.

#### 4.13) Modelo de Distribución Continua de Tres Componentes

Este modelo, también denominado modelo de Hooper y Brunger o modelo TCCD (Three Component Continuous Distribution Model), fue desarrollado con la idea de ganar la generalidad que, en opinión de sus autores, no poseen otros modelos previos a este, por haber sido desarrollados principalmente a partir de medidas fotométricas y no radiométricas, y por ser válidos solo para determinadas situaciones muy específicas. La ecuación general que define al modelo TCCD es la siguiente (Hooper et al., 1980):

$$\frac{L(\theta, \phi)}{D_h} = A_0 \psi_0 + A_1 \psi_1 + A_2 \psi_2 \quad (4.13)$$

en donde  $L(\theta, \phi)$  es la radiancia procedente del punto del cielo con coordenadas  $(\theta, \phi)$  (ángulo cenital y acimutal) y  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  y  $\psi_2$  son las *funciones base* del modelo las cuales adoptan valores diferentes, como veremos, en función del calibrado del modelo.

La base del desarrollo del modelo TCCD es la consideración de que cualquier distribución particular de radiancia del cielo puede considerarse formada por la superposición lineal de tres factores separados. Ya que, en general, se da la circunstancia de que el brillo de un elemento de cielo despejado depende de la posición de dicho elemento con respecto al sol y al cenit, el brillo de la región circumsolar es consecuencia del scattering anisótropo de la radiación por los constituyentes atmosféricos, acentuado para ángulos de scattering pequeños, y el brillo de la zona del cielo cerca del horizonte es resultado del mayor espesor óptico en esa dirección, los tres términos del modelo pretenden reproducir la contribución de cada una de estas características: el primer término representa una contribución isótropa; el segundo término representa la contribución debida al *horizonte brillante* y al tercer término describe la radiancia del cielo procedente de la región circumsolar.

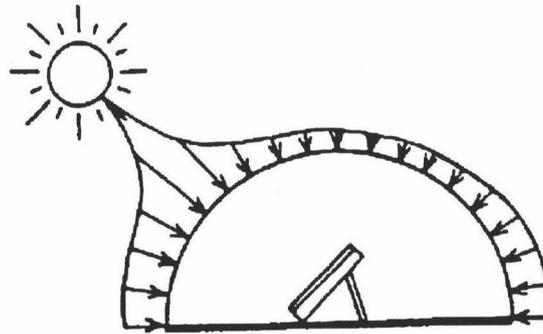


Figura 6: Modelo TCCD.

Las constantes  $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$  se denominan *Coefficientes de anisotropía*, y son funciones de las condiciones atmosféricas en cualquier instante, las cuales se determinan empíricamente. En su formulación original, (Hooper et al, 1980), las *funciones base* adoptaban los siguientes valores:

$$\psi_0=1, \quad \psi_1=(\theta/90)^2, \quad \psi_2=\exp(g\Psi)$$

con  $g= - 0.0145423 \exp( 0.0231798 \theta_0)$

siendo  $\Psi$  el ángulo de scattering. En este mismo trabajo, se tabulaban los parámetros  $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$ , normalizados a  $Dh$ , de acuerdo con los datos de que disponían para realizar el calibrado, los cuales incluían cielos totalmente despejados y completamente cubiertos.

En trabajos posteriores se han realizado nuevos calibrados. En un caso específicamente para cielos despejados (Hooper et al, 1987) y en otro para cielos parcialmente cubiertos (Rosen et al., 1989). En el caso de cielos totalmente despejados, las funciones base y los coeficientes de anisotropía adoptan los siguientes valores (Hooper et al., 1987):

FUNCION	VALOR
$\psi_0$	1
$\psi_1$	$(\theta/90)^{1.30501 + 0.0228958 \theta_0}$
$\psi_2$	$\exp(-\Psi 0.011435 e^{0.017188 \theta_0})$
COEFICIENTE	VALOR
$A_0$	$-0.752231 + 0.439273 e^{0.008031 \theta_0}$
$A_1$	$0.61625 -   0.799783 - 0.464883 e^{0.009374 \theta_0}  $
$A_2$	$0.840354 + 0.01233 e^{0.060289 \theta_0}$

**Tabla 6:** Coeficientes del Modelo TCCD. Todos los ángulos en grados.

En un trabajo más reciente, (Siala et al., 1990), se señala que las bases de datos sobre radiancia del cielo son tan escasas, que las determinaciones de las constantes que aparecen en este modelo, así como en otros, son muy particulares y concretas para el lugar en el cual fueron tomados los datos experimentales, por lo que aunque sus autores asignan un buen comportamiento a sus modelos, este hecho no está suficientemente bien contrastado, lo cual resalta el interés del presente estudio.

#### 4.14) Modelo Semiempírico de Siala

Este modelo, introducido por Siala (Siala, 1988; Siala et al., 1989; Siala et al., 1990), está basado en una mezcla de razonamiento físico y resultados empíricos. A diferencia del método empleado en el desarrollo de la mayoría de los modelos, en este caso se realiza un acercamiento al problema de la distribución angular de la radiancia del cielo mediante una aproximación de los conceptos físicos implicados. El resultado es un modelo de tipo regresión, en el que la forma de las *funciones base* está derivada a partir de razonamientos físicos.

Para evitar tener que realizar cálculos de scattering múltiple en la resolución de la ecuación monocromática de transporte radiativo, se elige en esta ocasión el método de *órdenes sucesivos de scattering*, (Liou, 1980). En esta aproximación, la radiancia monocromática es calculada individualmente para los fotones que han sido dispersados una vez, dos veces tres veces, y así sucesivamente. La radiancia calculada de un orden es insertada en la expresión para la función fuente del siguiente orden de scattering. Este proceso puede repetirse tantas veces como se desee. Aunque la ecuación que se obtiene, estrictamente hablando, es válida solo para la radiancia monocromática, se adopta en el desarrollo de este modelo como representativa de la distribución angular de la radiancia difusa, esto es, la radiancia total, integrada para todas las frecuencias.

La expresión resultante para la radiancia normalizada, en este caso, por la constante solar,  $I_{sc}$ , es:

$$\frac{L}{I_{sc}} = \frac{h_1 \cos \theta_0}{4\pi(\cos \theta - \cos \theta_0)} \frac{1 - h_2^2}{(1 + h_2^2 - 2h_2 \cos \Psi)^{3/2}} (e^{-h_3 \sec \theta} - e^{-h_3 \sec \theta_0}) \quad (a)$$

Ecuación 4.14 (a)

$$\frac{L}{I_{sc}} = \frac{h_1 h_3}{4\pi \cos \theta_0} \frac{1 - h_2^2}{(1 + h_2^2 - 2h_2 \cos \Psi)^{3/2}} e^{-h_3 \sec \theta_0} \quad (b)$$

Ecuación 4.14 (b)

distinguiéndose los casos (a) si  $\theta \neq \theta_0$  ó bien (b) si  $\theta = \theta_0$ .

En los problemas de scattering de la radiación procedente del sol, como se ha estudiado en el capítulo 2 de esta memoria, las funciones de fase dependen de cada problema particular. A veces se eligen estas funciones de fase, de modo

que simplifiquen los cálculos. En este desarrollo se han elegido las funciones de fase de Henyey-Greenstein, (Hulst, 1980), dado que son suficientemente representativas, pero simplifican y hacen manejables los cálculos de scattering múltiple, (Siala et al., 1990).

La forma anterior del modelo de Siala corresponde a una de las dos alternativas que se pueden considerar para este modelo semiempírico. Una segunda forma incluiría también el segundo orden de scattering. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el aumento de la complejidad al añadir términos con ordenes mayores de scattering no repercute en un mejor comportamiento del modelo (Siala et al., 1990).

El calibrado del modelo, llevado a cabo por el autor empleando los datos de Brunger (Brunger, 1987), da los siguientes valores para los parámetros que se incluyen en el mismo (Siala et al., 1990):

$$h_1 = 1.287; h_2 = 0.443; h_3 = 0.438$$

con  $R^2 = 82.3$ , r.m.s. (%) = 45.2 ; m.b.e.(%) = -5.6

El modelo, tal y como se ha presentado aquí, describe la distribución promedio de la radiancia difusa para todas las condiciones del cielo. Es por ello que no da cuenta de las variaciones en la distribución con las diferentes condiciones del mismo.

#### 4.15) Modelo de la CEE

Teniendo en mente la formulación de Liebelt, pero apoyándose firmemente para el cálculo de los valores asignados a las constantes, en los trabajos de Steven y Unsworth sobre medidas de distribución relativa de radiancia del cielo en Sutton Bonington, UK, (Steven et al., 1979), el modelo de la CEE adopta siguiente

forma, en donde  $\Psi$  es el ángulo de scattering en radianes,  $\theta$  el ángulo cenital del punto del cielo considerado y TL el factor de Turbiedad de Linke:

$$\frac{L}{L_z} = \frac{(a_1 + a_2 e^{-3\Psi} + a_3 \cos^2\Psi) (1 - e^{-0.088 TL(\gamma_o) \sec\theta})}{(a_1 + a_2 e^{-3\theta_o} + a_3 \cos^2\theta_o) (1 - e^{-0.088 TL(\gamma_o)})} \quad (4.15)$$

en donde las constantes toman los siguientes valores en función de la elevación solar,  $\gamma_o$  en grados:

$$a_1 = 0.8995 - 0.0053\gamma_o$$

$$a_2 = 0.6155 + 1.9687 TL$$

$$a_3 = 0.409 - 0.0096 \gamma_o$$

Por un lado,  $a_2$  determina la magnitud de la contribución de la aureola solar. Por otro,  $a_1$  y  $a_3$  determinan la contribución del scattering no isotrópico del cielo, de elevada importancia fuera de la aureola. En el caso de un cielo "puro" de Rayleigh,  $a_1 = 1$  y  $a_3 = 1$ .

Es necesario destacar que los datos empleados para generar este modelo son, aunque fiables, bastante limitados. Los trabajos de Steven permitieron establecer la metodología inicial del desarrollo. Con todo, empleando las constantes que se han dado, se elaboró el Atlas Europeo de Radiación Solar. Incluido en el mismo programa que desarrolló este modelo (*Proyecto F, dentro del Programa de Investigación y Desarrollo en Energía Solar de la CEC*), Valko presentó los resultados de sus observaciones sobre radiancia del cielo en diversos emplazamiento de Europa, (Valko, 1984), .Empleando estos datos se realizaron posteriores comprobaciones de este modelo . Este estudio sugirió algunos cambios en la formulación original.

Así, se aumentó el número de constantes que deben ser determinadas en el modelo al sustituir por  $b_0$  el factor 0.088 del primer paréntesis. Este hecho hace que sean  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $b_0$  los parámetros que se necesitan determinar. Por un lado, estos datos muestra la existencia de un efecto mayor de la aureola por lo que un mejor ajuste para  $a_2$  es 1.35 veces la expresión anterior, es decir:

$$a_2 = 0.8309 + 2.658 TL$$

En el caso de  $a_1$  y  $a_3$ , se adoptaron las siguientes expresiones:

$$a_1 = 1.0744 - 0.0744 TL$$

$$a_3 = 2.3843 - 1.7087 TL + 0.54709 TL^2 - 0.07481 TL^3 + 0.003631 TL^4$$

Por último, Liebelt asigna el valor de 0.088 para  $b_0$ . El trabajaba con datos de luminancia y este valor coincide, aproximadamente, con el valor del espesor óptico de Rayleigh de la atmósfera a la longitud de onda central del espectro visible. El valor de  $b_0$  es crítico a la hora de representar adecuadamente el efecto de *horizonte brillante* en función de la turbiedad, sin embargo, ejerce muy poca influencia sobre los valores relativos de radiancia en las zonas más altas del cielo. En esta versión modificada del modelo de la CEC, se adoptó el valor sugerido por Liebelt de 0.088, pues no se profundizó en su estudio. En esta memoria se muestran los resultados obtenidos en este sentido.

#### 4.16) Modelo de Valko

El modelo de Valko es un modelo totalmente empírico. Este hecho no le resta importancia, pues la base de datos con la que ha sido generado pasa por ser, sin temor a equivocarnos, la mejor base de datos sobre radiancia del cielo que existe. A lo largo de sus campañas por toda Europa, de la que la nuestra de Sabinal y Veleta es una de ellas, son tantas y tan variadas las condiciones

atmosféricas que se han medido, que el modelo desarrollado por Valko puede considerarse como bien fundamentado. La idea original de Valko fue la de olvidarse por completo de consideraciones previas, teóricas o empíricas procedentes de otros investigadores, y simplemente observar la distribución de sus datos experimentales. De esta forma, al no estar condicionado o "viciado" por otros argumentos, el autor consideraba que el resultado del estudio ganaría en generalidad e independencia.

Teniendo esto en cuenta, representó gráficamente los datos de radiancia para todas las estaciones y campañas realizadas para diferentes cortes, incluyendo el plano solar, y observó su distribución. Si bien el modelo ha sido desarrollado para condiciones de cielo despejado y con nubes, nosotros nos centraremos en la forma que adopta para cielos despejados. Empleando 1242 distribuciones de radiancia, de las que 390 corresponden a cielos despejados, Valko estudia la variación del cociente  $\pi L/D_h$  para la radiancia del cielo de puntos contenidos en diferentes planos con respecto al plano del sol.

Mediante un ajuste en tres etapas, llega a la expresión (Valko, 1988):

$$\frac{\pi L}{D_h} = \left[ \sum_i^2 \left( \sum_j^3 \left( \sum_k^3 c_{ijk} \alpha_s^k \right) \gamma^j \right) \gamma_0^i \right]^{-1} \quad (4.16)$$

en donde las sumatorias van desde cero a los valores indicados.  $D_h$  es la irradiancia difusa sobre superficie horizontal, obtenida mediante integración del campo de radiancias,  $L$  es la radiancia del punto del cielo considerado,  $\gamma$  y  $\gamma_0$  son la elevación del punto del cielo y del sol respectivamente y  $\alpha_s$  es el acimut del punto considerado con respecto al sol, esto es, la diferencia sobre el plano horizontal y en valor absoluto, del acimut del punto del cielo y el acimut del sol.

De las 390 distribuciones obtenidas para cielos despejados, consigue 325 representaciones del cociente  $\pi L/Dh$  en función de la elevación solar,  $\gamma_0$ , para diferentes elevaciones en el cielo,  $\gamma$ . Son estos diagramas los que le permiten realizar el ajuste polinómico siguiente (Valko, 1987-1988). En una primera etapa, considera el ajuste de  $\pi L/Dh$  como una función inversa de la elevación solar.

$$\frac{1}{a_0 + a_1 \gamma_0 + a_2 \gamma_0^2} \quad \text{Ajuste VALKO: Paso 1}$$

En una segunda etapa, considera los coeficientes anteriores también como una función de la elevación del punto de cielo, para los casos  $\alpha_s = 0, 30, 60, 90, 120$  y 180 grados. En este caso, el polinomio es cúbico.

$$\begin{aligned} a_0 &= b_{00} + b_{01} \gamma + b_{02} \gamma^2 + b_{03} \gamma^3 \\ a_1 &= b_{10} + b_{11} \gamma + b_{12} \gamma^2 + b_{13} \gamma^3 \\ a_2 &= b_{20} + b_{21} \gamma + b_{22} \gamma^2 + b_{23} \gamma^3 \end{aligned} \quad \text{Ajuste VALKO: Paso 2}$$

Finalmente, en una tercera etapa, considera estos nuevos coeficientes como función polinómica del ángulo acimutal respecto al sol,  $\alpha_s$ . Es decir:

$$\begin{aligned} b_{00} &= c_{001} + c_{002} \alpha_s + c_{003} \alpha_s^2 + c_{004} \alpha_s^3 \\ b_{01} &= c_{011} + c_{012} \alpha_s + c_{013} \alpha_s^2 + c_{014} \alpha_s^3 \\ b_{02} &= c_{021} + c_{022} \alpha_s + c_{023} \alpha_s^2 + c_{024} \alpha_s^3 \\ b_{03} &= c_{031} + c_{032} \alpha_s + c_{033} \alpha_s^2 + c_{034} \alpha_s^3 \end{aligned} \quad \text{Ajuste VALKO: Paso 3}$$

Evidentemente, tendríamos otros dos juegos de ecuaciones semejantes para los  $b_{1i}$  y los  $b_{2i}$ . Los 48 coeficientes  $c_{ijk}$  son, pues, el resultado del ajuste y viene tabulados más adelante (Tabla 7-a y 7-b). En el caso particular de  $\alpha_s = 0$ , se dan dos ramas a la derecha e izquierda de la posición solar. Estas dos ramas no son tales cuando consideramos  $\alpha_s$  mayores, tal y como puede observarse en los

gráficos de las figuras 7 y 8, en los que se reproduce el comportamiento de este ajuste triple para diferentes condiciones. En un caso se ha variado la elevación solar, manteniendo fijo la posición del punto en el cielo, y en otro caso se ha procedido al contrario, variando la posición del punto del cielo y manteniendo fijo la elevación solar.

Valko obtiene un RMSE de la radiancia normalizada calculada mediante su modelo, que varía entre 0,822 y 0,00327, (Valko, 1988), disminuyendo este error al aumentar  $\alpha_s$  (acimut respecto al sol) y al aumentar  $\gamma$  (elevación del punto del cielo considerado). No obstante, los resultados de las campañas de Sabinal y Veleta no se emplearon para analizar este modelo, aportando la novedad sobre los datos anteriores de que en España se obtuvieron datos para elevaciones mayores y bajo condiciones de horizonte más despejado y cielos más limpios que las obtenidas en centro Europa. En esta memoria presentamos, pues, también nuestros resultados sobre este modelo. Los 48 coeficientes  $c_{ijk}$  se muestran a continuación en la Tabla 7-a y 7-b.

Tabla 7-a: Valores para  $c_{ijk}$ . Flanco Izquierdo

		k=0	1	2	3
i=0	j=0	.607E+00	.856E-04	.226E-03	-.101E-05
	1	-.489E-01	.457E-03	-.940E-05	.269E-07
	2	.147E-02	-.102E-04	.230E-06	-.677E-09
	3	-.795E-05	.563E-07	-.171E-08	.559E-11
i=1	j=0	-.264E-01	.126E-02	-.284E-04	.109E-06
	1	.166E-02	-.939E-04	.211E-05	-.814E-08
	2	-.377E-04	.160E-05	-.348E-07	.139E-09
	3	.257E-06	-.785E-08	.164E-09	-.692E-12
i=2	j=0	.247E-03	-.145E-04	.352E-06	-.140E-08
	1	-.242E-04	.196E-05	-.356E-07	.138E-09
	2	.454E-06	-.398E-07	.655E-09	-.257E-11
	3	-.303E-08	.220E-09	-.336E-11	.135E-13

Tabla 7-b: Valores para  $c_{ijk}$ . Flanco Derecho

		k=0	1	2	3
i=0	j=0	.980E+00	-.144E-01	.381E-03	-.149E-05
	1	-.776E-01	.157E-02	-.213E-04	.635E-07
	2	.745E-03	.182E-04	-.723E-07	.255E-09
	3	-.309E-06	-.241E-06	.147E-08	-.417E-11
i=1	j=0	-.358E-01	.163E-02	-.323E-04	.121E-06
	1	.333E-02	-.159E-03	.281E-05	-.103E-07
	2	-.430E-04	.180E-05	-.370E-07	.146E-09
	3	-.629E-08	.239E-08	.553E-10	-.356E-12
i=2	j=0	.442E-03	-.221E-04	.433E-06	-.165E-08
	1	-.293E-04	.216E-05	-.377E-07	.145E-09
	2	.394E-06	-.375E-07	.630E-09	-.250E-11
	3	.318E-09	.892E-10	-.197E-11	.920E-14

#### 4.17) Modelo de Brunger y Hooper

Este modelo es el más reciente de todos los expuestos en esta memoria. Está formulado también para una gran variedad de condiciones de cielo, cubriendo desde cielos despejados y limpios hasta turbios y completamente nubosos. El conjunto de datos a partir del cual se ha generado es el mismo que permitió a los autores desarrollar el modelo TCCD, esto es, la base de datos SKYSCAN 83/84 ya mencionada anteriormente. Hooper y Brunger formulan su modelo en función de la posición del sol, dada por el ángulo cenital  $\theta_0$  y el acimut  $\phi_0$ , la fracción difusa  $K$  y el índice de claridad  $Kt$ , (Brunger et al., 1993). Adopta la siguiente forma:

$$L(\theta, \phi) = D_h \left[ \frac{a_0 + a_1 \cos \theta + a_2 e^{-a_3 \Psi}}{\pi (a_0 + 2a_1/3) + 2a_2 I(\theta_0, a_3)} \right] \quad (4.17-a)$$

en donde  $\Psi$  es el ángulo de scattering en radianes,  $D_h$  es la irradiancia difusa

sobre superficie horizontal,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son funciones de  $K$  y  $Kt$  las cuales se tabulan a continuación. Por otro lado,  $I(\theta_0, a_3)$  es una función específica de  $a_3$  y el ángulo cenital solar.

Dado que el modelo se formula para todo tipo de cielos, nosotros vamos a restringirnos al caso de cielos despejados. La función  $I(\theta_0, a_3)$  viene dada por:

$$I = \frac{[1 + e^{(-a_3\pi/2)}]}{(a_3^2 + 4)} \left\{ \pi - \left[ 1 - \frac{2(1 - e^{(-a_3\pi)})}{\pi a_3(1 + e^{(-a_3\pi/2)})} \right] [2\theta_0 \text{sen}\theta_0 - 0.02\pi \text{sen}2\theta_0] \right\}$$

Ecuación (4.17-b)

Los coeficientes adoptan los siguientes valores para los casos que están incluidos en nuestra base de datos:

$K$	$Kt$	0.65	0.75	0.85
0.35	$a_0$	0.2871	0.2491	0.2510
	$a_1$	-0.2184	-0.2224	-0.0907
	$a_2$	2.6467	1.5992	0.9733
	$a_3$	3.594	2.6404	2.6775
0.25	$a_0$	0.3153	0.3071	0.2971
	$a_1$	-0.2338	-0.2576	-0.3126
	$a_2$	3.8860	2.3127	1.3594
	$a_3$	4.3920	3.5189	2.397
0.15	$a_0$	0.3360	0.3243	0.3061
	$a_1$	-0.2600	-0.3003	-0.4531
	$a_2$	4.2481	1.9157	1.612
	$a_3$	4.3727	3.2680	2.319

Tabla 8: Valores de los coeficientes del modelo de Brunker y Hooper.  
(Solo para los rangos de  $K$  y  $Kt$  incluidos en nuestra base de datos)

Según sus autores, el modelo está basado en simples funciones geométricas que describen las tres características cualitativas más aparentes de la distribución angular de la radiancia del cielo: la radiancia circunsolar, la cual decrece rápidamente con la distancia angular desde el disco solar, el *horizonte brillante* (u oscuro para el caso nuboso), y el fondo uniforme de radiancia responsable del brillo general del cielo. Para ello recurren respectivamente, al igual que otros autores, a una exponencial, un coseno y aun término constante. En el calibrado de su modelo emplearon un procedimiento de ajuste no lineal por mínimos cuadrados incluido en el software SAS, (SAS).

Al estudiar sus datos experimentales encontraron que la distribución de radiancia normalizada seguía, al igual que la radiancia del cielo, aproximadamente una distribución Logarítmica-Normal. Por ello, a la hora de evaluar su modelo ajustaron el logaritmo de la radiancia normalizada teórica a la experimental. En la valoración de este modelo, realizada para todo tipo de cielos, encuentran un MBE de -11%. Esta tendencia a la subestimación la atribuyen probablemente al tipo de ajuste realizado, empleando valores logarítmicos y no los valores de radiancia directamente. El RMSE calculado para alrededor de 80.000 datos fue de  $0.246 \text{ sr}^{-1}$  ó el 65% de la radiancia normalizada media observada. El resultado de nuestro estudio sobre este modelo y la contrastación de estos datos se expondrá más adelante en esta memoria.

#### **4.18) Otros Modelos**

Incluimos ahora una serie de modelos, de luminancia y de radiancia del cielo, que por su importancia en el contexto general del estudio de la radiación solar o por ser relativamente recientes, merecen ser mencionados en esta revisión de modelos. No obstante, y como ya se ha comentado, por razones diversas no serán comprobados en esta memoria. Este hecho no quita que en un trabajo

posterior podamos comprobar y estudiar las diferentes soluciones que estos modelos proponen.

#### 4.18.1) Modelo de Liebelt

Para la estimación de la Irradiancia Difusa sobre superficies inclinadas en días despejados, la Comisión de la Comunidad Europea (CEC) centró su estudio en la búsqueda de un modelo adecuado para la distribución de la radiancia del cielo, con el que posteriormente realizar la integración. En la búsqueda de un modelo en términos relativos se adoptó, en principio, el modelo de Kittler y el modelo de Gusev, antes expuestos, para condiciones de turbiedades respectivamente moderadas (Kittler,  $TL < 5$ ), y turbiedades mayores (Gusev,  $TL \approx 8$ ). Evidentemente, el problema de ambos modelos es que en una primera formulación, como se ha visto, no son sensibles a los cambios de turbiedad. Esto es así por un lado al emplearse en términos relativos (respecto a la radiancia del cenit) y por otro al estar formulados para unas condiciones de turbiedad específicas.

El modelo de Liebelt, (Liebelt, 1978), representó un avance en este sentido pues depende de la turbiedad en función del coeficiente de Turbiedad de Linke,  $TL$ , de la forma:

$$\begin{aligned} \log(L/L_z) = & \log(1 - \exp(-0.088 m TL(\gamma_o))) + \\ & + \log(1 + P(20) (e^{-3\Psi} - 0.009) + P(21)\cos^2\Psi) - \log(1 - \exp(0.088 TL(\gamma_o))) - \\ & - \log(1 + P(20) (e^{-3\theta_o} - 0.009) + P(21)\cos^2\theta_o) \end{aligned}$$

#### Ecuación (4.18.1)

en donde  $(L/L_z)$  representa la luminancia de un punto del cielo con respecto al valor del cenit. De nuevo  $\Psi$  es el ángulo de scattering en radianes,  $\gamma_o$  es la elevación solar y  $\theta_o$  es el ángulo cenital solar, también en radianes.  $P(20)$  y  $P(21)$  son parámetros que dependen de la turbiedad,  $m$  es la masa óptica para el

elemento del cielo considerado y  $TL(\gamma_0)$  el factor de Turbiedad de Linke. Los parámetros óptimos dados por Liebelt son:

Intervalo de $TL(\gamma_0)$	P(20)	P(21)
$3.5 < TL < 3.95$	8.117	0.276
$4.5 < TL < 4.7$	9.673	0.491
$5.4 < TL < 5.7$	11.409	0.338
$6.4 < TL < 6.7$	14.265	0.457

**Tabla 9:** Valores óptimos para los parámetros del modelo de Liebelt.

Esta formulación es más racional en términos físicos y también, según su autor, más adecuada desde el punto de vista del modelado matemático. Sin embargo, el problema principal de este modelo es la variación aleatoria de  $P(21)$ , y por lo tanto no parametrizable, lo que dificulta su empleo. Por otro lado, Page sugiere la siguiente expresión para  $P(20)$  en el rango de  $2 < TL < 8$ , (Page, 1986):

$$P(20) = 0.6155 + 1.9687 TL(\gamma_0)$$

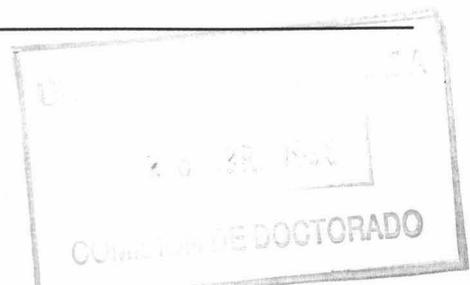
No hay que olvidar que tanto este modelo como los de Kittler y Gusev, se basan en medidas de luminancia del cielo y no en datos de radiancia. Aunque se emplean en términos relativos, pueden no ser los más adecuados para representar la distribución angular de la radiancia del cielo, aunque sí proporcionan una buena base de la que partir hacia estudios más profundos. En este sentido consideramos interesante su descripción por cuanto junto con los otros dos, sirve de base para el desarrollo del modelo de radiancia de la Comunidad Económica Europea, empleado para generar las tablas de cielos despejados en el *Atlas CEC Europeo para Superficies Inclinadas*.

#### 4.18.2) Modelo de Gueymard

En la tarea de modelizar la irradiancia solar para superficies inclinadas, Gueymard considera que la integración de la distribución de radiancia es la mejor forma de calcular la componente difusa (Gueymard, 1986; Gueymard, 1987). En esta memoria hemos indicado ya la importancia de este planteamiento, pues es la única forma de tener en cuenta el evidente carácter no isótropo de la radiación difusa del cielo, (Dave, 1977; Steven, 1977a). Nuevamente se tratan por igual los conceptos de radiancia y luminancia. Así, la formulación original del modelo de Gueymard es la de un modelo de luminancia del cielo (Gueymard, 1986), aunque posteriormente lo emplea como un modelo de radiancia (Gueymard, 1987).

El modelo que propone Gueymard es de tipo empírico, y en su desarrollo emplea datos experimentales de diferente procedencia (Gueymard, 1986). Gueymard considera que la anisotropía del cielo procede de las propiedades ópticas de los aerosoles, que no están suficientemente bien representadas en otros modelos existentes hasta la fecha. Por ello, su idea original fue la de expresar la alta dependencia de la radiancia, y en especial la radiancia circunsolar, con la carga de aerosoles mediante el *coeficiente de turbiedad de Angströma*,  $\beta$ , (Gueymard, 1986).

Distingue dos zonas en la cúpula celeste: una zona circunsolar en la que considera dos subzonas, definidas por los intervalos de ángulo de scattering  $\Psi \leq 3^\circ$  y  $3^\circ < \Psi \leq 20^\circ$ , y una zona hemisférica (el resto). Para la primera zona emplea medidas experimentales de radiancia obtenidas en *Laboratorio Lawrence Berkeley* (Grether et al., 1975) y para la segunda analiza las bases de datos de radiancia de Steven, Hooper & Brunger y Morris & Lawrence (Morris et al, 1971; Steven, 1977a; Hooper et al, 1980).



El modelo así resultante de su investigación es una combinación de dos términos de la forma:

$$\frac{L}{D_h} = K_N \left( \frac{L_{cir}}{D_h} + \frac{L_{hem}}{D_h} \right) \quad (4.18.2)$$

en donde los subíndices *cir* y *hem* corresponden a *circunsolar* y *hemisférica*. Por un lado la contribución hemisférica viene dada por:

$$\frac{L_{hem}}{D_h} = (1 + 0.01\theta_o)(0.275 - 0.395\cos\theta + 0.170\cos^2\theta)$$

con  $\theta$  ángulo cenital y  $\theta_o$  ángulo cenital solar en grados.

Por otro, la contribución circunsolar viene dada por el **valor máximo** entre la radiancia circunsolar normalizada de la primera subzona antes indicada ( $\Psi \leq 3^\circ$ ) y la segunda ( $3^\circ < \Psi \leq 20^\circ$ ), las cuales viene expresadas por:

$$\frac{L_{cir1}(\Psi)}{D_h} = \Psi^{-t} \frac{L_{cir1}(1)}{D_h} \quad (\Psi \leq 3^\circ)$$

con

$$\begin{aligned} t &= 6.556 (m\beta)^{0.5} - 3.346 m\beta && \text{si } (m\beta < 1) \\ t &= 3.210 + 0.2 (m\beta - 1)^{0.5} && \text{si } (1 \leq m\beta < 3) \end{aligned}$$

y por

$$\frac{L_{cir2}}{D_h} = (b_o + b_1\theta_o + b_2\theta_o^2) \exp(b_3 + b_4\Psi) \quad (3^\circ < \Psi \leq 20^\circ)$$

con

$$\begin{aligned} b_0 &= 0.109 + 0.029\Psi + 0.005 \exp(-0.015\theta_o + 1.07 \times 10^{-5} \theta_o^3) \\ b_1 &= (0.02 - 6 \times 10^{-4} \Psi) \\ b_2 &= 6.8 \times 10^{-5} \quad , \quad b_3 = 0.24 \quad , \quad b_4 = -0.054 \end{aligned}$$

siendo  $m$  la *masa óptica*,  $\beta$  el *coeficiente de turbiedad de Angström* y  $\Psi$  el ángulo de scattering, todos los ángulos en grados.

Finalmente,  $K_N$  es un *factor multiplicativo* que viene dado por la ecuación:

$$K_N = a_0 + a_1\theta_o 10^{-2} + a_2\theta_o^2 10^{-4} + a_3\theta_o^3 10^{-6}$$

Aquí  $\theta_o$  es nuevamente el ángulo cenital solar expresado en grados y las constantes  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  vienen dadas por:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1.0156 + 0.0907\beta - 0.8644\beta^2 \\ a_1 &= -0.1966 + 1.5843\beta - 3.8185\beta^2 \\ a_2 &= 0.3651 - 4.8270\beta + 7.9650\beta^2 \\ a_3 &= -0.113 + 2.010\beta - 2.950\beta^2 \end{aligned}$$

en donde  $\beta$  es el *coeficiente de turbiedad de Angström*.

Como puede apreciarse, la formulación del modelo es bastante compleja y poco operativa, al implicarse demasiadas constantes empíricas. Gueymard aporta herramientas simplificadoras para calcular  $L_{\text{cir1}}/Dh$ , aunque a pesar de ello los resultados al aplicar el modelo resultan *faltos de eficacia* en una zona de  $10^\circ$  alrededor del sol (Gueymard, 1986). Con todo y según el autor, este modelo se acerca más a la teoría y se comporta mejor en esta zona que el resto de las formulaciones empíricas, las cuales tienden a subestimar (Gueymard, 1987).

#### 4.18.3) Modelo de Perez

El modelo de Perez es un modelo de distribución angular de luminancia para todas las condiciones de cielo, desde el completamente cubierto al despejado, (Perez et al., 1993). La base experimental de datos que soporta este modelo es muy extensa, y está formada por unos 16.000 barridos de luminancia tomados entre Junio de 1985 y Diciembre de 1986 en Berkeley, (LBL, 1986).

Antes de exponer su forma definitiva, tenemos que remontarnos a un trabajo anterior. En este trabajo se realiza la siguiente formulación para la

luminancia del cenit, para el intervalo de ángulo cenital ( $17^\circ < \theta < 85^\circ$ ), (Perez et al., 1990):

$$\frac{L_z}{D_h} = a_i + b_i \cos \theta + c_i \exp(-3\theta) + d_i \Delta$$

$$\Delta = Dh m/I_0$$

En esta expresión  $\Delta$  es lo que denominan sus autores *brillo del cielo* siendo  $m$  la masa óptica relativa y  $I_0$  la irradiancia extraterrestre. Fuera del intervalo indicado para  $\theta$ , los autores recomiendan *precaución* hasta una validación posterior. Los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  se tabulan en ese mismo trabajo en función de lo que denominan sus autores *claridad del cielo*,  $\epsilon$ , dado por, (Perez et al, 1990):

$$\epsilon = [(Dh + I)/Dh + 1.041 \theta_0^3] / [1 + 1.041 \theta_0^3]$$

con  $I$  la irradiancia directa y  $\theta_0$  el ángulo cenital solar en radianes. A partir de  $L_z$  formula la luminancia para cualquier punto del cielo de la forma. Aunque ofrece una forma especial para cada tipo de cielos, en el caso de cielos despejados queda como sigue:

$$\frac{L}{L_z} = \frac{f_1(\gamma) f_2(\Psi)}{f_1(\frac{\pi}{2}) f_2(\theta_0)}$$

en donde las funciones  $f_1$  y  $f_2$  vienen dadas para un ángulo cualquiera  $X$  expresado en radianes por:

$$f_1(X) = 1 - \exp(-0.32/\text{sen}X)$$

$$f_2(X) = 0.91 + 10 \exp(-3X) + 0.45(\cos X)^2$$

es decir, adopta de forma provisional el estándar CIE (modelo de Kittler antes expuesto). En su forma definitiva, las constantes de las funciones  $f_1$  y  $f_2$  se recalculan teniendo en cuenta su efecto sobre la parametrización.

Es decir el modelo quedaría como sigue:

$$\frac{L}{L_z} = \frac{[1+a \exp(b/\cos\theta)] [1+c \exp(d \Psi)+e \cos^2\Psi]}{[1+a \exp(b)] [1+c \exp(d \theta_0)+e \cos^2\theta_0]} \quad (4.18.3)$$

en donde cada uno coeficiente implicados se tabula, como antes, en función de 8 binomios ( $\epsilon$ ,  $\Delta$ ). La actuación de estos coeficientes podrían interpretarse como sigue:

- a: Acentúa o disminuye el efecto del horizonte.
- b: Modula el gradiente de luminancia cerca del horizonte.
- c: Acentúa o disminuye la luminancia en la zona circunsolar.
- d: Modula la anchura de la zona circunsolar.
- e: Tiene en cuenta el scattering hacia la superficie terrestre.

La intención de este modelo es el empleo junto con valores horarios, o de menor frecuencia, de irradiancia global y directa, así como para su empleo, conjunta o separadamente, con otro modelo de los mismos autores para el cálculo de valores horarios de irradiancia directa a partir de la global, (Perez et al., 1991).

Este hecho, el de ser un modelo de luminancia y el de no aportar realmente una formulación "*nueva*", pese a ser reciente, nos ha llevado a no considerarlo para su evaluación. Con todo, según reclaman sus autores en una comparación realizada frente a otros modelos, incluidos el de Brunger y el de Harrison ya reseñados, el comportamiento resulta *óptimo para este tipo de modelos* (Perez et al., 1993).

Sin embargo, el hecho de emplear en la validación los mismos datos que en su desarrollo plantea, al menos, la más que razonable duda del resultado. Duda que ellos mismos destacan y vuelven a resaltar cuando en un reciente trabajo, en el que repiten la comparación empleando otras bases de datos del luminancia del

cielo (Ineichen et al., 1994). En este caso, el comportamiento del modelo está más equilibrado frente a otros *competidores*, situándose globalmente en términos parecidos de RMSE (46%), frente al de Brunger & Hooper (48%), (Ineichen et al., 1994). Lógicamente, con la base de Berkeley nuevamente obtiene los mejores resultados de la validación.

#### 4.18.4) Modelo de Perraudou

El último modelo considerado en esta memoria es el modelo de Perraudou, el cual utiliza para la luminancia del cielo, como el anterior de Perez, una ecuación básica con coeficientes ajustables. Viene dado por la expresión siguiente, (Perraudou, 1988):

$$\frac{L}{D_h} = (a_1 + b_1 \exp(-3\Psi) + c_1 \cos^2\Psi) X (a_2 - b_2 \operatorname{sen}^{0.6}\gamma) X (a_3 + b_3 \operatorname{sen}\gamma_o + c_3 \cos\gamma_o) \quad (4.18.4)$$

De nuevo se trata de un modelo para todo tipo de condiciones de cielo, aunque en realidad los coeficientes  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $a_3$ ,  $b_3$  y  $c_3$  pueden tomar solo cinco valores diferentes cada uno. Estos cinco conjuntos de valores se determinaron experimentalmente, a partir de medidas de luminancia en cinco puntos del cielo. Representan los cinco tipos de cielo considerados por Perraudou: completamente cubierto, parcialmente cubierto, condiciones medias de claridad, parcialmente claro y totalmente claro. Para determinar el tipo de cielo se elige para cada aplicación, el autor introduce el *índice de nebulosidad*,  $N$ , el cual se determina mediante la siguiente expresión (Perraudou, 1988):

$$N = (1 - Dh/Gh) / (1 - [Dh/Gh]_{\text{teórico}})$$

Este modelo resulta algo más simple que el de Perez, y también es consecuencia de un estudio combinado analítico y estadístico. En un reciente trabajo con datos de luminancia tomados en el Reino Unido, Littlefair realiza una comparación de modelos de luminancia entre los que incluye el de Perez y el de Perraudou, (Littlefair, 1994). En este trabajo, el comportamiento global (para todo el cielo) en condiciones de cielo despejado del modelo de Perez, da lugar a un 33% de RMSE frente al 49% de RMSE para el de Perraudou, con un MBE del 17% frente a un 27%. En el estudio por zonas, tampoco presenta mejor comportamiento el modelo de Perraudou que el de Perez, (Littlefair, 1994).

Haciéndonos eco de las recomendaciones de Kittler, (Kittler et al., 1990), con estos dos modelos, y a la vista de validaciones existentes, la complejidad de un modelo no garantiza un mejor comportamiento. Siguiendo con esas recomendaciones, nuestros datos son de radiancia del cielo y estos modelos han sido específicamente calibrados con datos de luminancia, por lo que puede existir alguna influencia en el resultado. Finalmente, esas recomendaciones animan al análisis profundo de distribuciones experimentales y al empleo de modelos analíticos simples (que pueden ser totalmente respetuosos con la teoría) como base del estudio. Esa es la línea de esta memoria y por ello tampoco se ha considerado este modelo para la validación que exponemos a continuación.

## **5. PRUEBA DE LOS MODELOS. ANALISIS DE RESULTADOS**

### **5.1) Introducción**

Como se ha podido comprobar en la descripción de los modelos realizada en el punto anterior, hay una gran diversidad de propuestas y formulaciones para la distribución de la radiancia del cielo. Una de las cuestiones más comprometidas a la hora de realizar la prueba de los diferentes modelos, fue la de elegir el método más adecuado para poder comparar unos resultados con otros y determinar el mejor comportamiento. Según se observa en la literatura analizada, algunos investigadores prefieren estudiar estadísticamente el *logaritmo* de la radiancia obtenida por su modelo y la medida experimentalmente, aunque su formulación venga dada en otros términos. Esto se debe a que, como hemos visto anteriormente, la distribución de radiancia presenta un comportamiento *lognormal*.

Otros autores prefieren el análisis de la radiancia normalizada con respecto a alguna otra magnitud, debido a que de esta manera se suavizan influencias de tipo local o del estado de turbiedad de la atmósfera, ganando así en generalidad. Aun en este caso nos encontramos con divergencias, debido a que a veces se normaliza con respecto a la radiancia procedente de un punto concreto del cielo, llámese cenit, o con respecto a la irradiancia difusa sobre una superficie horizontal. En cualquiera de estos dos casos, en ocasiones se desnormaliza luego y se estudia el comportamiento del modelo en términos absolutos.

Un tercer problema al que nos enfrentamos es al hecho de la base de datos en sí, rica y rigurosa en la información que contiene, pero diferente con respecto a las bases de datos empleadas por otros autores en sus trabajos. Algunos investigadores han realizado promedios sobre la base de barridos del cielo con características semejantes, lo que les ha llevado a *barridos tipo* con el que luego han trabajado. En nuestro caso las medidas instantáneas de radiancia no han sido

promediadas. Lo único que hemos hecho ha sido emplear los datos en la misma forma que sus autores (L/Dh, L/Lz, L/Isc) y para los mismos rangos de elevaciones solares o con las exclusiones que ellos tuvieron en sus bases de datos.

Por todo ello, ante tal diversidad y por las características de nuestra base de datos, se ha optado por probar los modelos de la misma forma en la que han sido formulados por sus autores. Esto implica en todos los casos hacerlo en términos relativos. Además, para evitar variaciones debidas al empleo de una instrumentación diferente, lo que implica diferentes rangos espectrales, como ya se ha comentado para cada barrido se ha procedido a calcular la irradiancia difusa horizontal por integración de los datos de radiancia de ese barrido. Solo en los casos en los que el autor muestra un análisis logarítmico, se ha procedido de forma semejante. Finalmente, se han agrupado los modelos en tres tipos para su análisis:

- a) Modelos que normalizan con respecto a la Irradiancia Difusa sobre superficie horizontal (Dh):
  - Modelo de Dogniaux
  - Modelo de Steven
  - Modelo de Valko
  - Modelo TCCD
  - Modelo de Harrison y Coombes
  - Modelo de Brunger y Hooper
- b) Modelos que normalizan con respecto a la Radiancia del Cenit (Lz):
  - Modelo de Kittler
  - Modelo de Gusev
  - Modelo de la Comunidad Económica Europea
- c) Otras formulaciones:
  - Modelo de Siala.

A la hora de elegir los parámetros estadísticos que iban a incorporarse en el análisis, se han seguido las recomendaciones dadas por Iqbal (Iqbal, 1983) y Won (Won, 1984), además de los indicadores que normalmente se emplea en la literatura. En este sentido, se ha estimado conveniente incluir en las tablas siguientes los parámetros que se describen a continuación:

\* **AVE** - *Valor medio* estimado por el modelo

\* **MBE** - *Desviación media* (Mean Bias Error). Si  $N$  es el número de observaciones experimentales,  $y_i$  son los valores predichos por el modelo y  $x_i$  los valores medidos, el *MBE* viene definido por:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N}$$

Representa una indicación de la tendencia sistemática del modelo a la subestimación o sobreestimación. En el caso ideal,  $MBE=0$ . En las tablas se expresa en porcentaje con respecto al valor medio experimental.

\* **RMSE** - *Error cuadrático medio* (Root Mean Square Error). Aporta una comparación término a término de la diferencia entre los valores predichos por el modelo y los medidos de forma experimental. Es siempre positivo, aunque el valor ideal sería también cero. Viene definido por la expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}}$$

En las tablas se ha expresado también en porcentaje con respecto al valor medio experimental.

Ya que ninguna estadística puede por sí sola suministrar una completa visión del comportamiento de un modelo, hemos considerado que el binomio *MBE-RMSE* puede ser eficaz en este sentido. De esta forma, aquellos casos en los que el MBE sea cercano a cero, el RMSE proveerá una estimación complementaria de la desviación del modelo con respecto a los valores experimentales (Won, 1984). Adicionalmente hemos empleado:

\* *a, b, r* - *Pendiente, Ordenada en el origen y Coeficiente de Correlación*. Son los parámetros habituales del análisis de regresión lineal entre los valores predichos por el modelo y los valores experimentales. Lógicamente, los valores ideales serían  $a=1$ ,  $b=0$  y  $r=1$ . Una pendiente cercana a la unidad mostraría un modelo sin una tendencia especial, con una probabilidad semejante de subestimación o sobreestimación en todo el rango de las medidas experimentales.

Para cada modelo se ha realizado un estudio con los datos de SABINAL y otro con los datos de VELETA, buscando diferencias y puntos en común en el comportamiento. Recordemos que este estudio se ha llevado a cabo empleando únicamente dos tercios de la base de datos, la cual ha sido dividida de nuevo de tres formas distintas:

- División por **Altura Solar** ( $\gamma_0$ ).
- División por **Cinturones del Cielo** ( $\gamma$ ).
- División por **Ángulo de Scattering** ( $\Psi$ ).

Tal y como se vio en el capítulo 4 de esta memoria, en el primer caso se han dividido los datos de 10 en 10 grados de Altura Solar. En el segundo caso se han dividido los datos considerando la cúpula del cielo formada por tres bandas o cinturones, delimitadas por la elevación del punto del cielo considerado, (0-20°,

20°-40°, 40°-90°). En el tercer caso se han considerado diversas distancias angulares con respecto al sol, caracterizadas por el ángulo de scattering, (0-20°, 20°-70°, 70°-120°, > 120°).

Es necesario recordar aquí que en los programas de análisis se han excluido los datos experimentales correspondientes a puntos del cielo situados a una distancia angular menor o igual que 7.5° de ángulo de scattering y los datos experimentales superiores a 250 Wm<sup>2</sup>sr<sup>-1</sup>. Estas dos restricciones disminuyen en muy pocos casos el número de datos experimentales de cada grupo y asegura el que no exista contaminación directa por el Sol en el instrumento de medida. Por lo tanto al dividir la base de datos de tres formas diferentes, el análisis en sí es triple, permitiendo definir perfectamente el comportamiento de cada modelo como veremos a continuación.

De entre todos los modelos analizados, se ha elegido el que de forma global mejor respuesta ha obtenido para nuestra zona de estudio. Sobre esta base se ha realizado una serie de propuestas y modificaciones que han dado lugar a un modelo propio para la radiancia del cielo. Este estudio será el contenido del siguiente capítulo de la memoria.

### **5.2) Modelos que normalizan con respecto a Dh**

Dado que uno de los parámetros que vamos a emplear en el análisis es el *Valor Medio* generado por el modelo (AVE), hemos considerado necesario ofrecer el *Valor Medio experimental (AVE Experimental)*. Como la magnitud que vamos a emplear cambia de una agrupación de modelos a otra, en cada caso y al principio expondremos el **AVE Experimental**, así como en aquellos casos en los que por alguna restricción adicional a las comentadas, sea también necesario volver a dar esta información.

Para los modelos que ocupan este grupo, el AVE Experimental de (L/Dh) en cada categoría, se expresa a continuación. Lógicamente es común en el análisis de todos los modelos incluidos en este apartado:

(L/Dh)	AVE Experimental (sr <sup>-1</sup> )	
GRUPO DE DATOS	SABINAL	VELETA
0 - 20	0.453	0.612
20 - 30	0.437	0.597
30 - 40	0.381	0.472
40 - 50	0.326	0.438
50 - 60	0.284	0.426
60 - 70	0.272	0.388
70 - 80	0.277	0.342
0 - 20	0.335	0.542
20 - 40	0.240	0.259
40 - 90	0.302	0.240
0 - 20	0.962	0.868
20 - 70	0.346	0.443
70 - 120	0.222	0.377
120 - >	0.285	0.639

### 5.2.1) Modelo de Dogniaux

Recordemos que la expresión del Modelo de Dogniaux es:

$$\frac{L}{D_h} = \pi^{-1} \{ d_1 + d_2 \exp(d_3 \psi) + d_4 \cos^2 \psi \} \{ 1 - \exp(d_5 \sec \theta) \}$$

En este caso, dado que los coeficientes  $d_i$  solo han sido calculados por su autor para  $\theta_0$  (ángulo cenital solar) por encima de 30° y por debajo de 70°, en el *análisis por altura solar* nos limitamos a alturas por encima de 20° y por debajo de 60°. Debido a esta nueva restricción, el valor medio experimental (AVE Experimental) en los grupos de *datos por cinturón del cielo* y *ángulo de scattering* serían:

(L/Dh)	AVE Experimental (sr <sup>-1</sup> ) (Dogniaux y Steven)	
GRUPO DE DATOS	SABINAL	VELETA
0 - 20	0.405	0.611
20 - 40	0.286	0.291
40 - 90	0.202	0.197
0 - 20	1.318	1.089
20 - 70	0.404	0.495
70 - 120	0.217	0.374
120 - >	0.283	0.627

El comportamiento del modelo puede apreciarse en los gráficos de las figuras 9-14, y los principales datos del análisis estadístico en las Tablas 1.a y 1.b. Como puede observarse, el modelo subestima de forma general en cualquiera de las tres divisiones que hemos realizado, tanto en Sabinal como en Veleta.

En Sabinal se aprecia un comportamiento parecido en todos los casos del análisis por altura solar, disminuyendo la tendencia a la subestimación a medida que la elevación solar es mayor. En el análisis por cinturones, el modelo produce resultados similares, correspondiendo los mejores aciertos para la zona media del cielo (de 20 a 40 grados de elevación), en donde parece compensarse la subestimación del horizonte con la sobreestimación del cenit.

El análisis por ángulo de scattering permite observar un comportamiento adecuado del modelo en el rango 20°-70°, pero bastante alejado de la realidad en el resto de los casos. Aunque el RMSE no supera en ningún caso el 50%, no podemos considerar que la modelización sea efectiva salvo para la zona indicada anteriormente. En su forma original, los coeficientes  $d_i$  no dependían del ángulo cenital solar y el modelo presentaba un error máximo del 25%, según indica Steven (Steven et al., 1979). Con la modificación de Steven reflejada en el mismo trabajo, sus resultados presentaban un error máximo del 10%.

DOGNIAUX - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20						
20 - 30	0.359	-17.8	42.2	0.7241	0.0428	0.9570
30 - 40	0.342	-10.2	34.2	0.7400	0.0602	0.9403
40 - 50	0.319	-1.8	32.3	0.7632	0.0709	0.9000
50 - 60	0.283	-0.35	24.9	0.8093	0.0527	0.8809
60 - 70						
70 - 80						
DOGNIAUX - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.349	-13.8	32.3	0.7624	0.0402	0.9405
20 - 40	0.306	7	49.5	0.7283	0.0979	0.9058
40 - 90	0.237	17.3	41.4	0.7316	0.0887	0.9109
DOGNIAUX - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	1.113	-15.6	32.1	0.4748	0.4866	0.8035
20 - 70	0.395	-2.2	33.2	0.7005	0.1120	0.9199
70 - 120	0.200	-7.8	20.6	0.5271	0.0858	0.8557
120 ->	0.203	-28.3	35.3	0.1151	0.1701	0.4063

Tabla 1.a: Comportamiento del modelo de DOGNIAUX para SABINAL.

En nuestro estudio el RMSE medio de todos los casos se sitúa en el 34% y en ningún caso particular es inferior al 20%. Estos mismos comentarios pueden realizarse para Veleta, en donde el resultado del análisis es aún peor, con una subestimación también generalizada y con un RMSE medio del 55%.

En el caso de Veleta, podemos afirmar que el modelo no representa en absoluto la distribución de radiancia del cielo, destacando una alta subestimación en el cinturón que contiene el horizonte y la zona del cielo más alejada del sol.

<b>DOGNIAUX - División por Altura Solar (°)</b>						
<b>VELETA</b>	<b>AVE (sr<sup>-1</sup>)</b>	<b>MBE (%)</b>	<b>RMSE (%)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
<b>0 - 20</b>						
<b>20 - 30</b>	0.386	-35.3	61.8	0.6651	0.0113	0.7557
<b>30 - 40</b>	0.349	-26.1	58	0.5431	0.0925	0.7018
<b>40 - 50</b>	0.322	-26.3	58.3	0.4266	0.1354	0.6087
<b>50 - 60</b>	0.284	-33.2	64.4	0.2315	0.1855	0.3982
<b>60 - 70</b>						
<b>70 - 80</b>						
<b>DOGNIAUX - División por Cinturón del Cielo (°)</b>						
<b>0 - 20</b>	0.369	-39.6	58.6	0.5604	0.0267	0.6638
<b>20 - 40</b>	0.319	9.6	39.2	1.1302	-0.0097	0.9251
<b>40 - 90</b>	0.230	16.8	35.9	0.9351	0.0453	0.9010
<b>DOGNIAUX - División por Ángulo de Scattering (°)</b>						
<b>0 - 20</b>	1.252	15	27.4	0.7269	0.4602	0.8179
<b>20 - 70</b>	0.416	-16	52.3	0.5111	0.1630	0.7840
<b>70 - 120</b>	0.206	-44.9	65	0.1578	0.1463	0.6399
<b>120 - &gt;</b>	0.203	-67.6	81	0.0240	0.1881	0.3637

**Tabla 1.b:** Comportamiento del modelo de DOGNIAUX para VELETA.

El modelo de Dogniaux no es sensible a las diferencias de turbiedad atmosférica y este hecho se manifiesta sensiblemente en las diferencias encontradas entre Sabinal y Veleta. Asimismo, si bien su comportamiento es parecido para todas las alturas solares en un sitio y en otro, pone de manifiesto una gran carencia en la forma de representar el horizonte y las zonas alejadas del sol, incluyendo el mínimo de polarización situado a  $\Psi=90^\circ$ .

## 5.2.2) Modelo de Steven

La expresión para el Modelo de Steven era:

$$\frac{L}{D_h} = \pi^{-1} \left\{ \sum_1^{10} c_i f_i(\theta, \phi) + c_{11} \exp(-c_{12} \text{sen}\psi) \right\}$$

Las figuras 15-20 muestran el comportamiento del modelo para las diferentes categorías y las Tablas 2.a y 2.b el resultado del análisis estadístico.

STEVEN - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20						
20 - 30	0.437	0.1	79.6	0.3751	0.2732	0.7099
30 - 40	0.343	-10	67.4	0.3219	0.2207	0.7002
40 - 50	0.337	3.7	52.4	0.3897	0.2106	0.7059
50 - 60	0.288	1.4	29.5	0.7035	0.0879	0.8316
60 - 70						
70 - 80						
STEVEN - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.342	-15.6	57.4	0.3639	0.1947	0.7714
20 - 40	0.402	40.6	74.2	0.6604	0.2130	0.8360
40 - 90	0.299	48	75	0.7480	0.1478	0.7826
STEVEN - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	0.995	-24.5	42.4	0.2645	0.6463	0.7131
20 - 70	0.352	-12.9	62.6	0.3148	0.2255	0.6233
70 - 120	0.275	26.7	60	0.0478	0.2643	0.0430
120 ->	0.369	30.4	44.7	0.3253	0.2765	0.2551

Tabla 2.a: Comportamiento del modelo de STEVEN para SABINAL.

STEVEN - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20						
20 - 30	0.452	-24.3	67.6	0.3415	0.2478	0.5573
30 - 40	0.341	-27.8	70.3	0.2021	0.2453	0.4478
40 - 50	0.336	-23.1	63.5	0.1923	0.2523	0.4118
50 - 60	0.290	-31.8	61.4	0.2481	0.1843	0.4658
60 - 70						
70 - 80						
STEVEN - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.360	-41.1	61.9	0.2851	0.1863	0.5699
20 - 40	0.431	48.1	72.1	1.0434	0.1269	0.8395
40 - 90	0.294	49.2	75.3	0.9784	0.1013	0.7882
STEVEN - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	1.093	0.4	33.9	0.3102	0.7554	0.5187
20 - 70	0.358	-27.7	73.7	0.2056	0.2555	0.5026
70 - 120	0.283	-24.3	63.3	0.0197	0.2572	0.0433
120 ->	0.377	-39.9	59.5	0.0824	0.3249	0.2607

**Tabla 2.b:** Comportamiento del modelo de STEVEN para VELETA.

Las conclusiones que podemos extraer para este modelo son muy parecidas tanto para Sabinal como para Veleta. Como puede apreciarse en las figuras 15-20, la serie de funciones  $f_i$  aportadas por Steven no parecen representar los resultados experimentales. En el análisis por alturas solares, si bien el comportamiento es similar en todas las agrupaciones, en Veleta llegan a aparecer hasta "dos ramas" claramente definidas que se manifiestan en la estadística con valores muy altos del RMSE.

Si bien esta no es la situación en Sabinal, la gran dispersión de los datos hace que los coeficientes de correlación sean bajos y en ocasiones los valores de la pendiente estén bastante alejados de la unidad.

El análisis por ángulo de scattering para este modelo, muestra un rango de variación significativamente menor que el de los datos experimentales, claramente manifiesto a partir de 70° y más acusado en Veleta. Sin embargo, podemos distinguir una zona en la que se concentran la mayor parte de los aciertos del modelo de Steven. Es el cinturón medio del cielo caracterizado por elevaciones desde 20 hasta 40 grados. En esta región, tanto en Sabinal como en Veleta, obtenemos un coeficiente de correlación lineal de 0.84, aunque el resto de parámetros estadísticos confirmen también que el 8% de error máximo encontrado por su autor (Steven et al., 1979) sea algo inalcanzable en nuestro caso.

En el análisis de estos resultados no debemos olvidar que la base de datos que empleó Steven (Steven, 1977b) estaba caracterizada por barridos de 40 minutos frente a los 2.8 minutos de nuestros barridos, y con un instrumento con el doble ángulo de visión que el empleado por nosotros. Por ello, la irradiancia difusa sobre superficie horizontal calculada a partir de esos datos resulta sensiblemente distinta (un 6% mayor de media (Steven, 1977b)) que la medida experimentalmente. Además, el autor agrupó sus distribuciones experimentales por zonas del cielo y en función del ángulo cenital solar, por lo que la comparación con nuestras medidas "*cuasiinstantáneas*" refleja toda la variabilidad que queda promediada por Steven. Por otro lado, la gran diferencia de altura y de turbiedad entre los dos emplazamientos se ve reflejada nuevamente en los diferentes resultados obtenidos entre Sabinal y Veleta, siendo las condiciones más extremas de Veleta las que ocasionan peores resultados. Todo ello evidencia la no adecuación de esta formulación en líneas generales.

### 5.2.3) Modelo de Valko

Recordemos que el Modelo de Valko era el resultado de un ajuste en tres etapas dado por la expresión:

$$\frac{\pi L}{D_h} = \left[ \sum_i^2 \left( \sum_j^3 \left( \sum_k^3 c_{ijk} \alpha_s^k \right) \gamma^j \right) \gamma_0^i \right]^{-1}$$

aunque nosotros hemos trabajado con  $L/D_h$ . Desde el punto de vista del análisis gráfico y estadístico, las figuras 21-28 y las Tablas 3.a y 3.b muestran el resultado de nuestro estudio. Ya que el modelo es el resultado de un *puro análisis estadístico*, sin condicionantes teóricos previos y empleando una extensísima base de datos tomada en diferentes regiones del mundo, cabría esperar un buen comportamiento. Sin embargo, a simple vista puede ser un tanto desilusionante el que se no se obtengan buenos resultados. La explicación hay que buscarla en un análisis más profundo.

De entrada, dado que al generar este modelo Valko no disponía de datos experimentales por debajo de los 18° de elevación, todos estos casos (muy ricos en nuestra base de datos) fueron excluidos en nuestro análisis. Esto ha supuesto eliminar 39.347 datos puntuales en Sabinal y 32.673 en Veleta, distribuidos de diferente forma en función del grupo considerado. Esto hace que el valor medio experimental para este análisis sea, en cada caso, el que se muestra más adelante.

Por otro lado, aunque así se disminuye el tamaño global de la base de datos, lo más significativo es que aparecen una gran cantidad de casos en los que el modelo genera un valor negativo y casos en los que el modelo da un resultado disparatadamente alto. Esta circunstancia explica las "columnas" de puntos prácticamente generalizada en todos los gráficos de las figuras 21-28 y el que aparezcan valores tan altos del MBE tanto en Sabinal como en Veleta.

(L/Dh)	AVE Experimental (sr <sup>-1</sup> )	(Valko)
<b>GRUPO DE DATOS</b>	<b>SABINAL</b>	<b>VELETA</b>
0 - 20	0.270	0.286
20 - 30	0.283	0.314
30 - 40	0.273	0.272
40 - 50	0.261	0.279
50 - 60	0.246	0.276
60 - 70	0.263	0.277
70 - 80	0.278	0.256
0 - 20	0.277	0.357
20 - 40	0.238	0.257
40 - 90	0.278	0.233
0 - 20	0.880	0.679
20 - 70	0.249	0.264
70 - 120	0.152	0.204
120 ->	0.219	0.348

Los "*casos problemáticos*" que comentábamos antes aparecen siempre a partir de 40 grados de elevación solar, para ángulos de scattering hasta 70° y uniformemente distribuidos en todos los cinturones considerados. Tal y como se aprecian en las Tablas 3.a y 3.b, esto explica el que aparezca tímidamente algún tipo de ajuste lineal solo para los tres primeros grupos por altura solar y en los dos últimos por ángulo de scattering, tanto en Sabinal como en Veleta.

Es necesario volver al origen de este modelo para comprender estos resultados. Se trata de un ajuste triple para toda la cúpula del cielo, pero realizado por planos con respecto al plano solar. Es decir, se ha parametrizado observando la distribución experimental de los datos principalmente en función de  $\alpha_s$  (acimut relativo al sol). El caso más conflictivo es, para cualquier altura solar, aquel en el que  $\alpha_s=0$  o 180°, es decir el plano sol-cenit-punto del cielo considerado. Al aparecer dos ramas hace que el ajuste polinómico genere valores erróneos precisamente en la "*chimenea*" que así se genera (ver figuras 7 y 8 del punto 4.16 de este capítulo).

VALKO - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.293	8.5	53.7	0.8526	0.0627	0.8749
20 - 30	0.326	15.2	75	1.0094	0.0404	0.8768
30 - 40	0.383	40.3	335	1.6612	-0.0701	0.4865
40 - 50	0.414	58.6	404	1.8966	-0.0808	0.4219
50 - 60	0.446	81.3	546	2.3989	-0.1439	0.3049
60 - 70	0.517	96.6	538	2.9103	-0.2478	0.3625
70 - 80	1.223	340	1365	9.365	-1.3841	0.5200
VALKO - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.503	81.6	510	2.0062	-0.0518	0.3317
20 - 40	0.439	84.5	522	1.5201	0.0771	0.2988
40 - 90	0.818	194	1022	5.1560	-0.6136	0.4211
VALKO - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	3.795	331	804	-0.2407	4.0069	-0.0162
20 - 70	0.474	90.4	487	2.2848	-0.0942	0.2648
70 - 120	0.165	8.6	20.8	0.9622	0.0188	0.8276
120 ->	0.238	8.7	14.4	0.5438	0.1185	0.6699

**Tabla 3.a:** Comportamiento del modelo de VALKO para SABINAL.

Aunque se han excluido del análisis los valores generados por el modelo mayores que 16 (50 sr<sup>-1</sup>), en el análisis estadístico aparecen RMSE muy elevados y una sobreestimación demasiado exagerada en líneas generales. De todas formas el comportamiento del modelo no es tan malo como puedan reflejar los resultados anteriores. Efectivamente, cuando se aplica a algún caso concreto y a los diferentes planos con respecto a la posición solar (técnica empleada para generarlo), el modelo no reproduce tan mal la distribución de radiancia del cielo.

VALKO - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.322	12.6	56.4	1.4031	-0.0791	0.9318
20 - 30	0.357	13.7	83	1.6059	-0.1469	0.9019
30 - 40	0.391	43.8	230	2.0612	-0.1687	0.6374
40 - 50	0.442	58.4	555	2.6004	-0.2840	0.3472
50 - 60	0.457	65.6	497	2.8696	-0.3338	0.3257
60 - 70	0.544	96.4	658	4.8836	-0.8104	0.3255
70 - 80	1.601	525	1838	17.7123	-2.9333	0.4478
VALKO - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.514	44	357	2.2462	-0.2885	0.3600
20 - 40	0.467	81.7	567	2.3854	-0.1466	0.3029
40 - 90	0.847	264	1349	6.1212	-0.5778	0.3146
VALKO - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	4.109	505	1117	-2.5214	5.8217	-0.1455
20 - 70	0.478	81.1	495	2.5560	-0.1958	0.2653
70 - 120	0.168	-17.7	26.9	0.5601	0.0541	0.7824
120 ->	0.237	-31.9	36.4	0.3610	0.1107	0.8192

Tabla 3.b: Comportamiento del modelo de VALKO para VELETA.

En las figuras 29-32 se presentan dos casos de Veleta (por ser allí donde mejores resultados hemos obtenido) elegidos por sus condiciones particulares, que son las siguientes:

- Día-Serie-Scan:	188-15-3	Kt:	0.826
- Altura y Acimut Solar:	40°, 90°	Kd:	0.041
- IDHI:	49.5227 W/m <sup>2</sup>	Dh/Gh:	0.049
		TL:	2.49
- Día-Serie-Scan:	192-6-3	Kt:	0.831
- Altura y Acimut Solar:	73°, 328°	Kd:	0.140
- IDHI:	146.1150 W/m <sup>2</sup>	Dh/Gh:	0.169
		TL:	5.31

en donde IHDI es la Irradiancia Difusa sobre superficie Horizontal Integrada a partir de los datos experimentales de ese barrido.

Tras la representación 2D de la distribución angular de radiancia del cielo, figuras 29 y 31, ofrecemos los cortes experimentales y teóricos en cada caso, figuras 30 y 32. Como puede apreciarse, en los planos para los que ha sido diseñado, el modelo reproduce aceptablemente los resultados experimentales, mostrando el peor comportamiento en las cercanías del sol para  $\alpha_s=0$ . Cuando la turbiedad atmosférica es mayor (TL) y la altura solar roza el cenit (segundo caso presentado), la tendencia a la sobreestimación y los valores "*disparatados*" aumentan, por ser mayor la presencia de esa "*chimenea*" en el ajuste que comentábamos antes.

Por lo tanto, podemos concluir que el modelo de Valko es interesante para casos particulares de cielo limpio y alturas solares medias o medias bajas (como pueden ser las de centro Europa que fueron los datos empleados en el ajuste) y aplicándolo a los cortes  $\alpha_s$  definidos. En el resto de los casos, el ajuste polinómico no reproduce el campo de radiancia, por no controlar el ajuste polinómico lo que sucede entre las dos ramas que aparecen en torno a la posición solar.

#### 5.2.4) Modelo TCCD (Modelo de Hooper & Brunger)

Recordemos que la forma del Modelo TCCD es:

$$\frac{L(\theta, \phi)}{D_h} = A_0 \psi_0 + A_1 \psi_1 + A_2 \psi_2$$

En este caso, la forma del modelo como sumatoria de tres componentes, a saber, *contribución isótropa*, *horizonte brillante* y *región circunsolar*, puede ser analizada de forma precisa por la división que hemos realizado de la base de datos. Las figuras 33-40 y las Tablas 4.a y 4.b aportan el resultado de nuestro estudio.

Sin embargo, antes de analizar estos resultados hay que señalar ciertas características del calibrado del modelo llevado a cabo por sus autores. Se emplearon 10.988 datos puntuales de radiancia del cielo obtenidos durante la primavera de 1979 en Toronto (Canadá). Estos datos puntuales corresponden a 654 barridos a lo largo del plano solar y 32 en el perpendicular, constando cada barrido de medidas en 19 puntos del cielo. Además, el instrumento empleado (Radiómetro Kipp-Zonen) tenía un ángulo de visión bastante elevado (0.316 sr). Por último, el valor de  $D_h$  (Irradiancia Difusa Horizontal) empleado para la normalización de la base de datos, fue la obtenida mediante el empleo de un piranómetro con banda de sombra, y no el resultado de la integración de los datos del barrido (Hooper et al., 1987).

Estas circunstancias hacen que nuestra base de datos supere en todos los aspectos a los datos empleados en el calibrado, unido al hecho de que los autores finalmente emplearon barridos promedio dentro de cada categoría (por ángulo cenital solar), mientras que en nuestro caso se han empleado los datos originales que, como ya se ha explicado, corresponden a barridos de todo el cielo. Teniendo esto en cuenta, podemos analizar los resultados de las Tablas 4.a y 4.b.

TCCD - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.430	-5.1	72.2	0.4729	0.2162	0.8384
20 - 30	0.464	6.2	60	0.5268	0.2338	0.8869
30 - 40	0.447	17.3	48.4	0.6217	0.2100	0.8774
40 - 50	0.396	21.5	43.4	0.6452	0.1858	0.8571
50 - 60	0.358	26	38.6	0.6972	0.1595	0.8539
60 - 70	0.333	22.4	43.5	0.4437	0.2125	0.7378
70 - 80	0.319	15.2	52.3	0.2665	0.2455	0.7088
TCCD - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.411	22.7	46.2	0.5754	0.2182	0.8842
20 - 40	0.305	27	63.2	0.5671	0.1694	0.8582
40 - 90	0.288	-4.3	60.4	0.3896	0.1704	0.7928
TCCD - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	0.586	-39	52.4	0.3850	0.2155	0.7755
20 - 70	0.409	18.2	38.8	0.6581	0.1815	0.9125
70 - 120	0.306	37.8	49.3	1.1069	0.0603	0.7547
120 ->	0.398	39.7	45.8	0.6375	0.2161	0.5709

**Tabla 4.a:** Comportamiento del modelo de TCCD para SABINAL.

De entrada se observa un comportamiento bastante parecido, considerando el RMSE en todas las categorías, tanto en Sabinal como en Veleta. La tendencia generalizada a la sobreestimación en Sabinal contrasta con la tendencia a la subestimación en Veleta. No obstante, en términos absolutos, el MBE es menor en Veleta que en Sabinal.

En el análisis estadístico que realizan Hooper y Brunger, dado que agrupan sus datos en función del ángulo cenital solar, podemos comparar directamente con nuestra división por altura solar.

TCCD - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.501	-18.1	51.2	0.5679	0.1530	0.8470
20 - 30	0.488	-18.3	46.5	0.5547	0.1567	0.8485
30 - 40	0.461	-2.3	42.4	0.5654	0.1943	0.8244
40 - 50	0.403	-8	43.9	0.4679	0.1977	0.7674
50 - 60	0.364	-14.6	48.1	0.3247	0.2257	0.6450
60 - 70	0.335	-13.7	48.2	0.2143	0.2517	0.5143
70 - 80	0.320	-6.4	48.1	0.1279	0.2765	0.3386
TCCD - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.448	-17.3	45.9	0.4583	0.1994	0.7537
20 - 40	0.318	22.8	45.7	0.8792	0.0905	0.8602
40 - 90	0.271	12.9	43.7	0.6416	0.1166	0.8051
TCCD - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	0.760	-12.4	37.7	0.5779	0.2580	0.8832
20 - 70	0.444	0.2	45.7	0.5243	0.2110	0.8482
70 - 120	0.316	-16.2	47.5	0.3262	0.1929	0.6003
120 ->	0.398	-37.7	53.3	0.1896	0.2772	0.6787

Tabla 4.b: Comportamiento del modelo de TCCD para VELETA.

Encuentran que el RMSE disminuye en torno a un ángulo cenital solar de 35°, para luego aumentar hasta cerca del 40% en torno a los 85° (sol cerca del horizonte). Este es un resultado semejante al que obtenemos nosotros. En Sabinal el valor mínimo se da en torno a los 55° y en Veleta en torno a los 40° de elevación solar. La gran diferencia con nuestros resultados es que nunca obtenemos un RMSE menor que el 40%, mientras que sus resultados apuntan a un RMSE medio del 25%. La explicación de esa disminución la encontramos en que en esa categoría los autores tienen mayor número de distribuciones, por lo que el ajuste se ha realizado con más datos y es más representativo. Sin embargo,

nuestros elevados valores de RMSE así como del MBE confirman lo que sus autores ya apuntaban, y es la particularidad del ajuste realizado a las condiciones de Toronto y que puede presentar un mejor comportamiento en el plano solar. Esta circunstancia se verificará en un trabajo futuro. Además no debemos perder de vista que la validación del modelo realizada por sus autores fue llevada a cabo empleando los mismos datos que para el calibrado. Estos datos, al ser *dependientes* y sólo del plano solar, se complementaron con 32 barridos *independientes* tomados en el plano perpendicular al del sol. Nosotros, sin embargo, tenemos datos para toda la cúpula del cielo.

Ya que el MBE ofrece una variación aleatoria en el estudio por alturas solares, podemos pensar que no hay una dependencia clara de este parámetro con el ángulo cenital solar. Sin embargo, si observamos conjuntamente estos resultados con los del análisis por cinturones del cielo, la bondad del ajuste lineal tanto en Sabinal como en Veleta, con coeficientes de correlación en torno a 0.8 en la mayoría de los casos, nos hacen pensar que el término de *contribución isótropa* y *contribución del horizonte* no corresponde con la situación de nuestra zona de medida. Recordemos el patrón de medida tan exhaustivo que se lleva a cabo en nuestros barridos experimentales y la calidad y cantidad de los datos en esta zona del cielo. Tanto en Sabinal como en Veleta se obtienen desviaciones más altas que en la zona por encima de los 40° de elevación.

Otro tanto ocurre con la contribución circunsolar, con una clara subestimación en Sabinal y Veleta, pero más acusada en Sabinal. Teniendo en cuenta el menor número de datos en esta zona, puede ser la causante de que en términos generales el modelo sobreestime los valores bajos de radiancia y subestime los más altos, ofreciendo en la representación gráfica una curvatura inicial y una pendiente en torno a 0.6.

### 5.2.5) Modelo de Harrison y Coombes

Como ya se ha comentado, este modelo se obtuvo modelizando una base de datos parecida a la nuestra por cuanto las distribuciones de radiancia obtenidas son de todo el cielo y obtenidas con un instrumento de ángulo de visión semejante al nuestro. Estos hechos van a verse reflejados en la bondad del modelo como vamos a ver. Recordamos que el modelo de Harrison & Coombes viene dado por la ecuación:

$$\frac{\pi L}{D_h} = (A + B e^{-m\Psi} + C \cos^2 \Psi \cos \theta_0) (1 - e^{-\rho \sec \theta}) (1 - e^{-\delta \sec \theta_0})$$

en donde, como hasta ahora, se ha evaluado el cociente  $L/D_h$ . Las figuras 41-48 y las Tablas 5.a y 5.b ofrecen los resultados estadísticos más importantes de nuestro análisis y su representación gráfica.

Harrison y Coombes son dos autores que gustan emplear la representación logarítmica para observar la distribución de sus datos en torno a los valores estimados por el modelo. No obstante, a la hora de calcular los parámetros estadísticos representativos del comportamiento del modelo, lo hacen sobre la base de la radiancia normalizada. Por ello, nosotros hacemos igual en las Tablas 5.a y 5.b. En realidad la representación logarítmica distribuye mejor los puntos del diagrama en torno a la recta 1-1, dado el carácter *lognormal* de esta distribución como ya se ha comprobado.

En nuestro análisis de este modelo observamos, en líneas generales, un mejor comportamiento que el de los modelos hasta ahora comentados. El coeficiente de correlación lineal se acerca en la mayoría de los casos bastante al 0.92 obtenido por los autores en su comprobación (Harrison et al., 1988a), aunque encontramos diferencias.

En concreto, en el análisis por alturas solares el modelo se desvía bastante hacia la subestimación conforme aumenta la altura solar (disminuye el ángulo cenital solar,  $\theta_0$ ). Esto ocurre de forma más acusada en Veleta, lo que parece evidenciar la necesidad de un valor más alto del coeficiente  $\delta$  del modelo. El cinturón más bajo del cielo, aunque con una fuerte tendencia a la subestimación, parece estar bien representado en Sabinal como lo indica un  $r=0.92$  y el menor MBE del grupo.

Harrison & Coombes - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.387	-14.6	62.4	0.8239	0.0135	0.8619
20 - 30	0.368	-15.8	40.3	0.8066	0.0160	0.9454
30 - 40	0.289	-24.2	43.9	0.6764	0.0313	0.9303
40 - 50	0.233	-28.5	46.5	0.5673	0.0477	0.8980
50 - 60	0.197	-30.6	41.7	0.5536	0.0401	0.8801
60 - 70	0.181	-33.5	46.5	0.4546	0.0577	0.8590
70 - 80	0.177	-36.1	55.9	0.3809	0.0710	0.8737
Harrison & Coombes - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.259	-22.7	37.8	0.7566	0.0052	0.9204
20 - 40	0.152	-36.7	60.4	0.5952	0.0091	0.9473
40 - 90	0.164	-45.7	70.2	0.4204	0.0373	0.9394
Harrison & Coombes - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	0.584	-39.3	49.6	0.7467	-0.1338	0.8064
20 - 70	0.226	-34.7	43.8	0.7333	-0.0272	0.9493
70 - 120	0.175	-21.2	28.5	0.7613	0.0061	0.7867
120 ->	0.312	9.5	27.2	0.8393	0.0732	0.6353

Tabla 5.a: Modelo de Harrison-Coombes para SABINAL.

Sin embargo Veleta y, en particular su horizonte más limpio y despejado, contrasta claramente con las condiciones rurales del emplazamiento en las afueras de Calgary (Canadá) donde se realizaron las medidas. El término exponencial del modelo que da cuenta de la región circunsolar, da lugar a una gran dispersión de datos a partir de 70° de ángulo de scattering, aunque en Sabinal globalmente el RMSE está en 37% frente al 62% de Veleta. Es destacable que mientras en Sabinal se reproduce mejor el horizonte, es en Veleta donde se reproduce mejor la zona circunsolar.

<b>Harrison &amp; Coombes - División por Altura Solar (°)</b>						
<b>VELETA</b>	<b>AVE (sr<sup>-1</sup>)</b>	<b>MBE (%)</b>	<b>RMSE (%)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
0 - 20	0.534	-12.8	70.1	1.2869	-0.2537	0.8636
20 - 30	0.412	-31	55.8	0.8631	-0.1034	0.8228
30 - 40	0.300	-36.4	54.8	0.5930	0.0201	0.8331
40 - 50	0.238	-45.7	62.1	0.4260	0.0518	0.8110
50 - 60	0.204	-52.1	56.5	0.3055	0.0743	0.7382
60 - 70	0.184	-52.6	67.7	0.2550	0.0854	0.6657
70 - 80	0.182	-46.8	63.4	0.2443	0.0982	0.5453
<b>Harrison &amp; Coombes - División por Cinturón del Cielo (°)</b>						
0 - 20	0.320	-41	62.3	0.8286	-0.1288	0.7515
20 - 40	0.172	-33.6	44	0.9436	-0.0722	0.9251
40 - 90	0.157	-34.6	47.5	0.6738	-0.005	0.9087
<b>Harrison &amp; Coombes - División por Ángulo de Scattering (°)</b>						
0 - 20	1.010	16.4	63.7	1.5842	-0.3652	0.9168
20 - 70	0.268	-39.5	58.4	0.6384	-0.0148	0.8475
70 - 120	0.185	-50.9	67.1	0.2611	0.0865	0.6925
120 ->	0.331	-48.2	59.2	0.2723	0.1565	0.7691

**Tabla 5.b: Modelo de Harrison-Coombes para VELETA.**

La forma de este modelo permite recalibrarlo fácilmente para otras condiciones ya que, de forma general, la clara tendencia a la subestimación y las pendientes muy pequeñas en algunas regiones, con coeficientes de correlación en torno a 0.9, parecen indicar la conveniencia de unos coeficientes dependientes con la altura solar y las condiciones atmosféricas de turbiedad.

### 5.2.6) Modelo de Brunger y Hooper

Tal y como se expuso anteriormente, el modelo de Brunger y Hooper o *modelo Kt-K*, viene dado por:

$$L(\theta, \phi) = D_h \left[ \frac{a_0 + a_1 \cos \theta + a_2 e^{-a_3 \Psi}}{\pi (a_0 + 2a_1/3) + 2a_2 I(\theta_0, a_3)} \right]$$

en donde  $\Psi$  es el ángulo de scattering en radianes,  $D_h$  es la irradiancia difusa sobre superficie horizontal,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son funciones de  $K$  y  $Kt$  e  $I(\theta_0, a_3)$  es una función específica de  $a_3$  y el ángulo cenital solar.

La comprobación de este modelo con nuestros datos experimentales suscitaba una gran expectación, por ser el modelo de radiancia más reciente en la literatura, bien fundamentado teórica y experimentalmente en su formulación, y no ser ésta última demasiado compleja de aplicar. Por otro lado, hemos de recordar que los datos experimentales empleados para su calibrado (SKYSCAN'83), son parecidos en sus características a los nuestros.

De nuevo en esta ocasión nos encontramos con que de los 2/3 de nuestra Base de Datos, tenemos que excluir algunos datos en la comprobación. Corresponden a aquellos casos de combinaciones  $Kt-K$  no contemplados por sus autores (por no existir datos de esas categorías), que sí se manifiestan en nuestras campañas. Tales casos pueden ser empleados más adelante para calcular dichos coeficientes, aun indeterminados, y son más abundantes en Veleta que en Sabinal.

Concretamente estos casos son 28 barridos en Sabinal y 227 barridos en Veleta, que corresponden en su mayoría a combinaciones excluidas por ser  $K$  inferior a 0.1, categoría límite inferior del calibrado del modelo desarrollado por sus autores (intervalo  $0.2 \geq K \geq 0.1$ , que se le asigna  $K=0.15$ ). Sólo en Veleta

se dan 5 barridos en los que, además,  $K_t$  es superior a 0.9, categoría límite superior para este índice (intervalo  $0.9 \geq K_t \geq 0.8$ , que se le asigna  $K_t=0.85$ ), (Brunger et al., 1993). Por ello, el Valor Medio Experimental (AVE Experimental) en cada categoría considerada es el siguiente para esta validación:

(L/Dh)	AVE Experimental ( $\text{sr}^{-1}$ ) (Brunger & Hooper)	
GRUPO DE DATOS	SABINAL	VELETA
0 - 20	0.453	0.632
20 - 30	0.437	0.658
30 - 40	0.381	0.448
40 - 50	0.325	0.375
50 - 60	0.284	0.314
60 - 70	0.271	0.312
70 - 80	0.276	0.304
0 - 20	0.340	0.519
20 - 40	0.244	0.266
40 - 90	0.292	0.243
0 - 20	0.969	1.193
20 - 70	0.352	0.467
70 - 120	0.220	0.299
120 - >	0.292	0.575

Las figuras 49-56 muestran el comportamiento de este modelo para Sabinal y Veleta. En estos gráficos se ha representado, como hasta ahora, la radiancia normalizada generada por el modelo frente a la experimental, empleando escala decimal. Tenemos que recordar que los autores del modelo realizan el calibrado del mismo, sobre la base del ajuste del logaritmo de las medidas normalizadas de radiancia. El argumento para esta decisión es que el empleo de un procedimiento no-lineal de ajuste, requiere que los datos empleados presenten una *distribución normal*, como el logaritmo de la radiancia (Brunger et al., 1993). También por esta razón, ellos emplean representaciones modelo-experimental con escala

logarítmica. Todas estas circunstancias nos han animado a realizar, sólo en este caso, dos tipos de análisis estadístico: L/IHDI y Ln(L/IHDI). En el primer caso, el resultado de nuestra evaluación viene dado en las Tablas siguientes:

<b>Brunger &amp; Hooper - División por Altura Solar (°)</b>						
<b>SABINAL</b>	<b>AVE (sr<sup>-1</sup>)</b>	<b>MBE (%)</b>	<b>RMSE (%)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
<b>0 - 20</b>	0.368	-18.8	76.2	0.4785	0.1509	0.8109
<b>20 - 30</b>	0.361	-17.4	55.6	0.5862	0.1048	0.9217
<b>30 - 40</b>	0.343	-9.97	46.2	0.5720	0.1247	0.9035
<b>40 - 50</b>	0.317	-2.46	36.4	0.5949	0.1237	0.8890
<b>50 - 60</b>	0.295	3.87	27.3	0.6604	0.1071	0.8850
<b>60 - 70</b>	0.292	7.38	26.1	0.7183	0.0968	0.9021
<b>70 - 80</b>	0.296	7.25	28.1	0.7206	0.0969	0.9198
<b>Brunger &amp; Hooper - División por Cinturón del Cielo (°)</b>						
<b>0 - 20</b>	0.320	-6.47	41.6	0.5085	0.1451	0.9205
<b>20 - 40</b>	0.283	16.0	41.0	0.8130	0.0848	0.9397
<b>40 - 90</b>	0.311	6.51	35.9	0.7749	0.0850	0.9217
<b>Brunger &amp; Hooper - División por Ángulo de Scattering (°)</b>						
<b>0 - 20</b>	0.845	-12.8	33.3	0.4849	0.3751	0.8432
<b>20 - 70</b>	0.324	-7.95	44.0	0.5123	0.1435	0.8662
<b>70 - 120</b>	0.249	13.2	24.9	0.6096	0.1153	0.8093
<b>120 -&gt;</b>	0.299	2.4	18.8	0.2780	0.2132	0.5930

**Tabla 6.a: Modelo de Brunger y Hooper para SABINAL.**

Brunger y Hooper encontraban un MBE de -11.4%, y achacaban esta subestimación al hecho de haber ajustado el logaritmo del modelo al logaritmo de las medidas, en vez de los valores directamente. En nuestro caso encontramos una tendencia a la subestimación para alturas solares hasta 50° tanto en Sabinal como

en Veleta, que evoluciona hacia la sobreestimación a partir de ese límite. En Veleta estas desviaciones son menos acusadas que en Sabinal.

Brunger & Hooper - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.525	-16.9	53.0	0.6498	0.1146	0.8121
20 - 30	0.582	-11.6	46.1	0.7320	0.1000	0.7905
30 - 40	0.382	-14.7	48.4	0.6004	0.1131	0.8055
40 - 50	0.334	-10.9	41.3	0.5621	0.1236	0.8242
50 - 60	0.318	1.27	30.2	0.6316	0.1194	0.8420
60 - 70	0.315	0.96	28.7	0.6384	0.1160	0.8153
70 - 80	0.314	3.29	23.3	0.7716	0.0796	0.8807
Brunger & Hooper - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.440	-15.2	46.0	0.6288	0.1135	0.8215
20 - 40	0.328	23.3	63.0	1.0711	0.0431	0.8490
40 - 90	0.268	10.3	41.2	0.9167	0.0448	0.8966
Brunger & Hooper - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	1.202	0.75	36.3	0.6241	0.4570	0.7762
20 - 70	0.439	-6.0	48.4	0.5897	0.1635	0.8143
70 - 120	0.281	-6.02	33.5	0.5452	0.1179	0.7879
120 ->	0.354	-38.4	55.0	0.2339	0.2193	0.7988

Tabla 6.b: Modelo de Brunger y Hooper para VELETA.

En el análisis por cinturones observamos que la subestimación está reservada a la primera franja, tanto en Sabinal como en Veleta. Finalmente, en el análisis por ángulo de scattering observamos que en Sabinal el modelo subestima hasta  $\Psi=70^\circ$ , mientras que en Veleta es a partir de  $\Psi=20^\circ$ , presentando un buen comportamiento en la zona circunsolar (MBE=0.75%).

En líneas generales, y según puede observarse en las figuras 49-56, el modelo subestima con mayor intensidad para valores elevados de la radiancia normalizada y se comporta mejor en Sabinal que en Veleta (parámetros del ajuste lineal), aunque recordemos que el número de barridos es mucho mayor en Sabinal que en Veleta, por las exclusiones comentadas.

Como se ha comentado, hemos realizado este mismo análisis para el logaritmo de la radiancia normalizada experimental y teórica. En este caso el Valor Medio Experimental (AVE Experimental) en cada categoría es el siguiente:

(L/Dh)	AVE Experimental	LOG
<b>GRUPO DE DATOS</b>	<b>SABINAL</b>	<b>VELETA</b>
0 - 20	-1.165	-0.769
20 - 30	-1.201	-0.660
30 - 40	-1.247	-1.068
40 - 50	-1.318	-1.184
50 - 60	-1.378	-1.292
60 - 70	-1.399	-1.260
70 - 80	-1.405	-1.285
0 - 20	-1.228	-0.853
20 - 40	-1.647	-1.530
40 - 90	-1.492	-1.629
0 - 20	-0.138	0.032
20 - 70	-1.245	-1.025
70 - 120	-1.568	-1.331
120 ->	-1.283	-0.676

Por otro lado, el análisis estadístico ofrece el resultado que presentamos en las Tablas 6.c y 6.d.

<b>Brunger &amp; Hooper - División por Altura Solar (°) - LOG</b>						
<b>SABINAL</b>	<b>AVE (sr<sup>-1</sup>)</b>	<b>MBE (%)</b>	<b>RMSE (%)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
0 - 20	-1.234	-5.9	28.0	0.7457	-0.3654	0.9208
20 - 30	-1.245	-3.7	23.8	0.7479	-0.3465	0.9483
30 - 40	-1.234	1.04	22.0	0.7449	-0.3054	0.9332
40 - 50	-1.251	5.0	19.8	0.6946	-0.3360	0.9228
50 - 60	-1.286	6.7	17.0	0.6728	-0.3592	0.9071
60 - 70	-1.291	7.8	15.3	0.7127	-0.2933	0.9013
70 - 80	-1.294	7.9	13.3	0.7768	-0.2022	0.9455
<b>Brunger &amp; Hooper - División por Cinturón del Cielo (°) - LOG</b>						
0 - 20	-1.201	2.2	20.0	0.5555	-0.5184	0.9155
20 - 40	-1.427	13.4	15.8	0.8445	-0.0365	0.9773
40 - 90	-1.390	6.8	13.4	0.9501	0.0274	0.9663
<b>Brunger &amp; Hooper - División por Ángulo de Scattering (°) - LOG</b>						
0 - 20	-0.214	-55.1	194	0.5413	-0.1393	0.8372
20 - 70	-1.237	0.6	19.8	0.7210	-0.3397	0.9224
70 - 120	-1.417	9.6	14.7	0.6472	-0.4021	0.8635
120 ->	-1.236	3.7	15.0	0.2901	-0.8635	0.6148

Tabla 6.c: Idem Tabla 6.a, para el LOGARITMO DE (L/IHDI)

Como puede apreciarse, la tendencia del modelo en cuanto a la subestimación o sobreestimación sigue siendo la misma de antes, aunque en valor absoluto ha disminuido en Sabinal. Sin embargo, el resultado del ajuste lineal mejora notablemente en Sabinal, superando un coeficiente de correlación de 0.9 en todas las agrupaciones de alturas solares. Bajo esta nueva perspectiva, en la división por cinturones del cielo observamos un mejor comportamiento para todas las categorías consideradas, con un MBE que solo se acerca al 14% en el caso del cinturón medio y una RMSE que no llega al 20% en ningún caso, frente a un

40% del análisis anterior. También vemos que la pendiente se acerca más al valor ideal (1). Esta misma situación se da en Veleta.

<b>Brunger &amp; Hooper - División por Altura Solar (°) - LOG</b>						
<b>VELETA</b>	<b>AVE (sr<sup>-1</sup>)</b>	<b>MBE (%)</b>	<b>RMSE (%)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
0 - 20	-0.931	-21.1	58.7	0.8444	-0.2818	0.8593
20 - 30	-0.821	-24.4	80.0	0.9301	-0.2070	0.7984
30 - 40	-1.188	-11.2	48.4	0.7970	-0.3371	0.7701
40 - 50	-1.231	-4.0	35.0	0.7053	-0.3955	0.7740
50 - 60	-1.235	4.4	21.8	0.7356	-0.2852	0.8455
60 - 70	-1.224	2.9	18.1	0.7634	-0.2625	0.8532
70 - 80	-1.226	4.6	15.8	0.7572	-0.2533	0.8900
<b>Brunger &amp; Hooper - División por Cinturón del Cielo (°) - LOG</b>						
0 - 20	-0.951	-11.5	41.3	0.6255	-0.4177	0.8255
20 - 40	-1.390	9.2	23.7	1.0676	0.2431	0.8799
40 - 90	-1.657	-1.7	36.1	1.2025	0.3018	0.7763
<b>Brunger &amp; Hooper - División por Ángulo de Scattering (°) - LOG</b>						
0 - 20	0.078	144	895	0.7395	0.0541	0.8480
20 - 70	-1.022	0.3	41.3	0.7899	-0.2124	0.8197
70 - 120	-1.369	-2.9	27.1	0.7720	-0.3411	0.7496
120 ->	-1.070	-58.3	74.7	0.4291	-0.7799	0.8308

**Tabla 6.d:** Idem Tabla 6.b para el LOGARITMO de (L/IHDI)

Es evidente, tanto en Sabinal como en Veleta, que en la división por ángulo de scattering, el modelo empeora en la zona circunsolar y mejora, aunque no de forma muy significativa, en el resto de los casos. Si recordamos el estudio presentado en esta memoria sobre la radiancia en la región circunsolar, vimos que al normalizar con respecto a la irradiancia difusa horizontal, aumentaba

considerablemente la asimetría (SKEW y CURT) de la distribución con respecto a la magnitud absoluta. También vimos que el tomar logaritmo no representaba una mejora tan acusada en cuanto a la *normalización* de la distribución así obtenida. La Desviación Estándar (SDEV) tanto en Sabinal como en Veleta se hacía incomparable frente a la media (del 500 al 2000%). Es decir, la distribución de datos de radiancia circumsolar al tomar logaritmo no se acerca a una distribución normal con la misma intensidad, si se trata de la magnitud absoluta que si se trata de la magnitud dividida por IHDI.

Con respecto al resto de los casos y categorías en Veleta, podemos hacer el mismo comentario que en Sabinal. En líneas generales y en valor absoluto, disminuye MBE y el RMSE y también mejoran de forma muy considerable los coeficientes del ajuste lineal. De todas formas esta mejora hay que entenderla en el contexto de las características de la distribución de radiancia del cielo y no supone claras diferencias con respecto al análisis anterior. Lo único que podemos decir es que la impresión visual de la representación Modelo-Experimental es mucho mejor.

Entendemos que Brunger y Hooper emplean una representación logarítmica por el carácter *lognormal* de la distribución y por el tipo de ajuste no lineal desarrollado para el cálculo de sus coeficientes. Sin embargo, a la hora de emplear el modelo, lógicamente, se realizará sobre la base de la formulación original y el RMSE y MBE a tener en cuenta deberán ser los de las Tablas 6.a y 6.b. Esta situación vuelve a darse en el caso del modelo de Siala. Este autor ha trabajado con Brunger y gusta de ofrecer representaciones también en escala logarítmica. De cara a la intercomparación de modelos y a la valoración real con vista a su uso, nosotros ofreceremos el MBE y RMSE del modelo tal cual se formula, aunque por el tipo de procedimiento estadístico seguido los autores gusten de la representación logarítmica teórico-experimental.

Por lo demás, el análisis estadístico que subyace bajo tales representaciones indica, ya sea logarítmico o lineal, que el modelo tiende a la subestimación en una medida semejante a la que indican sus autores en Sabinal, y algo peor en Veleta donde el RMSE supera el 50% en pocas ocasiones.

Podríamos concluir que el modelo presenta una respuesta óptima para alturas solares a partir de  $50^\circ$ , en la zona superior de la cúpula celeste, a partir de  $40^\circ$ , y para ángulos de scattering de  $20^\circ$  a  $120^\circ$ , lo que equivale a decir que no representa demasiado bien la radiancia en el horizonte ni la zona circunsolar, pero sí la contribución que otros autores denominan *radiancia de fondo*.

### 5.3) Modelos que normalizan con respecto a $L_z$

Para los tres modelos que vamos a analizar a continuación, y al igual que se hizo antes, ofrecemos el Valor Medio experimental (AVE Experimental) de los datos incluidos en cada una de las categorías consideradas:

(L/L <sub>z</sub> )	AVE Experimental	
GRUPO DE DATOS	SABINAL	VELETA
0 - 20	3.774	4.921
20 - 30	3.805	4.303
30 - 40	2.915	3.495
40 - 50	2.061	2.632
50 - 60	1.324	1.971
60 - 70	0.780	1.269
70 - 80	0.397	0.871
0 - 20	1.772	3.102
20 - 40	1.220	1.429
40 - 90	1.058	1.095
0 - 20	4.076	5.132
20 - 70	1.841	2.532
70 - 120	0.910	1.827
120 - >	2.168	4.600

#### 5.3.1) Modelo de Kittler

El modelo de Kittler venía dado, según hemos visto, por la expresión:

$$\frac{L(\Psi)}{L_z} = \frac{(0.91 + 10e^{-3\Psi} + 0.45\cos^2\Psi)(1 - e^{-0.32\sec\theta})}{0.27385 [0.91 + 10e^{-3\theta_0} + 0.45\cos^2\theta_0]}$$

Ya que está formulado para coeficientes de turbiedad inferiores a  $TL=5$ , podemos esperar, a priori, que su comportamiento sea mejor en Veleta que en Sabinal. Incluso el valor estándar de aplicación,  $TL=2.45$ , se asemeja más a la Moda en Veleta,  $TL=2.54$ , que la Moda en Sabinal,  $TL=3.66$ . Sin embargo, analizando el resultado del análisis estadístico en las Tablas 7.a y 7.b vemos como en Veleta

existe una subestimación generalizada en todos los casos, llegando incluso a un MBE de -46% para el grupo de  $\Psi > 120^\circ$ . Sin embargo, en Sabinal esta subestimación, menos significativa que en Veleta, llega a ser hasta un -7% en la división por cinturones, pasando a ser una sobreestimación para alturas solares mayores de  $60^\circ$  y  $\Psi > 70^\circ$ .

<b>KITTLER - División por Altura Solar (<math>^\circ</math>)</b>						
<b>SABINAL</b>	<b>AVE (<math>\text{sr}^{-1}</math>)</b>	<b>MBE (%)</b>	<b>RMSE (%)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
0 - 20	3.296	-12.7	60.9	0.6183	0.9625	0.8828
20 - 30	3.172	-16.6	51	0.6107	0.8486	0.9497
30 - 40	2.509	-13.9	40.5	0.6420	0.6377	0.9485
40 - 50	1.832	-11.1	36.8	0.6088	0.5775	0.9135
50 - 60	1.297	-2	25.4	0.6638	0.4184	0.9157
60 - 70	0.887	13.7	37.2	0.5257	0.4771	0.8447
70 - 80	0.636	60.2	69	0.6250	0.3874	0.8580
<b>KITTLER - División por Cinturón del Cielo (<math>^\circ</math>)</b>						
0 - 20	1.696	-4.3	50.4	0.6761	0.4980	0.9656
20 - 40	1.138	-6.7	86	0.5155	0.5088	0.9209
40 - 90	1.016	-4	50.8	0.4743	0.5136	0.8929
<b>KITTLER - División por Ángulo de Scattering (<math>^\circ</math>)</b>						
0 - 20	2.841	-30.3	70	0.5713	0.5124	0.9307
20 - 70	1.705	-7.4	46	0.6915	0.4323	0.9683
70 - 120	1.013	11.3	28.2	0.7531	0.3274	0.9538
120 ->	2.211	2	16.2	0.7429	0.6014	0.8456

**Tabla 7.a:** Comportamiento del modelo de **KITTLER** para **SABINAL**.

Una impresión visual del comportamiento del modelo la tenemos en las figuras 57-64. En Sabinal, si bien tenemos un coeficiente de correlación lineal en torno a 0.95, esta subestimación se materializa en pendientes alrededor de 0.6 y un RMSE que llega hasta el 86% en el segundo cinturón de la cúpula celeste. Las

constantes que intervienen en este modelo son fundamentales a la hora de valorar una contribución más que otra. Por los resultados de la comparación Sabinal-Veleta, podemos razonar que la zona circunsolar está bien modelizada en Veleta, y el resto en Sabinal.

<b>KITTLER - División por Altura Solar (°)</b>						
<b>VELETA</b>	<b>AVE (sr<sup>-1</sup>)</b>	<b>MBE (%)</b>	<b>RMSE (%)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
0 - 20	4.100	-16.7	44.4	0.8206	0.0618	0.8758
20 - 30	3.425	-20.4	46.4	0.7513	0.1926	0.8427
30 - 40	2.567	-26.6	50.4	0.5720	0.5679	0.8134
40 - 50	1.847	-29.8	51.7	0.4584	0.6412	0.7880
50 - 60	1.329	-32.6	55.4	0.3246	0.6894	0.6833
60 - 70	0.892	-29.7	55	0.2420	0.5849	0.5970
70 - 80	0.644	-26.1	57.4	0.1425	0.5191	0.3892
<b>KITTLER - División por Cinturón del Cielo (°)</b>						
0 - 20	2.214	-28.6	53.2	0.7421	-0.0881	0.8680
20 - 40	1.371	-4.1	40.6	0.8638	0.1364	0.9138
40 - 90	1.059	-3.3	34.2	0.6120	0.3894	0.8625
<b>KITTLER - División por Ángulo de Scattering (°)</b>						
0 - 20	5.274	2.8	34.1	0.9918	0.1840	0.9497
20 - 70	2.150	-15.1	51.3	0.7052	0.3642	0.8972
70 - 120	1.173	-35.8	57.3	0.4378	0.3735	0.8386
120 ->	2.468	-46.4	57.5	0.2777	1.1907	0.7933

**Tabla 7.b:** Comportamiento del modelo de KITTLER para VELETA.

Según hemos visto, Kittler retomó el tema de las constantes en su modelo, ofreciendo una parametrización en función de TL. Al parecer, en virtud de los resultados obtenidos, los valores de **B** (=10) y de **C** (=0.45) condicionan el resultado final pero no de forma decisiva (Kittler, 1985). Los valores por defecto, se asemejan más a las condiciones de Veleta, sin embargo sólo se obtiene un buen

ajuste en el caso del grupo de datos para  $\Psi \leq 20^\circ$ . Dado que la ausencia de obstáculos singulares en el horizonte de Sabinal y Veleta no eran muy acusadas, su influencia puede estar bien representada por el término  $(1 - \exp(-0.32 \sec \theta))$  en ambos casos aunque en Veleta el ajuste no sea muy bueno. Recordemos la influencia tan acusada que puntualmente tiene el "pico" en esta zona, capítulo 4 de esta memoria, y que puede afectar al resultado estadístico final.

Sin embargo, podemos pensar que el valor de la constante  $A (=0.91)$ , es el causante de que el modelo funcione mejor para el rango de alturas solares de  $30^\circ$ - $60^\circ$ , que pueden ser el rango de elevaciones solares máximas que con mayor frecuencia se den en centro Europa y por ello las de la mayor parte de los datos empleados para su cálculo. Es probable que se obtuviesen mejores resultados si  $A$  se parametrizara también en función de  $TL$ , y de la altura solar. La comprobación de estas sugerencias, así como el comportamiento del modelo de Kittler bajo la nueva formulación de las constantes  $B$  y  $C$ , será objeto de un trabajo futuro.

### 5.3.2) Modelo de Gusev

Los comentarios que hemos realizado para el modelo de Kittler, acompañan perfectamente a los resultados que hemos obtenido para el modelo de Gusev. Si recordamos la forma de este modelo:

$$\frac{L(\Psi)}{L_z} = \frac{(0.856 + 16e^{-3\Psi} + 0.3 \cos^2\Psi) (1 - e^{-0.32 \sec\theta})}{0.27385 (0.856 + 16e^{-3\theta_0} + 0.3 \cos^2\theta_0)}$$

observamos que se trata de la misma expresión, con otros valores para las constantes que en él intervienen. Nuevamente, el resultado del análisis estadístico realizado puede observarse en las Tablas 8.a y 8.b.

GUSEV - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	3.620	-4.0	57.6	0.8376	0.4584	0.8774
20 - 30	3.402	-10.6	36.3	0.8147	0.3022	0.9543
30 - 40	2.544	-12.7	32.3	0.8051	0.1974	0.9511
40 - 50	1.726	-16.3	35	0.7092	0.2642	0.9199
50 - 60	1.141	-13.8	27.2	0.7202	0.1877	0.9217
60 - 70	0.737	-5.5	31.9	0.5835	0.2820	0.8717
70 - 80	0.511	28.7	40.6	0.7435	0.2160	0.8923
GUSEV - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	1.580	-10.8	39.2	0.8404	0.0904	0.9650
20 - 40	1.143	-6.3	69.4	0.6645	0.3323	0.9286
40 - 90	1.024	-3.2	44.6	0.5879	0.4020	0.8912
GUSEV - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	3.392	-16.8	53	0.7609	0.2904	0.9298
20 - 70	1.740	-5.5	36	0.8341	0.2046	0.9658
70 - 120	0.811	-10.9	29.9	0.7071	0.1674	0.9535
120 ->	1.749	-19.3	25.3	0.6388	0.3637	0.8480

Tabla 8.a: Comportamiento del modelo de GUSEV para SABINAL.

Está pensado para reproducir la distribución de radiancia en ambientes muy contaminados (TL alrededor de 8) y las condiciones estándar de aplicación de este modelo, según se vio, corresponden a TL=5.5. Por ello, los resultados en Sabinal y en Veleta no pueden ser más que *pobres*, ya que las condiciones en nuestras campañas no llegaron a ese extremo, salvo barridos concretos en Sabinal.

GUSEV - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	4.620	-6.1	61.2	1.1123	-0.8541	0.8428
20 - 30	3.718	-13.6	57.3	0.9599	-0.4125	0.7997
30 - 40	2.589	-25.9	54.2	0.6726	0.2381	0.7632
40 - 50	1.731	-34.2	56.5	0.4889	0.4445	0.7255
50 - 60	1.166	-40.8	63.4	0.2976	0.5794	0.5756
60 - 70	0.738	-41.8	65.2	0.1979	0.4869	0.4517
70 - 80	0.511	-41.3	68.5	0.1056	0.4190	0.2497
GUSEV - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	2.195	-29.2	64	0.9360	-0.7083	0.8304
20 - 40	1.431	0.14	53.8	1.1223	-0.1723	0.9047
40 - 90	1.074	-1.92	3.32	0.7591	0.2430	0.8585
GUSEV - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	6.755	31.6	68.5	1.3674	0.2621	0.9487
20 - 70	2.282	-9.9	53.8	0.8609	0.1020	0.8773
70 - 120	0.974	-46.7	66.2	0.4110	0.2233	0.8083
120 ->	1.993	-56.7	67	0.2330	0.9218	0.7609

**Tabla 8.b:** Comportamiento del modelo de GUSEV para VELETA.

En las figuras 65-72 tenemos las diferentes representaciones gráficas en este caso. Mientras en Veleta el comportamiento del modelo es peor que el de Kittler (en su formulación original) en todos los casos, con porcentajes de subestimación y RMSE muy elevados, observamos que los nuevos valores de las

constantes mejoran los resultados del análisis estadístico en algunos casos en Sabinal. Tal es la situación para un ángulo de scattering  $\Psi \leq 70^\circ$  (los dos primeros grupos de esta clasificación) y también, aunque menor, para alturas solares  $\gamma_0 \leq 40^\circ$  (los tres primeros grupos de esta clasificación). Es decir, efectivamente la zona circunsolar queda mejor representada por un valor superior para **B**, mientras que el resto parece tener una influencia menor.

### 5.3.3) Modelo de la CEE

#### 5.3.3.a) Formulación original

El problema de las constantes del modelo de Kittler aparece de nuevo en este modelo. Si recordamos la formulación original:

$$\frac{L}{L_z} = \frac{(a_1 + a_2 e^{-3\Psi} + a_3 \cos^2\Psi) (1 - e^{-0.088 TL(\gamma_\rho) \sec\theta})}{(a_1 + a_2 e^{-3\theta_\rho} + a_3 \cos^2\theta_\rho) (1 - e^{-0.088 TL(\gamma_\rho)})}$$

en donde las constantes vienen dadas por:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.8995 - 0.0053\gamma_\rho \\ a_2 &= 0.6155 + 1.9687TL \\ a_3 &= 0.409 - 0.0096\gamma_\rho \end{aligned}$$

estamos ante un caso semejante a los dos anteriores, con una parametrización diferente para las constantes A, B y C (en este caso designadas  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ ). También el coeficiente  $\rho$  ( $=0.32$ ) ahora se ha sustituido por la función  $0.088TL$ . Es decir, básicamente se introducen las modificaciones que hemos venido observando necesarias en el estudio estadístico que estamos realizando. En las Tablas 9.a y 9.b ofrecemos el resultado de nuestro trabajo en esta ocasión.

Como se comentó anteriormente, empleando datos de Valko se reconsideró la formulación para las constantes  $a_i$ . Como los datos de Sabinal y de Veleta no se emplearon en esta *reformulación*, hemos considerado oportuno comprobar la bondad de la nueva propuesta frente a la original. Por ello los hemos distinguido designando *CEE Original* a la formulación original y *CEE Modificado* a la segunda propuesta, que es analizada a continuación.

En las figuras 73-80 tenemos la representación para cada grupo de datos. Si analizamos en primer lugar los resultados en Sabinal, observamos que para la división por alturas solares se conservan las tendencias detectadas con el modelo

de Kittler, es decir, subestimación hasta  $\gamma_0=60^\circ$  y sobreestimación para alturas solares mayores. También observamos unos resultados estadísticos mejorados con respecto a los de Kittler, pero muy semejantes. El orden de magnitud para MBE y RMSE es muy parecido. Incluso en la división por ángulo de scattering, en la primera categoría, el análisis ofrece prácticamente el mismo resultado que entonces.

CEE Original - División por Altura Solar ( $^\circ$ )						
SABINAL	AVE ( $\text{sr}^{-1}$ )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	3.342	-11.5	62.5	0.5815	1.1469	0.8843
20 - 30	3.216	-15.5	54	0.5784	1.0152	0.9412
30 - 40	2.605	-10.6	39.7	0.6411	0.7364	0.9465
40 - 50	1.925	-6.6	33.9	0.6374	0.6107	0.9222
50 - 60	1.312	-0.9	22.2	0.7113	0.3707	0.9391
60 - 70	0.840	7.7	31.4	0.5949	0.3756	0.8873
70 - 80	0.560	41	51	0.7034	0.2809	0.8809
CEE Original - División por Cinturón del Cielo ( $^\circ$ )						
0 - 20	1.705	-3.8	50.6	0.6820	0.4964	0.9612
20 - 40	1.123	-8	88.4	0.5024	0.5101	0.9149
40 - 90	1.012	-4.4	48.6	0.4959	0.4874	0.9078
CEE Original - División por Ángulo de Scattering ( $^\circ$ )						
0 - 20	2.801	-31.3	73	0.5387	0.6061	0.9322
20 - 70	1.684	-8.5	45.1	0.7033	0.3890	0.9685
70 - 120	1.042	14.5	23.6	0.9527	0.1755	0.9696
120 ->	2.237	3.2	11.7	0.9805	0.1117	0.9348

**Tabla 9.a:** Comportamiento del modelo de la CEE Original para SABINAL.

Por el contrario, en Veleta esta formulación mejora considerablemente los resultados del modelo de Kittler. Se produce en este caso una subestimación generalizada a todas las categorías y casos considerados, aunque en valor absoluto

el MBE y RMSE disminuye siempre. El ambiente menos contaminado de Veleta se ve ligeramente mejor representado por la formulación propuesta para los coeficientes  $a_i$ , aunque como puede verse en las figuras 77-80, existe una gran dispersión de datos.

CEE Original - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	4.748	-4	31.2	0.8504	0.5398	0.9303
20 - 30	3.962	-8	32.6	0.8171	0.4441	0.9126
30 - 40	2.958	-15.4	40	0.6748	0.5997	0.8650
40 - 50	2.132	-19.1	41.7	0.5902	0.5767	0.8319
50 - 60	1.616	-18.1	40.8	0.5236	0.5843	0.8034
60 - 70	1.016	-19.9	41.6	0.4715	0.4178	0.7790
70 - 80	0.680	-21.9	45.2	0.3916	0.3388	0.7303
CEE Original - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	2.643	-14.9	39.4	0.8295	0.0655	0.9157
20 - 40	1.347	-6.1	36.6	0.7427	0.2817	0.9468
40 - 90	1.057	-4.1	33.5	0.5872	0.4102	0.9045
CEE Original - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	4.862	-6.5	30.1	0.9049	0.1556	0.9595
20 - 70	2.327	-8.1	44.2	0.8151	0.2631	0.9153
70 - 120	1.541	-15.7	37	0.7874	0.1023	0.8818
120 ->	3.313	-28	36.2	0.6235	0.4446	0.8759

Tabla 9.b: Comportamiento del modelo de la CEE Original para VELETA.

### 5.3.3.b) Formulación Modificada para los datos de Valko

Tal y como se ha visto, la modificación con respecto a la formulación anterior consistía en emplear las siguientes relaciones para las constantes  $a_i$ :

$$a_1 = 1.0744 - 0.0744 TL \quad , \quad a_2 = 0.8309 + 2.658 TL$$

$$a_3 = 2.3843 - 1.7087TL + 0.54709TL^2 - 0.07481TL^3 + 0.003631TL^4$$

En las Tablas 9.c y 9.d tenemos el resultado del análisis y en las figuras 81-88 la representaciones gráficas siguiendo el mismo esquema que hasta ahora.

CEE Modificado - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	3.601	-4.6	56	0.6914	0.9923	0.8891
20 - 30	3.381	-11.1	46	0.6657	0.8476	0.9454
30 - 40	2.613	-10.4	36	0.6988	0.5759	0.9502
40 - 50	1.844	-10.6	34.2	0.6565	0.4903	0.9220
50 - 60	1.239	-6.4	23.4	0.7129	0.2949	0.9351
60 - 70	0.815	4.5	32.4	0.5778	0.3646	0.8652
70 - 80	0.576	45	55.8	0.6791	0.3063	0.8550
CEE Modificado - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	1.695	-4.4	43.8	0.7480	0.3692	0.9658
20 - 40	1.126	-7.7	83.9	0.5359	0.4722	0.9205
40 - 90	1.014	-4.2	49.4	0.4946	0.4911	0.8927
CEE Modificado - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	2.941	-27.8	66.4	0.6073	0.4666	0.9283
20 - 70	1.731	-6	39.4	0.7600	0.3314	0.9704
70 - 120	0.957	5.2	21.4	0.8634	0.1711	0.9644
120 ->	2.317	6.9	14.4	1.1090	-0.0875	0.9397

Tabla 9.c: Comportamiento del modelo CEE Modificado para SABINAL.

CEE Modificado - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	5.246	6	33.8	1.0068	0.2643	0.9329
20 - 30	4.184	-2.8	32.1	0.9190	0.2282	0.9147
30 - 40	2.964	-15.3	38.9	0.7272	0.4200	0.8704
40 - 50	2.031	-22.9	43.2	0.6016	0.4461	0.8347
50 - 60	1.519	-23.1	43.7	0.5098	0.5119	0.7984
60 - 70	0.984	-22.5	43.7	0.4486	0.4150	0.7644
70 - 80	0.699	-19.8	44.8	0.3867	0.3626	0.7116
CEE Modificado - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	2.704	-13	40.1	0.9341	-0.1980	0.9145
20 - 40	1.361	-5.1	34.8	0.7931	0.2235	0.9451
40 - 90	1.057	-4.1	34.9	0.5750	0.4238	0.8872
CEE Modificado - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	5.301	1.9	33.6	1.0498	-0.1599	0.9569
20 - 70	2.425	-4.2	45.7	0.8919	0.1667	0.9091
70 - 120	1.435	-21.5	40.7	0.7474	0.0696	0.8741
120 - >	3.639	-20.9	30.4	0.7541	0.1697	0.8717

Tabla 9.d: Comportamiento del modelo CEE Modificado para VELETA.

Esta modificación produce ligeras mejoras con respecto a la anterior en Sabinal y en Veleta, manteniendo semejantes ordenes de magnitud en los parámetros estadísticos que hemos encontrado. Debemos tener en cuenta que los datos de Valko empleados para esta *reformulación* corresponden a campañas semejantes a la nuestra pero desarrolladas en centro europa. El empleo de una ecuación cuadrática en TL para  $a_3$  y el cambio de dependencia de  $\gamma_0$  a TL para  $a_1$  (lo que a la vista de los valores extremos de cada parámetro apenas la modifica), no mejora sustancialmente los resultados anteriores. Por otro lado, el

aumento global de la constante  $a_2$  (aureola solar) tampoco se manifiesta en una mejora significativa en el caso de Sabinal.

Es decir, sobre la base del modelo de Kittler hemos probado diferentes formulaciones de las constantes que en él aparecen, obteniendo ligeras mejoras en el comportamiento de los modelos, pero en ningún caso significativas como para representar adecuadamente la distribución angular de la radiancia del cielo. La tendencia a la subestimación es generalizada y tan solo se observan buenos ajustes para grupos de datos concretos. Una cosa parece estar clara, y es el hecho de que la *filosofía* de la formulación es correcta y puede dar buenos resultados si se parametrizan correctamente las constantes  $a_i$ .

El comportamiento del modelo de la CEE (y el anterior de Kittler) era diferente en Sabinal y Veleta. Sin embargo las variaciones introducidas en el modelo de la CEE Modificado (hacer que las constantes  $a_i$  sólo dependan de TL), ocasionan cambios semejantes en su comportamiento en Sabinal y en Veleta. En virtud de estos resultados concluimos que la correcta formulación de  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  quizás debería plantearse por un camino alternativo que contemplase las dos dependencias tratadas, es decir la altura solar,  $\gamma_o$ , y el coeficiente de turbiedad de Linke, TL, aunque éste último incluya una dependencia con  $\gamma_o$ . Es probable que incluso una parametrización del coeficiente  $\rho$  de Kittler ( $=0.032$ ), que en este caso se le asigna el valor  $0.088TL$ , diera un mejor resultado del modelo también con una mayor dependencia de  $\gamma_o$ .

**5.4) Otras Formulaciones**

No hemos querido terminar esta evaluación de modelos sin estudiar el modelo semiempírico de Siala, diferente y novedoso con respecto a los otros por su desarrollo y definición. La forma del modelo implica que ofrezcamos de nuevo el Valor Medio Experimental en cada categoría (**AVE Experimental**), al formularse en términos de *radiancia normalizada por la constante solar*:

(L/Isc)	AVE Experimental (sr <sup>-1</sup> )	
GRUPO DE DATOS	SABINAL	VELETA
0 - 20	0.031	0.021
20 - 30	0.040	0.023
30 - 40	0.039	0.028
40 - 50	0.038	0.029
50 - 60	0.037	0.026
60 - 70	0.037	0.027
70 - 80	0.041	0.027
0 - 20	0.040	0.031
20 - 40	0.029	0.016
40 - 90	0.040	0.016
0 - 20	0.120	0.049
20 - 70	0.042	0.027
70 - 120	0.028	0.023
120 - >	0.029	0.029

**5.4.1) Modelo de Siala**

Como ya se ha descrito, distinguiendo los casos de ángulo cenital solar,  $\theta_0$ , distinto o igual al ángulo cenital del punto del cielo considerado, el modelo de Siala viene dado por las expresiones:

$$\frac{L}{I_{sc}} = \frac{h_1 \cos \theta_0}{4\pi(\cos \theta - \cos \theta_0)} \frac{1 - h_2^2}{(1 + h_2^2 - 2h_2 \cos \Psi)^{3/2}} (e^{-h_3 \sec \theta} - e^{-h_3 \sec \theta_0})$$

si  $\theta \neq \theta_0$ , o bien la siguiente expresión si  $\theta = \theta_0$ :

$$\frac{L}{I_{sc}} = \frac{h_1 h_3}{4\pi \cos\theta_0} \frac{1-h_2^2}{(1+h_2^2-2h_2\cos\Psi)^{3/2}} e^{-h_3 \sec\theta_0}$$

En este modelo aparecen tres parámetros,  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$ , que Siala calcula empleando la base SKYSCAN ya comentada. Para ello calcula barridos medios de radiancia en función del tiempo para cada día (Siala et al., 1990). Esta forma de trabajar es totalmente diferente a la nuestra, ya que nosotros no hemos realizado ningún tipo de promedio con nuestros barridos. Dentro del grupo de Brunger y Hooper, Siala emplea, como ellos, un ajuste no lineal del logaritmo de la radiancia normalizada experimental y teórica para calibrar el modelo. En esta ocasión hemos decidido realizar nuestra comprobación empleando también el logaritmo de las medidas normalizadas experimentales y las teóricas. Igualmente, a la hora de ilustrar gráficamente el resultado del modelo en las diferentes categorías, hemos empleado una representación logarítmica.

Finalmente, al programar este modelo adoptamos para  $I_{sc}$  el valor 1000 W/m<sup>2</sup>, resultado del cálculo de la constante solar para el rango espectral de los sensores empleados en nuestras medidas experimentales (capítulo 3 de esta memoria). Por otro lado, siguiendo las conclusiones de Siala (Siala et al, 1990), empleamos el modelo con la forma que adopta cuando se incluye sólo el primer orden de scattering, y los valores de las constantes dadas por su autor, ya que no existen otros calibrados o comprobaciones posteriores de este modelo. Recordemos el hecho de que  $h_1$  está relacionado con el *albedo de scattering simple*, el cual teóricamente no debe superar el valor 1. Sin embargo, el hecho de emplear una aproximación de scattering simple en la modelización de la radiancia (debida al scattering múltiple), ocasiona este coeficiente el cual

disminuye y se acerca a 1 al emplear sucesivos ordenes de scattering, y debería mejor llamarse *factor de albedo* (Siala et al., 1990). Las Tablas 10.a y 10.b presentan el resultado del análisis estadístico en donde, por las razones comentadas al tratar el modelo Kt-K (modelo de Brunger y Hooper), los coeficientes de regresión lineal (a, b y r) son los correspondientes a la representación logarítmica y los datos de MBE y RMSE son porcentajes empleando el modelo tal cual se formula. Las figuras 89-96 muestran la representación gráfica en escala logarítmica para Sabinal y Veleta.

SIALA - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.035	12.3	77.0	0.6902	-1.0503	0.6942
20 - 30	0.047	17.8	54.2	0.7802	-0.6014	0.7888
30 - 40	0.055	40.0	70.7	0.7895	-0.4073	0.7781
40 - 50	0.059	55.3	83.6	0.7743	-0.3519	0.7407
50 - 60	0.061	65.1	88.0	0.7614	-0.3285	0.7031
60 - 70	0.062	67.0	86.3	0.6723	-0.5949	0.6555
70 - 80	0.063	55.6	74.1	0.5320	-1.0410	0.6410
SIALA - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.056	39.7	65.7	1.0230	0.3526	0.7490
20 - 40	0.060	105.2	129.0	0.9607	0.5979	0.8904
40 - 90	0.068	70.5	89.8	0.6565	-0.4904	0.9102
SIALA - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	0.129	7.5	34.0	0.2102	-1.6053	0.4711
20 - 70	0.078	86.6	95.5	0.6245	-0.5392	0.8874
70 - 120	0.037	31.7	49.8	0.5970	-1.1766	0.6708
120 ->	0.018	-37.2	42.2	0.3080	-2.9385	0.2805

Tabla 10.a: Comportamiento del modelo de SIALA para SABINAL.

Teniendo en cuenta los primeros resultados de Siala (RMSE de 45.2% y MBE de -5.6%), observamos una significativa mala estimación en Sabinal, en virtud de los márgenes de RMSE y MBE que obtenemos. Evidentemente los parámetros del ajuste lineal no son los deseables en ningún caso. Si observamos las gráficas de las figuras 89-92 podemos ver que estamos ante un modelo que genera una distribución muy dispersa y que tiende a dar el mismo resultado a partir de unos determinados valores experimentales, especialmente en la zona circunsolar del cielo. De forma global se aprecia también un comportamiento muy semejante del modelo, independientemente que se trate de la división por alturas solares, cinturón del cielo o ángulo de scattering.

SIALA - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.031	51.4	137.2	0.4429	-2.0217	0.4139
20 - 30	0.049	111.3	200.7	0.4957	-1.3788	0.4714
30 - 40	0.056	99.3	169.4	0.4434	-1.4597	0.4587
40 - 50	0.059	103.8	158.8	0.3581	-1.6792	0.3925
50 - 60	0.061	131.2	179.2	0.2425	-2.0224	0.2689
60 - 70	0.062	131.1	168.9	0.1245	-2.4044	0.1517
70 - 80	0.062	129.6	164.4	0.0556	-2.6394	0.0762
SIALA - División por Cinturón del Cielo (°)						
0 - 20	0.055	77.3	133.4	0.5165	-1.2613	0.3708
20 - 40	0.057	255.6	319.3	0.9571	1.0696	0.7536
40 - 90	0.061	276.9	326.0	0.7566	0.3601	0.8248
SIALA - División por Ángulo de Scattering (°)						
0 - 20	0.132	169.6	188.3	0.0888	-1.7594	0.2625
20 - 70	0.078	190.6	215.2	0.4480	-0.9102	0.7117
70 - 120	0.035	51.5	75.0	0.3972	-1.8697	0.5767
120 ->	0.016	-44.8	59.7	0.2447	-3.3258	0.2849

Tabla 10.b: Comportamiento del modelo de SIALA para VELETA.

En Veleta observamos prácticamente la misma situación que en Sabinal. La única salvedad es que tanto el RMSE y MBE superan en la mayoría de los casos el 100%, muy por encima de los de Sabinal, y el modelo también tiende a sobreestimar y comportarse de la misma forma en todas las divisiones. En los gráficos 93-96 pueden observarse medidas problemáticas, que a lo largo de esta memoria hemos identificado como ocasionadas por el *pico del Veleta*. Estas medidas son fácilmente apreciables en la representación del cinturón más bajo, figura 95. Sin embargo, lo más destacable es que a pesar de emplear medidas instantáneas y no promediadas, el modelo se comporta de forma muy semejante en todas las categorías y no destaca especialmente en ninguna.

## **6. RESUMEN DE RESULTADOS. COMPARACION**

Con el objetivo de tener una impresión global del comportamiento de los modelos analizados, hemos representado gráficamente el error de desviación media (MBE) y el error cuadrático medio (RMSE), ambos en porcentaje con respecto al valor medio experimental. Al igual que en el análisis individual, hemos considerado los modelos que normalizan con respecto a la irradiancia difusa ( $D_h$ ) y los que normalizan con respecto a la radiancia en el cenit ( $L_z$ ).

El modelo de Siala y el modelo de Valko se han representado aparte. En el primer caso por ser una formulación diferente al resto, al normalizar con respecto a la constante solar. El segundo por presentar unos valores muy descompensados con respecto al resto de los modelos de su grupo. En el análisis del modelo de Valko ya comentábamos a qué era debido este comportamiento.

Para no repetir datos en exceso y conseguir una impresión rápida y cómoda del comportamiento de los modelos, se han elegido para su representación tres categorías de entre todas las consideradas. Por un lado el grupo de datos correspondientes a una altura solar entre 40 y 50 grados. Según se ha visto, no es el conjunto para el que disponemos de más datos, tanto en Sabinal como en Veleta, pero consideramos que puede ser representativo de las alturas solares máximas más comunes en Europa. También se ha considerado el primer cinturón del cielo, caracterizado por elevaciones de 0 a 20 grados. En este caso, dada la abundancia de datos en nuestra base, nos permite observar la bondad de la parametrización en esta zona de la cúpula celeste. Finalmente, hemos considerado la zona circunsolar, es decir, el primer conjunto de datos de esta subdivisión, caracterizado por ángulos de scattering de 0 a 20 grados.

En las siguientes figuras (figuras 97-102) se han representado seis columnas para cada modelo, asignándose de dos en dos (MBE y RMSE) a cada categoría comentada en el párrafo anterior. Mediante una inspección de estos gráficos, junto con todo lo que se ha comentado en este capítulo, podríamos resumir concluyendo que los modelos que mejor representan la distribución angular de la radiancia del cielo en Sabinal y Veleta, bajo condiciones de cubierta nubosa cero, serían:

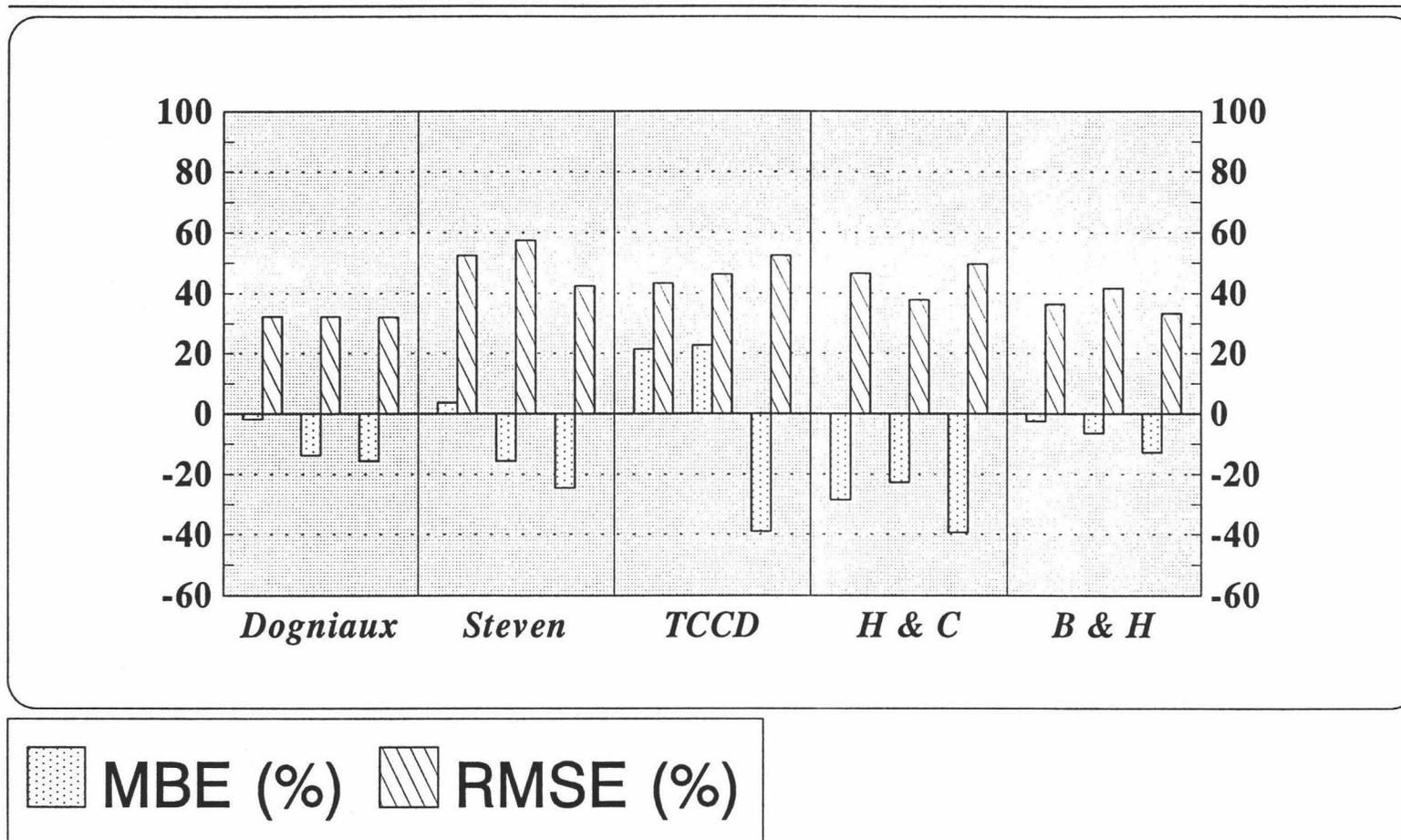
- Tipo (L/Dh):       **Modelo de Brunger y Hooper (modelo Kt-K)**
- Tipo (L/Lz):       **Modelo de la CEE Modificado**

Finalmente, nos inclinamos por el **Modelo de Siala** como la formulación más prometedora, pues aunque no es el que mejor reproduce el campo de radiancia, sí es el que lo hace de forma semejante en todas las categorías que hemos considerado. Quizás este hecho pone de manifiesto que, a pesar de los resultados tan aparentemente adversos, estamos ante la mejor de las formulaciones por ser la más representativa de todas las zonas y estar pendiente únicamente de un "mejor" calibrado de sus constantes. La combinación de razonamiento empírico teniendo en cuenta el fundamento físico resulta, a pesar de su mayor complejidad, la mejor forma de representar la radiancia del cielo. Al menos la que admite mejoras que previsiblemente afecten globalmente a todas las contribuciones y por lo tanto menos específicas del lugar de medida.

# Modelos que Normalizan con respecto a Dh

## SABINAL

252

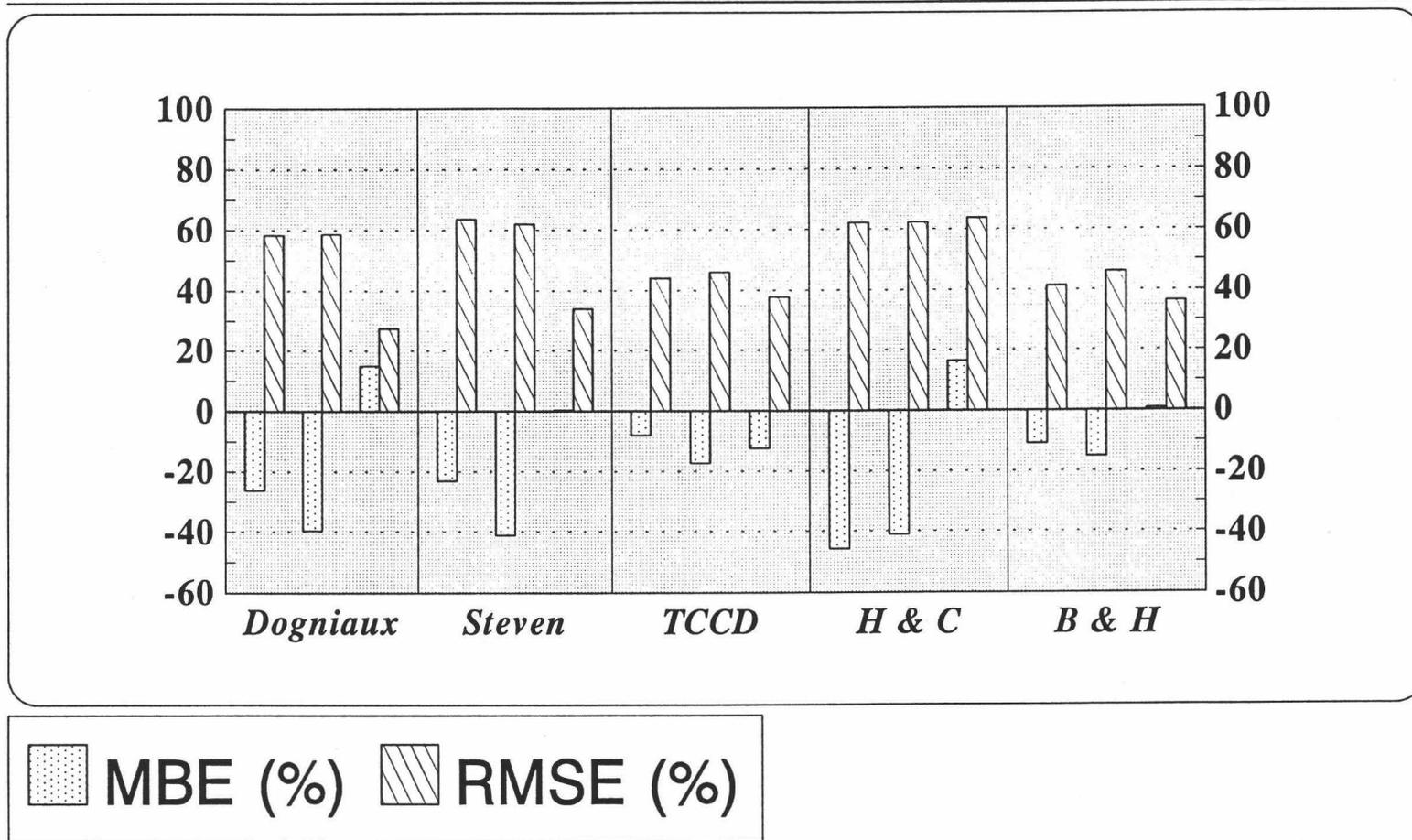


**Figura 97:** Comparación para Sabinal de los modelos tipo (L/Dh) que se indican, mediante la representación del MBE y RMSE, de tres de las categorías consideradas. De izquierda a derecha y de dos en dos columnas para cada modelo: Categoría de  $\gamma_0$  entre 40° y 50°, categoría de  $\gamma$  entre 0° y 20° y categoría de  $\Psi$  entre 0° y 20°. (Cap.6)

# Modelos que Normalizan con respecto a Dh

## VELETA

253

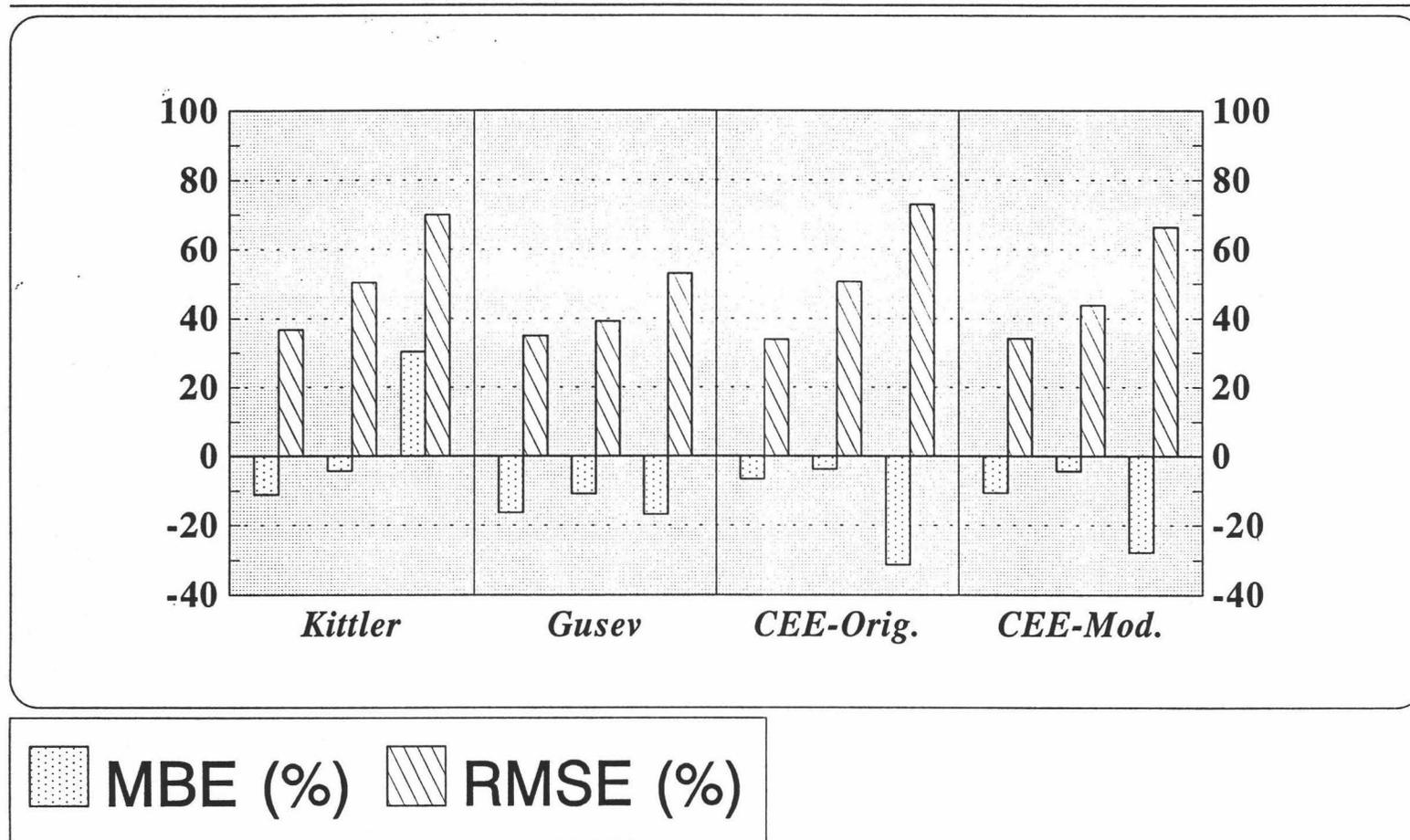


**Figura 98:** Comparación para Veleta de los modelos tipo (L/Dh) que se indican, mediante la representación del MBE y RMSE, de tres de las categorías consideradas. De izquierda a derecha y de dos en dos columnas para cada modelo: Categoría de  $\gamma_0$  entre  $40^\circ$  y  $50^\circ$ , categoría de  $\gamma$  entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$  y categoría de  $\Psi$  entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$ . (Cap.6)

# Modelos que Normalizan con respecto a Lz

## SABINAL

254

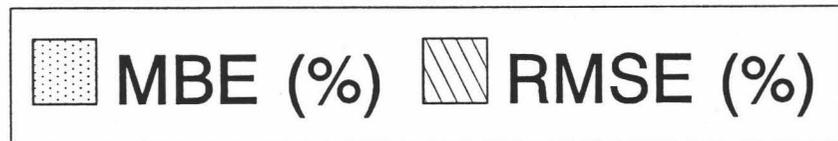
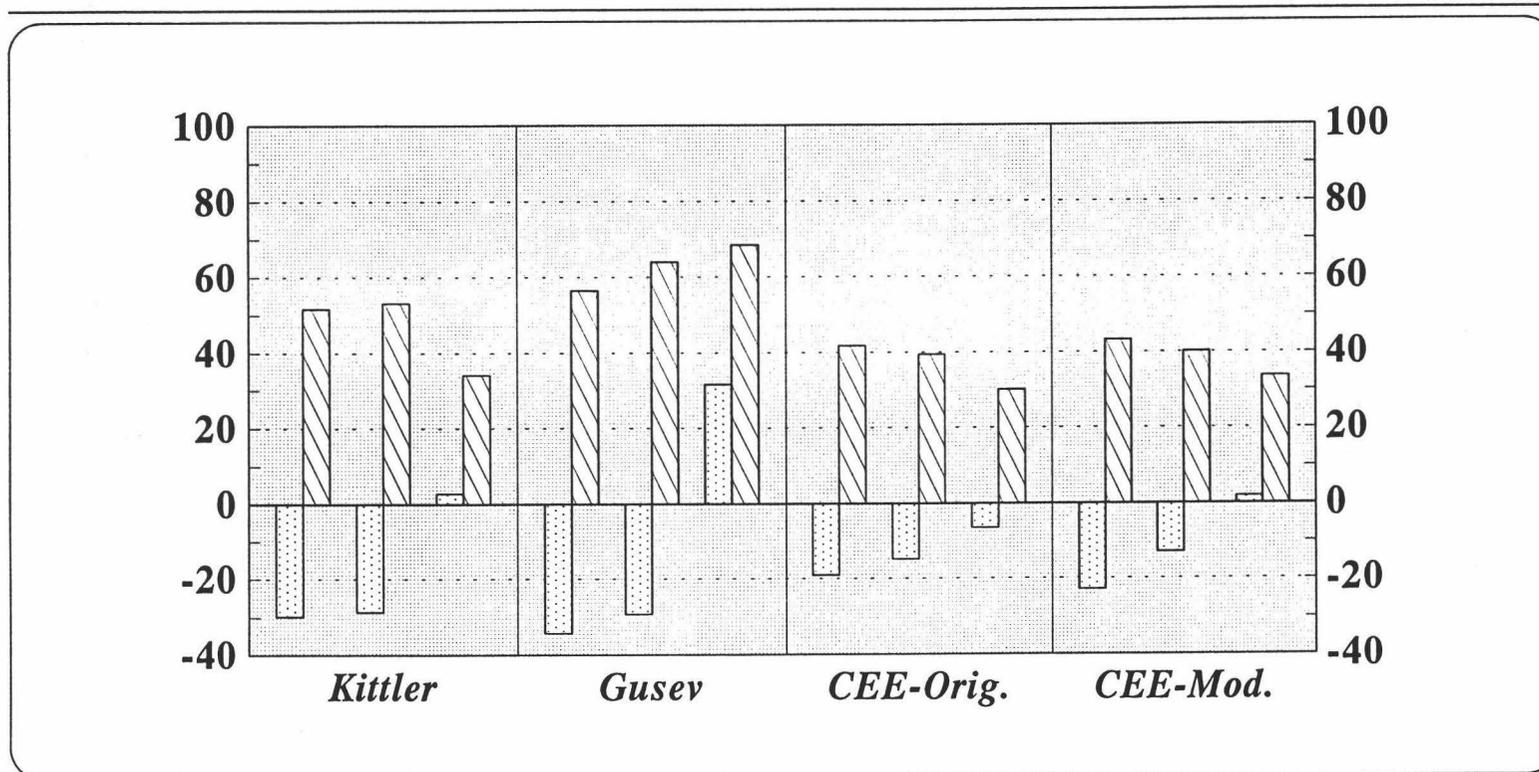


**Figura 99:** Comparación para Sabinal de los modelos tipo (L/Lz) que se indican, mediante la representación del MBE y RMSE, de tres de las categorías consideradas. De izquierda a derecha y de dos en dos columnas para cada modelo: Categoría de  $\gamma_0$  entre  $40^\circ$  y  $50^\circ$ , categoría de  $\gamma$  entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$  y categoría de  $\Psi$  entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$ . (Cap.6)

# Modelos que Normalizan con respecto a Lz

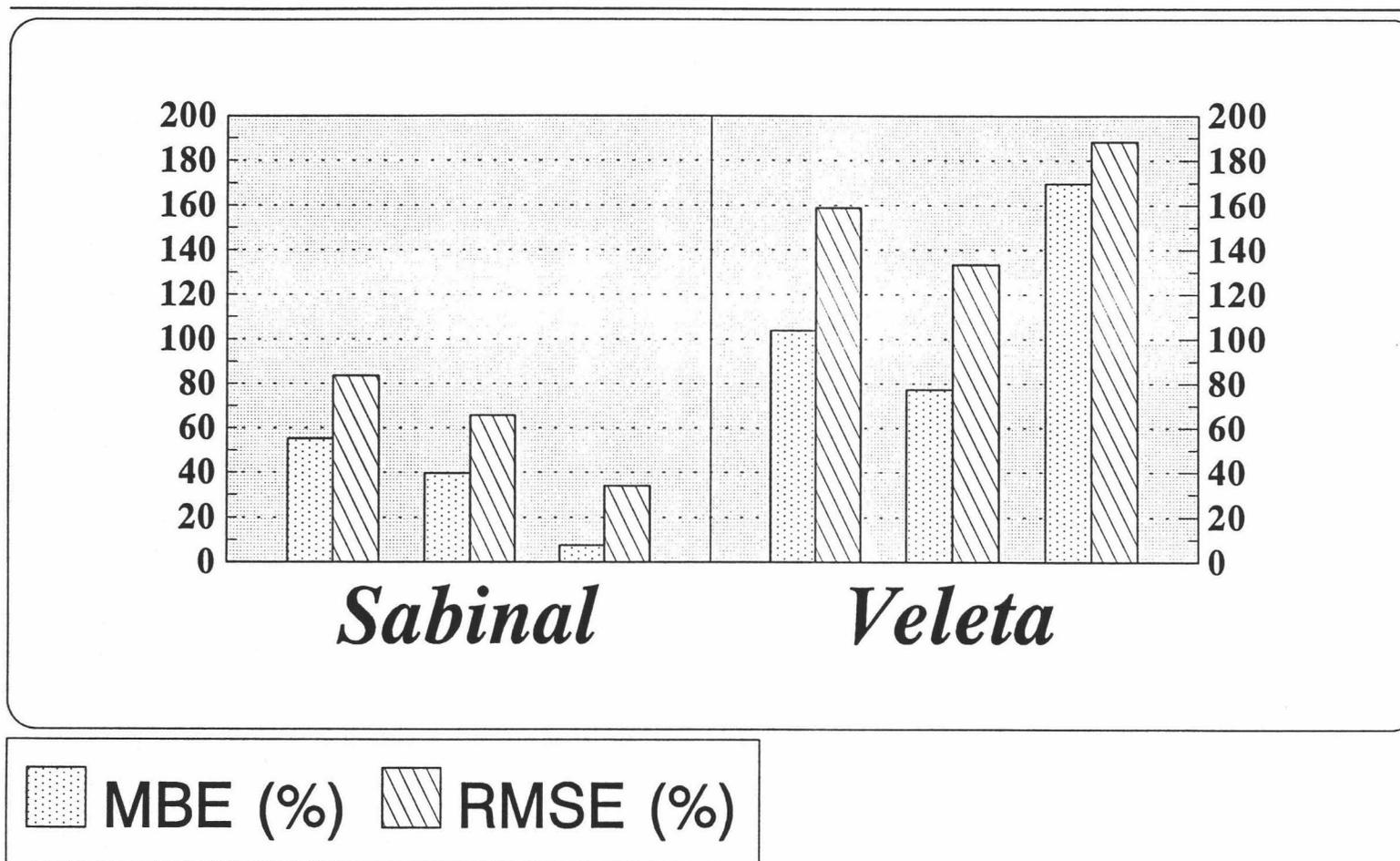
## VELETA

255



**Figura 100:** Comparación para Veleta de los modelos tipo (L/Lz) que se indican, mediante la representación del MBE y RMSE, de tres de las categorías consideradas. De izquierda a derecha y de dos en dos columnas para cada modelo: Categoría de  $\gamma_0$  entre  $40^\circ$  y  $50^\circ$ , categoría de  $\gamma$  entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$  y categoría de  $\Psi$  entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$ . (Cap.6)

# Modelo de SIALA

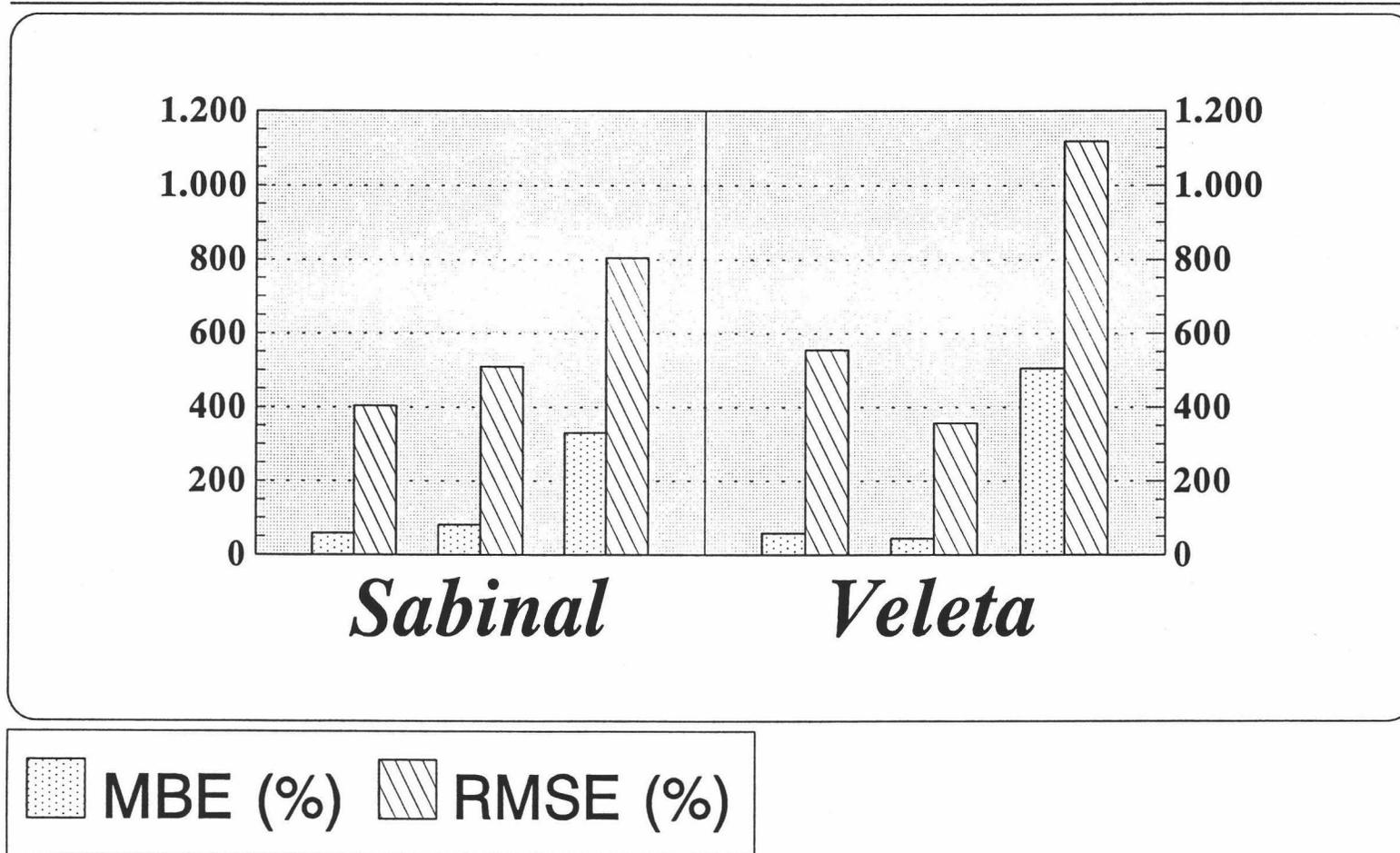


256

**Figura 101:** Comparación para Sabinal y Veleta del modelo de Siala, mediante la representación del MBE y RMSE, de tres de las categorías consideradas. De izquierda a derecha y de dos en dos columnas para cada modelo: Categoría de  $\gamma_0$  entre 40° y 50°, categoría de  $\gamma$  entre 0° y 20° y categoría de  $\Psi$  entre 0° y 20°. (Cap.6)

# Modelo de VALKO

257



**Figura 102:** Comparación para Sabinal y Veleta del modelo de Valko, mediante la representación del MBE y RMSE, de tres de las categorías consideradas. De izquierda a derecha y de dos en dos columnas para cada modelo: Categoría de  $\gamma_0$  entre 40° y 50°, categoría de  $\gamma$  entre 0° y 20° y categoría de  $\Psi$  entre 0° y 20°. (Cap.6)

**7. PROPUESTA DE UN MODELO UNIVERSAL  
DE RADIANCIA DEL CIELO**

1. INTRODUCCION
2. CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO DE SIALA
3. RECALIBRADO DEL MODELO DE SIALA
4. MODIFICACIONES PROPUESTAS AL MODELO DE SIALA
5. PRUEBA DEL MODELO DE SIALA MODIFICADO
6. PROPUESTA DE UN MODELO UNIVERSAL - MURAC

## 1. INTRODUCCION

En el capítulo 6 de esta memoria hemos desarrollado una exhaustiva descripción de modelos de radiancia del cielo y una comparación de los resultados obtenidos al validarlos con nuestra base de datos. Según hemos podido comprobar en el análisis anterior, la normalización con respecto a la radiancia en el cenit,  $L_z$ , o con respecto a la Irradiancia Difusa Horizontal,  $D_h$ , da lugar a modelos que se comportan unos mejor que otros, pero siempre por zonas. Es decir, salvando diferencias dentro de cada grupo ( $L_z$  o  $D_h$ ) y para las diferentes categorías consideradas (las tres subdivisiones de la base de datos), hemos obtenido que algunos modelos reproducen mejor la distribución angular de la radiancia del cielo en unas zonas de la cúpula celeste y otros en otras.

Podríamos destacar el modelo de Brunger y Hooper y el modelo de la CEE-Modificado como los más destacados, en líneas generales, en sus respectivos grupos. Sin embargo ninguno de los dos, o el resto de los modelos considerados,

presenta un comportamiento uniforme para todo el cielo. Como se da la circunstancia de que en ambos casos, y en el resto, la formulación de estos modelos implica algunas constantes empíricas, podríamos pensar en un recalibrado empleando nuestra base de datos. Sin embargo el hecho de que el comportamiento no sea uniforme, es decir, el que los modelos se comporten bien o mal por zonas y categorías, hace que un posible recalibrado nos lleve sólo a una mejora parcial y por supuesto muy particular para Sabinal y/o para Veleta.

Sin embargo hemos analizado un modelo que destaca de los demás en cuanto a su concepción y en cuanto a su comportamiento: **el modelo de Siala**. Tal y como se ha visto, no es precisamente el modelo que mejor resultados da en algunas zonas pero, según lo entendemos, **presenta tres ventajas evidentes** sobre el resto de las formulaciones:

- a) El comportamiento del modelo es semejante, bueno o malo, para todas las regiones del cielo consideradas y todas las subdivisiones de la base de datos.
- b) En su formulación original observamos un comportamiento muy parecido tanto para Sabinal como para Veleta .
- c) Frente al resto de propuestas exclusivamente empíricas, este modelo se basa en una mezcla de razonamiento físico y consideraciones de tipo empírico.

Por todo lo anterior, y con la experiencia adquirida del estudio y análisis del resto de los modelos, hemos considerado que el modelo de Siala es la mejor formulación de cara a la propuesta de un *Modelo General de Radiancia del Cielo*. Cualquier modificación previsiblemente va a afectar de forma uniforme al

comportamiento del modelo en las zonas del cielo consideradas y, lo que puede ser mejor, en distintas localizaciones geográficas.

## 2. CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO DE SIALA

Nuevamente, recordamos aquí la forma del modelo de Siala:

$$\frac{L}{I_{sc}} = \frac{h_1 \cos \theta_0}{4\pi(\cos \theta - \cos \theta_0)} \frac{1 - h_2^2}{(1 + h_2^2 - 2h_2 \cos \Psi)^{3/2}} (e^{-h_3 \sec \theta} - e^{-h_3 \sec \theta_0}) \quad \theta \neq \theta_0$$

$$\frac{L}{I_{sc}} = \frac{h_1 h_3}{4\pi \cos \theta_0} \frac{1 - h_2^2}{(1 + h_2^2 - 2h_2 \cos \Psi)^{3/2}} e^{-h_3 \sec \theta_0} \quad \theta = \theta_0$$

y también el hecho de que es el resultado del empleo del *método de los sucesivos órdenes de scattering* propuesto por Liou (Liou, 1980) y el considerar la radiancia monocromática así obtenida como integrada.

### 2.1) La Función de Fase de Henyey-Greenstein

Centramos nuestra atención en la *función de fase de Henyey-Greenstein*. En el capítulo 2 de esta memoria establecimos la Ecuación General de Transporte Radiativo en un medio que difunde y absorbe radiación (ecuación 2.2.7). También se estableció la *Función Fuente* debida a los fenómenos de scattering y emisión (ecuaciones 2.3.3 y 2.3.4), aunque esta última se puede considerar prácticamente despreciable en el caso de transferencia de radiación solar en la atmósfera (Lenoble, 1993).

La resolución de la Ecuación de Transporte, junto con la función fuente y las condiciones de contorno, puede llevarse a cabo mediante el *Método Monte*

*Carlo* para casi cualquier tipo de geometría, aunque normalmente se recurra a simplificaciones como el de atmósfera plano-paralela, ya comentada. La función de fase,  $p(\psi)$ , incluida en la función fuente, tiene que representarse mediante una expresión matemática que sea, al mismo tiempo, lo más simple y realista que sea posible. El caso más simple, y el menos realista, es el considerar  $p(\psi)=1$ . En el capítulo 2 vimos algunas de las formulaciones dentro de la teoría de scattering de *Rayleigh* y de *Mie*.

También algunos de los modelos descritos en esta memoria incluyen como base de su formulación una *función de fase experimental*, en virtud de las observaciones y medidas realizadas (*Scattering Indicatrix*). De todas formas, desde un punto de vista matemático lo más normal es desarrollar la función de fase en series de Polinomios de Legendre, en donde de todos los coeficientes de la serie, el primero ( $\beta_1$ ) juega un papel especial en el reparto de la radiación difundida, incluso si no es el mayor de todos (Lenoble, 1993).

Según se pudo ver en el capítulo 2, las funciones de fase obtenidas a partir de la teoría de *Mie* pueden llegar a ser muy complejas, incluso cuando se tienen en cuenta algunas simplificaciones. Por ello, y más aún en problemas de scattering múltiple, se suele recurrir a funciones de fase que contemplen las amplias características de una función de fase real, pero que simplifiquen el problema del scattering múltiple y lo hagan manejable matemáticamente.

La *función de fase de Henyey-Greenstein*, incluida en el modelo de Siala, es una aproximación que contiene sólo un parámetro,  $h_2$ , como una característica de lo que podría considerarse una función de fase real. Este parámetro se conoce como *factor de asimetría* y resulta ser matemáticamente un *cos $\Psi$  promedio* ponderado por la función de fase e igual a un tercio del primer coeficiente antes referido ( $h_2=\beta_1/3$ ). Para el caso de scattering isotrópico,  $h_2=0$ . El *factor de*

*asimetría* aumenta conforme el *pico de difusión* de la función de fase se acentúa e incluso puede llegar a ser negativo si la función de fase se acentúa hacia atrás ( $\Psi = 90^\circ - 180^\circ$ ), (Liou, 1992).

Aunque la aproximación de Henyey-Greenstein pueda considerarse un tanto pobre, ha sido empleada satisfactoriamente por Van de Hulst en numerosos cálculos de scattering múltiple, (Hulst, 1980), según indica Siala (Siala et al., 1990). Por otro lado recientemente Liou destaca también la conveniencia de su uso en numerosas aplicaciones de transferencia radiativa en atmósferas planetarias, así como que resulta bastante adecuada en los casos de patrones de scattering no demasiado acentuados hacia adelante, esto es, más cercanos al scattering molecular de Rayleigh (Liou, 1992).

Por todo lo anterior, y aunque existen otras aproximaciones de la función de fase, hemos considerado conveniente aprovechar la forma simple de esta función y elegir el parámetro  $h_2$  en función de nuestros datos. En el análisis de los datos experimentales desarrollado en el capítulo 4 de esta memoria, vimos como la radiancia, normalizada o en valor absoluto, seguía un patrón clásico exponencial en función del ángulo de scattering ( $\Psi$ ). Si representamos la función de fase de H-G en función de  $\Psi$  observamos que reproduce bastante bien este comportamiento, si bien el valor de  $h_2$  es decisivo.

Siala propone originalmente el valor de 0.443 en el caso de aproximación de scattering simple y de 0.460 si se tiene en cuenta el segundo orden de scattering (Siala et al., 1990). Aunque Liou sugiere valores de 0.7, 0.8 y 0.85 en sus cálculos, el valor de  $h_2$  en nuestro caso vendrá condicionado por el análisis matemático que vamos a desarrollar, y que nos llevará como veremos a un valor inferior a los aquí señalados.

## 2.2) Aproximación de scattering simple en el Modelo de Siala

La forma del Modelo de Siala que hemos analizado en el capítulo anterior, es la correspondiente al empleo de la aproximación de scattering simple. Según Siala, la complejidad añadida al considerar sucesivos ordenes de scattering no aporta resultados sensiblemente mejores (Siala et al., 1990). Esta aproximación conduce a que el *albedo de scattering simple*,  $h_1$ , pierda estrictamente hablando su significado como tal. De hecho, el valor que resulta del ajuste realizado por Siala es de 1.287 y se reduce a 1.217 al considerar el segundo orden de scattering, esto es, al acercarnos más a la realidad. Según vimos en el capítulo 2, el *albedo de scattering simple* adopta valores comprendidos entre 0 y 1, correspondiendo este último valor al *caso conservativo* pues entonces no habría absorción.

En realidad, tal y como apunta Siala, estamos ante un parámetro que debería mejor denominarse *factor de albedo*, ya que representa un parámetro de regresión que ajusta su valor para adaptarse al hecho de modelar el campo de radiancia, fundamentalmente debida al scattering múltiple, mediante una aproximación de scattering simple. Tal y como expondremos a continuación, en nuestro análisis mantenemos la dependencia funcional de  $h_1$  dentro del modelo y el significado físico y matemático que le da el autor.

## 3. RECALIBRADO DEL MODELO DE SIALA

Antes de pensar en modificar el modelo de Siala hemos procedido a recalibrarlo, calculando las constantes que en él aparecen con nuestra base de datos. Como se ha indicado, Siala reconoce que los valores de  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$  no son generales y tienen que ser calculados para otros tipos de cielo y lugares. Para desarrollar este trabajo, hemos empleado el programa 3R del paquete estadístico

BMDP y las 2/3 partes de nuestra base de datos, a la que hemos suprimido en Veleta los datos correspondientes al Pico (elevación,  $\gamma$ , de  $0^\circ$  a  $9^\circ$  y acimut,  $\phi$ , de  $180^\circ$  a  $270^\circ$ ) y los datos de  $\gamma=0^\circ$  en Sabinal y Veleta. De esta forma garantizamos que no tenemos ninguna influencia de horizonte local en nuestros cálculos. Al igual que en la prueba de modelos, hemos suprimido los valores de radiancia superiores a  $250 \text{ W/m}^2\text{sr}$  y la zona de ángulo de scattering menor o igual a  $7.5^\circ$ . Por otro lado, al igual que el autor, hemos empleado un procedimiento de ajuste no lineal (3R) aplicado al logaritmo de la radiancia experimental normalizada a la constante solar y al logaritmo del modelo de Siala.

Posteriormente con los nuevos parámetros se ha procedido a comprobar el resultado obtenido, empleando el tercio de datos reservado para tal efecto. En este caso, los valores medios experimentales (**AVE Experimental**) de la radiancia normalizada por la constante solar, para las diferentes categorías de alturas solares son:

(L/Isc)	AVE Experimental ( $\text{sr}^{-1}$ ) - 1/3 Base de Datos	
GRUPO DE DATOS	SABINAL	VELETA
0 - 20	0.033	0.020
20 - 30	0.040	0.022
30 - 40	0.040	0.026
40 - 50	0.038	0.029
50 - 60	0.036	0.025
60 - 70	0.038	0.026
70 - 80	0.040	0.026

Para todo el conjunto de datos que constituye el tercio reservado de la base, obtenemos el siguiente resultado experimental:

**SABINAL:** Número de datos = 35.767 , AVE Experimental:  $0.038 \text{ (sr}^{-1}\text{)}$

**VELETA:** Número de datos = 23.816 , AVE Experimental:  $0.026 \text{ (sr}^{-1}\text{)}$

### 3.1) Recalibrado para Sabinal

Por problemas de cálculo debido al elevado número de datos puntuales de que disponemos, se aplicó el procedimiento antes descrito a la división por alturas solares de nuestra base de datos. De esta manera garantizamos la presencia de datos de horizonte así como de zona circunsolar en todos los ficheros, y podemos desarrollar el análisis de regresión no lineal que implica una potencia de cálculo muy elevada. Los valores que hemos obtenido en Sabinal para las constantes en el Modelo de Siala, en su versión original, son:

Parámetros (SDEV)	$h_1$	$h_2$	$h_3$
0 - 20°	0.945 (0.0232)	0.226 (0.0077)	0.150 (0.0069)
20° - 30°	1.013 (0.0059)	0.333 (0.0021)	0.186 (0.0022)
30° - 40°	0.908 (0.0050)	0.274 (0.0018)	0.179 (0.0018)
40° - 50°	0.876 (0.0040)	0.340 (0.0017)	0.221 (0.0020)
50° - 60°	0.807 (0.0035)	0.298 (0.0016)	0.207 (0.0018)
60° - 70°	0.937 (0.0053)	0.457 (0.0016)	0.207 (0.0019)
70° - 80°	0.999 (0.0063)	0.454 (0.0014)	0.161 (0.0015)

**Tabla 1.a:** Parámetros para Sabinal, en función de la altura solar.

Lo primero que destaca en estos valores es que el *factor de albedo* ( $h_1$ ) ha dejado de ser superior a la unidad. Tan solo en el caso de  $\gamma_0$  entre 20°-30° llega a ser de 1.013, aunque se puede considerar comprendido entre 0.8 y 0.9. Por otro lado, el factor de asimetría ( $h_2$ ) se sitúa en torno a 0.3 y el espesor óptico vertical ( $h_3$ ) en torno a 0.2, aunque los valores no son únicos y existe variación en función

del rango de altura solar, especialmente para  $h_2$ . Hay que destacar en este análisis que el número de datos en el primer rango (de 0 a 20° de altura solar), es muy inferior que en los otros grupos (sólo 733 datos puntuales), por lo que la confianza que ponemos en este resultado es menor que en el resto de los casos. En cualquier caso, este hecho se ve reflejado en una mayor desviación estándar (SDEV) para esa categoría.

Empleando el tercio de datos reservado, hemos procedido a validar el modelo con estas nuevas constantes, obteniendo el resultado que ofrecemos en la siguiente Tabla. Nuevamente, **a**, **b** y **r** corresponden al ajuste lineal del logaritmo de la radiancia normalizada experimental y teórica, y el MBE y RMSE porcentajes del valor real del modelo con respecto al experimental:

SIALA - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.027	-18.5	87.8	0.7684	-0.9372	0.8889
20 - 30	0.037	-8.0	58.1	0.8486	-0.5448	0.9188
30 - 40	0.034	-13.8	53.6	0.7929	-0.7937	0.9085
40 - 50	0.037	-4.5	45.6	0.8167	-0.6441	0.8873
50 - 60	0.033	-8.3	43.9	0.7451	-0.9424	0.8150
60 - 70	0.037	-2.4	40.8	0.7833	-0.7396	0.8014
70 - 80	0.035	-14.3	58.6	0.5055	-1.7309	0.6840

Tabla 1.b: Comportamiento del modelo de SIALA recalibrado para SABINAL.

Si comparamos los resultados en esta tabla con los correspondientes del capítulo 6 (Tabla 10.a), podemos observar que el análisis ha mejorado considerablemente, reduciéndose de forma muy efectiva el MBE (ahora negativo como en Canadá) y RMSE, así como consiguiendo coeficientes de correlación

más cercanos a 0.9, y por lo tanto indicando un mejor ajuste lineal entre valores experimentales y estimados por el modelo. De todas formas este ajuste lineal no es excesivamente mejor que antes, aunque sí mejora en todos los casos. En la figura 1 hemos representado el comportamiento del modelo recalibrado para tres casos, junto con el resultado obtenido con las constantes de Siala (capítulo 6), en donde podemos apreciar los resultados que antes hemos comentado.

### 3.2) Recalibrado para Veleta

Desarrollando en el caso de Veleta el mismo procedimiento y con las mismas consideraciones que antes, obtenemos los siguientes resultados para los parámetros del modelo de Siala en su versión original:

<i>Parámetros (SDEV)</i>	$h_1$	$h_2$	$h_3$
0 - 20°	0.834 (0.0105)	0.120 (0.0025)	0.095 (0.0020)
20° - 30°	0.751 (0.0081)	0.156 (0.0021)	0.110 (0.0018)
30° - 40°	0.758 (0.0091)	0.191 (0.0028)	0.133 (0.0026)
40° - 50°	0.732 (0.0092)	0.225 (0.0033)	0.151 (0.0032)
50° - 60°	0.685 (0.0078)	0.202 (0.0033)	0.150 (0.0029)
60° - 70°	0.665 (0.0085)	0.344 (0.0032)	0.151 (0.0030)
70° - 80°	0.767 (0.0113)	0.354 (0.0030)	0.123 (0.0026)

**Tabla 2.a:** Parámetros para Veleta, en función de la altura solar.

Al igual que antes, destaca que el *factor de albedo* tampoco supera la unidad en este caso. También vemos que  $h_2$  y  $h_3$  no presentan valores únicos,

observándose un aumento con la altura solar principalmente de  $h_2$  (al igual que en Sabinal), menos evidente en el caso de  $h_3$ . Al igual que en Sabinal,  $h_1$  puede considerarse constante para todo el rango con una incertidumbre inferior al 20% (entre 0.7 y 0.8). Con estos parámetros hemos procedido a comprobar el comportamiento del modelo empleando el tercio de la base de datos reservada para tal efecto. En esta ocasión el análisis estadístico, en los mismos términos que antes, ofrece los siguientes resultados:

SIALA - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.019	-2.5	47.4	0.8235	-0.7059	0.9361
20 - 30	0.021	-3.6	38.0	0.8362	-0.6663	0.9302
30 - 40	0.024	-8.8	70.9	0.7086	-1.1414	0.8519
40 - 50	0.026	-9.3	63.6	0.6450	-1.3673	0.7917
50 - 60	0.024	-1.2	55.1	0.6834	-1.2008	0.7664
60 - 70	0.024	-8.1	54.4	0.5317	-1.8082	0.6748
70 - 80	0.025	-3.9	54.4	0.4734	-1.9811	0.6147

Tabla 2.b: Comportamiento del modelo de SIALA recalibrado para VELETA.

Comparando en este caso con la Tabla 10.b del capítulo 6, observamos que también en Veleta la mejora del comportamiento del modelo es más que evidente. En Veleta, sin embargo, esta mejora en términos relativos es más espectacular: el coeficiente de correlación se acerca hasta valores cercanos a 0.7 y 0.8 cuando antes apenas llegaba a 0.3, indicando incluso falta total de correlación en la categoría de altura solar entre 70°-80°. No solo mejora el MBE y RMSE considerablemente, sino que los valores de pendiente y ordenada en el origen indican un mejor grado de ajuste. Al igual que antes, en la figura 2 podemos apreciar en este caso el efecto del recalibrado.

Encontramos, pues, que los valores de los parámetros en el Modelo de Siala cambian de un lugar a otro y lo que es más importante, no presentan un valor único con la altura solar. Es decir, tal y como afirmaba su autor, es necesario recalibrar el modelo para cada lugar pero, además, en este recalibrado es necesario tener en cuenta otra variable como es la altura solar, que si bien no influye fuertemente sobre  $h_1$  y  $h_3$ , sí lo hace sobre el *factor de asimetría*,  $h_2$ , que aumenta al aumentar  $\gamma_0$ . Esta variación está ligada también, como se vio en el capítulo 4, a un aumento de la turbiedad, TL, en las horas centrales del día.

#### **4. MODIFICACIONES PROPUESTAS AL MODELO DE SIALA**

##### **4.1) Dependencia con el grado de turbiedad de la atmósfera**

Al estudiar el modelo de Siala en el capítulo seis, pudimos observar que los resultados obtenidos eran globalmente poco satisfactorios, pues encontramos en Sabinal y en Veleta un RMSE muy elevado, peor en la zona circunsolar de Veleta, y un MBE del 50% en Sabinal y superior al 100% en Veleta. Al representar gráficamente la radiancia experimental y teórica en la forma que lo hace el autor, observamos que se produce en forma de *pinceladas*, independientemente del grupo de datos empleado.

De entrada, estos resultados nos llevan a la conclusión que los parámetros sugeridos por Siala, obtenidos a partir de la base SKYSCAN (ambiente urbano), se acercan más a las condiciones de Sabinal que de Veleta, lo cual es lógico. La necesidad de recalcular los parámetros para otros lugares era algo ya destacado por Siala, y nosotros así lo hemos hecho, comprobando que la sospecha era fundamentada. Sin embargo los valores originales de los parámetros, aunque no adecuados para nuestra zona de medidas, no resultaban *demasiado disparatados*, a juzgar por los resultados para Sabinal y Veleta, a pesar de la distancia y

diferencias de los lugares de medida en Canadá y España. Esto nos reafirma en nuestra idea de que estamos ante el modelo que puede llegar a ser más general en cuanto a su aplicación, si conseguimos disminuir y generalizar algunas dependencias. En cualquier caso, con un recalibrado adecuado se consigue una mejora significativa, como se ha visto y comprobado en el apartado anterior.

Tenemos que recordar que nosotros no hemos llevado a cabo ningún tipo de promedio en barridos con características semejantes. Esto hace, por ejemplo, que el efecto del *Pico Veleta* fuera visible a simple vista en la representación gráfica de la franja del horizonte (elevación 0°-20°), en forma de *penachos* de puntos desviados del comportamiento general. A parte de esto, si recordamos que nuestros datos experimentales se reparten por elevaciones de 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 36, 54, 72 y 90 grados, podemos entender esas *pinceladas* en la representación gráfica del modelo original antes mencionadas.

Curiosamente estas pinceladas hacían muy ancha la distribución y situaban a las elevaciones mayores más alejadas de la recta 1-1, al tiempo que se producía un arqueamiento de los datos que pierden prácticamente su dependencia para alturas solares elevadas y en la zona circumsolar de 0-20 grados y a partir de 120° de ángulo de scattering. Todos estos hechos nos llevan a pensar que sería necesario incluir una dependencia más acusada del punto del cielo considerado, vía su elevación por ejemplo.

De la misma manera, observamos que la normalización con la constante solar no garantiza la independencia con el grado de turbiedad. De hecho al representar gráficamente el modelo original para Veleta con los parámetros recalculados por nosotros, figura 2, se observan dos agrupaciones de datos claramente definidas, de la misma forma que en el estudio experimental de los datos desarrollado en el capítulo 4 de esta memoria (por encima y por debajo de

TL=4). Esta circunstancia es más acusada en Veleta y prácticamente no se observa en Sabinal, figuras 1.

#### 4.2) Modificación Simple del Modelo de Siala

Por lo que hemos comentado en el apartado anterior, antes de modificaciones más profundas nos hemos planteamos, en primer lugar, una **modificación simple** al modelo de Siala que sería incluir esta dependencia vía el coeficiente de turbiedad de Linke TL en las exponenciales. Esta modificación simple nos obliga a recalcular las constantes  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$  nuevamente, empleando las 2/3 partes de nuestra base de datos y por rangos de altura solar,  $\gamma_o$ , al igual que se hizo antes. Las constantes así obtenidas para VELETA son las siguientes:

<i>Parámetros (SDEV)</i>	$h_1$	$h_2$	$h_3$
0 - 20°	0.809 (0.0082)	0.119 (0.0025)	0.058 (0.0010)
20° - 30°	0.780 (0.0083)	0.115 (0.0020)	0.048 (0.0008)
30° - 40°	0.911 (0.0094)	0.119 (0.0021)	0.037 (0.0006)
40° - 50°	0.904 (0.0094)	0.245 (0.0024)	0.037 (0.0006)
50° - 60°	0.754 (0.0055)	0.230 (0.0023)	0.054 (0.0007)
60° - 70°	0.844 (0.0092)	0.376 (0.0021)	0.035 (0.0005)
70° - 80°	0.859 (0.0072)	0.214 (0.0047)	0.074 (0.0014)

**Tabla 3.a:** Parámetros para Veleta. Modelo Original-Modificación simple.

Hemos realizado este cálculo de forma detallada solo para Veleta, por ser allí donde se observa la clara división entre datos con valores por encima y por

debajo de  $TL=4$ , mientras que en Sabinal este cálculo se ha realizado solo para la categoría de  $\gamma_0=30^\circ-50^\circ$  como representativa de las demás categorías y para  $\gamma_0=70^\circ-80^\circ$ . Lo primero que destaca es que los valores de  $h_s$  están ahora en torno a 0.05, lógicamente menores, y que el error estándar (SDEV) en cada caso ha disminuido con respecto al cálculo anterior. Como consecuencia, tal y como puede observarse en los gráficos de la figura 3, la dependencia con TL disminuye sensiblemente, y el ajuste mejora de nuevo como indican los parámetros estadísticos, de nuevo expresados bajo el criterio anterior, reflejados en la siguiente Tabla:

SIALA - División por Altura Solar ( $^\circ$ )						
VELETA	AVE ( $sr^{-1}$ )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.020	1.0	44.7	0.7919	-0.7834	0.9387
20 - 30	0.021	-3.6	40.7	0.8530	-0.6057	0.9298
30 - 40	0.025	-5.4	62.0	0.8610	-0.5544	0.9206
40 - 50	0.028	-3.5	53.4	0.8536	-0.5611	0.9007
50 - 60	0.027	10.0	49.0	0.7936	-0.6688	0.8732
60 - 70	0.025	-3.5	43.9	0.8359	-0.6435	0.8694
70 - 80	0.028	8.5	57.0	0.7005	-1.0515	0.6744

Tabla 3.b: Comportamiento del Modelo Original con la Modificación simple para VELETA.

Como puede verse, salvo en el caso de elevaciones solares bajas o medias,  $\gamma_0$  entre 0 y 40 grados, el análisis ha mejorado sensiblemente en todos los casos, situándose el coeficiente de correlación en 0.9 y el RMSE inferior al 50% para casi todas las elevaciones solares. También es verdad que para las primeras categorías la dependencia con TL es menor, sin embargo en líneas generales la inclusión de TL en el modelo mejora el comportamiento global del mismo de forma significativa.

En el caso de Sabinal, el resultado de los nuevos parámetros con esta modificación simple en las categorías consideradas es la siguiente:

<i>Parámetros (SDEV)</i>	$h_1$	$h_2$	$h_3$
30° - 50°	0.905 (0.0026)	0.279 (0.0012)	0.067 (0.0004)
70° - 80°	0.988 (0.0050)	0.445 (0.0015)	0.057 (0.0005)

**Tabla 4.a:** Parámetros para Sabinal. Modelo Original-Modificación simple.

El análisis estadístico del modelo así modificado y empleando de nuevo el tercio de datos reservado, resulta como se muestra en la siguiente Tabla:

SIALA - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
30 - 50	0.037	-4.9	48.7	0.7507	-0.8325	0.9070
70 - 80	0.039	-2.3	53.6	0.5026	-1.6056	0.7296

**Tabla 4.b:** Comportamiento del Modelo Original con la Modificación simple para algunas categorías de SABINAL.

Como puede apreciarse, en la categoría de 30 a 50 grados de elevación solar el comportamiento es semejante al observado con el recalibrado (Tabla 1.b), sin embargo, en la categoría de elevaciones solares más altas, si bien la pendiente y ordenada en el origen no mejoran significativamente, el coeficiente de correlación así como el MBE y el RMSE sí lo hacen. Ya vimos en el capítulo 4 como las variaciones de TL influían menos en la distribución de los datos experimentales, por lo que esta modificación afecta menos que en Veleta, como ya se suponía.

#### 4.3) Modificación General del Modelo de Siala

En nuestros análisis previos, observamos que el simple hecho de incluir TL en la exponencial del término final disminuye sensiblemente el ancho de la distribución y mejora el ajuste lineal, redistribuyendo los datos en torno a la recta 1-1, aunque no elimina totalmente el arqueamiento de los datos. Por ello damos un paso más y tratamos de eliminar alguna de las constantes y ganar generalidad a la hora de aplicar el modelo.

La siguiente etapa en nuestro estudio ha sido analizar la dependencia del modelo con  $h_3$ . Dado que el parámetro  $h_3$  es el *espesor óptico vertical* y la secante de  $\theta$  o  $\theta_0$  viene a ser una aproximación de la **masa óptica relativa**, hemos realizado pruebas tratando de eliminar este parámetro. En todos estos estudios previos hemos desarrollado un esquema de trabajo semejante al que ya hemos explicado, y que recordemos incluye los siguientes pasos:

- 1) Introducimos la modificación al modelo.
- 2) Calculamos los parámetros ( $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$ ) aplicando el programa 3R de BMDP al logaritmo de la radiancia normalizada a la constante solar (experimental y teórica) de los 2/3 de la base de datos.
- 3) Analizamos el resultado de la modificación con el tercio de datos reservados.

En virtud de estos estudios observamos que es beneficioso en el comportamiento del modelo modificar las exponenciales que en él aparecen, introduciendo una función que incluya, además de los magnitudes físicas que directa o indirectamente representan, el coeficiente de turbiedad de Linke TL. Por otro lado del análisis del resto de los modelos, observamos que es general el empleo de un factor tipo  $(1 - \exp(-cte/\text{sen}\gamma))$ . En el modelo de Kittler, en el de Gusev, en el de Harrison y en el de Pokrowsky esta constante adopta el valor de

0.32. Más adelante, en el modelo de la CEE se sustituye este valor por  $0.088TL$ . Se da la circunstancia que  $0.088$  es aproximadamente el valor del espesor óptico de Rayleigh para la longitud de onda central del espectro visible.

En el estudio de los modelos antes indicados, hemos comprobado que la franja de  $0^\circ$ - $20^\circ$  de elevación está bastante bien representada por estos modelos, lo cual indica la conveniencia de este término para tener en cuenta el scattering múltiple, más acusado en la zona del horizonte. Además, en nuestros estudios previos hemos podido comprobar que es más efectiva la dependencia con  $TL^2$  y no  $TL$ . La mejora se refleja principalmente en una reducción de la ordenada en el origen y una mayor aproximación de la pendiente al valor unidad. De nuevo, esta circunstancia se verifica con más intensidad en Veleta que en Sabinal.

Por todo lo anterior, y en virtud de los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas, **proponemos las siguientes modificaciones:**

- a) Dado que la exponencial en el tercer término puede considerarse, como una *transmitancia*, proponemos considerar una situación atmosférica real sustituyendo  $h_3 \sec \theta$  por  $\delta_R m TL$ .
- b) Incluir un término que tenga en cuenta el scattering múltiple, y que por lo tanto disminuya el grado de aproximación a la realidad del modelo, sin ganar en complejidad por ello. Proponemos la inclusión del término:  $(1 - \exp(-\delta_R m TL^2))$ .

En donde  $\delta_R$  es el espesor óptico de Rayleigh por unidad de masa óptica (equivalente por tanto a  $h_3$ ) y  $m$  es la masa óptica relativa. En nuestro caso hemos empleado las siguientes expresiones para su cálculo, bien conocidas y generalmente aceptadas (Iqbal, 1983; Page, 1986):

$$\delta_R = 1/(0.9 m + 9.4)$$

$$m = (P/P_0)/(\text{sen}\gamma + 0.15(\gamma + 3.885)^{-1.253})$$

$$P/P_0 = \exp(-0.0001184z)$$

siendo  $\gamma$  la elevación del punto del cielo en grados y  $P/P_0$  la corrección de presión con  $z$  la altura de la estación en metros. Es decir, empleamos las fórmulas de Kasten para  $\delta_R$  (Kasten, 1980) y  $m$  (Kasten, 1966), y la corrección sugerida por Lunde (Lunde, 1980). El factor  $\delta_R m$  viene a representar la atenuación de radiación debida a una atmósfera completamente seca. Al incluir el coeficiente de turbiedad de Linke, estamos acercándonos a la situación real, de atenuación debida a aerosoles y al vapor de agua, en un solo índice (Linke, 1922).

De esta manera conseguimos eliminar una de las constantes del modelo, así como incluir la dependencia con el grado de turbiedad de la atmósfera. Como tendremos ocasión de comprobar, estas modificaciones mejoran considerablemente la respuesta del modelo y afectan prácticamente por igual a todas las zonas del cielo y categorías consideradas.

Con estas propuestas el modelo quedaría formulado como sigue:

$$\frac{L}{I_{sc}} = f(\theta_0, h_1) f(\Psi, h_2) (e^{-\delta_R m TL} - e^{-\delta_{R0} m_0 TL}) (1 - e^{-\delta_R m TL^2}) \quad \theta \neq \theta_0$$

$$\frac{L}{I_{sc}} = \frac{h_1 (\delta_R TL)}{4\pi \cos\theta_0} f(\Psi, h_2) e^{-\delta_{R0} m_0 TL} (1 - e^{-\delta_R m TL^2}) \quad \theta = \theta_0$$

en donde  $f(\theta_0, h_1)$  es la misma fracción propuesta por Siala y  $f(\Psi, h_2)$  la función de fase de Henyey-Greenstein y el subíndice "o" hace referencia al sol.

En honor a la verdad hemos de decir que Kasten tabuló unos valores revisados para  $m$  (Kasten et al., 1989), pero que en esta ocasión optamos por su fórmula tradicionalmente empleada. También comentar que la expresión para el espesor óptico de Rayleigh,  $\delta_R$ , ha sido objeto de estudios más recientes que han ocasionado su reformulación (Louche et al., 1986; Grenier et al., 1994). En estos nuevos cálculos, dichos autores se han basado en medidas más actuales de la radiación espectral solar extraterrestre.

La implicación más importante de estos hechos es la gran influencia que tiene  $\delta_R$ , junto con  $m$ , en el cálculo del Coeficiente de Turbiedad de Linke. En el trabajo de Grenier (Grenier et al., 1994) se concluye que los valores de TL empleando las expresiones de Kasten son superiores (de un 5% a un 25%) a los calculados empleando su revisión, por lo que son erróneos y deben ser ajustados. Incluso propone un método para reducir su valor al caso de una masa óptica relativa 2 y evitar la variación diaria que este coeficiente exhibe, y que ya observamos en el capítulo 4, (Grenier et al., 1995).

Estos trabajos acaban de tener la réplica científica de Kasten (Kasten, 1996), proponiendo una tercera revisión de la expresión para  $\delta_R$  y afirmando que siempre que se empleen los valores de TL computado con las expresiones que podríamos denominar *clásicas* junto con dichas expresiones *clásicas*, los resultados serán idénticos que al utilizar los coeficientes TL *nuevos* con las nuevas parametrizaciones del espesor de Rayleigh.

En nuestro caso, dado que la extensión en el tiempo de este trabajo cubre todo el desarrollo que hemos comentado, y que los Coeficientes de Turbiedad de Linke, TL, se calcularon a partir de las expresiones de Kasten, hemos optado por emplearlas de nuevo en esta ocasión. El observar cómo puede modificar estos hechos a nuestras propuestas en el modelo de Siala, será objeto de estudios futuros.

## 5. PRUEBA DEL MODELO DE SIALA MODIFICADO

### 5.1) Cálculo de las constantes $h_1$ y $h_2$

Tal y como se ha explicado, a partir de la inspección visual y teórica del modelo de Siala, hemos considerado las modificaciones necesarias para ganar generalidad sin salinos del planteamiento teórico-empírico del autor. En primer lugar hemos procedido a calcular las constantes  $h_1$  y  $h_2$  del modelo, desarrollando los mismos pasos que ya se han explicado. De nuevo la única salvedad en este cálculo ha sido la de eliminar los datos correspondientes al Pico del Veleta, además de aquellos datos experimentales con ángulo de scattering  $\Psi \leq 7.5^\circ$  y superiores a  $250\text{W/m}^2\text{sr}$  tal y como se hizo en la prueba de modelos y por las mismas razones. Las variaciones por categorías de elevación solar de estos parámetros acompañados de la desviación estándar (SDEV) de los mismos, se refleja en la siguiente Tabla:

<i>Estación</i>	<b>SABINAL</b>		<b>VELETA</b>	
<i>Parámetro (SDEV)</i>	$h_1$	$h_2$	$h_1$	$h_2$
0 - 20°	1.311 (0.0161)	0.224 (0.0069)	1.991 (0.0112)	0.137 (0.0031)
20° - 30°	1.349 (0.0052)	0.329 (0.0020)	1.556 (0.0071)	0.178 (0.0026)
30° - 40°	1.125 (0.0032)	0.270 (0.0016)	1.253 (0.0054)	0.221 (0.0025)
40° - 50°	1.073 (0.0028)	0.333 (0.0015)	1.117 (0.0049)	0.275 (0.0026)
50° - 60°	0.976 (0.0021)	0.294 (0.0013)	0.997 (0.0040)	0.278 (0.0026)
60° - 70°	0.996 (0.0024)	0.420 (0.0013)	0.967 (0.0033)	0.431 (0.0019)
70° - 80°	0.984 (0.0023)	0.407 (0.0013)	0.914 (0.0025)	0.401 (0.0015)

**Tabla 5.a:** Parámetros para Sabinal y Veleta. Modelo de Siala con la **Modificación General.**

### 5.2) Comprobación del Modelo de Siala Modificado

En virtud de estos nuevos parámetros y modificaciones, el ajuste lineal entre la radiancia experimental y teórica normalizada a la constante solar empleando el tercio de datos reservado nos da el siguiente resultado:

SIALA - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.027	-20.9	87.8	0.7516	-1.0041	0.9019
20 - 30	0.036	-9.5	58.1	0.8307	-0.6069	0.9243
30 - 40	0.034	-13.0	51.8	0.7464	-0.9183	0.9240
40 - 50	0.036	-5.3	44.0	0.8058	-0.6784	0.8992
50 - 60	0.035	-3.9	40.3	0.7075	-1.0080	0.8398
60 - 70	0.036	-0.8	40.1	0.8693	-0.2998	0.7790
70 - 80	0.036	1.1	40.3	0.5440	-1.4121	0.7086

Tabla 5.b: Comportamiento del Modelo de Siala Modificado para SABINAL.

En este caso, la mejora en el comportamiento del modelo con respecto al recalibrado anterior es más acusada conforme aumenta la altura solar, disminuyéndose el MBE y RMSE y mejorando el ajuste lineal. Aunque para bajas alturas solares el modelo se comporta de forma semejante al recalibrado, la mejora es bastante notoria para las altas elevaciones solares. A partir de 50° disminuye el MBE y RMSE y en cualquiera de los casos, el coeficiente de correlación lineal es superior. En las gráficas de las figuras 4 y 5 puede apreciarse el resultado de las modificaciones propuestas.

De forma semejante, para Veleta el resultado del análisis estadístico para el modelo de Siala modificado es el que presentamos en la Tabla 5.c. En este caso, si observamos las figuras 6 y 7 y comparamos los ajustes con los que

SIALA - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.022	12.0	52.4	1.1686	0.7095	0.9387
20 - 30	0.025	12.7	49.8	1.1571	0.6498	0.9321
30 - 40	0.027	4.6	55.7	1.0700	0.2800	0.9208
40 - 50	0.029	3.1	48.8	1.0362	0.1343	0.8958
50 - 60	0.026	4.8	45.6	1.1067	0.3958	0.8800
60 - 70	0.026	1.2	38.5	0.9805	-0.0838	0.8726
70 - 80	0.026	4.4	35.8	0.8149	-0.6887	0.8192

Tabla 5.c: Comportamiento del Modelo de Siala Modificado para VELETA.

presentamos en la Tabla 2.b, en este caso la mejora en el comportamiento del modelo llega hasta niveles óptimos de pendiente prácticamente la unidad, coeficiente de correlación de 0.9, un MBE inferior al 5% y un RMSE en torno al 40%. En este sentido, la mejora es superior al recalibrado o la modificación simple antes propuesta, lo cual indica la conveniencia de las propuestas realizadas y la simplificación de pasar de tres a dos parámetros.

## 6. PROPUESTA DE UN MODELO UNIVERSAL - MURAC

### 6.1) Dependencias de las nuevas constantes $h_1$ y $h_2$

En la figura 8 tenemos la representación gráfica de las constantes  $h_1$  y  $h_2$  en función de la altura solar para Sabinal y Veleta. Se aprecia que existen diferencias entre ambos lugares, pero que la evolución de ambas es semejante. Tanto  $h_1$  como  $h_2$  disminuye y aumenta respectivamente con  $\gamma_0$  en Sabinal y Veleta. Esta circunstancia nos llevó a estudiar la posibilidad de encontrar con una forma funcional, dependiente de la altura solar,  $\gamma_0$ , común para Sabinal y Veleta. Este hecho nos llevaría al Modelo Universal de Radiancia del Cielo que

buscamos, al no depender definitivamente las constantes del emplazamiento escogido. Las diferencias entre Sabinal y Veleta que venimos comentando desde el principio de esta memoria, son más que suficientes como para considerar que tales funciones pueden ser válidas para cualquier otra estación radiométrica.

Del estudio de las constantes, fundamentalmente mediante la prueba de diferentes tipos de análisis de regresión (exponencial, logarítmico, lineal, potencial etc...) y dependencias, observamos que existía una función que daba como resultado una variación prácticamente idéntica con  $\gamma_0$  en Sabinal y Veleta, cuando se aplicaba a las constantes  $h_1$  y  $h_2$ . Estas funciones son:

$$f_1 = h_1/\exp(-\delta_{R_0}m_0TL) \quad \text{y} \quad f_2 = h_2/\exp(\delta_{R_0}m_0TL)$$

La variación de estas funciones con  $\gamma_0$  puede verse en los gráficos de las figura 9, así como la diferencia entre Sabinal y Veleta de las mismas, figura 10 (no se supera el 15% de la función en la mayoría de los casos), constituyendo el avance definitivo perseguido en la generalización del modelo. Hemos encontrado que el mejor tipo de ajuste para estas funciones es el ajuste potencial, el cual lo hemos aplicado al valor medio de las mismas en Sabinal y Veleta en cada caso.

Finalmente, este ajuste se materializa en las siguientes **EXPRESIONES COMUNES** para Sabinal y Veleta (figura 10):

$$\begin{aligned} h_1/\exp(-\delta_{R_0}m_0TL) &= [14.378873 \gamma_0^{-0.571154}] \\ h_2/\exp(\delta_{R_0}m_0TL) &= [0.0128224 \gamma_0^{0.726504}] \end{aligned}$$

En donde el coeficiente de correlación resulta de -0.991661 en el caso de la función para  $h_1$  y de 0.968056 en el de la función para  $h_2$ . En este último análisis estadístico, además de las consideraciones sobre exclusión de datos experimentales realizadas hasta ahora, que hemos mantenido, hemos promediado los cuatro valores de radiancia en el cenit (cuando los cuatro sensores miran al cenit). La bondad de estos ajustes se comprueba a continuación.

### 6.2) Propuesta de MURAC. Comprobación

El modelo final propuesto como *Modelo General de Radiancia del Cielo*, con carácter de *universalidad* y que por tanto denominaremos **MURAC**, queda pues **definido por el modelo de Siala modificado** según se ha explicado (en el que se ha suprimido ya el parámetro  $h_3$ ) y el empleo de las expresiones generales para  $h_1$  y  $h_2$  antes detalladas. Bajo estas condiciones, hemos probado MURAC empleando todos los datos del tercio reservado en Sabinal y Veleta globalmente y por elevaciones solares. En el primer caso, el análisis estadístico resultante es:

MURAC - SABINAL y VELETA - Decimal						
1/3 Base Reservada	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
SABINAL	0.033	-13.2	28.0	0.4569	0.0157	0.7546
VELETA	0.030	15.4	48.2	0.7591	0.0098	0.7486

**Tabla 6:** Comportamiento de MURAC para SABINAL y VELETA.

En la figura 11 podemos observar el comportamiento de MURAC para todos los datos (1/3 de la Base). Recordemos que estamos ante 35.767 datos puntuales en Sabinal y ante 23.816 datos puntuales en Veleta y que a pesar de la aparente magnitud del RMSE, si lo calculamos en términos relativos dato a dato

y no con respecto al valor medio experimental, se reduce a un 25% en Sabinal y a un 42% en Veleta. En el caso de la división por alturas solares obtenemos los resultados que ofrecemos en las siguientes Tablas:

MURAC - División por Altura Solar (°)						
SABINAL	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.027	-22.8	90.4	0.7368	-1.0739	0.8919
20 - 30	0.032	-23.8	75.3	0.7187	-1.1014	0.9107
30 - 40	0.035	-14.9	51.2	0.7596	-0.8914	0.9174
40 - 50	0.036	-10.5	46.1	0.7700	-0.8482	0.8717
50 - 60	0.034	-5.9	38.2	0.7659	-0.8429	0.8382
60 - 70	0.032	-10.8	43.6	0.6416	-1.3102	0.7371
70 - 80	0.030	-14.4	42.1	0.4753	-1.9123	0.6079

Tabla 7.a: Comportamiento de MURAC para SABINAL.

MURAC - División por Altura Solar (°)						
VELETA	AVE (sr <sup>-1</sup> )	MBE (%)	RMSE (%)	a	b	r
0 - 20	0.023	11.4	49.9	1.1362	0.5831	0.9297
20 - 30	0.028	21.7	56.7	1.1303	0.6223	0.9229
30 - 40	0.031	12.1	60.8	0.9871	0.0488	0.8973
40 - 50	0.033	9.3	54.8	0.9331	-0.1663	0.8681
50 - 60	0.030	19.6	58.0	0.9973	0.1281	0.8569
60 - 70	0.029	13.1	50.1	0.8738	-0.3574	0.8224
70 - 80	0.028	12.8	43.8	0.7735	-0.7232	0.7982

Tabla 7.b: Comportamiento de MURAC para VELETA.

En los gráficos de las figuras 12-15 puede apreciarse el resultado de este ajuste tanto en un caso como en otro. Independientemente de la mejora que supone MURAC, es fácilmente apreciable que el comportamiento del mismo es menos ajustado en la zona circunsolar y para elevaciones solares altas. Sin

embargo, y en líneas generales, sitúa los resultados estadísticos al mismo nivel que el mejor de los modelos que normalizan con respecto a *IHDI* o *Lz*, con la ventaja de la ausencia de constantes locales y su fundamento físico-empírico. El modelo subestima y sobreestima el mismo porcentaje en Sabinal y Veleta respectivamente, y se sitúa el RMSE dentro de lo que debería ser un modelo ideal, 20-40% según señala Brunger (Brunger et al., 1993).

En la figura 16 se representan los datos correspondientes a un ángulo de scattering menor o igual a 20°. Es evidente que en esta zona es donde se da la mayor parte de la subestimación del modelo. En realidad, en Sabinal se observa una respuesta uniforme del mismo, casi constante, mientras que en Veleta el ajuste es mejor. Un factor determinante, pues, en el comportamiento del modelo es la función de fase elegida en el mismo.

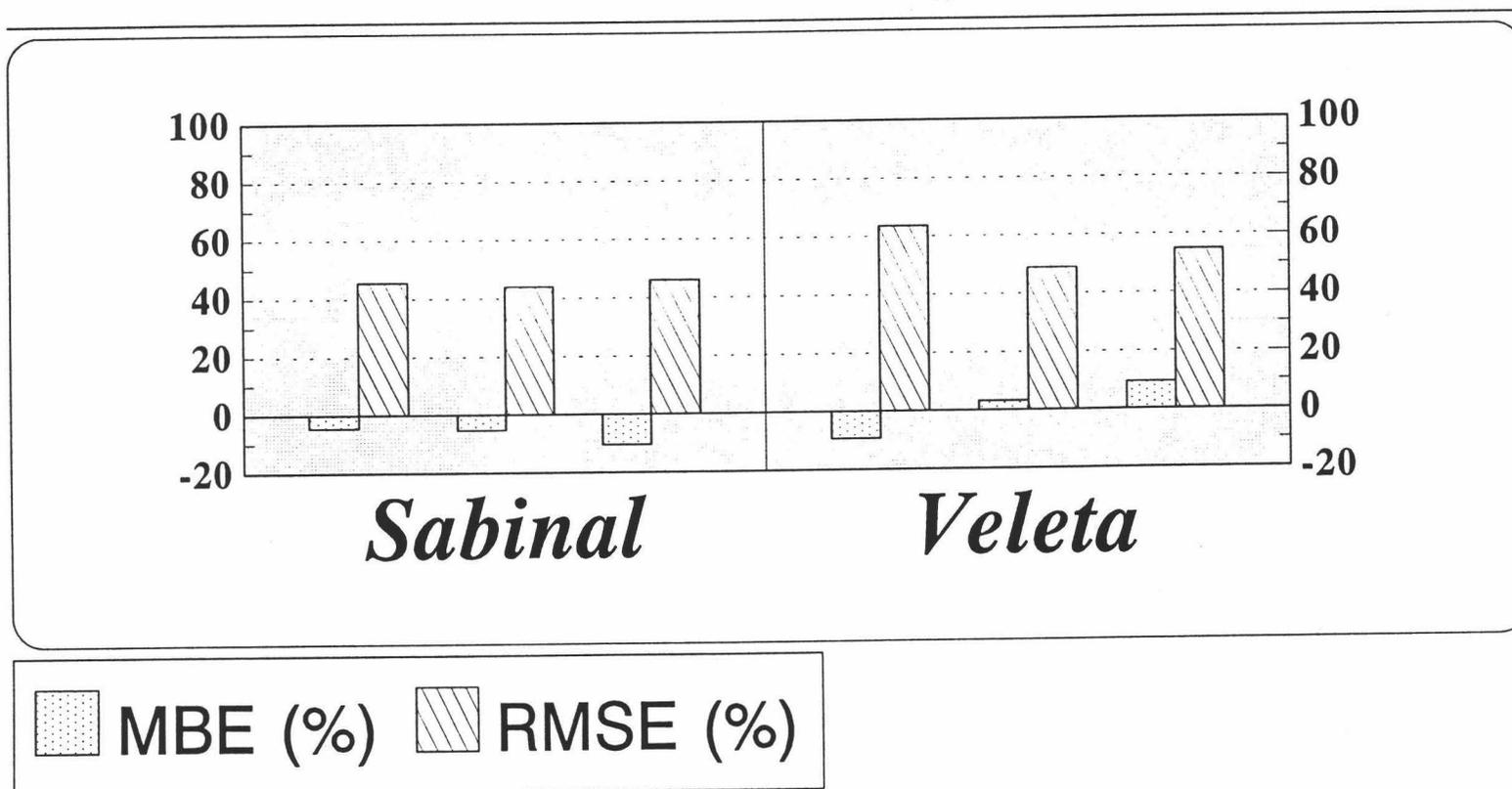
A modo de recopilación de resultados en la evolución que hemos realizado hasta llegar a MURAC, en la figura 17, que se muestra a continuación, hemos representado el MBE y RMSE en porcentaje con respecto al valor medio experimental (como hasta ahora) para la categoría de elevación solar comprendida entre 40 y 50 grados. De dos en dos columnas, y de izquierda a derecha representamos el MBE y RMSE para:

- 1) Modelo de Siala Recalibrado
- 2) Con la Modificación General
- 3) MURAC

En esta figura podemos observar lo que antes hemos comentado. Para las otras categorías el resultado era muy semejante al presentado.

# Modelo de SIALA - MURAC

Altura solar : 40 - 50 grados



286

## Recalibrado - Modificado - MURAC

Figura 17: Comparación del comportamiento de MURAC con el Modelo de Siala recalibrado y el Modelo de Siala Modificado, mediante la representación del MBE y RMSE para la categoría de  $\gamma_0$  entre 40° y 50°. (Cap.7)

Pensamos que el trabajo en el futuro debe de enfocarse hacia dos objetivos concretos:

- 1) Determinar hasta qué punto las modificaciones aquí propuestas son realmente universales y afectan por igual a otras zonas del mundo. Aunque las diferencias entre Sabinal y Veleta son acusadas, es conveniente realizar estas comprobaciones sobre otra base de datos diferente a la nuestra.
  
- 2) Encontrar otra función de fase más cercana a la realidad, aunque sin aumentar por ello la complejidad del modelo. Quizás una pequeña modificación de la función de fase de H-G pueda ser la solución. En este sentido, es de resaltar que la función de fase que se incluya en MURAC debe tener en cuenta la mayor zona circumsolar que se da en ambientes más contaminados, como Sabinal con respecto a Veleta, tal y como se ha visto.

Dado que en este trabajo no se han realizado promedios sobre la base de barridos con características semejantes y dado que el Modelo de Siala que se ha tomado como base es para condiciones medias, el trabajo en el futuro debería orientarse también hacia la prueba del mismo en condiciones medias de nuestra base de datos, lo cual debe repercutir en mejores resultados del análisis estadístico.

Por otro lado, y con respecto al primer punto anterior, actualmente disponemos de la base de datos SKYSCAN ya comentada y el permiso del autor de la misma para su uso en dichas comprobaciones. Igualmente, los contactos actuales con el Dr. Brunger y el desarrollo de campañas propias permitirán comprobar el verdadero alcance de los resultados con el MURAC.

**8. CONCLUSIONES**

Cuando en septiembre de 1986 defendía la memoria de mi tesina de licenciatura, nada podía hacerme pensar que tardaría diez años en hacer lo propio con esta memoria para optar al grado de Doctor. Muchos son los problemas y condicionantes que me han forzado a tal situación, que ahora no son importantes, pero que en cualquier caso han enriquecido mi calidad como docente e investigador en la Universidad de Granada y que forman, ineludiblemente, parte de mi destino.

Así, y transcurridos algunos intentos de Tesis que más adelante se mostraron infructuosos, en Mayo de 1988 comenzábamos la campaña de medidas en Sabinal, agotadora en muchos momentos pero apasionante en todo su desarrollo, no pudiendo entonces llegar a imaginar la gran riqueza científica que aquellas medidas contenían y lo dilatado en el tiempo que podría llegar a ser su interpretación. Efectivamente, han pasado ocho años y aún estamos en condiciones de extraer mucha más información que la que aquí hemos presentado. Esta memoria supone básicamente seis años de trabajo, que van desde comienzos

de 1990 hasta hoy día. En ese tiempo, y una vez solventados ciertos problemas que podríamos denominar marginales (entre los que se incluye el traer las cintas con los datos desde Suiza), hemos desarrollado una investigación que podríamos dividir en dos fases bien diferenciadas y que tendrá una tercera:

- a) Fase informática
- b) Fase de investigación
- c) Trabajo futuro de continuación

Durante la fase informática, procedimos a la lectura de los datos en el formato original suizo. Hay que recordar que en 1990 aún no teníamos en la Facultad de Ciencias los medios que actualmente disponemos, como son las amplias conexiones con el Centro de Cálculo de la Universidad, *Workstation* (Estación de Trabajo) en nuestro Grupo de Investigación, así como el disfrutar de un ordenador personal por investigador. Con esto pretendemos decir que el trabajo que hoy día no supone ningún esfuerzo (más allá que el impuesto por los conocimientos que cada uno pueda tener de este tema), entonces se tornaba mucho más tedioso pues estábamos forzados por condicionantes ajenos a nuestra voluntad.

En este tiempo se procedió a la lectura de las cintas y a su posterior traspaso a diskette (bajo sistema MS-DOS) para su tratamiento. Además del viaje a Suiza en Febrero de 1990, tardamos unos seis meses antes de disponer de la totalidad de los datos en un formato accesible a los ordenadores de la época, para comenzar a darle la forma definitiva que nos permitiría concluir con la investigación que aquí hemos presentado.

Durante otros dos años sometimos a los datos a un proceso de análisis que incluyó filtrado de datos erróneos, división según nuestros criterios y copias de

seguridad. Para cada uno de estos pasos, se empleó la programación personal en BASIC y FORTRAN, junto con el empleo de algún paquete comercial de los que ya se han reseñado. Prácticamente se realizó un programa a medida para cada análisis que pretendíamos desarrollar.

Podemos considerar que es a finales de 1992 cuando estamos en condiciones de comenzar a estudiar todo lo que estos dos meses de campaña son capaces de mostrar sobre la distribución angular de la radiancia del cielo. Así pues a partir de 1993 comienza lo que hemos denominado *fase de investigación*, en la que desarrollamos este estudio que culmina hoy en esta memoria.

Una vez hecha esta pequeña introducción (a todas luces innecesaria en unas conclusiones como tales pero necesarias desde un punto de vista personal, por servir de reflexión ante tantos años de trabajo), resumiremos a continuación las contribuciones de nuestro estudio. Aunque en cada uno de los capítulos se han comentado y discutido las aportaciones más interesantes, dentro de este resumen podríamos extraer las siguientes **conclusiones**:

A) El tratamiento de los datos nos ha permitido disponer de una extensísima base de datos, quizás no en el tiempo pero sí en cuanto a la cantidad de las magnitudes medidas, la calidad de tales medidas y su distribución angular. Esta base de datos, dentro del programa europeo en el que está integrada, forma una de las bases de datos sobre radiancia del cielo y otras magnitudes más ricas de las que existen actualmente.

B) Hemos podido contribuir a la caracterización radiométrica de los dos emplazamientos en los que estuvimos realizando la campaña: Sabinal y Veleta. Hemos podido constatar la extremada calidad desde un punto de vista radiométrico de la atmósfera de Veleta, por los elevados niveles energéticos

registrados, así como por los bajos niveles de turbiedad encontrados en virtud de los valores de los diferentes índices analizados. En Sabinal hemos podido comprobar el efecto de los más de 3000 metros de diferencia de altura con respecto al Pico Veleta y la influencia del entorno marítimo en el que nos encontrábamos.

C) Del estudio de la distribución angular de la radiancia del cielo, hemos podido comprobar hasta qué punto dicha distribución no es isótropa, verificando la existencia de una contribución circunsolar, una contribución de efecto horizonte y una contribución de fondo. Hemos analizado la influencia de la turbiedad sobre cada una de estas contribuciones, así como las variaciones que registran durante un día en virtud del movimiento del sol en la cúpula celeste. La influencia de la turbiedad resulta ser bastante decisiva en la contribución circunsolar, así como en la región del horizonte.

D) Hemos comprobado la eficacia del análisis gráfico en este tipo de estudio, detectando muchos de los efectos a partir de la representación en dos y tres dimensiones de la radiancia del cielo. Paralelamente a estos efectos, y a partir de este estudio gráfico, hemos podido constatar la gran simetría de la distribución de irradiancia global sobre superficies inclinadas.

E) Hemos estudiado en profundidad la forma de la distribución angular de la radiancia del cielo, incluyendo el carácter *lognormal*. Al considerar en este estudio diferentes regiones en el cielo, rangos de elevación solar y planos, nos ha permitido establecer la dependencia de la radiancia con la posición relativa punto del cielo-sol vía el ángulo de scattering,  $\Psi$ , así como con otros parámetros de posición ( $\gamma$ ,  $\gamma_0$ ) y parámetros representativos de las condiciones atmosféricas, como puede ser el coeficiente de turbiedad de Linke, TL, que nos han ayudado a interpretar mejor su modelización. Confirmamos la generalmente aceptada

dependencia exponencial de la radiancia con  $\Psi$ . Sin embargo nuestro estudio refleja la necesidad de incluir la dependencia con las condiciones de turbiedad vía alguna combinación de índices tipo Kt-K o mediante TL.

F) Hemos establecido hasta qué punto la normalización de la radiancia disminuye la dependencia de ésta con el grado de turbiedad de la atmósfera, encontrando que al normalizar con respecto a la radiancia del cenit,  $L_z$ , la distribución suaviza esta dependencia con más intensidad que al normalizar con respecto a la irradiancia difusa,  $D_h$ . En cualquiera de los dos casos el efecto disminuye pero no se suprime totalmente.

G) Hemos estudiado la radiancia en el horizonte, en virtud de la gran cantidad de medidas de que disponíamos y de los horizontes despejados de nuestros lugares de medida. De este estudio se extrae el hecho de que la radiancia en el horizonte no depende del ángulo acimutal del punto del cielo considerado. Sólo para elevaciones solares bajas se presenta dependencia con el ángulo acimutal solar,  $\phi_o$ . También hemos comprobado que los obstáculos influyen sobremanera en la distribución final (Pico Veleta). Por otro lado, es acusado el efecto de la altitud en la contribución de la zona del horizonte. Nuestro estudio evidencia que la radiancia aumenta hacia un valor máximo conforme consideramos puntos del cielo a mayor elevación. En el caso de Sabinal, estos valores máximos se sitúan en torno a  $10^\circ$  y en Veleta en torno a  $3^\circ$  que definen la máxima contribución del *horizonte brillante*. En este sentido, son las condiciones de turbiedad las que condicionan tanto la extensión del *horizonte brillante* como su intensidad.

H) Hemos introducido y comentado 23 modelos para la distribución angular de la radiancia del cielo, desarrollando una exhaustiva comprobación de su comportamiento en Sabinal y Veleta para 11 de ellos. En virtud de este

trabajo, hemos podido comprobar las virtudes y defectos de cada tipo de modelización, planteándose interesantes posibilidades en algunos casos, que animan a su recalibrado o a sugerir modificaciones o ampliaciones imposibles de desarrollar por sus autores. Hemos encontrado que el Modelo de Brunger y Hooper es el que mejor resultados ofrece dentro de la categoría de modelos tipo L/Dh y el Modelo de la CEE Modificado dentro de la categoría L/Lz (este último presenta el inconveniente de la poca frecuencia con la que se mide la radiancia en el cenit). Ambos modelos incluyen la dependencia de las condiciones de turbiedad. El de la CEE Modificado es además una formulación que recoge toda la información adicional de las campañas europeas de Valko realizadas con el MORAS. No obstante, es el Modelo de Siala por su comportamiento semejante para todas las categorías consideradas, así como por su fundamento físico el que nos anima a desarrollar un trabajo más profundo con él.

D) Finalmente, y como resultado de todo lo anterior, hemos desarrollado un modelo propio con carácter de universal que hemos denominado **MURAC**. La gran aportación de este modelo es que reúne todas las ventajas que hemos detectado en nuestro análisis de modelos, interviniendo en su formulación tan solo dos parámetros,  $h_1$  y  $h_2$ , dependientes de la turbiedad y la elevación solar. Hemos modelizado esta dependencia encontrando sendas expresiones válidas tanto en Sabinal como en Veleta, lo cual podemos considerar como indicio de su independencia con el lugar de aplicación. Esta nueva formulación conduce a unos niveles de estimación cercanos a los considerados como óptimos por algunos autores y que en cualquier caso se sitúan prácticamente al mismo nivel que los mejores resultados obtenidos en el análisis de modelos. Es decir, **MURAC** presenta la ventaja de la ausencia de constantes locales y su fundamento físico-empírico, además de necesitar sólo información sobre el índice de turbiedad de Linke, TL.

Llegados a este punto, podríamos finalizar con la fase que al principio denominábamos *trabajo futuro de continuación*. Son numerosos los trabajos posibles que hemos ido planteando a lo largo de esta memoria y que necesariamente tienen que formar parte del futuro. Igualmente, la pretendida universalidad de MURAC, sugerida por los resultados obtenidos en dos lugares con características tan diferentes como Sabinal y Veleta, tiene que ser comprobada con otras bases de datos. En este sentido nos encontramos ya en contacto con el Dr. Brunger (Canadá) para establecer la cooperación que nos permita desarrollar tal trabajo. Tenemos una gran esperanza en esa *universalidad*, porque nuestra comprobación y desarrollo se ha realizado en dos emplazamientos muy distintos, práctica esta poco habitual en este tipo de trabajos.

Pero independientemente de los posibles trabajos que hemos considerado posibles y futuribles, no debemos olvidar que tan solo nos hemos centrado en el estudio de la radiancia del cielo, quedando numerosos flujos radiativos por estudiar en nuestra base de datos como es el caso de la radiancia e irradiancia reflejada, la distribución angular de la irradiancia difusa o las medidas con filtro realizadas con el radiómetro absoluto. Todo ello dará continuidad a este trabajo, el cual a pesar de su extensión podría considerarse sólo la *punta del iceberg*.

**9. BIBLIOGRAFIA**

- 
- ARNFIELD, A.J., *Estimation of Diffuse Irradiance on Sloping, Obstructed Surfaces: An Error Analysis*. Arch. Met. Geoph. Biokl., Serie B, 30, pp.303-320, 1982.
- BENER, P., FRÖHLICH, C. y VALKO, P., *Mobile Station for Automatic Measurement of Spectral Solar and Sky Radiance and of the Fluxes of Global and Sky Radiation on Differently Oriented Planes*. Proceedings International Solar Energy Society Conference, Paper E-31. Paris (1973).
- BERGSTROM, R.W. y VISKANTA, R., *Spherical Harmonics Approximation for Radiative Transfer in Polluted Atmospheres*. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Paper No.73-749, 1973.
- BMDP. *Statistical Software*. BMDP Statistical Software Inc., 1440 Sepulveda Blvd., Los Angeles, CA 90025, USA, 1990.
-

- 
- BOURGES, B., *Le calcul de l'éclairement Solaire sur Plans Inclinés*. La Météorologie 7e, ser. No.11, pp.58-68, 1986.
- BOX, M.A. y DEEPAK, A., *An approximation to multiple scattering in the earth's atmosphere. Almicantar radiance formulation*. Journal of Atmospheric Science, 38, 1037, 1981.
- BRUNGER A.P., *The Development of an Empirical Model for the Angular Distribution of Sky Radiance*. Mechanical Engineering Project Report, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Toronto, 1981.
- BRUNGER, A.P., HOOPER, F.C. y WARDLE, D.I., *A system for recording sky radiance distributions*. 5th Conference on Atmospheric Radiation, American Meteorological Society, Boston, MA, pp.250-253, 1983.
- BRUNGER, A.P., HOOPER, F.C. y WARDLE, D.I., *A comprehensive sky radiance data base*. Proceedings INTERSOL '85, ISES, Pergamon Press, New York, Vol.4, pp.2415-2419, 1985.
- BRUNGER, A.P., *The magnitude, Variability and Angular Characteristics of the Shortwave Sky Radiance*, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Toronto, 1987.
- BRUNGER, A.P. y HOOPER, F.C., *Measured Shortwave Sky Radiance in an Urban Atmosphere*. Solar Energy, 47, 2, pp.137-142, 1991.
-

- 
- BRUNGER, A.P.                   y HOOPER, F.C., *Anisotropic Sky Radiance Model Based on Narrow Field of View Measurements of shortwave Radiance*. Solar Energy, 51, 1, pp.53-64, 1993.
- BRUSA, R.W.,                   y FRÖHLICH, C., *Recent Solar Constant Determinations from High Ballons*. Proceedings 3rd Scientific Assembly of IAMAP, Hamburg, 1981.
- BRUSA, R.W.,                   *Solar Radiometry*. WRCD Publication No. 598, Dissertation ETH No. 7181, 1983.
- BURIEZ, J.C.                   y FOUQUART, Y., *Generalization of the Curtis-Godson Approximation to Inhomogeneous Scattering Atmospheres*. Journal of the Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 24, 5, pp.409-417, 1980.
- C.I.E.,                           *Standarization of luminance distribution of clear skies*. Publication CIE No. 22, TC-4.2, 1973.
- COOMBES , C.A.               y HARRISON, A.W., *An automatic all sky scanning radiometer*. Canadian Journal of Physics, 60, pp.919-925, 1982.
- COULSON, K.L.,               Solar and Terrestrial Radiation. Academic Press, New York, 1975.
- COULSON, K.L.,               Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere. A.Deepak Pub, Hampton, USA, 1988.
- CHANDRASEKHAR, S.,       Radiative transfer. Dover Publications. Inc., New York, 1960.
-

- 
- DALIMIN, M.N. y KUMAR, P., *A computational analysis of the amount of solar energy reaching the Earth's atmosphere*. Solar & Wind Technology, 4, 2, pp.219-228, 1987.
- DAVE, J.V., *A Direct Solution of the Spherical Harmonics Approximation to the Radiative Transfer Equation for an Arbitrary Solar Elevation. Part I: Theory*. Journal of the Atmospheric Sciences, 32, pp.790-798, 1975.
- DAVE, J.V., *Validity of the isotropic-distribution approximation in solar energy estimations*. Solar Energy, 19, pp.331-333, 1977.
- DAVE, J.V., *Isotropic Distribution Approximation in Solar Energy Estimations*. Solar Energy, 22, pp.15-19, 1979.
- DEEPAK, A., BOX, M.A., TWITTY, J.T. y ADAMS, R.R., *Comparison between photographic and photoelectric measurements of the solar aureole almucantar radiance*. Applied Optics, 17, 13, 1977 (1978).
- DEEPAK, A., BOX, G.P. y BOX, M.A., *Experimental validation of the solar aureole technique for determining aerosol size distributions*. Applied Optics, 21, 12, 2236, 1982.
- DEHNE, K., *Entwicklung eines Sky-Scanners zur schnellen Vermessung der räumlichen Verteilung spektraler Himmelsstrahldichten*. Ber. Dt. Wetterd., 134, pp.39, 1974.
-

- 
- DOGNIAUX, R., *Variations géographiques et climatiques des expositions énergétiques solaires sur des surfaces receptrices horizontales et verticales*. Institut Royal Meteor. de Belgique, Misc. SERIE B, No.38, 1975.
- DOGNIAUX, R., *Parameterization of the angular distributions of sky radiances for clear, overcast and intermediate sky covers with particular application to UCCLE (Belgium) radiation climatic conditions*. Institut Royal Meteorologique de Belgique, Miscellanea SERIE B, No.63, 1986.
- DOGNIAUX, R., Prediction of Solar Radiation in Areas with a Specific Microclimate. Commission of the European Communities. Kluwer Academic Publishing., 1994
- DORNO, C., *Himmelshelligkeit, Himmelspolarisation und Sonnenintensität in Davos 1911 bis 1918*. Veröff. Preuss. Meteor. Instituts Nr. 303, 303pp., 1919.
- EIDEN, R., *Circumsolar sky radiation: The flux density of radiation energy originating from the circumsolar sky measured at ground based stations*. Report published by Commission of the European Communities. Luxembourg, 1983.
- FORGAN, B.W., *The Measurements of Solar Irradiance*. FIAMS Research Report 31, Flinders University of South Australia, pp.380, 1979.
- FOYO-MORENO I., VIDA, J. y ALADOS-ARBOLEDAS, L., *Estudio de la influencia de la nubosidad en la radiancia del cielo en Sierra Nevada*. Iª Conferencia Internacional Sierra Nevada. Vol. 1, pp.113-124, 1996.
-

- FRÖHLICH, C. y WEHRLI, C., *Spectral distribution of solar irradiance from 25000 nm to 250 nm*. World Radiation Center, Davos, Suiza. Comunicación privada, 1981a.
- FRÖHLICH, C. y BRUSA, R.W., *Solar radiation and its variation in time*. Sol. Phys., 74, pp.209-215, 1981b.
- FRÖHLICH, C. y LONDON, J., Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. WRCP Pub. Ser. No.7. WMO/TD. No. 149, 140 pp. 1986.
- GREENSTADT, A.H. y FILLMORE, J.A., *Radiative Transfer Through an Arbitrarily Thick, Scattering Atmosphere*. Journal of the Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 24, 5, pp.391-406, 1980.
- GRENIER, C., De La CASINIERE, A. y CABOT, T., *A spectral model of Linke's turbidity factor and its experimental implications*. Solar Energy, 52, 4, pp.303-313, 1994.
- GRENIER, C., De La CASINIERE, A. y CABOT, T., *Atmospheric Turbidity Analyzed by Means of Standardized Linke's Turbidity Factor*. Journal of Applied Meteorology, 34, 6, pp.1449-1458, 1995.
- GRETHER, D. et al, *Measurements of circumsolar solar radiation*. SPIE J., 68, pp.41-48, 1975.
- GRETHER, D. et al, *Measurements and analysis of circumsolar radiation*. LBL Rap. 11645, Berkeley, CA, 1980.

- 
- GUEYMARD, C., *Une paramétrisation de la luminance énergétique du ciel clair en fonction de la turbidité*. Atmosphere-Ocean, 24, 1, pp.1-15, 1986.
- GUEYMARD, C., *An Anisotropic Solar Irradiance Model for Tilted Surfaces and its Comparison with Selected Engineering Algorithms*. Solar Energy, 38, 5, pp.367-386, 1987.
- HALE, G.M. y QUERRY, M.R., *Optical Constant of Water in the 200nm to 200 $\mu$ m Wavelength Region*. Applied Optics, 12, pp.555-563, 1973.
- HARRISON, A.W. y COOMBES, C.A., *Angular Distribution of Clear Sky Short Wavelength Radiance*. Solar Energy, 40, 1, pp.57-63, 1988a.
- HARRISON, A.W. y COOMBES, C.A., *An Opaque Cloud Cover Model of Sky Short Wavelength Radiance*. Solar Energy, 41, pp.387-392, 1988b.
- HARRISON, A.W., *Directional Sky Luminance Versus Cloud Cover and Solar Position*. Solar Energy, 46, 1, pp.13-19, 1991.
- HAY, J.E., *Measurements and Modelling of Shortwave Radiation of Inclined Surfaces*. Third Conference on Atmospheric Radiation, Amer. Meteor. Soc., Davis, California, pp.150-153, 1978.
- HAY, J.E., *Calculations of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces*. Solar Energy, 23, pp.301-307. 1979.
-

- HAY, J.E. y McKAY, D.C., *Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces: A review and Assessment of Methodologies*. International Journal of Solar Energy, 3, pp.203-240, 1985a.
- HAY, J.E. y McARTHUR, L.J.B., *Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces: A review and Assessment of Methodologies*. International Journal Solar Energy, 3, pp.203-240, 1985b.
- HEIMO, A. y VALKO, P.: *First Results Obtained from the Swiss Mobile System for Solar Radiation Measurement*. UNESCO/WMO. Solar Energy Symposium. G eneva (1976).
- HEIMO, A., *Diagnosis of the atmosphere through optical measurements performed with a mobile station*, Tesis Doctoral, ETH No.7755, Z urich, 1984.
- HOOPER, F.C. y BRUNGER, A.P., *A Model for the Angular Distribution of Sky Radiance*. Journal of Solar Energy Engineering, 102, pp.196-202, 1980.
- HOOPER, F.C., BRUNGER, A.P. y CHAN, C.S., *A Clear Sky Model of Diffuse Sky Radiance*. Journal of Solar Energy Engineering, 109, pp.9-14, 1987.
- HULST, H.C.Van de, Multiple light scattering, tables, formulas and applications. Vol. 2, Academic Press, New York, 1980.
- INEICHEN, P, MOLINEAUX, B. y PEREZ, R., *Sky Luminance Data Validation: Comparison of Seven Models with Four Data Banks*. Solar Energy, 52, 4, pp.337-346, 1994.

- IEA International Energy Agency, An introduction to meteorological measurements and data handling for solar energy applications. Task IV Report. Development of an Isolation Handbook and Instrument Package. DOE/ER-0084, U.S. Department of Energy, Washington, D.C. 1980.
- IQBAL, M., An Introduction to Solar Radiation. Academic Press. New York, 1983.
- IRVINE, W.M. y POLLAK, J.B., *Infrared Optical Properties of Water and Ice Spheres*. Icarus, 8, pp.324-360, 1968.
- KÄHLER, K., *Flächenhelligkeit des Himmels und Beleuchtungsstärke in Räumen*. Meteor. Zeitschr., 25, 2, pp.52-57, 1908.
- KASTEN, F., *A new table and approximative formula for relative optical airmass*. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol., Serie B, 14, pp.206-223, 1966.
- KASTEN, F., *A simple parameterization of the pyr heliometric formula for determining the Linke turbidity factor*. Meteor. Rundschau, 33, pp.124-127, 1980.
- KASTEN, F. y YOUNG, A.T., *Revised optical air mass tables and approximation formula*. Applied Optics, 28, pp.4735-4738, 1989.
- KASTEN, F., *The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness*. Solar Energy, 56, 3, pp.239-244, 1996.

- 
- KITTLER, R., *Standardization of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies*. Proceedings of the CIE Conference on Sunlight in Buildings, Newcastle upon Tyne, Univ. Coll. London, 1967.
- KITTLER, R., *Luminance distribution characteristics of homogeneous skies: a measurement and prediction strategy*. *Lighting Research & Technology*, 17, 4, pp.183-188, 1985.
- KITTLER, R., *Sunlight in Buildings*. Proceedings of CIE Intersessional Conference. Bouwcentrum, Rotterdam, III, pp.273-285, 1986.
- KITTLER, R. y PIRŠEL, L., *Lessons to be learned from existing sky radiance/luminance models*. Proceedings International Daylighting Conference, Paper A4, Moscú, 1990.
- KITTLER, R., *The diffusion indicatrix as a substantial part of sky radiance/luminance models*. *Building Res. Journal*, 40, 12/4, pp.755-772, 1992.
- KITTLER, R. y VALKO, P., *Radiance Distribution on Densely Overcast Skies: Comparison with CIE Luminance Standard*. *Solar Energy*, 51, 5, pp.349-355, 1993.
- KITTLER, R., *Some qualities of scattering functions defining sky radiance distributions*. *Solar Energy*, 53, 6, pp.511-516, 1994.
- KLECKNER, E.W. y MICHALSKY, J., *A multipurpose computer-controlled scanning photometer*. PNL-4081, Pacific Northwest Lab., Richland, WA, 1981.
-

- 
- KLUTCHER, T.M., *Evaluations of Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces*. Solar Energy, 23, 114, 1979.
- KONDRATYEV, K.Y., KUDRIAVTZENA, L.A. y MANOLOVA, M.P., *Distribution of the energetical and light intensity of diffuse atmospheric radiation over the celestial sphere*. Bulletin of the University of Leningrad, pp.119-129, 1955.
- KONDRATYEV, K.Y. y MANOLOVA, M.P., *The Radiation Balance of Slopes*. The Reports at the Symposium on Radiation in Oxford, pp.3-20, 1959.
- KONDRATYEV, K.Y. y MANOLOVA, M.P., *The Radiation Balance of Slopes*. Solar Energy, 4, 1960.
- KONDRATYEV, K.Y., *Radiation in the atmosphere*. Academic Press, New York, 1969.
- KOURGANOFF, V., *Basic methods in transfer problems*. Dover Publications, Inc., New York, 1963.
- LBL LAWRENCE BERKELEY LABS, *Windows and Daylighting Group*. LBL, Berkeley, CA, 1986.
- LENOBLE, J., *Atmospheric Radiative Transfer*. A. Deepak Publishing, Hampton (Virginia), USA, 1993.
- LIEBELT, C., *Leuchtdichte und Strahldichteverteilung des Himmels*. Diss. Lichttechnisches Institut der Universitat Karlsruhe, 1978.
- LINKE, F., *Transmission-Koeffizient und Trübungsfaktor*. Beitr. Phys. Atmos., 10, pp.91-103, 1922.
-

- 
- LIOU, K.N., *An introduction to atmospheric radiation*. Academic Press, New York, 1980.
- LIOU, K.N., *Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere*. Oxford Monographs on Geology and Geophysics. No.20. Oxford University Press, 1992.
- LITTLEFAIR, P., *A Comparison of Sky Luminance Models with Measured Data from Garston, United Kingdom*, *Solar Energy*, 53, 4, pp.315-322, 1994.
- LIU, B., y JORDAN R.C., *The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation*. *Solar Energy*, 4, 3, 1960.
- LOUCHE, A., PERI, G. & IQBAL, M., *An analysis of the Linke turbidity factor*. *Solar Energy*, 37, pp.393-396, 1986.
- LUNDE, P.J., *Solar Thermal Engineering*. J. Wiley & Son, 1980.
- MA, C. e IQBAL, M., *Statistical Comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces*. *Solar Energy*, 31, pp.313-317, 1983.
- MATSUURA, K., *Average Sky as a Standard*. CIE Division III, Technical Committee 309. Circular No.9, 1985.
- MEINEL, A.B. y MEINEL N.P., *Applied Solar Energy: An Introduction*. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1976.
- McARTHUR, L.J.B. y HAY, J.E., *Radiative and Photographic Determinations of the Distribution of Diffuse Shortwave Radiation over the Sky Hemisphere*. Parte I y Parte II. 1220 pp., 1978.
-

- 
- McARTHUR, L.J.B. y HAY, J.E., *A technique for mapping the distribution of diffuse solar radiation over the sky hemisphere*. Journal Applied Meteorology, 20, pp.421-429, 1981.
- MICHALSKY, J., PEREZ, R. y SEALS R., *Evaluation of Algorithms for Sky Luminance Distribution Prospects for Performance Improvements*. Proceedings of ISES World Solar Congress, Denver, CO, Vol. 1 - Part II, pp.1049-1054, 1991.
- MOON, P. y SPENCER, D.E., *Illumination from a nonuniform sky*. Illumination Engineering, 37, 10, pp.707-726, 1942.
- MORRIS, C.W. y LAWRENCE, J.H., *The Anisotropy of Clear Sky Diffuse Solar Radiation*. ASHRAE Trans, Part II, 77, pp.136-141, 1971.
- NORMAN, J.M. y WELLES, J.M., *Radiative Transfer in Array of Canopies*. Agron. J., 75, 481, 1983.
- OLMO, F.J., VIDA, J., CASTRO-DIEZ, Y., ALADOS-ARBOLEDAS, L. y VALKO, P., *Contribution to the Graphical Analysis of the Sky Radiance and Angular Distribution of Global Irradiance*. American Solar Energy Society SOLAR'90, Texas (USA), pp.461-466, 1990.
- OLMO, F.J., VIDA, J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. y JIMENEZ, J.I., *Irradiancia Global y Radiancia del Cielo: un estudio gráfico*. VII Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica, San Fernando (Cádiz), pp.95, 1991.
-

- 
- PAGE, J.K., *The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40N-40S*. Proceedings of the U.N. Conference on New Sources of Energy. Conference Paper No. 35/5/98. Roma, 1961.
- PAGE, J.K., *The clear sky radiance model used as the basis for the CEC prediction process for estimating diffuse irradiance on inclined surfaces on clear days*. Solar Energy R&D in the European Community. Serie F. Vol.3. Prediction of Solar Radiation on Inclined Surfaces. Capítulo 3, Parte II. University of Scheffield, U.K.. Reidel Pub. Co. Dordrecht, 1986.
- PALZ, W., European Solar Radioation Atlas. Commission of the European Communities. Vol.1,2. EUR 9344. Bruselas. 1984.
- PEREZ, R. y SEALS, R., *A new simplified version of the Perez Diffuse Irradiance Model for tilted surfaces*. Solar Energy, 39, pp.221-231, 1987.
- PEREZ, R., INEICHEN, P., SEALS, R., MICHALSKY, J. y STEWART, R., *Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance*, Solar Energy, 44, 5, pp.271-289, 1990.
- PEREZ, R., INEICHEN, P., MAXWELL, E., SEALS, R., y ZELENKA, A., *Dynamic models for hourly global-to-direct irradiance conversion*. Proceedings of ISES WORLD CONGRESS, Denver, Colorado, pp.951-956, 1991.
-

- 
- PEREZ, R., SEALS, R. y MICHALSKY, J., *All weather model for sky luminance distribution. Preliminary configuration and validation.* Solar Energy, 50, 3, pp.235-245, 1993.
- PERRAUDEU, M., *Luminance Models.* Proceedings CIBSE National Lighting Conference. Cambridge, UK, 1988.
- POKROWSKI, G.I., *Über einen scheinbarach Mie-Effekt ad seine mögliche Rolle in der Atmosphärenoptik.* Zeitschrift für Physik, 53, pp.67-71, 1929.
- ROSEN, M.A., HOOPER, F.C. y BRUNGER, A.P., *The Characterization and Modelling of the Diffuse Sky Radiance.* Proceedings INTERSOL '85, Pergamon Press, New York, Vol.4, pp.2503-2507, 1985.
- ROSEN, M.A., HOOPER, F.C. y BRUNGER, A.P., *The Characterization and Modelling of the Diffuse Radiance Distribution under Partly Cloudy Skies.* Solar Energy, 43, 5, pp.281-290, 1989.
- SAS, *Computer software system for data analysis.* SAS Institute Inc., Box 8000, Cary, NC, 25711 - USA.
- SCHRAMM, W., *Über die Verteilung des Lichtes in der Atmosphäre.* Schriften d. Naturw. Vereins f. Schl.-Holst., 12, 1, pp.81-129, 1901.
- SCHÜEPP, W., *Die Bestimmung der Komponenten der Atmosphärischen Trübung aus Aktinometermessungen.* Arch. Met. Geoph. Biokl., 257, 1948.
-

- 
- SELBY, J.E.A., KNEIZYS, F.X., CHETWYND, J.H. y McCLATCHEY, R.A., *Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 4*. Air Force Cambridge Labs, 1978.
- SIALA, F.M.F., *Stochastic Characterization and Modelling of the Shortwave Diffuse Sky Radiance*. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Toronto, 1988.
- SIALA, F.M.F. y HOOPER, F.C., *A Semi-Emprirical Model for the Directional Distribution of the Diffuse Sky Radiance*. Renewables - A Clean Energy Solution. Solar Energy Society of Can. Inc., Ottawa, pp.322-326, 1989.
- SIALA, F.M.F. y HOOPER, F.C., *A model for the directional distribution of the Diffuse Sky Radiance with an application to CPC collector*. *Solar Energy*, 44, 5, pp.291-296, 1990.
- SMIC *Study of Man's Impact on Climate*. MIT Press, 1971.
- SMITH, J. y RANSON, K., *Bidirectional reflectance literature survey*. ORI, Silver Spring, Md., 1979.
- STEVEN, M.D., *Standard Distributions of Clear Sky Radiance*. *Quaterly Journal of the Royal Met. Society.*, 103, pp.457-465, 1977a.
- STEVEN, M.D., *Angular distribution and interception of diffuse solar radiation*. Tesis Doctoral. Universidad de Nottingham, 1977b.
-

- 
- STEVEN, M.D. y UNSWORTH, M.H., *The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 105, 445, pp.593-602, 1979.
- SUITS, G.H., *The cause of azimuthal variations in directional reflectance of vegetation canopies*. Remote Sensing of Environment, 2, 175, 1972.
- TEMPS, R.C. y COULSON, K.L., *Solar Radiation upon Slopes of Different Orientations*. Solar Energy, 19, pp.178-184, 1977.
- THEKAEKARA, T., *Solar energy outside the earth's atmosphere*. Solar Energy, 14, 2, pp.109-127, 1973.
- THEKAEKARA, T., *Solar irradiance: Total and spectral and its possible variations*. Applied Optics, 15, pp.915-920, 1976.
- THOMALLA, E., KOPKE, P., MULLER, H. y QUENZEL, H., *Circumsolar radiation calculated for various atmospheric conditions*. Solar Energy, 30, 575, 1983.
- VALKO, P., *Vereinfachtes Auswerteverfahren für die Schüeppsche Methode zur Bestimmung der Atmosphärischen Trübung*. Arch. Met. Geoph. Biokl., B11, 1, Heft, 1961.
- VALKO, P., *Some Empirical Properties of Solar Radiation and Related Parameters*. IEA TASK-IV/1 Handook An Introduction to Meteorological Measurements and Data Handling for Solar Energy Applications, Capítulo 8, pp.8.1-8.46, 1980.
-

- 
- VALKO, P., y HEIMO, A., *Swiss Mobile Solar Radiation Research System*. IEA TASK-IV/1 Handbook Validation of the Guidelines for Portable Meteorological Instrument Packages, Capítulo 4, pp.20-27, 1980.
- VALKO, P., *Empirical Study of the Angular Distribution of Sky Radiance and of Ground Reflected Radiation Fluxes*. Reports No 1-3 within Project F of the CEC Solar Energy R&D Programme, 1981-1982.
- VALKO, P., *Empirical Study of the Angular Distribution of Sky Radiance and of Ground Reflected Radiation Fluxes*. Solar World Congress, 4, pp.2183-2188, 1983.
- VALKO, P., *Empirical Study of the Angular Distribution of Sky Radiance and of Ground Reflected Radiation Fluxes*. Report No 4 within Project F of the CEC Solar Energy R&D Programme, 1984.
- VALKO, P., *Angular Distribution of Sky Radiance and Diffuse Irradiance on Inclined Surface*. Course on Physical Climatology for Solar and Wind Energy. 21 April-May, Trieste, Italy, 1986a.
- VALKO, P., *The Observed Radiance Distribution of Cloudless Skies and the Prediction of the Associated Components of the Diffuse Irradiance on Inclined Planes*. Solar Energy R&D in the European Community. Serie F. Vol.3. Prediction of Solar Radiation on Inclined Surfaces. Capítulo 3, Parte I, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1986b.
-

- 
- VALKO, P., *The Observed Radiance Distribution of Cloudless Skies and the Prediction of the Associated Components of the Diffuse Irradiance on Inclined Planes*. Swiss Meteor. Institute. Zürich, 1987a.
- VALKO, P., *Angular Distribution of Sky Radiance and Diffuse Irradiance on Inclined Surfaces. Part II: Processing and Analysis of Data*. European Solar Microclimates. 5<sup>th</sup> Project Meeting. Status Report. Edinburgh 8-9 October, 1987b.
- VALKO, P., *Angular distribution of sky radiance and diffuse irradiance on inclined surfaces*. European Solar Microclimates. 6<sup>th</sup> Project Meeting. Progress Report for the period October 1987 - April 1988. Athens, 5-6 May, 1988.
- VALKO, P., MERLO, G., OLMO-REYES, F.J. y WILD, M., *Analysis of Sky Radiance and Slope Irradiance. Angular Distribution Measured at Different Sites in Europe*. European Solar Microclimates. Final Report. Swiss Meteorological Institute, 1989a.
- VALKO, P. y MERLO, G., *Joint Analysis of Simultaneous Sky Radiance and Slope Irradiance Measurements from Different Sites in Europe*. Symposium Daylight and Solar Radiation Measurement, 9-11 October. Technische Universität Berlin (West). Germany, 1989b.
- VALKO, P. *Daylight-Related Analysis of a Ground-Based Full View Angle Sky Imagery*. Project. Swiss Meteorological Institute. Zürich, 1989.
-

- VALKO, P., *The Observed Radiance Distribution of Cloudless Skies and the Prediction of the Associated Components of the Diffuse Irradiance on Inclined Planes*. Swiss Meteorol. Institute, Zürich, 1990.
- Van DEVENTER, E.N. y JOUBERT, G.R., *An Automatic Sky Scanning Radiometer for Measuring the Distribution of Radiation from the Sky and Interpretation of the Measurements*. Proc. 3rd International Biometeor. Congress, Pergamon Press, pp.730-734, 1966.
- VIDA, J., OLMO, F.J. y ALADOS-ARBOLEDAS, L., *The influence of clouds on diffuse irradiance calculations*. Proceedings, INTERNATIONAL RADIATION SYMPOSIUM (IRS'92), Estonia. A. Deepak Publishing, pp. 259-263, 1992.
- VIDA, J., FOYO-MORENO, I. y ALADOS-ARBOELDAS, L. *Contribución a la caracterización radiométrica de Sierra Nevada*. Iª Conferencia Internacional Sierra Nevada. Vol. 1, pp.125-142, 1996.
- WALSH, J.W., The Science of Daylight. MacDonald, London, 1961.
- WALTHALL, C.L., NORMAN, J.M., WELLES, J.M., CAMPBELL, G. y BLAD, B.L., *Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and base soil surfaces*. Applied Optics, 24, 3, pp.383-387, 1985.
- WATERMAN, P.C., *Matrix-exponential description of radiative transfer*. Journal of the Optical Society of America, 71, 4, pp.410-422, 1981.

- WELLER, G., *Radiation Fluxes Over an Antartic Ice Surface, Mawson 1961-62. ANARE Report, Ser. A (IV), Glaciology, No.96, 1967.*
- WILMOTT, C.J., *On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors. Solar Energy, 28, pp.205-216, 1982.*
- WMO, Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source, Technical Note No. 172, pp.161-165, 1981.
- WON, T.K. *Model Validation Methods. IEA TASK-V Handbook Hanbook of methods of estimating solar radiation, Capítulo 3, pp.32-41, 1984.*

## NOMENCLATURA

La nomenclatura de las variables y constantes empleadas en la descripción de los modelos de radiancia, capítulo 6 de esta memoria, pueden llegar a coincidir en algunos casos. Sería muy extenso detallar el significado concreto para cada modelo, por lo que habrá que tener en cuenta su descripción y significado en cada momento. El resto de las variables y constantes que se han utilizado son comunes durante toda la memoria y la nomenclatura empleada para ellas es la siguiente:

$Gh_o$	. . . . .	Irradiancia Global Extraterrestre sobre superficie horizontal ( $W/m^2$ )
$Gh$	. . . . .	Irradiancia Global sobre superficie horizontal ( $W/m^2$ )
$Dh$	. . . . .	Irradiancia Difusa sobre superficie horizontal ( $W/m^2$ )
IHDI	. . . . .	Irradiancia Difusa Integrada sobre superficie horizontal ( $W/m^2$ )
Isc	. . . . .	Constante Solar ( $W/m^2$ )
$K_t$	. . . . .	Indice de Claridad ( $Gh/Gh_o$ )
$K_d$	. . . . .	Relación Difusa - Extraterrestre ( $Dh/Gh_o$ )
$K$	. . . . .	Fracción Difusa ( $Dh/Gh$ )
TL	. . . . .	Coefficiente de Turbiedad de Linke
$\gamma_o$	. . . . .	Altura Solar
$\phi_o$	. . . . .	Acimut solar. Sur=0
$\theta_o$	. . . . .	Angulo cenital solar
$\gamma$	. . . . .	Elevación de un punto del cielo
$\phi$	. . . . .	Acimut de un punto del cielo. Sur=0
$\theta$	. . . . .	Angulo cenital de un punto del cielo
$\Psi$	. . . . .	Angulo de scattering
$\alpha_s$	. . . . .	Acimut relativo Sol-punto del cielo ( $ \phi - \phi_o $ )
L	. . . . .	Radiancia ( $W/m^2sr$ )
Rad	. . . . .	Radiancia ( $W/m^2sr$ )
Lz	. . . . .	Radiancia en el cenit ( $W/m^2sr$ )
L/Lz	. . . . .	Radiancia normalizada a la del cenit
L/IHDI	. . . . .	Radiancia normalizada a la difusa integrada ( $sr^{-1}$ )
L/Dh	. . . . .	Radiancia normalizada a la difusa medida ( $sr^{-1}$ )
L/Isc	. . . . .	Radiancia normalizada a la constante solar