

UNIVERSIDAD DE GRANADA
Facultad de CienciasFecha 13/9/99ENTRADA NUM. 3081**Tesis Doctoral****Características espectrales y
colorimétricas de la luz-día
y luz-cielo en Granada****Departamento de Óptica
Facultad de Ciencias
Universidad de Granada****Javier Hernández Andrés****Septiembre 1999**

01255442

CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES Y COLORIMÉTRICAS
DE LA LUZ-DÍA Y LUZ-CIELO EN GRANADA

por
JAVIER HERNÁNDEZ ANDRÉS

Visado en Granada,
a 2 de Septiembre de 1999

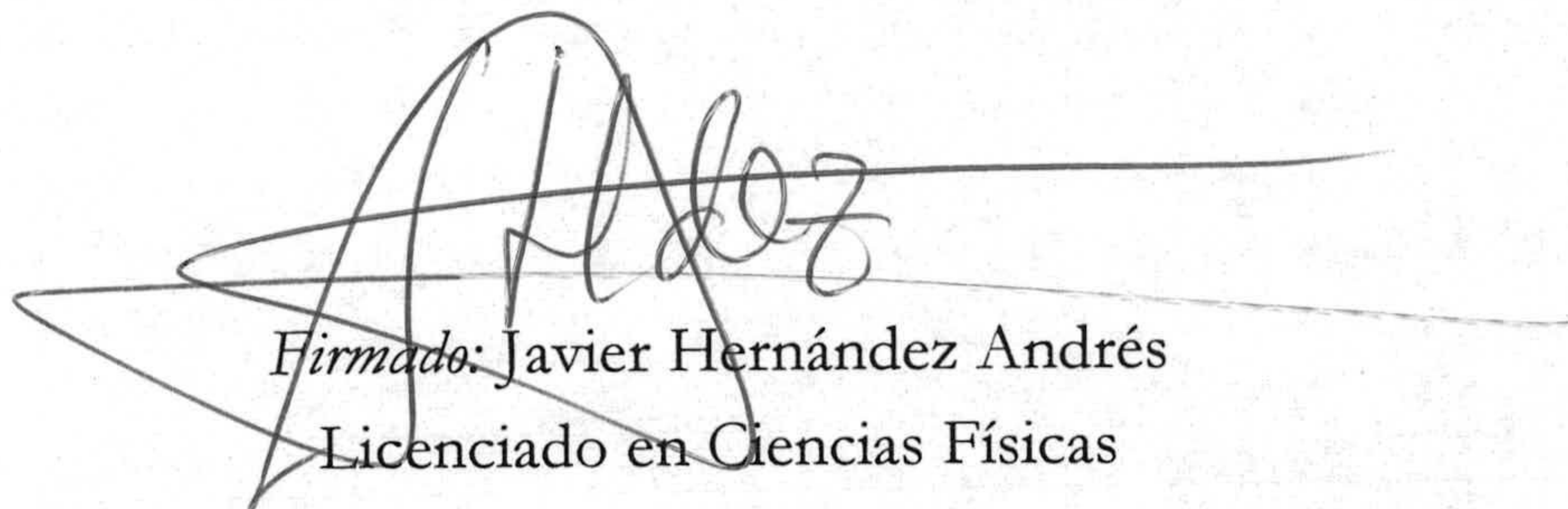
DIRECTOR DE LA TESIS



Firmado:

Dr. D. Fco. Javier Romero Mora.
Catedrático de Óptica de la Universidad de Granada

Memoria presentada para optar al grado de
DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS



Firmado: Javier Hernández Andrés
Licenciado en Ciencias Físicas

Quisiera hacer pública en estas líneas mi gratitud hacia un grupo de personas sin las cuales la realización de esta Tesis hubiera sido una tarea harto ímproba.

En primer lugar debo agradecer al director de esta Tesis (Dr. Javier Romero Mora) por su dirección científica, sus acertadas sugerencias y su constante estímulo y apoyo a lo largo de su elaboración.

A los doctores Enrique Hita Villaverde y Luis Jiménez del Barco Jaldo por haber confiado en mí concediéndome la oportunidad de iniciarme en el Departamento de Óptica.

A mis amigos y compañeros de despacho Antonio y José Ramón (Drs. García-Beltrán y Jiménez Cuesta, respectivamente) por su inestimable ayuda, por el trato personal que me han dispensado y por el hecho de compartir a diario penas y alegrías. También porque han tenido que soportarme en un minúsculo despacho durante mucho tiempo.

A otros amigos y compañeros de departamento (no hace falta que los/las nombre pues ellos/ellas saben quién son) que han hecho bien grata la convivencia diaria. A estas mismas personas quiero agradecerles su siempre presta ayuda cuando la he necesitado (ino han sido pocas!).

Al Dr. Raymond L. Lee Jr. por sus acertados comentarios, sugerencias e ideas durante estos dos últimos años en los que también he contado con su amistad.

A los Drs. Francisco J. Olmo Reyes y Lucas Alados Arboleya por las reseñas, indicaciones y aclaraciones que amablemente han tenido a bien suministrarme. Por supuesto no debo olvidarme de Carmen Sánchez Oliveros con la que he compartido las prolongadas jornadas de medidas experimentales que se detallarán posteriormente.

Al Dr. Joaquín Campos Acosta por su ayuda en la tarea bibliográfica.

A las asesoras literarias de esta Memoria: María Sánchez Arana y María Ángeles Díaz Martínez por sus sugerencias. La ciencia y la literatura no tienen por que estar reñidas: de hecho casi siempre hay algo intrínsecamente poético en la ciencia.

A mi familia así como a mis amigos y amigas (destacando por razones obvias a Pilar) les agradezco su apoyo y palabras de ánimo durante este periodo de tiempo.

Finalmente a mis padres, a los que dedico este trabajo. No es fácil expresar con palabras la profunda admiración que hacia ellos siento: cualquier elogio que incluya aquí es insignificante frente a los que se merecen como padres, educadores y personas.

«Medir es conocer»

Ernst Werner von Siemens (1816-1892)

*A mis padres.
Ellos sí que son mis ídolos.*

Índice

"Salve, oh ciudad en donde el alba nace y
donde el sol poniente se reclina,
donde la niebla en perlas se deshace
y las perlas en plata cristalina"
Primera impresión de Granada, José de Zorrilla

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1: FUNDAMENTOS Y OBJETIVOS	5
1.1. Aplicaciones de la luz natural	5
1.2. Ambigüedad del término "luz-día"	6
1.3. La luz-día en la literatura científica	8
1.4. El Sol como fuente de radiación	10
1.5. La atmósfera terrestre: absorción y esparcimiento	11
1.6. Colores en la atmósfera	14
1.7. Objetivos generales	15
1.7.A. Medidas de luz-día durante dos años	16
1.7.B. Medidas de luz-cielo en días despejados	18
1.7.C. Medidas de luz-día durante crepúsculos	20
Capítulo 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. Estudios de la luz-día desde 1960	23
2.2. Búsqueda de fuentes patrón	23
2.3. Estudios colorimétricos visuales en 1963	30
2.4. El trabajo de Judd, MacAdam y Wyszecki [1964]	32
2.5. Recomendaciones de la CIE	36
2.6. Trabajos posteriores a las recomendaciones de la CIE	38
2.7. Trabajos en los años 70	50
2.8. Trabajos más recientes	55

Capítulo 3: INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS	61
3.1. Elección del lugar de medida	61
3.2. Variables medidas experimentalmente	62
3.2.A. Medidas de luz-día	63
3.2.B. Medidas de luz-cielo en días despejados	66
3.2.C. Medidas de luz-día durante crepúsculos	67
3.3. Espectrorradiómetro utilizado	68
3.4. Calibración del espectrorradiómetro	70
3.5. Piranómetros	73
3.6. Obtención, almacenamiento y tratado de la información	74
3.7. Trayectoria solar	75
Capítulo 4: MEDIDAS DE LUZ-DÍA	79
4.1. Coordenadas de cromaticidad	80
4.2. Temperatura de color correlacionada (TCC)	85
4.3. Características fotométricas	98
4.4. Análisis de vectores propios y análisis de autovectores	103
4.4.A. Análisis de vectores propios	103
4.4.B. Análisis de autovectores	105
4.5. Evaluación de la similitud espectral	106
4.6. Vectores propios y autovectores de Granada	106
4.7. Curvas de luz-día estándar	111
4.8. Calidad de las reconstrucciones	116
4.9. Contenido de UV	120
Capítulo 5: MEDIDAS DE LUZ-CIELO	125
5.1. Coordenadas de cromaticidad	125
5.2. Temperatura de color correlacionada (TCC)	127
5.3. Posición sobre la bóveda celeste	129
5.4. Ángulo de esparcimiento (<i>scattering angle</i>)	136
5.5. Características fotométricas	143
5.6. Análisis de autovectores	144
5.7. Curvas de luz-cielo estándar	147
5.8. Calidad de las reconstrucciones	148

Capítulo 6: MEDIDAS DE LUZ-DÍA EN CREPÚSCULOS	151
6.1. Coordenadas de cromaticidad	151
6.2. Temperatura de color correlacionada (TCC)	159
6.3. Evolución fotométrica	163
6.4. Análisis de autovectores	170
6.5. Curvas de luz-día crepuscular estándar	171
6.6. Calidad de las reconstrucciones	174
Capítulo 7: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	177
7.1. Coordenadas de cromaticidad	177
7.2. Temperatura de color correlacionada (TCC)	181
7.3. Análisis de autovectores	183
7.4. Curvas de luz natural estándar	190
7.5. Calidad de las reconstrucciones	197
7.6. Cálculo de la TCC a partir de las coordenadas x e y	200
APORTACIONES Y CONCLUSIONES	209
GLOSARIO	213
BIBLIOGRAFÍA	219

Introducción

“Desde hace años, mis ojos no se abren
a la luz –inolvidable luz- de Granada”

Granada en la literatura romántica española, Discurso de Melchor F. Almagro

La investigación desarrollada en el Departamento de Óptica de la Universidad de Granada, iniciada en los años 70, está enmarcada dentro del campo de la Visión del Color. Dentro de este amplio campo, los trabajos realizados en nuestro departamento han estado centrados tradicionalmente dentro de la Colorimetría Diferencial y el Metamerismo, evolucionando de forma natural hacia otros aspectos de la Colorimetría, tanto básica como aplicada, y de los Modelos de Visión del Color.

En los últimos años el estudio de las propiedades matemáticas de las funciones de reflectancia espectral y de los iluminantes ha ido creciendo en interés. Este auge se debe principalmente al planteamiento y desarrollo de algoritmos que permiten la identificación y reconocimiento de color en el ámbito de la Visión Artificial, así como a la aproximación y estudio de una serie de fenómenos de adaptación cromática (en concreto el fenómeno de constancia del color) que verifica en mayor o menor medida el sistema visual humano.

Un conocimiento completo de las características de las curvas de reflectancia y de iluminantes permitiría una mejor adecuación de algoritmos y estructuras matemáticas al procesado de la señal de color, tanto en un dispositivo artificial como para el sistema visual humano.

En la Memoria de Licenciatura del doctorando, defendida hace cuatro años, se llevó a cabo un estudio sobre uno de los pilares fundamentales del entramado matemático propio de las funciones espectrales de la luz natural y luz artificial que iluminan los objetos que nos rodean: la generación de una representación idónea de estas distribuciones, buscando la funcionalidad de la misma frente a la implementación real de un algoritmo de análisis de color.

En dicha Memoria de Licenciatura apuntamos la necesidad de utilizar siete vectores de una base, compuesta por medidas experimentales de luz natural y luz

artificial, para poder representar y reconstruir curvas espectrales de iluminantes naturales y artificiales. Existe, por tanto, la posibilidad de obtener bases lineales con una dimensión baja (aunque superior a la recomendada por la CIE en el caso de tratar únicamente con luz natural) cuando el conjunto de iluminantes (naturales y artificiales) representado presenta una cierta variabilidad en su perfil espectral. Los resultados de dicha Memoria fueron publicados en el *Journal of the Optical Society of America A* (Romero J., García-Beltrán A., Hernández-Andrés J. [1997]).

Una de las conclusiones de nuestro trabajo se refería a la necesidad de iniciar futuras investigaciones entre distintos grupos de distintos países, en las que el abanico de medidas experimentales de luz natural se ampliase considerablemente, pues las medidas existentes en la literatura adolecen de cierta falta de continuidad y sus frecuencias temporales no son, asimismo, adecuadas para poder llegar a conclusiones que den generalidad.

En añadidura la CIE (Comisión Internacional de la Iluminación) está considerando una posible redefinición de las distribuciones espectrales de los iluminantes estándar de luz-día: el comité CIE TC 2-33 "*Re-formulation of CIE Standard Illuminants A and D65*" está preparando una nueva edición del CIE Standard S001-1986 (ahora ISO/CIE 10526).

Todos estos hechos y comentarios provocaron, hace cuatro años, que en nuestro Departamento se planteara la conveniencia e idoneidad de llevar a cabo una Tesis Doctoral en este campo, continuando y completando la Memoria de Licenciatura del doctorando antes mencionada. La adquisición, a cargo del proyecto de infraestructura IN94-0563, financiado por la C.I.C.Y.T., de un espectrorradiómetro de campo, fue el último acicate en la larga lista de apoyos y empujes que han motivado la realización de esta Memoria de Doctorado que aquí presentamos.

Recientemente Schanda [1999], durante el V Congreso Nacional de Color y dentro de su comunicación invitada titulada "*Assessing light source quality*" ha puesto de manifestó la necesidad, previamente apuntada en nuestro departamento, de realizar nuevas redefiniciones del cálculo de las fases de luz-día, así como una continuación de la investigación experimental en este campo.

En esta Memoria de Doctorado hemos tratado de subsanar las deficiencias que presentan los trabajos publicados en la literatura, que serán citados en un capítulo posterior; para ello hemos llevado a cabo tres campañas de medidas experimentales que nos permitirán caracterizar espectral y colorimétricamente tres distintos tipos de luz natural recibida en Granada.

En el primer capítulo de esta memoria, titulado *Fundamentos y Objetivos*, presentamos una breve revisión de las principales características de la radiación que recibimos sobre la superficie terrestre, centrándonos en la emisión de radiación en el Sol, y en las interacciones que sufre ésta antes de llegar a la superficie terrestre (absorción y esparcimiento). Hacemos hincapié, asimismo, en la necesidad de poseer un conocimiento preciso de las distribuciones espectrales de luz natural, y por ende de sus características colorimétricas, desde el punto de vista científico y técnico. En este mismo capítulo exponemos y justificamos, de forma pormenorizada, los objetivos iniciales de esta memoria.

Proseguimos con el capítulo *Revisión Bibliográfica* dedicado a presentar los trabajos realizados hasta la fecha y que están estrechamente relacionados con nuestros objetivos planteados. Destacamos, y por tanto describimos con mayor detalle, aquellos cuya relevancia sea manifiesta.

El análisis pormenorizado de estos trabajos nos permitió diseñar, de antemano, las campañas de medidas tal y como hemos descrito en el tercer capítulo (*Instrumentación y Medidas*), en donde hemos detallado el aparato de medida, el lugar escogido para realizar las medidas y las especificaciones de las tres campañas llevadas a cabo.

Al haber efectuado tres campañas de medidas bien distintas hemos separado en tres capítulos diferentes el análisis de los resultados correspondientes a cada una de ellas. Así el capítulo 4 se ha dedicado al análisis de las *medidas de luz-día*, el capítulo 5 al estudio de las características de la campaña de *medidas de luz-cielo* y el capítulo 6 al análisis de la campaña de *medidas de luz-día durante crepúsculos*.

Posteriormente en el capítulo 7 (*Discusión de resultados*) hemos compendiado los resultados encontrados en los capítulos 4, 5 y 6, realizando una discusión más profunda sobre alguno de ellos, incluyendo un análisis global sobre el conjunto de medidas total.

Finalizamos esta memoria con las *Aportaciones y Conclusiones*, donde quedan enumerados los logros alcanzados en este trabajo, y un *Glosario* de términos, conceptos y definiciones, con el fin de facilitar la lectura y comprensión de esta memoria.

Por último la *Bibliografía* incluye una lista completa con todos los trabajos aludidos a lo largo de la memoria, ordenados por orden alfabético del primer autor.

Capítulo 1:

Fundamentos y Objetivos

“Ni de la luz ni del cielo de Granada se puede formar una idea quien no haya visitado esta tierra es una luz templada y reflejada por la sierra que como ha dicho Gutiérrez Jiménez ensancha extraordinariamente la línea del horizonte ... y descompone la luz en colores tan variados como no la puede soñar la imaginación del artista”
El país de los sueños, P. Ventura

1.1. Aplicaciones de la luz natural

La fuente natural de energía radiante más importante para nosotros es el Sol. La luz del Sol directa -la que llega sin cambio en la dirección- y la luz del Sol esparcida, mediante diversos mecanismos en la atmósfera, son las posibles componentes de la luz-día (*daylight* en la literatura anglosajona, Henderson [1970]).

La luz-día como radiación es única en varios sentidos: es gratis, abundante, altamente variable, y sobre todo es *natural*. Es asimismo la radiación bajo la cual la raza humana ha evolucionado y es totalmente fundamental para nuestras vidas: no podríamos imaginarnos nuestra vida cotidiana sin esta fuente de energía esencial (Tarrant [1968]).

En las últimas décadas ha cobrado una gran importancia, desde el punto de vista científico y técnico, el estudio de las distribuciones espectrales de la radiación que recibimos del Sol y los datos fotométricos y colorimétricos que se derivan de éstas. Esta importancia se manifiesta en el reciente interés que ha surgido en numerosos campos de la investigación, tales como la meteorología, agricultura, biología, medicina, energías renovables, etc. (Liou [1980], Iqbal [1983]).

Algo similar está ocurriendo en distintos sectores industriales como los relacionados con la fotografía, los tintes, las pinturas, los textiles, con la intención de desarrollar y optimizar los productos que comercializan. En este tipo de industrias es útil conocer las características espectralradiométricas de la luz-día en relación con el color, las propiedades de su reproducción y la estabilidad colorimétrica de los colorantes.

Es fundamental poseer un conocimiento preciso y exhaustivo de las distribuciones espectrales de la luz natural recibida en la Tierra, así como el de sus coordenadas de

cromaticidad asociadas para distintas condiciones atmosféricas y en diferentes regiones geográficas. Este conocimiento se hace imprescindible además en distintas regiones del espectro como en el visible y ultravioleta para, por ejemplo, estudiar el crecimiento de las plantas, el comportamiento de los animales, en investigaciones médicas sobre el cáncer de piel, en investigación de materiales, etc. (Winch *et al.* [1966]).

En aplicaciones fotovoltaicas y de biomasa (fuentes renovables de energía), la cantidad de energía producida es proporcional a la energía solar disponible en determinadas bandas de longitud de onda. Asimismo la degradación de materiales y las propiedades ópticas que éstos presentan son fenómenos que dependen de la longitud de onda.

También en los estudios sobre el clima se necesitan conocer las distribuciones espaciales, temporales y espectrales de la radiación solar ya que afectan al balance de radiación sobre la superficie de la Tierra. Los distintos procesos que sufre la radiación solar en su paso a través de la atmósfera de la Tierra y en su superficie condicionan estas distribuciones, y por tanto el balance, afectando a los mecanismos que controlan el clima a nivel global.

Asimismo las investigaciones científicas sobre los efectos de la radiación solar sobre el hombre necesitan conocer la cantidad de energía que recibimos en la región ultravioleta, visible e infrarroja. A estas razones hay que sumar la importancia que posee para los ingenieros en iluminación. Esto se debe a dos causas: en primer lugar, muchos materiales coloreados contienen algún agente fluorescente que convierte la energía ultravioleta de la luz-día en radiación visible (Gates [1966], Tarrant [1968]). Cuando se llevan a cabo igualaciones de color o procesos de evaluación del color en tales materiales es importante que el iluminante usado represente el perfil espectral de la radiación solar razonablemente bien. En segundo lugar, la actual tendencia a hacer crecer determinados tipos de plantas bajo ambientes totalmente artificiales ha llevado consigo el diseño de instalaciones de luz que *imitan* la luz diurna natural.

1.2. Ambigüedad del término “luz-día”

Cuando estudiamos la radiación solar que recibimos en la superficie terrestre hemos de distinguir sus componentes. De hecho, la utilización de un solo término en la literatura científica (*daylight*) para referirse a la radiación natural que ilumina la superficie terrestre, y que es debida a luz solar directa y la esparcida por la atmósfera, lleva necesariamente a equívocos, pudiendo producir confusión (Wyszecki y Stiles

[1982], Lee [1994a]). Bajo este amplio término se han englobado en la literatura los siguientes tipos de medidas de la radiación que llega a la superficie terrestre (Henderson [1970]):

- radiación solar directa: la que llega sin cambio en la dirección.
- radiación solar esparcida por la atmósfera procedente de una región de la bóveda celeste sin incluir la radiación solar directa.
- radiación solar esparcida por la atmósfera procedente de una región de la bóveda celeste incluyendo la radiación solar directa.
- radiación solar esparcida por la atmósfera procedente de toda la bóveda celeste sin incluir la radiación solar directa.
- radiación solar esparcida por la atmósfera procedente de toda la bóveda celeste incluyendo la radiación solar directa.

Se hace, pues, necesario precisar adecuadamente qué tipo de medidas se llevan a cabo y por tanto evitar posibles ulteriores confusiones en la interpretación de resultados, como las que se producen al leer algunos artículos publicados en la literatura (detallados en el próximo capítulo). También hay que especificar qué tipo de magnitud radiométrica es la que se mide, discerniendo entre irradiancias y radiancias.

En esta memoria vamos a evitar la ambigüedad del término *daylight* denominando de la siguiente forma (y en castellano) a los 3 tipos de radiación básica:

- ⇒ luz-sol: radiación solar directa.
- ⇒ luz-cielo: radiación esparcida por la atmósfera.
- ⇒ luz-día: suma de la luz-sol y la luz-cielo.

Esta denominación que utilizaremos a lo largo de esta memoria es independiente del tipo de magnitud radiométrica medida: por ejemplo llamaremos luz-cielo cuando midamos únicamente radiación esparcida por la atmósfera, tanto si estamos midiendo radiancias o irradiancias.

Con esta denominación, que utilizaremos a partir de ahora, podemos afirmar que la luz-día es parte de la radiación electromagnética que procedente del Sol llega a la superficie de la Tierra, y que depende de las características de absorción y esparcimiento de la atmósfera terrestre (variables, selectivas y a menudo impredecibles) y de las características de las superficies adyacentes. Por tanto, dada una posición en la superficie terrestre, el perfil espectral de la luz-día que llega a la superficie de la Tierra depende del estado de la atmósfera (composición) y de la elevación solar (hora del día). Las condiciones atmosféricas varían tanto espacial como temporalmente, siendo a la vez importante el grado de contaminación.

1.3. La *luz-día* en la literatura científica

Si estamos interesados únicamente en el aspecto colorimétrico de la luz-día debemos analizar esta radiación en el espectro visible, limitando nuestro estudio a las longitudes de onda comprendidas entre 380 y 780 nm. Sin embargo este pequeño intervalo es inadecuado para muchos propósitos y por tanto es deseable incluir longitudes de onda más cortas (hasta los 280 nm) que llegan hasta la superficie terrestre. En la región infrarroja la radiación recibida en la Tierra no posee un límite en longitudes de onda tan definido, pero su interés en el uso y aplicaciones de la luz-día es, de momento, bastante escaso.

Cuando se habla de la distribución espectral de luz-día aparecen en la literatura cuatro formas bien distintas de abordar su estudio (Henderson [1970]):

1. El estudio del espectro de la radiación emitida por el Sol antes de penetrar en la atmósfera terrestre, importante en astrofísica.
2. La luz directa procedente del Sol y su estado cuando llega a la superficie terrestre y a distintas profundidades de penetración en la atmósfera.
3. El tercer tipo de espectro considerado en la literatura es el de la luz solar indirecta que ha sido esparcida por la atmósfera y llega hasta la superficie terrestre. Es el espectro más variable ya que nunca es uniforme sobre el cielo, y está sujeto a cambios atmosféricos que poseen efectos conocidos pero que son impredecibles en su incidencia y cantidad. La variabilidad en la cantidad y tipo de nubes es una de las fuentes más obvias en su incertidumbre.
4. El cuarto tipo de estudio es menos preciso, pero posee mayores aplicaciones prácticas. Se centra en el estudio de la distribución espectral de la radiación global (o suma de la luz directa procedente del Sol y luz esparcida por la atmósfera), recibida sobre una superficie horizontal en la superficie terrestre. Aunque el espectro de la radiación global esté sujeto a la suma de las variaciones que afectan a cada una de sus componentes, existe una cierta compensación, encontrándose una notable estabilidad en su composición espectral a pesar del gran número de factores que pueden modificar esta composición.

Los objetivos de los estudios que incluyen medidas experimentales de alguno de estos tipos de luz-día han cambiado desde sus comienzos. Inicialmente se centraban en determinar la constante solar y la temperatura efectiva del Sol (citar). Desde hace algunas décadas las medidas de las distribuciones espectrales se utilizan como fuentes de información meteorológica sobre ozono, vapor de agua, así como del balance de energías en la Tierra (Lenoble [1993]).

Estas medidas se han utilizado también como patrón para el diseño de fuentes artificiales de luz-día con fines tecnológicos. Se han propuesto distribuciones estándar (patrón) en el espectro visible con este propósito, siendo esencial la medida del color de la luz-día (Wyszecki y Stiles [1982]).

Asimismo la medida del espectro solar en montañas, desde aviones o cohetes para disminuir los efectos de la atmósfera terrestre, posee gran interés en física de la atmósfera y astrofísica. Desde el punto de vista teórico las medidas espectrales de luz-día se utilizan para estudiar las características radiativas de las moléculas y partículas en suspensión en la atmósfera (McCartney [1976]).

Sin embargo, y desgraciadamente, la mayoría de los trabajos existentes en la literatura en los que se analizan las características cromáticas de la luz-día son partes aisladas de información difíciles de relacionar entre sí (Henderson [1970]). Esto es debido, principalmente, a la ausencia de información sobre las condiciones meteorológicas existentes en el momento de realizar las medidas; esta ausencia tiene su origen en la dificultad de su obtención o bien en la imposibilidad de obtenerlas de forma cuantitativa. Dejando a un lado estas razones, a menudo no se ofrece información sobre otros factores que influyen en la composición espectral de la luz-día, como las relaciones geométricas entre el Sol y el aparato de medida, o la dirección de medida.

La región ultravioleta en el espectro de la luz-día ha recibido mucha atención en los trabajos publicados, a veces relacionándola cuantitativamente con el espectro visible, otras veces no. Sus variaciones, producidas por cambios en la absorción y esparcimiento en la atmósfera son más patentes que en el caso del espectro visible. Algunas de estas medidas han surgido por su importancia en terapias médicas.

Los aparatos utilizados en las medidas experimentales han cambiado desde los días en los que las emulsiones fotográficas, los espectrofotómetros visuales y los bolómetros (aparatos de medida de la radiación infrarroja) eran los únicos detectores sensibles en pequeñas regiones espectrales de energía (Henderson [1970]). Nuevos instrumentos de medida, más sensibles y estables, han sido diseñados para producir la máxima resolución posible. Particularmente importantes son las mejoras en la estabilidad y calibración de fuentes de luz de referencia. El almacenamiento y procesado automáticos, mediante ordenadores, de los datos ha supuesto un incremento en la velocidad de operación, contribuyendo a incrementar el número de medidas y, asimismo, ayudando a reducir los efectos, no deseables, de los cambios rápidos en la luz-día.

Los datos experimentales de luz-día están presentados en la bibliografía de cinco formas bien distintas, de las que las cuatro primeras están relacionadas con las distribuciones espectrales (Henderson [1970]).

1. El primer tipo presenta las distribuciones espectrales en forma de curvas o tablas. Las escalas suelen ser lineales en longitudes de onda, y lineales o logarítmicas en potencia (o energía).
2. La segunda forma de presentar los datos es a través de las coordenadas de cromaticidad, calculadas a partir de las distribuciones espectrales o mediante colorimetría visual. La información colorimétrica suele exponerse bien numéricamente o bien a través de diagramas cromáticos.
3. El tercer tipo consiste en dar como información colorimétrica una magnitud, calculada a partir de las coordenadas de cromaticidad, llamada *temperatura de color (TC)* o de forma más precisa *temperatura de color correlacionada (TCC)*.
4. El cuarto tipo está basado en el primer tipo, y consiste en tablas y curvas promedios que han llegado a convertirse en datos estándar debido a su uso continuo y, a veces, gracias a la ausencia de una posterior revisión de los datos.
5. El quinto tipo de presentación de resultados se expresa como la potencia total (o energía total) pero no en términos espectrales. Normalmente se refiere a la radiación solar o a la radiación global que incide sobre la superficie terrestre y a su variación diaria, mensual, anual, por estaciones del año, por lugares geográficos. Este tipo de información está ampliamente disponible en meteorología.

1.4. El Sol como fuente de radiación

A la distancia media a la que está situada la Tierra del Sol ($1,496 \cdot 10^8$ km), la cantidad de energía solar radiante que se recibe en el límite superior de la atmósfera terrestre por unidad de tiempo y por unidad de superficie es de $\sim 1,367$ kW/m² (Iqbal [1983]). A esta cantidad se la denomina *constante solar*, y su valor y su distribución espectral ha sido objeto de frecuentes estudios y revisiones para su precisa determinación (entre otros Thekaekara [1973]). A través de medidas directas se ha determinado que la iluminancia máxima sobre la superficie terrestre es de unos 131 klux, proporcionando una eficiencia luminosa de ~ 96 lm/W.

Prácticamente casi toda la radiación recibida en el tope de la atmósfera terrestre se origina en la superficie de la gran masa central del Sol, la fotosfera, que es la parte visible. Esta masa está compuesta principalmente de hidrógeno y la energía que se libera procede de reacciones de fusión nuclear. La temperatura de la superficie es de unos 6.000 K y la interior es de unos $40 \cdot 10^6$ K (Iqbal [1983]). Consecuentemente se origina un enorme número de reacciones nucleares que producen radiación luminosa. La radiación pasa después a través de dos capas de gases. Estos gases absorben la radiación en

determinadas longitudes de onda muy específicas produciendo en el perfil espectral unas líneas de absorción bien definidas (Gates [1966]).

Si comparamos las curvas espectral de la radiación solar recibida en el límite superior de la atmósfera terrestre y la del Cuerpo Negro con una temperatura en torno a 6.000 K observaremos una cierta semejanza entre ellas, tal y como se aprecia en la figura 1.1. Además se aprecia cómo la radiación del Sol está concentrada en la región visible del espectro. Así, por ejemplo, la emisión del Sol por debajo de los 200 nm sólo representa un 0,05% de su emisión total.

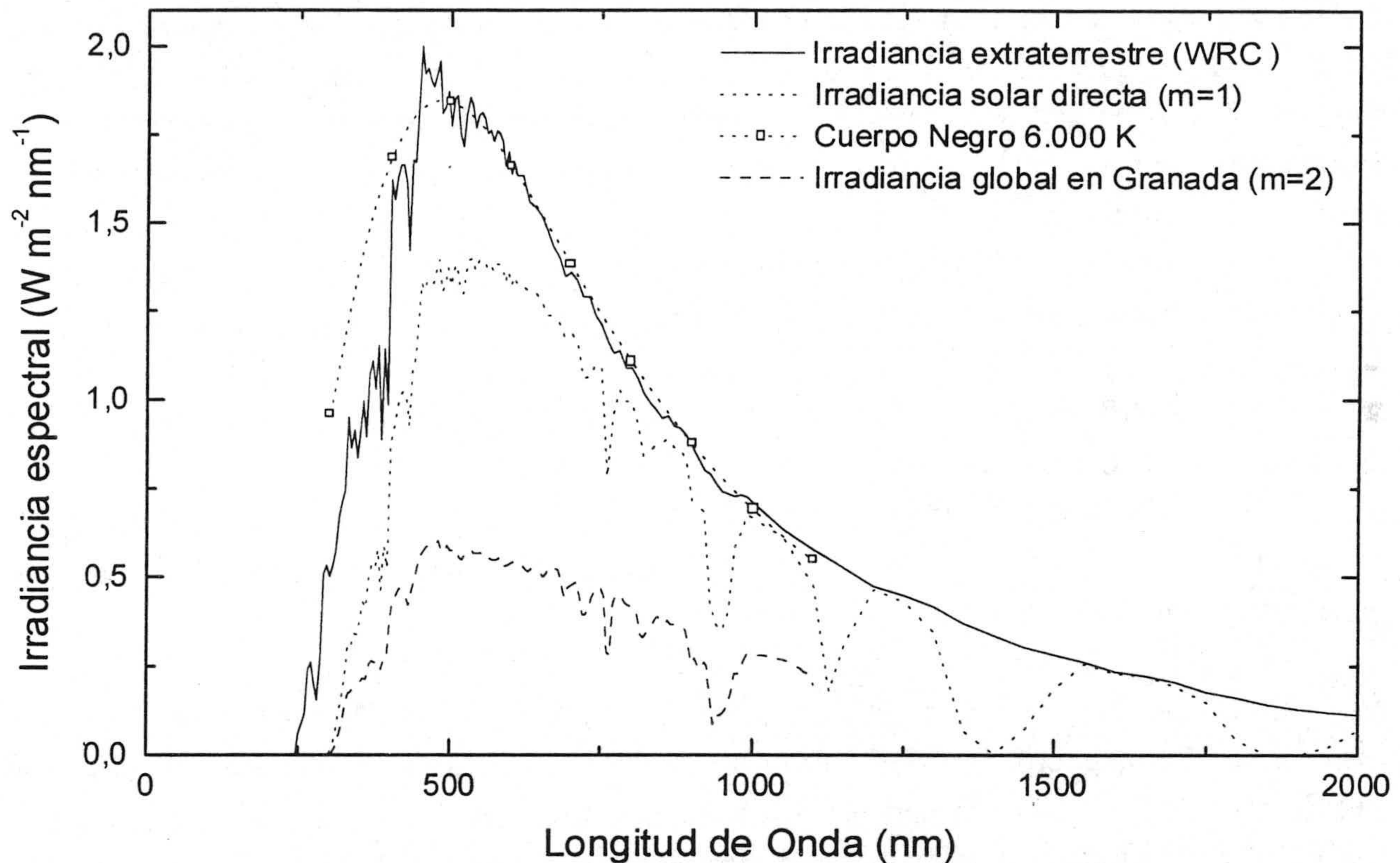


Figura 1. 1.- Comparación espectral de tres distribuciones espectrales: irradiancia fuera de la atmósfera terrestre suministrada por la WRC (World Radiation Center de Suiza, Iqbal [1983]), irradiancia solar directa sobre una superficie horizontal (masa óptica) (CIE [1989]), irradiancia global sobre la superficie terrestre (medida experimentalmente en Granada con elevación solar $\sim 30^\circ$ y cielo totalmente despejado). También hemos incluido la distribución espectral de un Cuerpo Negro a 6.000 K.

1.5. La atmósfera terrestre: absorción y esparcimiento

La atmósfera terrestre interacciona con la luz procedente del Sol, modificando su extensión, perfil y potencia espectral, debido a su composición, que bajo condiciones normales, consiste en una variedad de diferentes especies moleculares y concentraciones de partículas o aerosoles (McCartney [1976]).

La atmósfera terrestre estándar se extiende aproximadamente hasta los 100 km de altura sobre la superficie terrestre y está compuesta por una serie de gases que mantienen una proporción muy estable como N_2 , O_2 , Ar, CO_2 , Ne, CH_4 , Kr, H_2 y otros gases como H_2O , O_3 y HNO_3 , cuyas concentraciones relativas sí que varían con el tiempo o con el lugar geográfico. Debido a que estos gases poseen fuertes bandas de absorción dentro del espectro solar, ejercen una influencia variable en la radiación solar recibida.

De entre los gases permanentes destacan (por su concentración) el nitrógeno con un 78% y el oxígeno, con un 21%. Dentro de los gases variables el más abundante es el vapor de agua, que puede llegar a ser un 4% del total bajo condiciones de mucha humedad. En estos gases también se incluyen el ozono, el dióxido de carbono y otros. Todos estos constituyentes gaseosos forman la denominada atmósfera de Rayleigh, pero los siempre presentes aerosoles, nubes y otras partículas no gaseosas no se incluyen en ella. Más aún, el modelo de Rayleigh sólo tiene en cuenta los gases permanentes, aunque el vapor de agua no sea un componente despreciable.

Toda la radiación con longitudes de onda inferiores a 280 nm (excepto los rayos cósmicos) es absorbida por varios gases en la atmósfera terrestre. El oxígeno, por ejemplo, en su forma diatómica, absorbe fuertemente las radiaciones menores de 190 nm; por consiguiente tales radiaciones no se encuentran por debajo de unos 90 kilómetros sobre la superficie terrestre.

El ozono contenido en la atmósfera posee bandas de absorción en la región ultravioleta del espectro; posee una gran importancia ya que absorbe la radiación ultravioleta que queda (también absorbe en el visible), y limita de forma efectiva la longitud de onda más baja en la que recibimos radiación solar a 280 nm. Con esta acción de filtrado la atmósfera ha determinado los tipos de vida que se han desarrollado en la Tierra. Las variaciones en el contenido total de ozono en la atmósfera son continuas, existiendo cambios estacionales y latitudinales.

Aunque las absorciones debidas a ozono, dióxido de carbono, oxígeno molecular y vapor de agua son más efectivas en la región ultravioleta e infrarroja del espectro, también afectan, de forma más débil, a la composición espectral de la radiación que recibimos sobre la superficie terrestre en la región visible. De hecho los gases en la atmósfera baja (N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , CH_4 , y gases inertes) producen pequeñas absorciones en la banda 350 nm-800 nm. La longitud del camino óptico que recorre la luz antes de llegar a la tierra es bastante grande y esto origina que incluso dichas absorciones débiles produzcan un efecto considerable en las distribuciones espectrales de luz-día.

En el paso de la radiación solar a través de la atmósfera una buena cantidad de ésta se esparce debido a las moléculas de la atmósfera. Por esparcimiento (*scattering*) hay que entender al proceso mediante el cual toda partícula que intercepta el camino de una onda electromagnética extrae energía de la onda incidente y la reemite en todas las direcciones. Para que exista esparcimiento el índice de refracción de la partícula debe ser distinto del que posee el medio donde se encuentra, de modo que la partícula se constituya en una discontinuidad para la onda incidente.

Lord Rayleigh mostró que la proporción de radiación esparcida depende de la longitud de onda con λ^{-4} . Consecuentemente la radiación correspondiente a la región ultravioleta y a la región azul es más esparcida que la del rojo, y por tanto la luz solar directa aparece claramente amarillenta; cuando el camino atmosférico es muy grande, como ocurre al amanecer y al atardecer, el Sol aparece rojo.

El esparcimiento de Rayleigh o molecular se produce debido al nitrógeno, oxígeno y otros componentes moleculares de la atmósfera. Las partículas que producen este tipo de esparcimiento son pequeñas en tamaño comparadas con la longitud de onda de la radiación. El esparcimiento de Mie o de partículas grandes se debe a aerosoles, polvo, gotas de agua y otras partículas de diámetro comparable a la longitud de onda de la radiación (McCartney [1976]).

En una atmósfera despejada, los aerosoles (constituidos por polvo, neblina, polución, polen, esporas, y cualquier otro tipo de partículas en el aire) juegan un papel crucial a la hora de modificar la radiación solar que llega a la superficie terrestre, ya que esparcen fuertemente y absorben la radiación solar. La proporción relativa entre radiación esparcida-directa está principalmente controlada por los aerosoles. Los aerosoles –naturales o artificiales– varían geográfica y temporalmente y su tamaño y distribución de densidad varían considerablemente dependiendo de su origen.

Las nubes están compuestas de gotas de agua y cristales de hielo varias veces mayores que las longitudes de onda visibles. Cuando la luz las atraviesa sufre innumerables refracciones, actuando una nube como un material difusor muy efectivo. La luz procedente de las nubes es una mezcla de luz solar directa y luz-cielo que ha sufrido esparcimiento en la atmósfera.

De la luz procedente del Sol que sufre esparcimiento en la atmósfera, parte se pierde completamente porque sufre un cambio de dirección y sale fuera de la atmósfera, pero el resto llega hasta la superficie terrestre.

1.6. Colores en la atmósfera

La interacción de la atmósfera con la luz solar produce una gran cantidad de fenómenos tales como el color azul del cielo, los atardeceres rojizos, la absorción óptica en determinadas longitudes de onda debido a moléculas, el matiz verdoso muchas veces observado durante una fuerte tormenta de viento debido a la alta densidad de polvo y aerosoles en la atmósfera, etc (McCartney [1976]).

Existen sólo dos formas por las cuales lo que denominamos luz blanca se transforma, por interacción con la materia, en lo que denominamos luz coloreada: absorción y esparcimiento (Bohren [1987]). La absorción transforma la luz en otras formas de energía, mientras que el esparcimiento la redirecciona. Los colores aparecen cuando la absorción, el esparcimiento, o ambos, son selectivos: la luz no es absorbida y/o esparcida en todas las longitudes de onda por igual. Los colores observados dependen no sólo del espectro de absorción sino también de la longitud del camino que recorre la luz hasta llegar al observador (Bohren [1990]).

La explicación usual (o típica) de por qué el cielo es azul, que afirma que la luz azul es esparcida más que la luz roja por las moléculas atmosféricas, no es coherente con el hecho de que la luz violeta es esparcida incluso más que la luz azul, lo que, de acuerdo con los argumentos utilizados por los físicos, implica que el cielo debería ser violeta (Bohren y Dugney [1992]). Esto sucede si consideramos el color desde el punto de vista de un instrumento no humano, yendo tan lejos como para, a veces, identificar longitud de onda con color, incluso para longitudes de onda fuera del rango de la percepción. Aunque la luz violeta es, de hecho, esparcida por las moléculas más que la luz azul, el ojo humano es menos sensible al violeta que al azul.

Asimismo no es suficiente con decir que el cielo es azul: de hecho no es ni uniforme en color ni en luminosidad. Los azules más puros se encuentran *normalmente* cerca del cenit y hacia el horizonte el cielo se vuelve más blanco, asociándose casi siempre este fenómeno, de forma errónea, a la contaminación. En óptica atmosférica, la contaminación es la *solución universal* a la *ignorancia* (Bohren y Fraser [1985]).

La presencia de un mayor número de moléculas en la atmósfera produciría un cielo más luminoso, pero no más azul. Si la atmósfera fuese más espesa, el cielo sería más luminoso, pero no más azul. Un incremento de su luminosidad vendría necesariamente acompañado con una disminución de su pureza espectral (Bohren [1990]).

La presencia de partículas hace que el cielo sea más luminoso pero con menor pureza colorimétrica. Incluso en una atmósfera limpia (libre de aerosoles) el horizonte es

más luminoso y blanco que el cenit: las partículas sólo pueden intensificar una propiedad intrínseca de la atmósfera terrestre.

Podemos incrementar la presión atmosférica al nivel del mar (análogo a aumentar el número de moléculas en la atmósfera), o bien podemos realizar algo casi equivalente observando en diferentes direcciones (Bohren [1990]). La luz que un observador recibe, cuando mira en una dirección dada, es aquella que es esparcida por todas las moléculas y partículas que hay en su línea de observación. Cuanto mayor sea ésta, más luz recibirá. Pero la pureza de la luz no se incrementa de forma análoga; al contrario, disminuye. En cualquier elemento de volumen en la atmósfera, la componente de la luz-sol con longitudes de onda cortas tiene más probabilidad de ser esparcida hacia el observador que la componente con longitudes de onda largas. Pero las largas longitudes de onda tienen una probabilidad mayor de ser transmitidas hacia el observador sin ser esparcidas. Como consecuencia, la luz procedente de largos caminos posee un balance de color restablecido.

La variación del color del cielo es un ejemplo de las consecuencias del esparcimiento múltiple (Bohren y Fraser [1985], Bohren [1987]). El esparcimiento múltiple produce fenómenos observables que no pueden ser explicados mediante el esparcimiento simple. La blancura del cielo cerca del horizonte es sólo un ejemplo. Si tuviéramos que invocar únicamente la dependencia espectral del esparcimiento simple por moléculas, concluiríamos que el cielo es uniforme en color, contrariamente a lo observado.

En suma el color en la atmósfera es una consecuencia de los dos fenómenos que lo provocan: absorción y esparcimiento. La gran variedad de colores surge del gran número de roles que estos dos factores pueden jugar.

1.7. Objetivos generales

Hemos querido dejar claro en este capítulo la importancia de poseer un extenso y detallado conocimiento de las distribuciones espectrales de la luz natural recibida sobre la superficie terrestre. Extensos conjuntos de datos sobre la radiación solar están siendo publicados frecuentemente. Desgraciadamente estos no son completamente adecuados ya que no constituyen observaciones continuas y sobre todo no contienen información espectral de la radiación.

Veremos en el capítulo siguiente (*Revisión Bibliográfica*) cómo los trabajos relacionados con las características colorimétricas de la luz-día adolecen de una continuidad, tal y como apuntamos en la *Introducción*, y sus frecuencias temporales no son adecuadas para poder llegar a conclusiones que den generalidad.

Algunas medidas espectrales de luz-día, obtenidas en Granada y analizadas en la Memoria de Licenciatura del doctorando, nos indicaban la existencia de ciertas discrepancias entre nuestros resultados y las de los trabajos existentes en la literatura. Para confirmarlas o desecharlas es necesario ampliar nuestro conjunto de medidas.

A diferencia de lo realizado en la mayoría de los trabajos publicados en la literatura (que detallamos en el próximo capítulo), creemos esencial no mezclar distintos tipos de medidas, ya que esto puede producir el enmascaramiento de resultados y confusión en las conclusiones. Debemos reseñar que en España no se realizó, hasta la fecha, ningún trabajo en el que se caracterice, a través de medidas experimentales, la luz natural recibida sobre la superficie terrestre.

Asimismo, en esta Memoria de Doctorado hemos tratado de subsanar las deficiencias que presentan los trabajos publicados en la literatura, llevando a cabo tres campañas de medidas experimentales que nos permitirán caracterizar espectral y colorimétricamente tres tipos bien distintos de luz natural recibida en Granada, cuyos objetivos describimos a continuación.

1.7.A. Objetivos de la 1ª campaña: medidas de luz-día durante dos años

Como hemos visto, los principales factores que determinan la distribución espectral de la luz-día son los procesos de producción de luz en el Sol, los procesos de absorción que tienen lugar en las capas externas del sol, la absorción y esparcimiento en las capas altas de la atmósfera terrestre. Los efectos de las capas bajas de la atmósfera son totalmente locales y altamente variables, lo que produce que los perfiles espectrales de luz-día varíen rápidamente. Por eso una única curva espectral de luz-día no puede representar las distribuciones espectrales de luz-día en todo el mundo.

Medir el espectro de la luz-día en la superficie terrestre no es complicado. El principal problema estriba en la ya mencionada extrema variabilidad; en cierto modo la luz-día tiene cierta similitud con la climatología, ya que, de hecho, depende de alguna de las mismas variables. En ambos casos, existen muchos factores que los determinan, y estos factores pueden aparecer en infinitas y variadas combinaciones. El espectro de la

luz-día posee además la complicación añadida de estar compuesto por dos tipos de luz bien distintos: la luz solar directa y la luz esparcida por la atmósfera. Una de las consecuencias de esta complejidad es que realizar determinaciones experimentales aleatorias del espectro de la luz-día es incompatible con la elaboración de comparaciones o clasificaciones.

Asimismo el cálculo de las irradiancias espectrales con la ayuda de rigurosos modelos de transferencia radiativa en la atmósfera es complicado y lento cuando nos alejamos de condiciones simples, y por tanto no es muy apropiado a la hora de calcular numerosas distribuciones espectrales para una variedad de conjuntos de parámetros atmosféricos.

El término “luz-día promedio” ha sido muy utilizado en el pasado, pero con poca justificación cuando se aplica a medidas experimentales del espectro. Las campañas de medidas realizadas, y descritas en el capítulo dedicado a la *Revisión Bibliográfica*, pocas veces han sido realizadas de forma sistemática durante todo el día y nunca, de esta forma, durante un periodo de tiempo suficientemente extenso.

Por tanto, para poder caracterizar espectralmente y colorimétricamente la luz-día bajo cualquier tipo de condición atmosférica se hace necesario medir experimentalmente de forma continua y sistemática durante un extenso periodo de tiempo. Así hemos actuado en esta primera campaña: durante dos años completos, y de forma sistemática (tres días en semana, una medida cada hora), hemos adquirido el conjunto de datos espectrorradiométricos de luz-día (irradiancia global espectral sobre una superficie horizontal) más extenso existente hasta la fecha en la literatura.

La medida de la luz-día, ya sea a horas del día en las que el Sol tiene una elevación alta sobre el horizonte, o bien en condiciones crepusculares presenta indudable interés desde el punto de vista del conocimiento del intercambio de energía en la atmósfera. En la primera campaña se llevaron a cabo medidas espectrorradiométricas en el rango de 300 a 1100 nm, cubriendo por tanto el UV próximo, visible e IR cercano, de la luz-día (irradiancia global) recibida sobre una superficie horizontal.

Entre otras aplicaciones, nuestras medidas constituyen una valiosa base de datos que permitirá la evaluación comparativa de los distintos contenidos relativos de UV y visible, lo que tiene implicaciones en el conocimiento del entorno, ahondado en el estudio del esparcimiento y absorción en la atmósfera por moléculas y aerosoles, así como en el estudio de la transferencia radiativa de energía en la atmósfera.

Analizaremos desde un punto de vista colorimétrico dichas medidas, comparando nuestros resultados con los publicados en la literatura. El hecho de haber medido de

forma sistemática, durante esta campaña, nos permitirá analizar la dependencia de las características colorimétricas de la luz-día con la elevación solar y con las condiciones atmosféricas. Asimismo examinaremos la influencia de la presencia de luz-sol en el color de la luz-día.

Desde un punto de vista fotométrico nuestras medidas nos mostrarán la existencia de una relación lineal casi perfecta entre la iluminancia y la irradiancia integrada, independientemente de las condiciones atmosféricas o la elevación solar.

Posteriormente analizaremos la correlación existente en las distribuciones espectrales medidas, realizando un análisis de vectores propios sobre ellas, y comparando los perfiles espectrales de dichos vectores con los publicados por otros autores. Utilizaremos el método propuesto por la CIE para reconstruir curvas espectrales a partir de sus coordenadas de cromaticidad (que describiremos detalladamente en próximos capítulos) y analizaremos la calidad de dichas reconstrucciones. Asimismo generaremos curvas estándar de luz-día a distintas temperaturas de color correlacionadas, que nos servirán para establecer una comparación con las adoptadas por la CIE y otras publicadas en la literatura.

Utilizando un método de reconstrucción de curvas más general, y distinto al de la CIE, estudiaremos la calidad de las reconstrucciones espectrales, haciendo uso de un coeficiente que evalúa similitud espectral entre curvas y que ha sido previamente utilizado en nuestro departamento: Romero *et al.* [1997], Hernández-Andrés *et al.* [1998]. El análisis de este coeficiente nos permitirá estimar la dimensionalidad de una base lineal que las represente.

1.7.B. Objetivos de la 2ª campaña: medidas de luz-cielo en días despejados

No sólo es importante disponer de un conocimiento detallado de la distribución espectral de luz natural sino también un conocimiento de su distribución angular. Así, por ejemplo, los estudios para la utilización de la energía solar a menudo requieren un conocimiento de la distribución angular de la radiación esparcida y procedente del cielo. La suposición más simple que se puede hacer es que la radiancia esparcida del cielo es isotrópica. Sin embargo, esto debe verse como una sobresimplificación porque incluso en cielos muy limpios poseen una componente circumsolar intensa (a 20° del Sol) que puede significar más del 10% de la radiación esparcida recibida en una superficie

horizontal. Sin embargo, existen pocas medidas detalladas de la distribución espacial, y a su vez espectral, de la luz-cielo.

El cálculo de la radiación esparcida en la atmósfera ha sido abordado por algunos investigadores. Estos intentos varían desde una solución directa de la ecuación de transferencia radiativa que describe la propagación de la energía solar a través de la atmósfera hasta procedimientos simplificados; esto entraña una dificultad enorme pues para calcular el esparcimiento y absorción de la radiación por aerosoles se debe conocer su distribución de tamaño, su concentración, distribución espacial y su índice de refracción complejo.

Hemos comprobado que no existen trabajos experimentales en los que se estudie el color del cielo con campos de visión pequeños; de hecho, en todos los trabajos que citaremos en esta Memoria de Doctorado (capítulo 2) y que se refieren al análisis colorimétrico de la luz-cielo, la región de la bóveda celeste de donde provenía la luz analizada era considerablemente extensa.

Teniendo en cuenta cómo se obtienen las coordenadas de cromaticidad de un estímulo que es suma a su vez de dos estímulos (sus coordenadas de cromaticidad se hallan sobre la línea recta que une las dos coordenadas de cromaticidad de los dos estímulos originales) es razonable suponer que si midiésemos luz-cielo procedente de regiones amplias del cielo (p.ej. cuadrantes, etc.) las coordenadas de cromaticidad caerían también dentro del área de coordenadas de cromaticidad correspondientes a las pequeñas regiones del cielo que componen el área extensa. Este razonamiento, sin embargo, no es recíproco.

Medir espectralmente la luz proveniente de regiones muy pequeñas del cielo posee otra ventaja añadida: nos permite examinar sus características colorimétricas en función de la posición de la región analizada sobre la bóveda celeste. De hecho catalogaremos cada región estudiada en función de la geometría respecto a la posición del Sol. Investigaremos la dependencia del color de la luz-cielo con el ángulo de esparcimiento (*scattering angle*) para cada punto medido.

Esta campaña de medidas de la luz-cielo fue únicamente realizada durante días con cielos despejados, pues la instrumentación utilizada y el tiempo empleado en la adquisición de cada conjunto de medidas hacían inviable la tarea en el caso de condiciones atmosféricas variables temporalmente. Se exigía pues cierta constancia temporal en las condiciones atmosféricas y éstas eran sólo satisfechas en días con cielos totalmente despejados. En el tercer capítulo de esta Memoria de Doctorado describiremos de forma pormenorizada la instrumentación utilizada y las medidas adquiridas.

Dado que restringimos esta campaña únicamente a días con cielos despejados no se hacía exigible que la duración temporal fuese tan extensa como la primera campaña: así limitamos ésta a medio año.

Sobre la bóveda celeste se eligieron 44 puntos, situados sobre 4 meridianos, sobre los que se realizaban las medidas. Se intentó que el rango de elevaciones solares fuese el más extenso: las medidas adquiridas abarcan elevaciones solares entre 0° y 67° .

Recapitulando: el principal propósito de esta segunda campaña fue medir distribuciones espectrales de radiancia (con campos de visión de 3°), procedente de un número extenso y bien repartido de puntos sobre la bóveda celeste, en días con cielos despejados para distintas elevaciones solares y descubrir la dependencia de las características colorimétricas con ciertas variables (elevación solar, posición sobre la bóveda, ángulo de esparcimiento, etc.).

Lo que distingue este conjunto de medidas del anterior no es sólo el tipo de radiación natural medida (luz-día en el primer caso y luz-cielo en el segundo). También se diferencian en el tipo de magnitud radiométrica analizada: si en la primera campaña medíamos irradiancia global sobre una superficie horizontal, en esta segunda campaña hemos medido radiancia, mediante un telescopio acoplado al espectrorradiómetro, procedente de una región pequeña de la bóveda celeste (campo de visión: 3°).

Desde el punto de vista del análisis de nuestras medidas actuaremos de forma similar a la primera campaña: examinaremos colorimétricamente dichas medidas, comparando con otros trabajos. Espectralmente analizaremos la correlación existente en las curvas de luz-cielo, llevando a cabo nuestro propio análisis de autovectores. Utilizaremos el método propuesto por la CIE para reconstruir curvas espectrales a partir de sus coordenadas de cromaticidad, examinando la calidad de estas reconstrucciones, y generando curvas estándar de luz-cielo a distintas temperaturas de color correlacionadas.

1.7.C. Objetivos de la 3ª campaña: medidas de luz-día durante crepúsculos

La finalidad de esta última campaña de medidas de la evolución temporal durante los crepúsculos de la iluminancia y cromaticidad, tanto para cielos despejados como para cielos cubiertos, se cimienta en completar y extender los datos existentes (con cuatro décadas de antigüedad). Además de poseer múltiples aplicaciones prácticas en iluminación al aire libre, nuestros datos serán muy útiles para una variedad de modelos

de transferencia radiativa atmosféricos ya que proporcionarán datos experimentales que servirán para comprobar la exactitud de dichos modelos.

Desde el punto de vista de la percepción visual durante los crepúsculos se producen una serie de fenómenos visuales asociados precisamente con los cambios rápidos en el color de la luz y en el nivel de iluminación (paso del nivel fotópico al mesópico).

Los dos objetivos científicos que nos motivaron a realizar esta última campaña de medidas fueron:

- (1) actualizar y mejorar nuestro conocimiento sobre la evolución temporal sobre una superficie horizontal de iluminancia bajo cielos despejados y cubiertos durante los crepúsculos (los últimos datos existentes en la bibliografía fueron publicados hace más de cuarenta años),
- (2) llevar a cabo un estudio sistemático de cómo las cromaticidades de la luz procedente de todo el cielo cambian durante crepúsculos con cielos despejados y cubiertos.

Además de elaborar el primer conjunto extenso de datos de iluminancias y cromaticidades crepusculares en varias décadas, nuestra investigación propuesta:

- (1) tiene consecuencias prácticas en la mejora del conocimiento de la iluminación y color al aire libre,
- (2) será de mucha utilidad para los modelos de transferencia radiativa atmosféricos.

Con la realización de esta campaña pretendemos estudiar algunas características abandonadas, durante décadas, sobre la estructura fotométrica y colorimétrica de los crepúsculos. El principal problema en este tipo de investigación radica en que los datos existentes sobre la evolución de la iluminancia durante crepúsculos poseen más de 45 años de antigüedad (ver el artículo de Brown [1952] y los comentarios de MacInnis *et al.* [1996] sobre la continua confianza en los datos de Brown) y, que la evolución temporal de la cromaticidad durante los crepúsculos no ha sido nunca medida con modernos espectrorradiómetros como los que disponemos en la actualidad. Por otra parte, el estudio de la evolución de la iluminancia y color en cielos cubiertos durante crepúsculos ha estado igualmente abandonado por los científicos desde los años 50 (Middleton [1954]). Los recientes algoritmos desarrollados (Janiczek y DeYoung [1987]) parten de la suposición realizada por Brown [1952] que asume que las curvas de iluminancia durante crepúsculos con cielos cubiertos son simples versiones más “*oscuras*” de las correspondientes a cielos despejados. Nuestros resultados mostrarán que esto no es del todo cierto.

El hecho de que la investigación reciente no se haya ocupado del estudio de la evolución del color e iluminancia durante crepúsculos no significa, en modo alguno, que su estudio no sea importante. El contraste umbral y la visión del color cambia rápidamente durante los crepúsculos, y profesiones que van desde la militar hasta la arquitectura, pasando por los ingenieros en iluminación, por poner varios ejemplos, se pueden beneficiar de un mayor y preciso conocimiento de cómo varía la iluminación al aire libre (ej. Navvab [1997], MacInnis *et al.* [1996]).

En la parte de adquisición de medidas de nuestro estudio, queremos medir la evolución de la iluminancia y cromaticidad de la irradiancia global recibida sobre una superficie horizontal en función de la elevación solar durante crepúsculos, tanto en cielos despejados como cubiertos. En un futuro inmediato, pero fuera de los objetivos de esta Memoria de Doctorado, pretendemos utilizar estos datos para comprobar varios modelos de transferencia radiativa, bien adoptando o bien modificando los algoritmos de otros autores.

Algunas medidas iniciales, adquiridas en la primera campaña, descrita anteriormente, sugieren las siguientes hipótesis de trabajo:

- (1) los colores e iluminancias crepusculares poseen mayor variabilidad (diaria y geográfica) que la hasta ahora asumida,
- (2) las curvas de iluminancia de crepúsculos con cielos cubiertos pueden ser mucho más complejas que las correspondientes a cielos despejados,
- (3) las curvas de cromaticidad en crepúsculos con cielos cubiertos difieren significativamente de las correspondientes a cielos despejados.

En esta tercera y última campaña hemos medido irradiancias espectrales sobre una superficie horizontal (incluyendo luz solar directa cuando el sol se halla por encima del horizonte) en intervalos de 30 segundos para elevaciones solares entre -5° y $+5^\circ$ durante crepúsculos con cielos despejados y cielos cubiertos. Este rango de elevaciones solares en cierto modo se solapa con la definición cotidiana de crepúsculo (elevaciones solares entre 0° y -6°), pero nosotros nos apartamos ligeramente de este convenio ya que:

- (1) la medida del color e iluminancia durante el período previo al atardecer y posterior al amanecer posee múltiples aplicaciones prácticas,
- (2) dependiendo de los niveles de iluminancia durante un crepúsculo en particular, nuestro espectrorradiómetro puede no ser lo suficientemente sensible para medir espectros cuando la elevación solar es menor de -5° .

Analizaremos colorimétricamente y espectralmente estas curvas de forma análoga a como lo hemos realizado en las dos campañas previas.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

“Allí es el cielo azul y transparente,
fresca la brisa, amiga la fortuna, fértil la tierra,
y brilla eternamente sereno el rojo sol, blanca la luna”
Granada, José Zorrilla

2.1. Estudios de la luz-día desde 1960

Comenzamos nuestra revisión bibliográfica en 1960, ya que es a partir de este año cuando se llevan a cabo un gran número de proyectos cuyo fin es medir el espectro de la luz-día en distintos lugares del mundo. Esto hizo posible empezar a disponer de una gran cantidad de información en el visible y en el ultravioleta cercano. Algunos de los trabajos pioneros (en la década de los 60) presentaban ya gran precisión y elaboración y tenían como propósito la estandarización con fines prácticos de distribuciones espectrales representativas de luz-día. Asimismo el estudio colorimétrico de la luz-cielo y luz-día acaparó la atención de buena parte de estos trabajos.

Previamente en 1951 el Comité de Colorimetría de la CIE recomendó a sus miembros “*investigar la distribución de energía más conveniente para ser adoptada como promedio de la luz-día natural*”. En 1955 las recomendaciones fueron tan sólo las de “*examinar la conveniencia de las fuentes de luz para reproducir la luz-día natural*”, y en 1959 este asunto ni siquiera fue mencionado en las recomendaciones.

2.2. Búsqueda de fuentes patrón

Por aquella época existía la queja generalizada de que las lámparas estándar (patrón), que representaban luz-día, poseían importantes limitaciones entre las cuales destacaba el bajo contenido ultravioleta e impedían que fueran una adecuada representación de la luz-día cuando se usaban en colorimetría de materiales fluorescentes. A esta queja se le añadía el hecho de que la señal de color proveniente de los iluminantes estándar B y C era demasiado “*rosa*” para ser aceptada como representación de luz-día natural.

En varios comités de colorimetría circuló un cuestionario en el que se preguntaba si deberían cambiarse o modificarse las fuentes estándar de la CIE; si la respuesta era afirmativa se sugería que se recomendaran fuentes alternativas. Las respuestas fueron casi unánimes: "*redefinir las fuentes estándar de luz-día que tengan un uso más práctico que el del iluminante C [...] y que su contenido ultravioleta fuese comparable al de la luz-día natural, en cantidad y en perfil espectral*". Además se sugería incluir un iluminante con una TCC de al menos 7.400 K.

En 1963 la CIE recomendó que "*las definiciones de fuentes estándar con cuatro temperaturas de color correlacionadas, 3.900 K, 5.500 K, 6.500 K y 7.500 K, fuesen desarrolladas para complementar los estándares CIE A, B y C. Con la excepción de la fuente con TCC de 3.900 K, el resto de las fuentes complementarias tenían la intención de representar fases de luz-día en el rango espectral comprendido entre 300 y 830 nm*". De los nuevos estándares propuestos, el de 7.500 K fue elegido para satisfacer la opinión en los EE.UU., el de 6.500 K por estar cercano al iluminante estándar C, y el de 5.500 K como posible fuente para fotografía, igual que el de 3.900 K. En subsiguientes trabajos se desarrolló un iluminante estándar con una TCC de 4.800 K en lugar del de 3.900 K, estando más cercano al iluminante estándar B. También se incluyó posteriormente un iluminante con una TCC de 10.000 K.

Internacionalmente se propuso la estandarización de la luz-día con objetivos centrados en proporcionar distribuciones espectrales características de la luz-día para cualquier TCC dada, o cromaticidad en un *locus* definido, llamada "*luz-día reconstituida*" RD (*reconstituted daylight* en la literatura anglosajona).

Las especificaciones de los estándares británicos para fuentes artificiales de luz-día estaban basados en la distribución espectral del iluminante estándar C. Cuando en 1960 comenzó la revisión de este estándar, no existía ningún trabajo en Gran Bretaña sobre el espectro de la luz-día. Para remediar esta falta de información **Henderson y Hodgkiss** [1963] iniciaron un programa de medidas en Enfield, Middlesex, (Inglaterra). Durante 15 meses adquirieron un total de 274 distribuciones espectrales de luz-cielo y luz-día en el rango espectral de 300 a 800 nm en intervalos de 10 nm y con un ancho de banda de 1,5 nm. Midieron la luz procedente del cielo norte a 45° de elevación, utilizando un monocromador con un campo de visión de 6°, sin realizar ningún tipo de corrección para las fluctuaciones de irradiancia durante los 10 minutos que duraba la adquisición de cada medida. En la figura 2.1 se muestran algunas de estas medidas.

Henderson y Hodgkiss percibieron que para una TCC dada, las curvas correspondientes a luz del cielo norte, luz de todo el cielo con y sin sol presentaban un perfil muy similar, tal y como se muestra en la figura 2.2. Los autores afirmaron que

"elegir una TCC era casi como fijar el perfil espectral, en cierto grado, cualesquiera que fueran las condiciones atmosféricas". Este principio tan simplificador posee un gran valor ya que permite la determinación (estimación) de la distribución espectral partiendo únicamente de sus coordenadas de cromaticidad o su temperatura de color correlacionada.

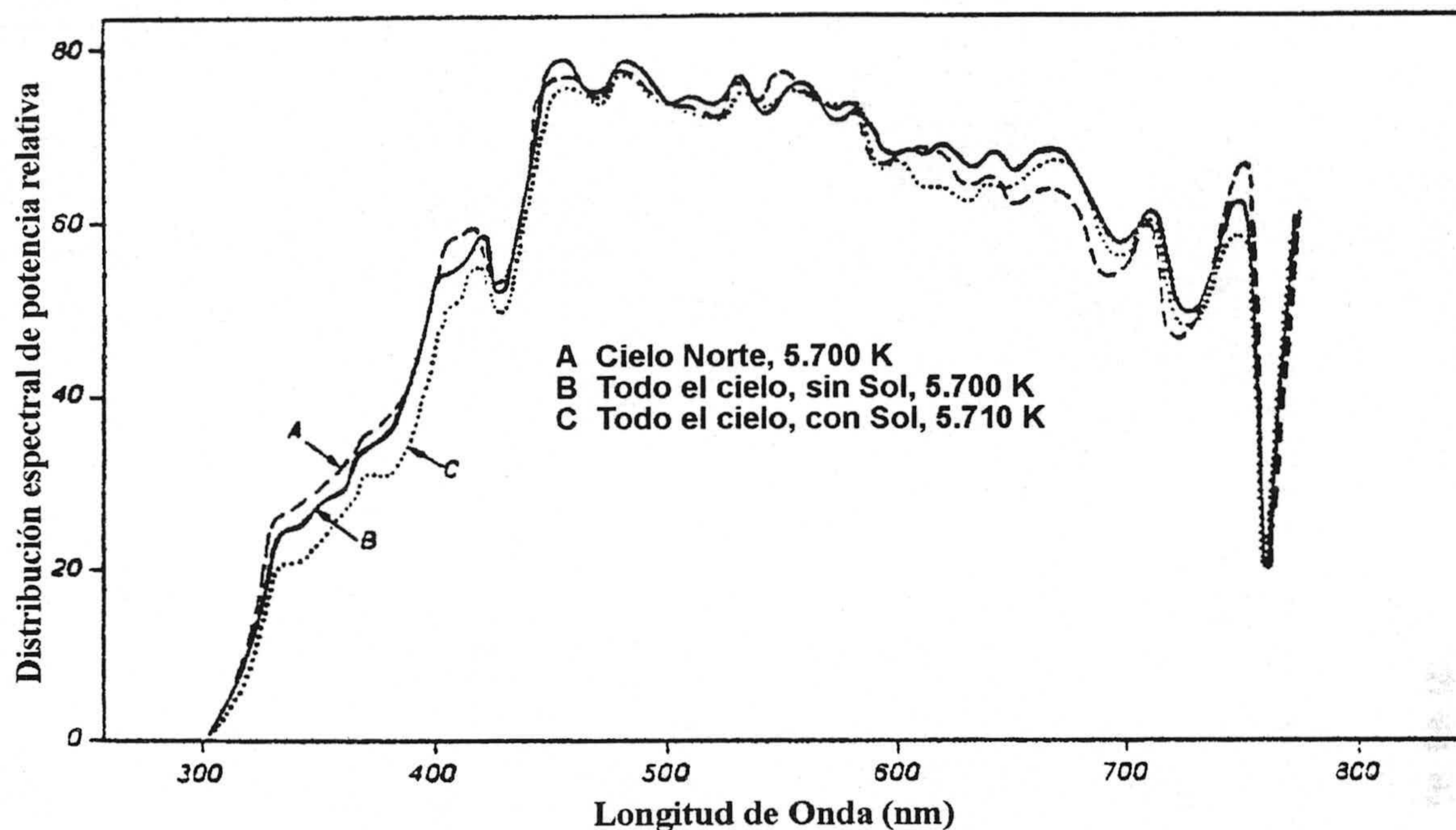


Figura 2.1.- Ejemplos de tres curvas espectrales de luz-día con distintas TCC, normalizadas en 560 nm, medidas por Henderson y Hodgkiss [1963]

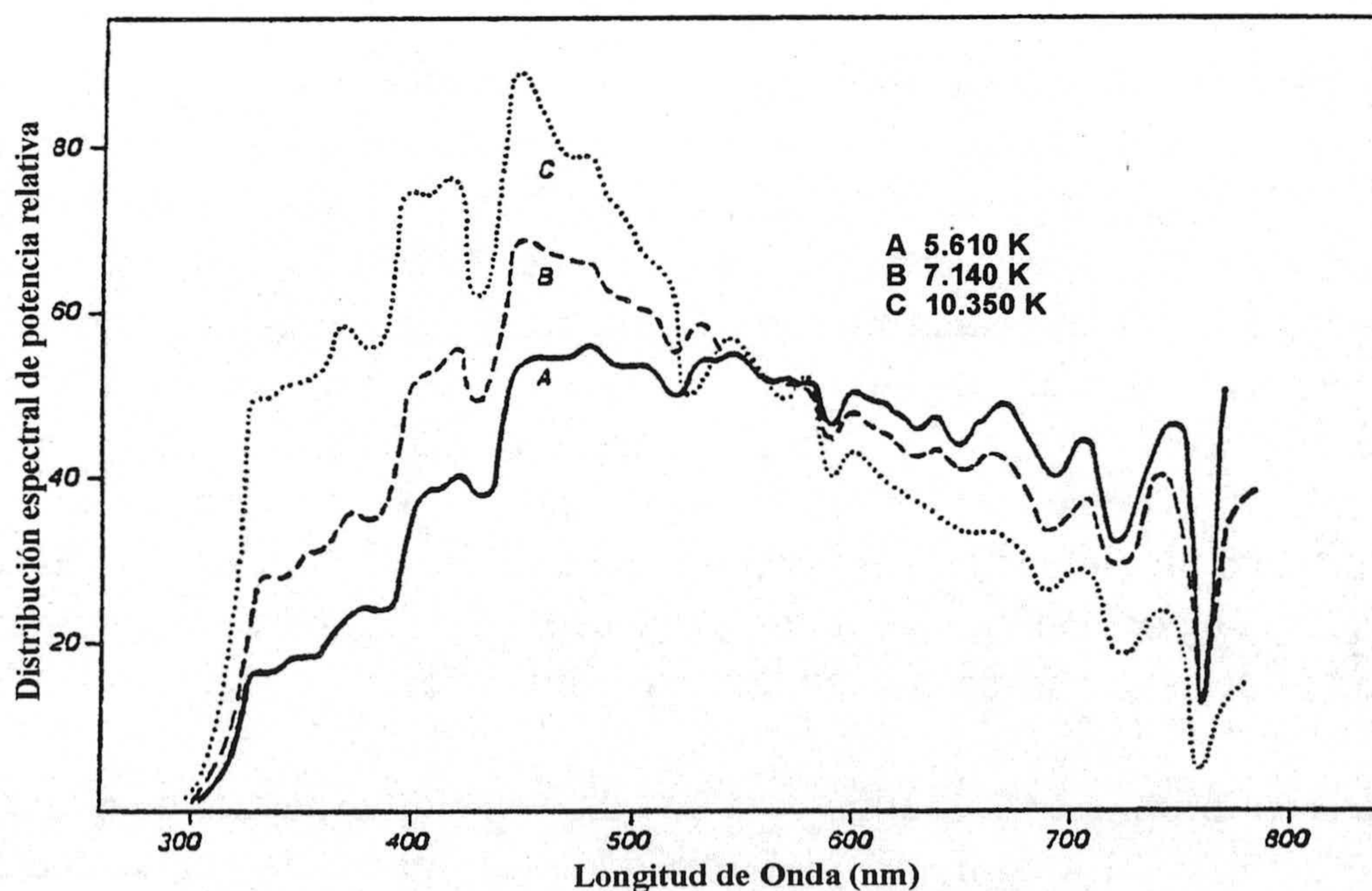


Figura 2.2.- Ejemplos de la similitud espectral de curvas de distintos tipos de luz-día con la misma TCC, obtenidas por Henderson y Hodgkiss [1963]

En la figura 2.3 se muestran los espectros promedios de 16 curvas en donde el Sol fue alternativamente incluido y excluido, comparando estos perfiles espectrales con los del Cuerpo Negro con aproximadamente la misma TCC. Se comprueba que la temperatura de color del Cuerpo Negro es mayor que la luz-día ya que ésta contiene menor radiación en la región de los azules (cortas longitudes de onda).

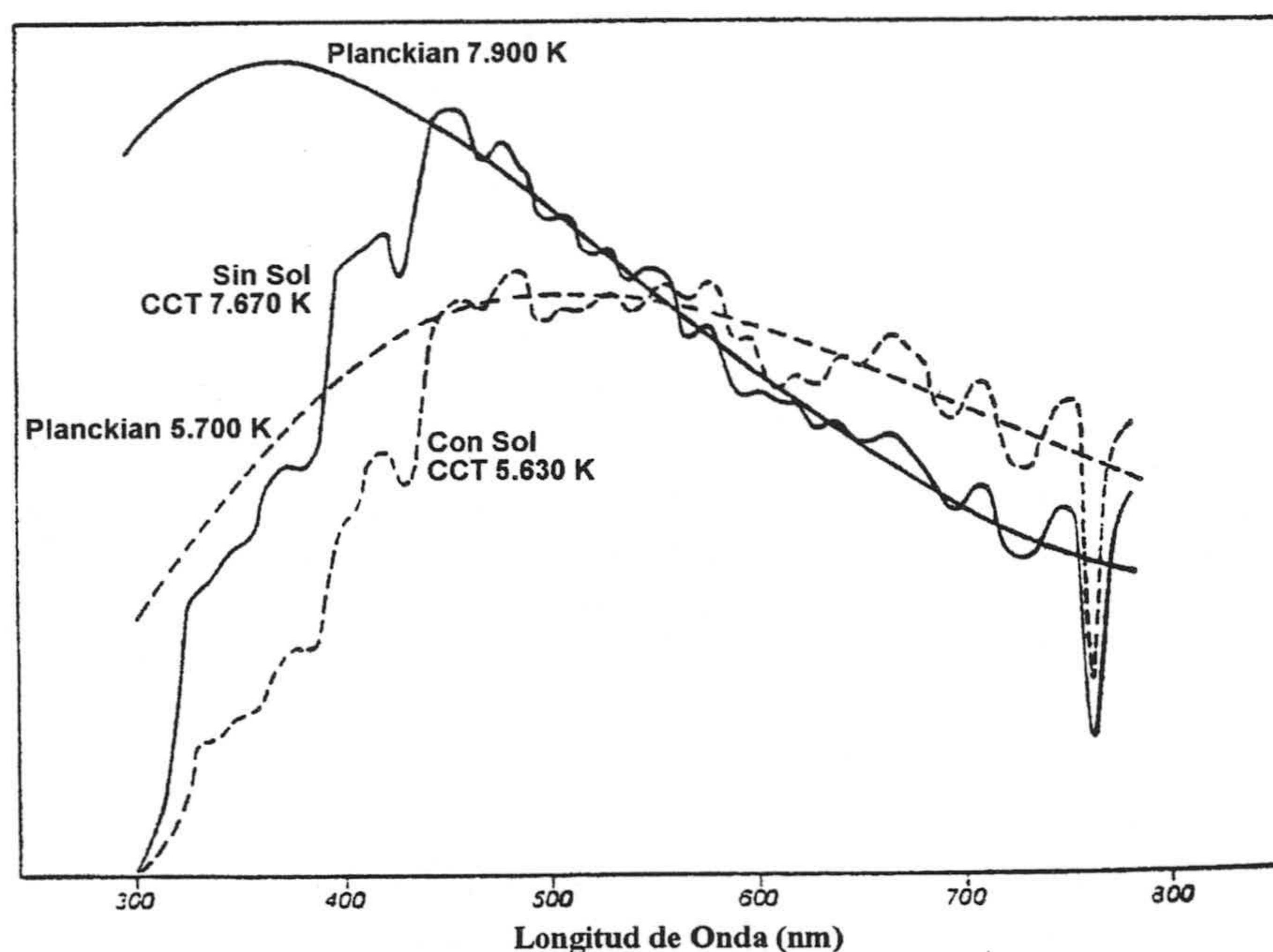


Figura 2.3.- Dos curvas espectrales del Cuerpo Negro, a distintas temperaturas, que mejor ajustan dos curvas promedio de dos tipos de luz-día realizadas por Henderson y Hodgkiss [1963]

La separación de curvas según su TCC y su posterior promediado permite su utilización como estándares. La primera propuesta, realizada por Henderson y Hodgkiss [1963], estaba basada en 70 espectros con una TCC entre 5.500 K y 6.500 K, y la segunda en 10 curvas con TCC superior a 20.000 K. Las coordenadas de cromaticidad de estas dos distribuciones promedio, con una TCC de 5.990 K y 30.700 K respectivamente, fueron usadas como límites de una línea recta en el diagrama cromático CIE 1931, ver figura 2.4, de forma casi análoga a la curva de Abbot-Gibson (Nickerson [1960]); curva que intenta representar distintas cromaticidades en un cielo azul, pero con la diferencia de que la curva de Henderson y Hodgkiss se sitúa por encima del *locus* del Cuerpo Negro y hacia la región de los verdes, además de estar basada en medidas experimentales.

La tercera propuesta se realizó para una distribución espectral de 6.500 K como estándar de luz-día artificial. Ésta se obtuvo como promedio de una selección de 45 curvas, normalizadas en 560 nm, todas ellas con una TCC entre 6.100 K y 6.950 K, obteniéndose una curva promedio con una TCC de 6.440 K, y coordenadas de cromaticidad ($x=0,314$, $y=0,329$). Esta curva fue propuesta por la British Standards Institution (BSI) como una distribución estándar de luz-día en abril de 1963.

Más tarde, con la redefinición de las líneas de isoterma por Kelly [1963], la elección de las curvas espectrales varió ligeramente, ya que el número de curvas con TCC entre 6.100 K y 6.950 K se redujo a 54, obteniéndose una curva promedio con una TCC de 6.498 K y coordenadas de cromaticidad ($x=0,3130$, $y=0,3275$). De nuevo fue propuesta por el BSI en agosto de 1965, pero posteriormente sería sustituida por las distribuciones RD.

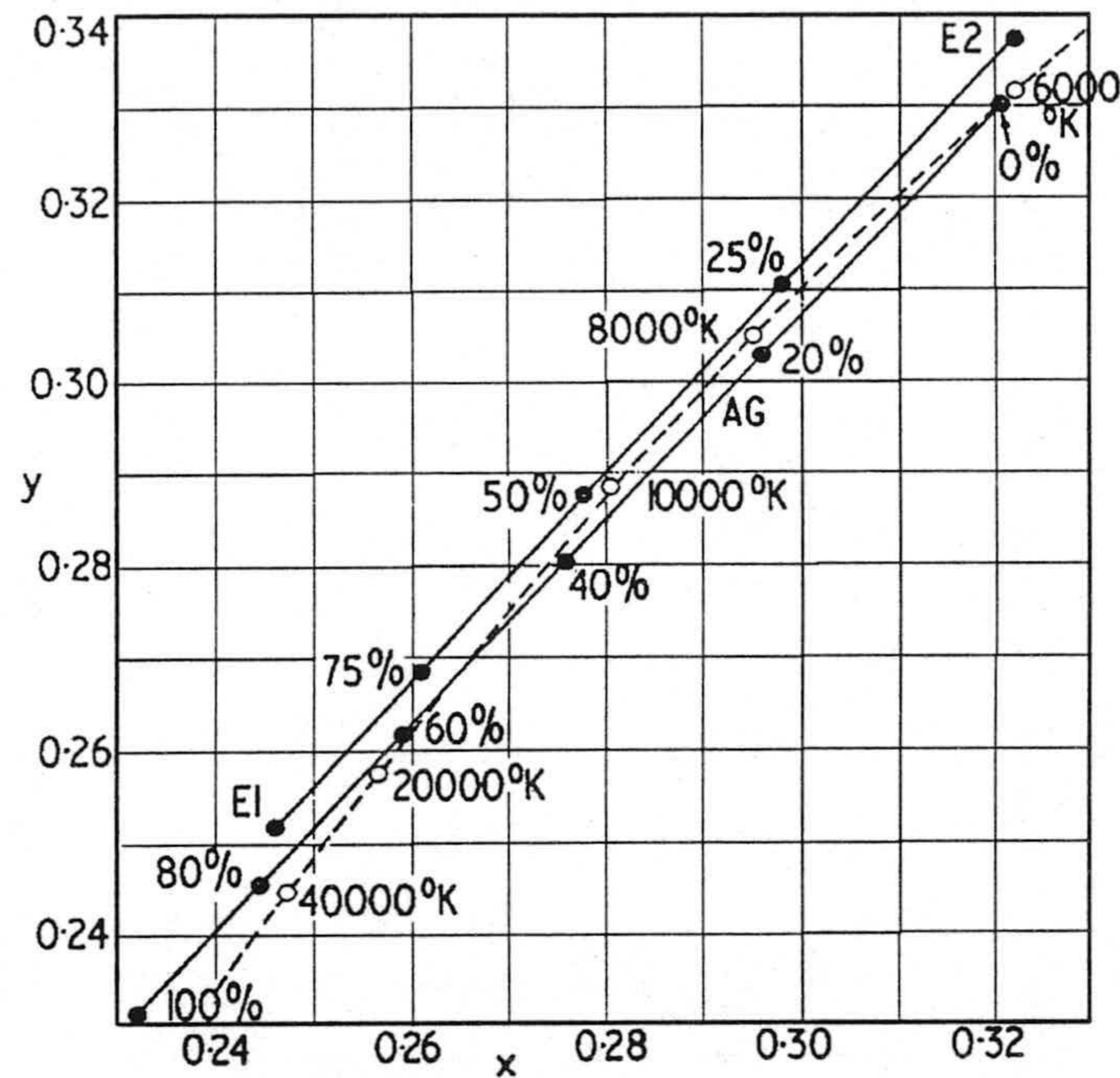


Figura 2.4.- AG: Curva de Abbot-Gibson; E1, E2: recta propuesta por Henderson y Hodgkiss [1963]; Línea discontinua: *locus* del Cuerpo Negro

La mayoría de las medidas realizadas por Henderson y Hodgkiss y las efectuadas por otros autores y expuestas en la literatura, proporcionan coordenadas de cromaticidad que se localizan en el lugar acromático y tienden hacia la región de los verdes en el diagrama cromático. Las coordenadas obtenidas por Henderson y Hodgkiss se sitúan sobre una zona paralela al *locus* del Cuerpo Negro, separada, en media, 0,007 en la coordenada y , como se puede apreciar en la figura 2.5.

Estos autores apuntaban que las coordenadas de cromaticidad de luz de todo cielo, con o sin luz solar directa, se superponían a las de luz-cielo norte. En cuanto a la TCC afirmaban que para cielos despejados variaba entre 8.000 K y al menos 40.000 K, mientras que para cielos cubiertos tomaba valores comprendidos entre 4.600 K y 7.200 K.

También realizaron una serie de medidas con condiciones estables de cielo en las que medían luz-cielo y alternativamente iban incluyendo y rechazando la luz solar

directa, encontrando que la presencia de luz solar directa reducía la TCC en aproximadamente 2.000 K.

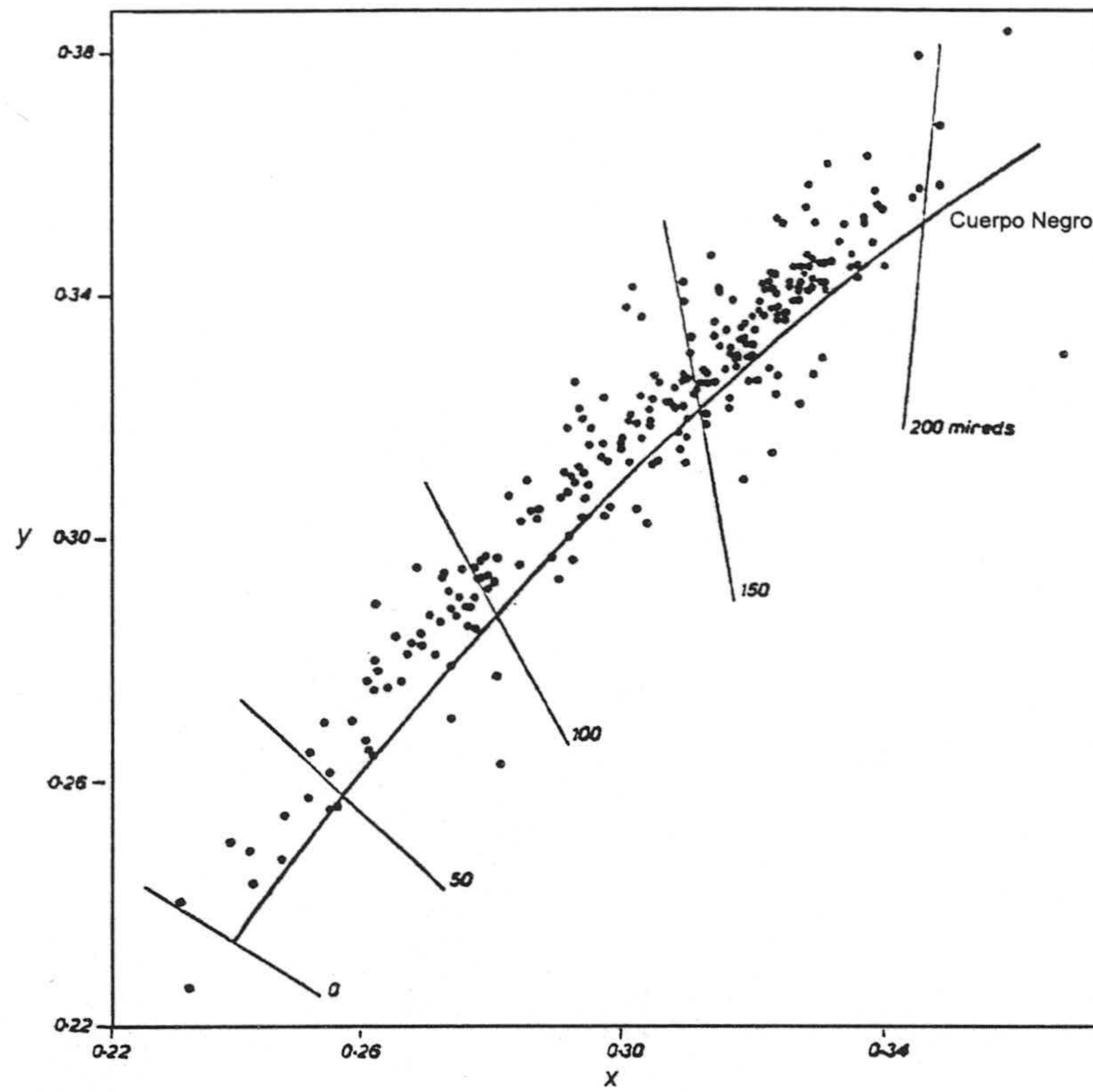


Figura 2.5.- Coordenadas de cromaticidad obtenidas para las medidas espectrorradiométricas realizadas por Henderson y Hodgkiss [1963]

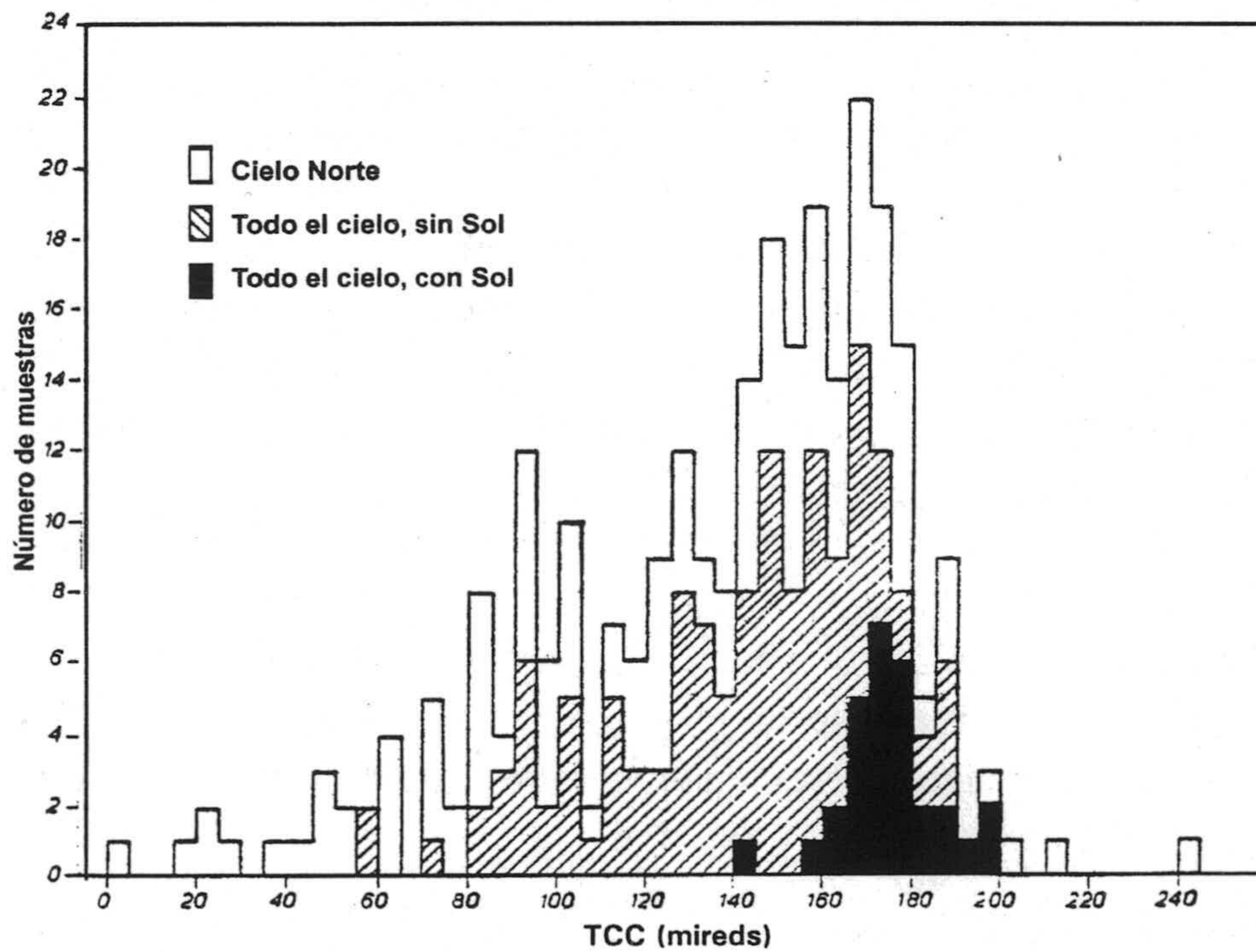


Figura 2.6.- Histograma de TCC (expresado en mireds) correspondiente a las medidas adquiridas por Henderson y Hodgkiss [1963]

Ayudándose de un histograma de TCC, mostrado en la figura 2.6, observaron cómo las más frecuentes, correspondientes a luz-día, se situaban en la región entre 5.500 y 7.000 K, mientras que la media era 6.690 K. Las medidas de luz-cielo norte proporcionaban una media de 7.290 K, mientras que para las correspondientes a luz de todo el cielo la media se situaba en 6.910 K.

Otra característica de las observaciones realizadas por Henderson y Hodgkiss era la información que ofrecían sobre el contenido ultravioleta. La fracción de irradiancia entre 300 y 400 nm con respecto a la irradiancia total variaba ampliamente sin apenas correlación con la TCC. Esto había sido observado antes del trabajo de Henderson y Hodgkiss y había sido un enorme obstáculo en los intentos de estandarización de la luz-día. En la figura 2.7 se muestran las variaciones de este cociente, así como la curva obtenida por Winch *et al.* [1966]. Un mejor análisis de los puntos de esta figura nos demuestra cierta dependencia con el tiempo del año, obteniéndose mayores proporciones que la media en verano y menores en invierno. Este resultado, obtenido en un ambiente urbano, era totalmente contrario al observado por Bener [1963] en los Alpes.

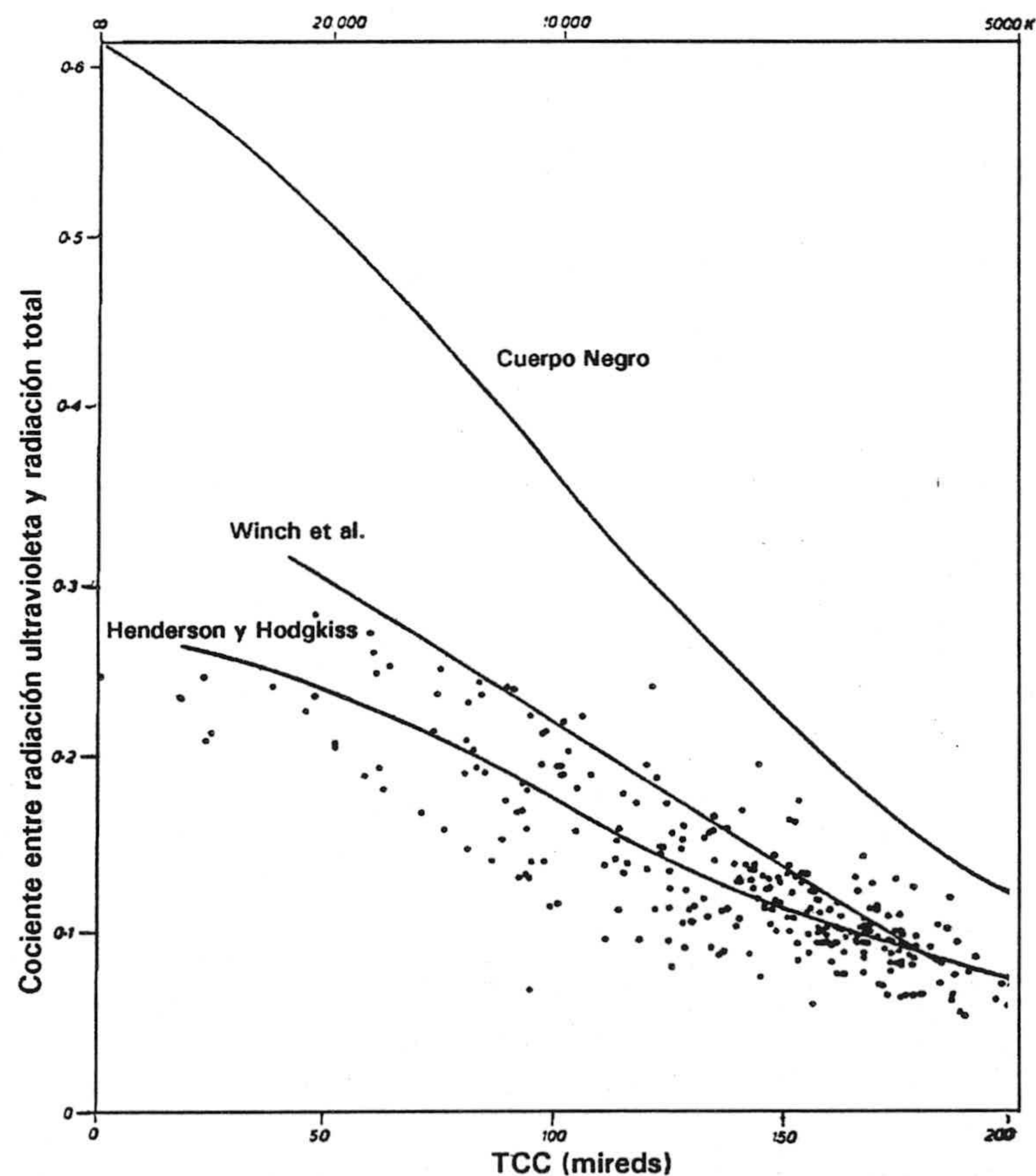


Figura 2.7.- Cociente entre la radiación ultravioleta (300-400 nm) y la radiación total (300-780 nm) correspondiente a las curvas espectrales medidas por Henderson y Hodgkiss [1963]. La línea central representa el mismo cociente obtenido para las medidas de Winch *et al.* [1966] en Suráfrica.

2.3. Estudios colorimétricos visuales en 1963

Los trabajos descritos hasta ahora mostraban las características colorimétricas de la luz-día a partir de medidas espectrales. Existen 3 trabajos -que hemos creído que sería interesante citarlos en este capítulo de la memoria de doctorado- que están basados en colorimetría visual directa, cuyos resultados a veces confirman y otras veces difieren de los obtenidos a través de medidas espectrales.

El primero fue el de **Chamberlin, Lawrence y Belbin** [1963]. Su trabajo se inspiró en la falta de datos de luz-día locales que motivó la investigación desarrollada por Henderson y Hodgkiss [1963]. Los autores midieron la cromaticidad del cielo norte de Salisbury, Wiltshire, (Inglaterra), con una elevación de 45° , al mediodía durante un año. El método era único en este campo, ya que utilizaban un colorímetro tipo Lovibond-Schofield. Esto requería una igualación entre una pantalla de óxido de magnesio expuesta a la luz-día y una pantalla similar expuesta a la iluminación obtenida por el paso del iluminante estándar C a través de una triada de filtros con gradiente en transmitancia; es decir, usando colorimetría sustractiva. Durante cada igualación se anotaban las condiciones meteorológicas así como la iluminancia de la pantalla expuesta a la luz del cielo. Las coordenadas de cromaticidad de estas medidas se situaban cercanas a las del *locus* del Cuerpo Negro excepto para TCC inferiores a 7.400 K, cuando la mayoría de los puntos lo hacen por debajo del *locus* del Cuerpo Negro (hacia los púrpuras), como puede observarse en la figura 2.8.

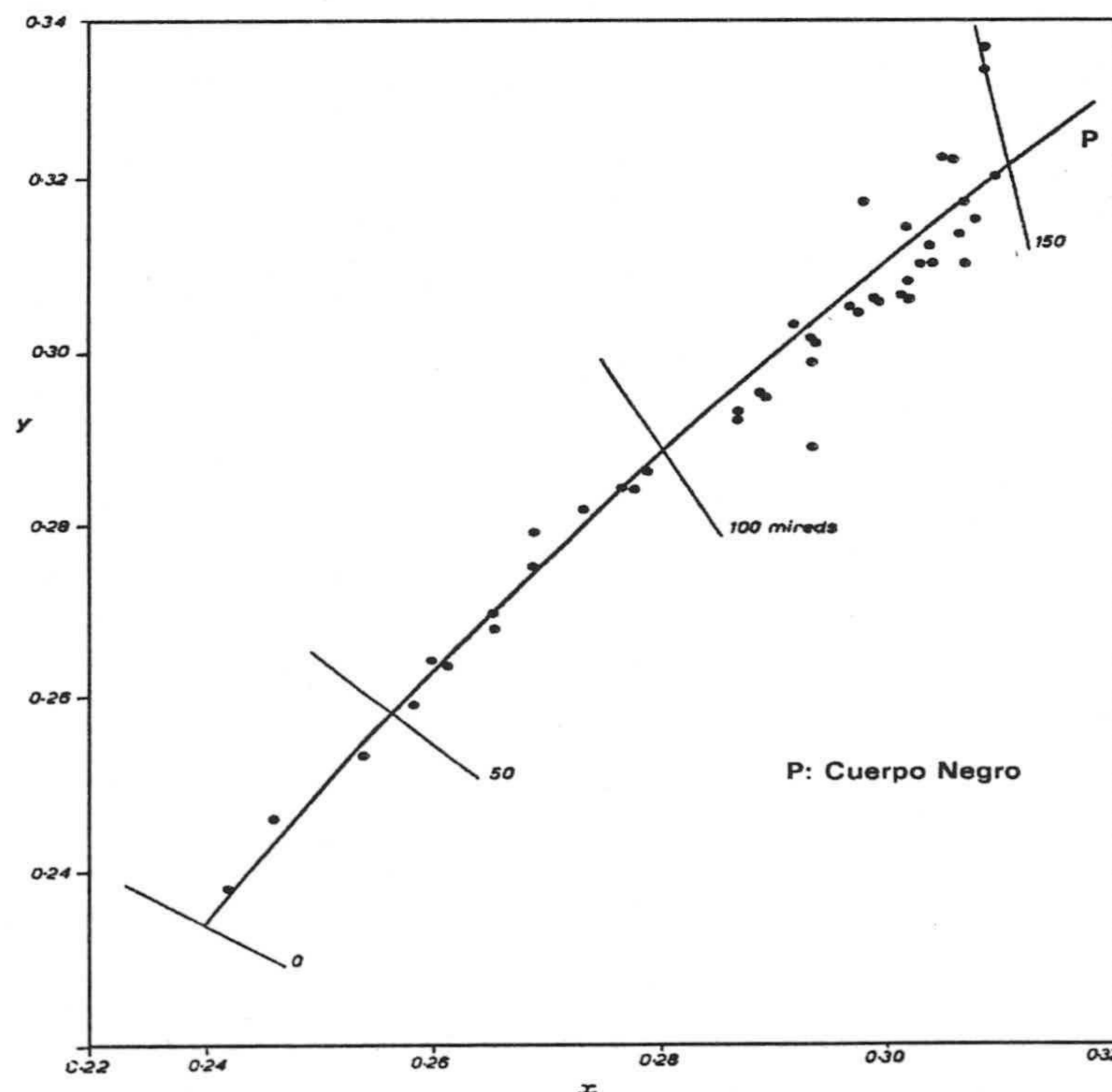


Figura 2.8.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a las medidas de luz del cielo norte realizadas por Chamberlin *et al.* [1963].

El rango de TCC estaba comprendido entre 6.800 K y ∞ K, con una inusual distribución del 20 por ciento de los valores en el intervalo de 120 a 135 mireds (7.400 a 8.300 K), 40% entre 130 y 150 mireds (6.700 a 7.700 K), y ninguna medida para TCC superiores a 150 mireds (inferiores a 6.700 K). Las observaciones fueron realizadas a través de una ventana con un vidrio con una tonalidad ligeramente verdosa, que no tuvieron en cuenta los autores. Aun considerado el efecto introducido por la tonalidad de dicho vidrio tampoco se pueden explicar los resultados tan diferentes (con respecto a los de otros autores).

El segundo trabajo puramente colorimétrico es el **Nayatani y Wyszecki [1963]** midiendo visualmente el color de la luz-cielo en Ottawa, Ontario, (Canadá) durante un mes obteniendo más de doscientas medidas. En este trabajo la luz procedente del cielo norte a 45° de elevación era reflejada, utilizando una pantalla de sulfato de bario, hacia un colorímetro de seis primarios tipo Donaldson. El principal propósito de este trabajo era que los datos obtenidos fuesen de utilidad para el Comité de Colorimetría de la CIE, que en la fecha de publicación del artículo se hallaba revisando el problema de establecer lámparas patrón.

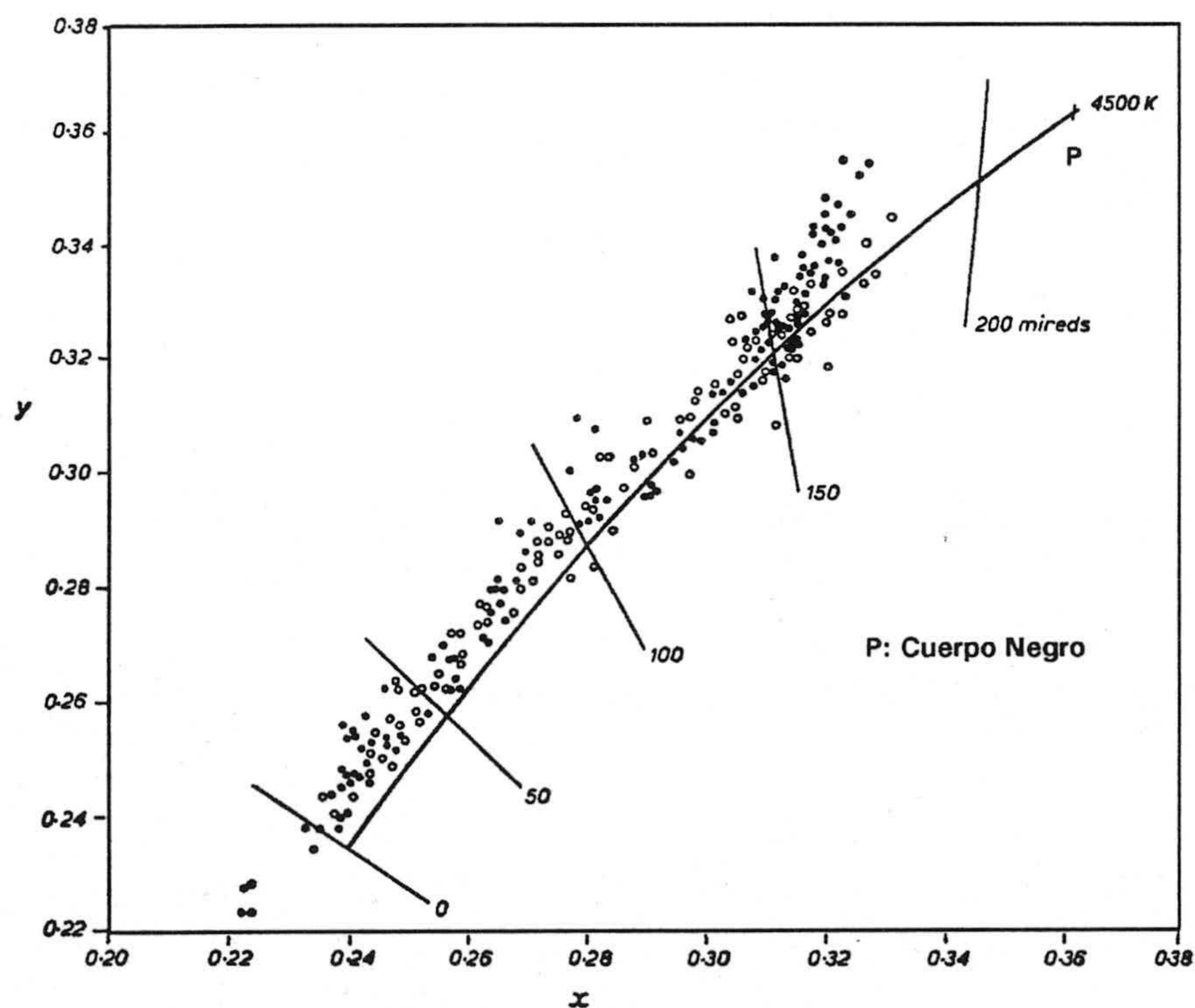


Figura 2.9.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a las medidas de luz-cielo norte realizadas por Nayatani y Wyszecki [1963]. Círculos cerrados: Medidas realizadas en el periodo 27 Febrero-9 Marzo de 1962. Círculos abiertos: Medidas realizadas en el periodo 14 Marzo-3 Abril de 1962.

En la figura 2.9 se muestran las coordenadas de cromaticidad de las medidas de Nayatani y Wyszecki. Estas se localizan por encima del *locus* del Cuerpo Negro para TCC inferiores a 6.800 K (147 mireds) y superiores a 9.000 K (111 mireds). La región abarcada coincide con la de la mayoría de los trabajos espectrorradiométricos que se van a exponer en este capítulo.

Con respecto a la variación de la TCC con las condiciones atmosféricas, los autores observan que, durante los días con cielo despejado, variaban entre 100.000 K por la mañana hasta 10.000 K justamente antes de la puesta del Sol. En los días con cielos cubiertos las variaciones de la TCC eran más pequeñas, situándose entre 6.000 K y 7.000 K casi a lo largo de todo el día.

Dado que esta revisión bibliográfica se está realizando de forma cronológica, hemos decidido posponer la referencia del tercer y último trabajo basado en colorimetría visual, publicado en el año 1965.

2.4. El trabajo de Judd, MacAdam y Wiszecki [1964]

Condit y Grum [1964] midieron 251 espectros de luz-día en Rochester, Nueva York, (EE.UU.). Los autores tenían en mente las necesidades de la fotografía en exteriores, en particular los efectos del contenido ultravioleta de la luz-día, la elevación solar, y la irradiación en planos distintos al horizontal. Por ello realizaron un estudio sobre la influencia, en las distribuciones espectrales de luz-día y luz-cielo, de la elevación solar y de las orientaciones de los planos de medida para diferentes condiciones atmosféricas.

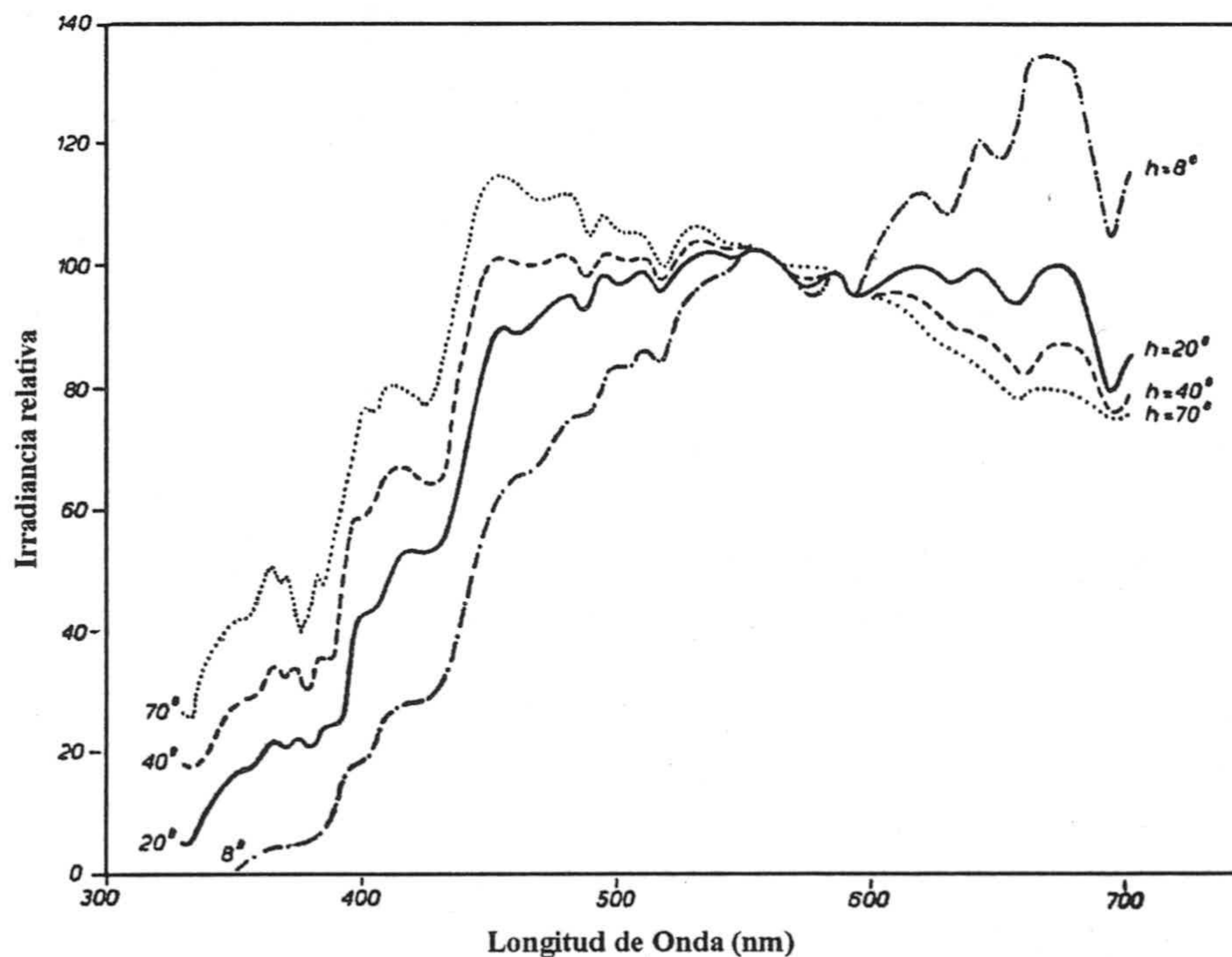


Figura 2.10.- Distribuciones espectrales normalizadas de luz-día con cielos despejados para varias elevaciones solares, obtenidas por Condit y Grum [1964]. La radiación incidía sobre un plano, orientado hacia el Sol, e inclinado 15° sobre la vertical.

Las curvas fueron medidas entre 330 y 700 nm, con una resolución espectral de 5 nm. En la figura 2.10 se muestran algunas de estas curvas. Aquellas medidas cuya iluminancia variaba más del 2% durante el tiempo de medida (105 segundos) fueron corregidas por los autores. Cada minuto se fotografiaba todo el cielo con el fin de registrar cuáles eran las condiciones atmosféricas. Los autores pusieron mucho énfasis en estudiar la influencia de la elevación solar, encontrando que para bajas elevaciones solares se obtenían las TCC más pequeñas.

Durante cuatro semanas efectuaron 251 medidas espectrorradiométricas (191 de luz-día y 60 de luz-cielo). Con cada grupo de medidas generaron una matriz de correlación y aplicando el método de vectores propios presentado por Simonds [1963] calcularon los primeros cinco vectores (vector principal y cuatro vectores propios). Cada curva espectral fue reconstruida posteriormente mediante combinación lineal de los cinco vectores calculados, pero los resultados mostrados en su artículo están descritos sólo en términos generales, ya que no ofrecen ni numéricamente ni gráficamente información sobre dichos vectores. Los cuatro vectores propios calculados para las 191 curvas de luz-día contribuían un 98,2% a la traza de la matriz de correlación, y en un 99,4% para los cuatro vectores obtenidos a partir de las 60 curvas de luz-cielo.

El efecto de las condiciones atmosféricas sobre los perfiles espectrales, hallado por Condit y Grum, se resume en un decrecimiento en la componente azul cuando el cielo presenta brumas. A medida que aparecían nubes en el cielo, la componente azul se veía incrementada ligeramente. Para cielos totalmente cubiertos, la composición espectral de la luz-día era ligeramente menos azul que para cielos despejados. En cuanto al efecto de la elevación solar para diferentes condiciones atmosféricas, Condit y Grum observaron que en cielos despejados la distribución espectral para elevaciones solares bajas poseía más irradiancia en el rango de los azules que para elevaciones altas. En cielos con brumas débiles la composición espectral era más roja que para cielos despejados con la misma elevación solar. Para cielos totalmente cubiertos el perfil espectral variaba mucho menos con la elevación solar que para cielos despejados. Asimismo se percataron de que la TCC aumenta cuando disminuye la elevación solar. Por último cabe destacar otra observación que hicieron referente a la estabilidad de las composiciones espectrales: la composición espectral de la luz-cielo variaba mucho menos con la elevación solar que la luz-día, aunque se modificaba más con las condiciones atmosféricas que la luz-día.

El tercer autor que contribuye en la colaboración sobre distribuciones RD fue **Budde**, que durante siete semanas almacenó 99 espectros de luz-cielo norte y de luz de todo el cielo en Ottawa, (Canadá), con un rango espectral de 300 a 720 nm y un ancho de banda entre 1 y 7 nm. Las curvas fueron automáticamente corregidas teniendo en cuenta las fluctuaciones de la irradiancia durante el tiempo de medida. La TCC de sus

medidas se situaban entre 3.700 y 20.000 K. Para TCC superiores a 10.000K las coordenadas se alejan del CIE locus (al que posteriormente nos referiremos y que fue adoptado tras la propuesta de Judd *et al.* [1964]) hacia la región de los verdes. Realizó comprobaciones colorimétricas simultáneas con un colorímetro visual de seis estímulos tipo Donaldson. La concordancia entre ambos métodos de medida era menor de 0,006 en x y en y . En el trabajo de Nayatani y Wyszecki [1963], anteriormente citado, donde se realizaron el mismo tipo de medidas en el mismo lugar que Budde, se observó que las coordenadas de cromaticidad de luz-cielo norte se extendían mucho más a lo largo del locus del Cuerpo Negro que las de Budde. El trabajo de Budde no fue publicado, pero las características de su estudio fueron detalladas en el artículo de Judd *et al.* [1964], que a continuación describiremos.

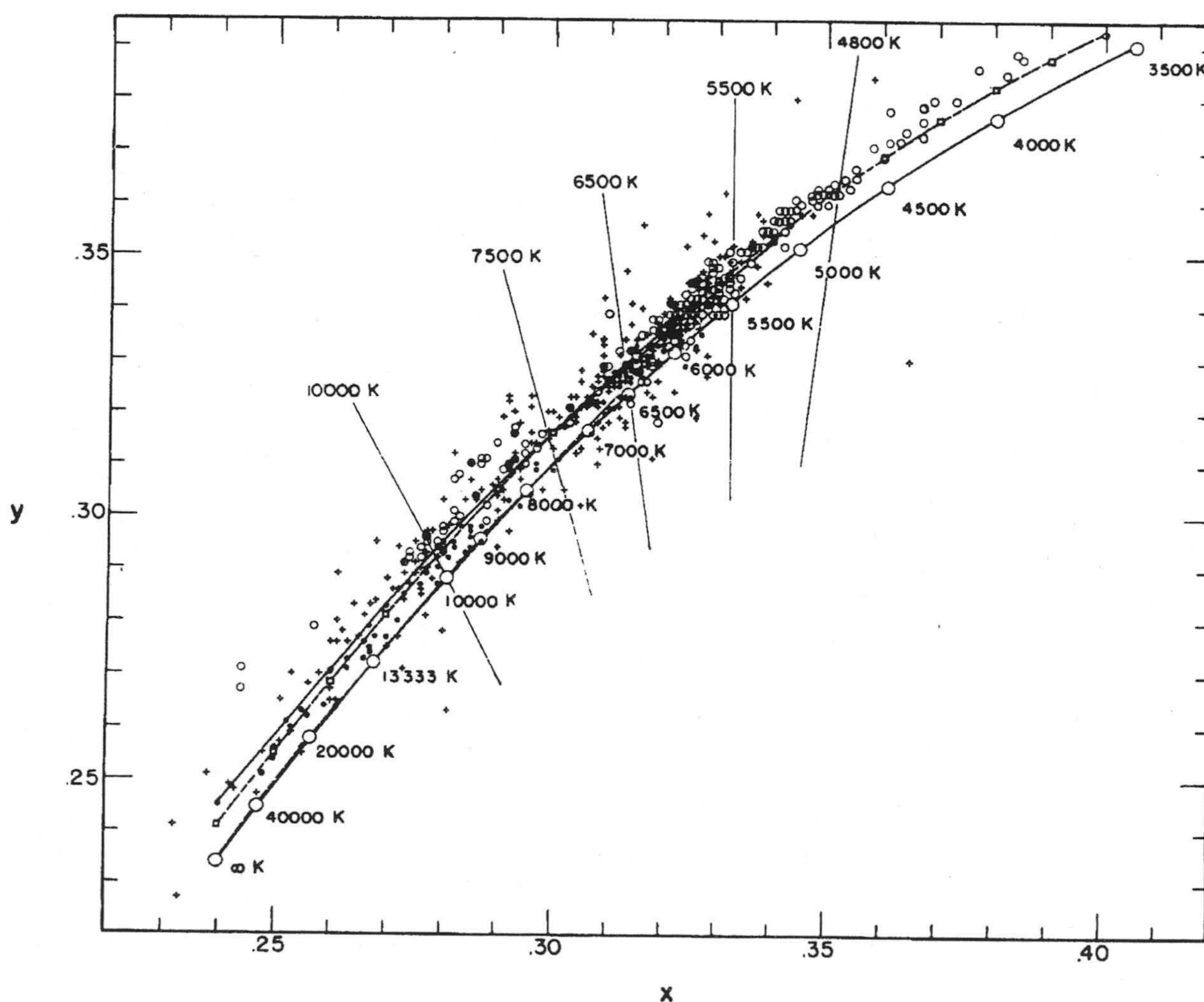


Figura 2.11.- Coordenadas de cromaticidad de las 622 medidas recogidas en el trabajo de Judd *et al.* [1964] (puntos: Budde; círculos pequeños abiertos: Condit y Grum; cruces: Henderson y Hodgkiss). También se muestra el locus del Cuerpo Negro (círculos grandes y abiertos conectados mediante una línea continua), las líneas de isoterma, el CIE locus ($y_D = -3,000x_D^2 + 2,870x_D - 0,275$) (curva discontinua que conecta cuadrados pequeños abiertos), la obtenida por Nayatani y Wyszecki [1963], (línea continua), así como la curva obtenida por Chamberlin *et al.* [1963] (línea discontinua situada sobre el Planckian locus desde 6,500 K hasta ∞ K)

Los comités técnicos colorimétricos de USA y Canadá se comprometieron en Octubre de 1962 a realizar una evaluación conjunta del abundante material experimental disponible con el fin de recomendar distribuciones espectrales patrón de luz-día para un amplio rango de TCC. Estos iluminantes patrón estaban eventualmente limitados a valores de TCC recomendados por la CIE, pero el método de cálculo permitía una extensión a todo el rango de distribuciones de luz-día posibles, siempre y cuando los datos originales fuesen extensos. Las motivaciones para iniciar este proyecto fueron descritas en el artículo más importante, citado en la bibliografía, cuyos autores son **Judd, MacAdam y Wyszecki [1964]**, donde además se incluyen las conclusiones a las que llegaron dichos comités colorimétricos.

El material utilizado en este trabajo comprendía 622 curvas espectrales obtenidas por Henderson y Hodgkiss [1963], Condit y Grum [1964], y Budde. Las coordenadas de cromaticidad de estas 622 medidas fueron representadas en el diagrama cromático por un *locus* que fue elegido de forma visual, y no mediante un ajuste por mínimos cuadrados. De esta forma se realizó un cierto ajuste por encima de 10.000 K para tener en cuenta los resultados de Nayatani y Wyszecki [1963] y por Chamberlin *et al.* [1963], obtenidos mediante colorimetría visual. El *locus* elegido visualmente por Judd *et al.* es el definido por la curva:

$$y_D = -3,000x_D^2 + 2,870x_D - 0,275$$

donde el sufijo D se refiere a coordenadas de cromaticidad de la luz-Día. Esta curva, dibujada en la figura 2.11, define las coordenadas de cromaticidad de luz-día en el diagrama CIE-1931 y se sitúa ligeramente por encima y aproximadamente paralela al *locus* del Cuerpo Negro.

Asimismo, en este trabajo, los autores utilizaron el análisis de vectores propios sobre el conjunto de las 622 medidas experimentales, así como sobre cada uno de los subconjuntos originales. Los vectores calculados estaban definidos en el intervalo de 300 a 830 nm de 10 en 10 nm. En la figura 2.12 se muestran gráficamente los dos primeros vectores propios y el vector principal.

Judd *et al.* calcularon los cuatro primeros vectores propios para cada uno de los subconjuntos de medidas y para el conjunto total. El primer vector propio se corresponde con variaciones cromáticas en la dirección amarillo-azul. El segundo vector propio muestra ciertas anomalías entre subconjuntos, pero para el conjunto global implica una variación verde-rosa.

Judd *et al.* aseguraban que "*la variación más común entre curvas espectrales de luz-día se manifiesta principalmente en un cambio en la TCC [...]. Esta variación de amarillo a azul se corresponde, generalmente, con la presencia o ausencia de nubes en el cielo, y en la inclusión o exclusión de luz solar directa*". Otra variación

observada en los perfiles espectrales "se corresponde con una variación de rosa a verde que puede estar causada por la presencia de agua en forma de vapor y/o neblina". Ambas variaciones se reflejan en los perfiles espectrales de los dos primeros vectores propios.

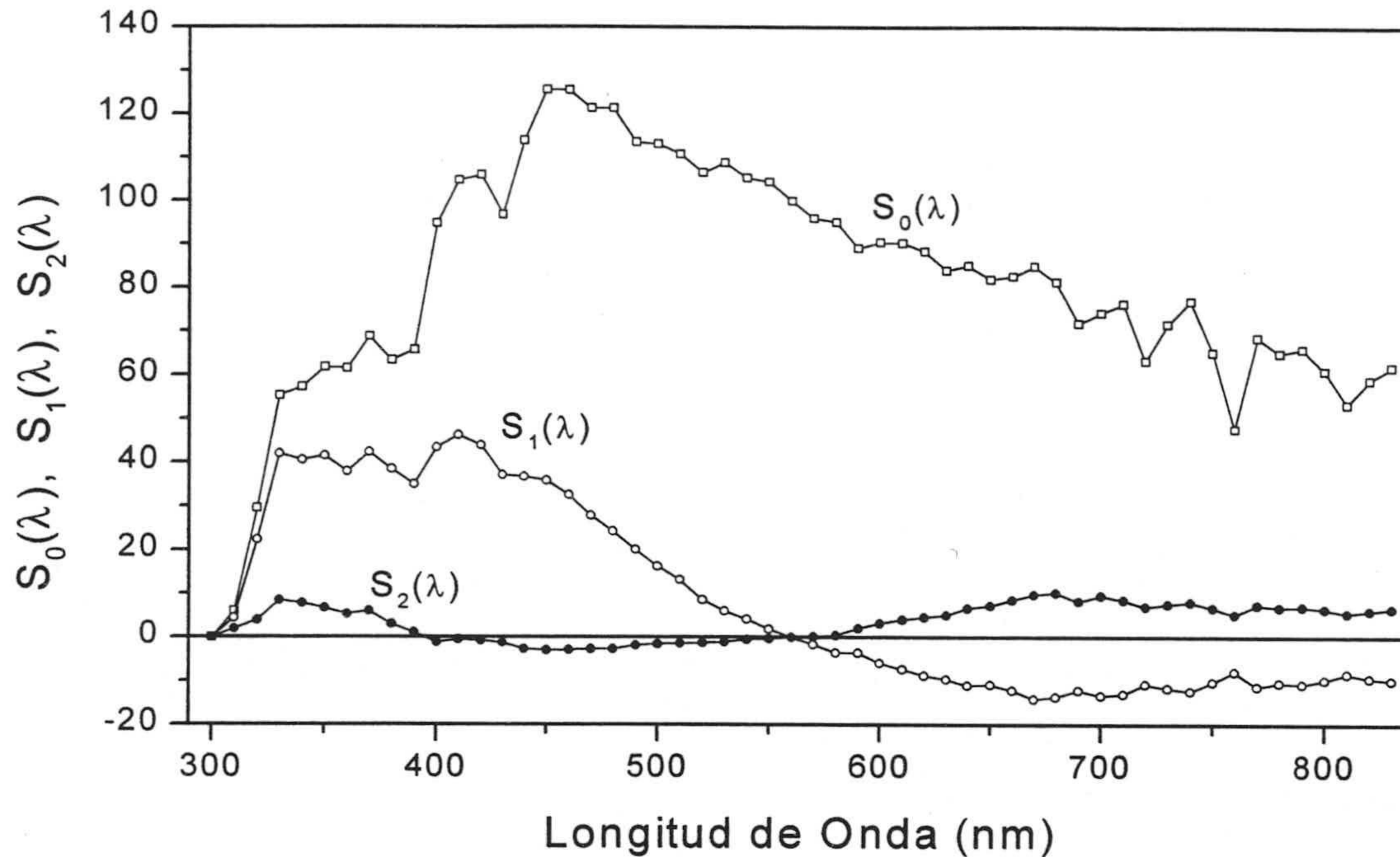


Figura 2.12.- Distribución espectral del vector principal $S_0(\lambda)$ y de los dos primeros vectores propios $S_1(\lambda)$ y $S_2(\lambda)$, obtenidos por Judd *et al.* [1964] y utilizados en el método de la CIE para calcular iluminantes de luz-día.

2.5. Recomendaciones de la CIE

Los autores redujeron el número de vectores propios a dos (tres si consideramos el vector principal) cuando querían generar curvas de distribución de luz-día que correspondiesen a cualquier cromaticidad dentro del rango de luz-día. De hecho, siempre existen valores de los dos escalares (únicos grados de libertad) que multiplican a los dos primeros vectores propios, para hacer corresponder las coordenadas de cromaticidad de la curva reconstruida con cualquier punto sobre el CIE *locus*. Encontraron que las 622 curvas medidas podían ser reconstruidas con una apropiada combinación lineal del vector principal (distribución media) y los dos primeros autovectores, afirmando que "las curvas reconstruidas reproducían satisfactoriamente las curvas medidas". Sin embargo reconocían que no existía buen ajuste en la región ultravioleta, encontrándose diferentes dependencias del ultravioleta con la TCC, apuntando que "el contenido en el ultravioleta está pobremente correlacionado con la TCC".

La relación existente entre los escalares, que multiplican a los dos primeros vectores propios y las coordenadas de cromaticidad asociadas a las curvas reconstruidas, se obtiene calculando los valores triestímulo correspondientes a los tres vectores usados en el método (el vector principal y los dos propios). Se consigue, de esta forma, una relación unívoca entre escalares y coordenadas de cromaticidad dada por las siguientes expresiones (para los vectores de Judd *et al.*):

$$x = \frac{0.30766 + 0.00561 M_1 + 0.00641 M_2}{1.00000 + 0.11594 M_1 + 0.00162 M_2} \qquad y = \frac{0.32079 + 0.00575 M_1 + 0.00229 M_2}{1.00000 + 0.11594 M_1 + 0.00162 M_2}$$

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703 x + 5.9914 y}{0.0241 + 0.2562 x + 0.7341 y} \qquad M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424 x + 30.0717 y}{0.0241 + 0.2562 x + 0.7341 y}$$

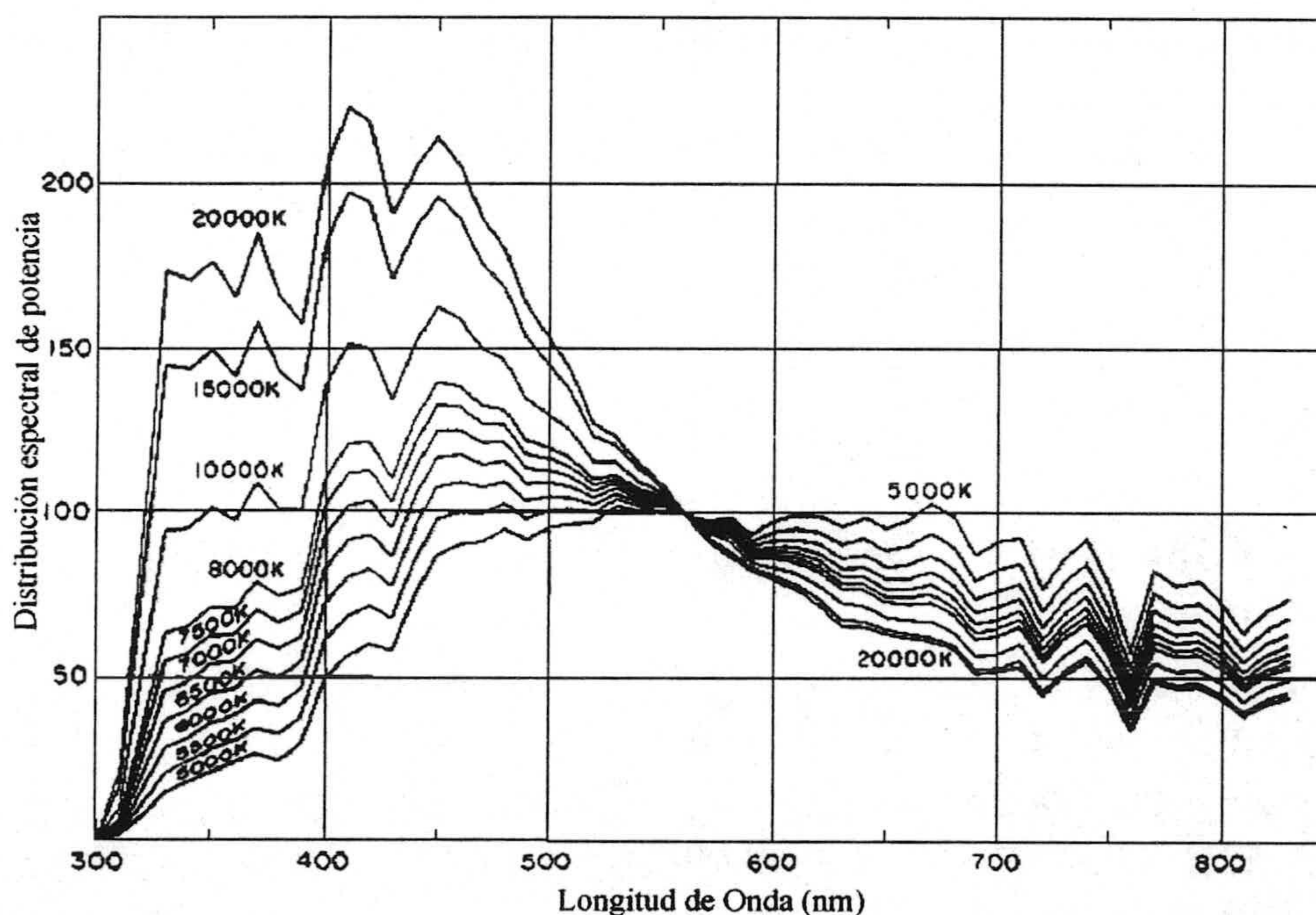


Figura 2.13.- Distribuciones espectrales relativas de 10 diferentes fases de luz-día obtenidas utilizando el método de la CIE para calcular iluminantes de luz-día.

Tanta era la importancia de este trabajo y sobre todo tal era el peso de los autores dentro de la comunidad científica y dentro de la CIE, que más tarde ésta adoptó su propuesta para generar distribuciones espectrales de luz-día y lo hizo utilizando los vectores y el *locus* obtenidos por Judd *et al.* Con este método se puede obtener una distribución espectral correspondiente a distintas fases de luz-día en la superficie de la Tierra con TCC comprendidas entre 4.000 K y 25.000 K. Para una TCC entre estos dos valores, o equivalentemente, para una coordenada de cromaticidad de una fase determinada de luz-día, la distribución espectral puede ser calculada mediante el uso de los dos primeros vectores propios y el vector principal,

en el espectro visible de 300 a 830 nm. La figura 2.13 muestra algunas de estas distribuciones, obtenidas con el método adoptado por la CIE. Las correspondientes a TCC de 5.500, 6.500 y 7.500 K, recomendadas por los autores al Comité de la CIE E-1.3.1 fueron aceptadas como distribuciones espectrales de los iluminantes estándar de la CIE D_{55} , D_{65} y D_{75} .

El método recomendado por la CIE para calcular iluminantes de luz-día hace uso de la correspondencia existente entre las coordenadas de cromaticidad (o temperatura de color correlacionada) de una fase dada de luz-día y su distribución espectral. Conocidas las coordenadas de cromaticidad de luz-día, una única distribución espectral se corresponde a esas coordenadas de cromaticidad. Es evidente, que con este método no se pueden generar metámeros.

Hay que resaltar el empeño de los autores y de la CIE por adoptar un modelo tridimensional con dos grados de libertad. Este tipo de modelo facilita que exista una relación unívoca entre los dos coeficientes que acompañan a los dos vectores principales y, por ejemplo, las coordenadas de cromaticidad de la luz-día. Este hecho permite generar la distribución espectral de una curva de luz-día conociendo las coordenadas de cromaticidad que queremos que tenga, siendo esto imposible si el número de grados de libertad fuese mayor que 2.

2.6. Trabajos posteriores a las recomendaciones de la CIE

La publicación de estos resultados y su aprobación por la CIE produjo un efecto de motivación en la realización de más medidas en otros lugares del mundo, donde las características de la luz-día podían, quizás, no concordar con las aceptadas por la CIE. Los lugares donde se realizaron estas medidas fueron Africa del Sur, India, Japón y Australia.

El tercer y último trabajo puramente colorimétrico que hemos incluido en este capítulo es el realizado por **Collins** [1965] en el Laboratorio Nacional de Física de Gran Bretaña, durante dos años, como contribución a la revisión de los estándares de luz-día. Collins utilizó un medidor visual de TCC tipo Harding en la medida de la TCC de la luz-cielo en 4 cuadrantes (desde 13° elevación hasta cenit excluyendo la luz-sol) así como la luz-día (luz procedente de todo el cielo, desde 32° de elevación hasta el cenit, incluyendo la luz-sol cuando estaba presente), en Teddington, (Inglaterra).

Collins encontró que la TCC promedio es de 6.650 K para las medidas de cuadrantes, 7.000 K para luz-cielo norte y 5.990 K para luz de todo el cielo. Al medir



UNIVERSIDAD DE GRANADA

COMISION DE DOCTORADO



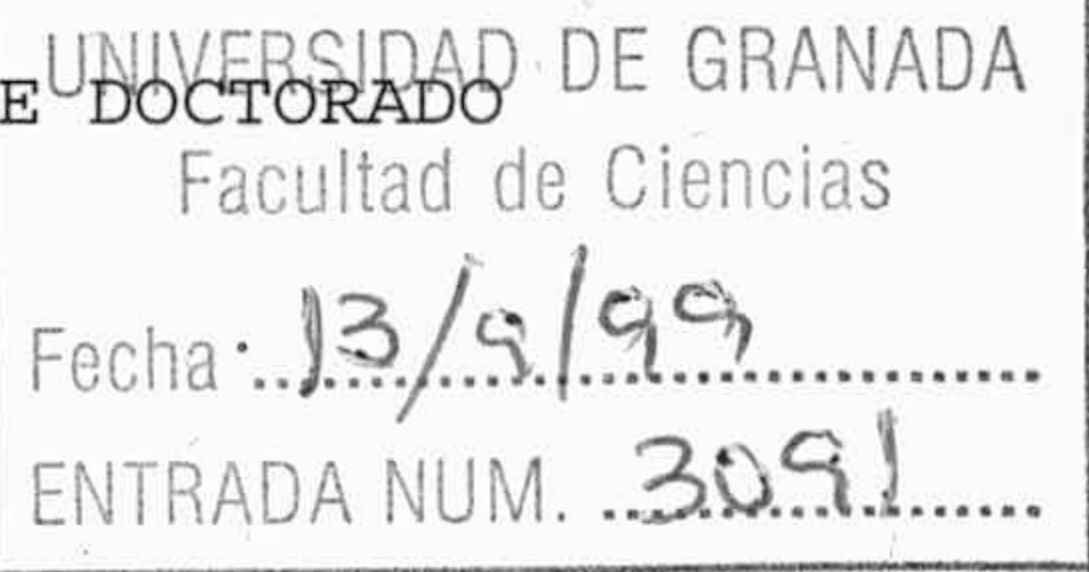
Fecha: 07 de Septiembre de 1999

Su Refª.

Nuestra Refª.

Fecha de Salida:

Unidad de Origen: COMISIÓN DE DOCTORADO



Destinatario:

Ilmo. Sr. DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

En cumplimiento del artículo 36 de las Normas Reguladoras de los estudios de Tercer Ciclo de esta Universidad, adjunto se remite un ejemplar de la Tesis Doctoral presentada por el Doctorando D.JAVIER HERNANDEZ ANDRES titulada CARACTERISTICAS ESPECTRALES Y COLORIMETRICAS DE LA LUZ-DIA Y LUZ-CIELO EN GRANADA y dirigida por el Profesor/es Dr/es JAVIER ROMERO MORA con objeto de mantenerla depositada desde el día 07 de Septiembre de 1999 hasta el día 13 de Octubre de 1999 para que pueda ser examinada por cualquier Doctor que así lo desee.

Granada, a 07 de Septiembre de 1999.

LA SECRETARIA DE LA COMISIÓN
DE DOCTORADO

S. WJ



Edo.: SULTANA WAHNON BENSUSAN
Secretaria de la Comisión de Doctorado

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY

15 30

únicamente TCC, el trabajo de Collins no proporcionaba información colorimétrica de las medidas realizadas.

El primer trabajo donde se miden las características espectrales de la luz-día (422 distribuciones) en el hemisferio sur, entre 285 nm y 775 nm, es el de **Winch, Boshoff, Kok y du Toit** [1966]. Las medidas experimentales fueron realizadas durante siete meses en Pretoria (Sudáfrica) a una elevación de 1.400 m midiendo tanto la luz-día como la luz-cielo (total y cielo sur). El principal objetivo de este trabajo fue la comprobación de las propuestas de iluminantes estándares de la CIE.

Los autores no realizaron ningún tipo de corrección para tener en cuenta la variación de la irradiancia durante los 4 minutos que duraba una medida entre 285 y 775 nm en intervalos de 5 nm. En cuanto a las TCC de las distintas fases de luz-día medidas, concluyeron que estas variaban entre 5.000 K y 12.000 K, siendo el valor más frecuente el de 5.800 K. Para sus medidas de la radiación recibida de todo el cielo sin luz solar directa, los dos valores más frecuentes eran 6.350 y 7.550 K. Para luz procedente del cielo sur las TCC variaban entre 5.200 y 11.500 K, aunque la mayoría se situaban entre 6.300 y 9.000 K.

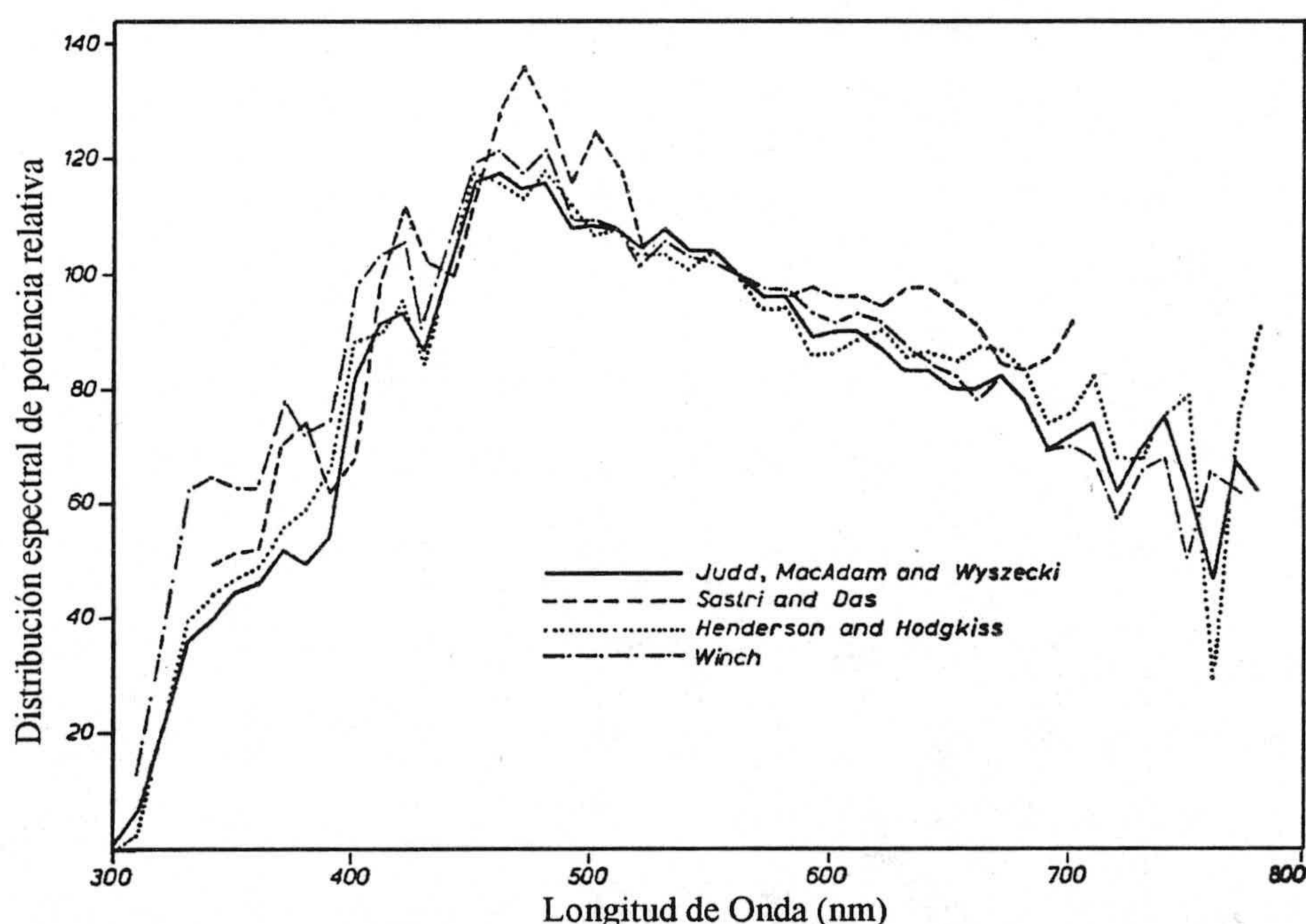


Figura 2.14.- Distribuciones espectrales de luz-día con una TCC de 6.500 K, obtenida por distintos autores.

Las medidas fueron agrupadas en función del valor de la TCC, en intervalos con distintos tamaños, para realizar promedios e interpolaciones con el fin de obtener curvas espectrales con una determinada TCC. Las comparaciones entre las curvas espectrales promedio de estos autores y las recomendadas por la CIE (valores RD) para 5.500, 6.500 y 7.500 K revelaban ciertas diferencias, especialmente en la región ultravioleta y violeta del espectro, mientras que el parecido en la región visible era

adecuado. En la figura 2.14 se muestran ambas curvas para 6.500 K, junto a las obtenidas por Sastri y Das [1968] y Henderson y Hodgkiss [1963], donde se puede apreciar un desplazamiento de la banda de absorción del oxígeno en 762 nm en unos 10 nm.

El contenido en la región ultravioleta de las medidas de luz-día de Pretoria realizadas por Winch *et al.*, es un 30% superior a la formulada por la CIE y un 20% superior a la medida por Henderson y Hodgkiss [1963] en el hemisferio norte. Los autores atribuyeron esta diferencia a la excesiva altura (1.400 metros) en la que se realizaban las medidas espectrorradiométricas.

La inspección de las curvas y los valores clasificados por Winch *et al.* no ofrecen ninguna razón inmediata para encontrar otra característica singular en sus resultados, salvo la gran cercanía de las coordenadas de cromaticidad al *locus* del Cuerpo Negro (ver figura 2.15) algo que es un rasgo común en la mayoría de trabajos similares. Los autores sugirieron que la marcada banda de absorción de Fraunhofer G cercana a los 430 nm podría ser la responsable del ligero desplazamiento hacia la región de los verdes de la mayoría de las coordenadas de cromaticidad de la luz-día de Pretoria. Corrigiendo esta banda de absorción se produce un acercamiento hacia el *locus* del Cuerpo Negro, así como un incremento de casi 140 K en la TCC.

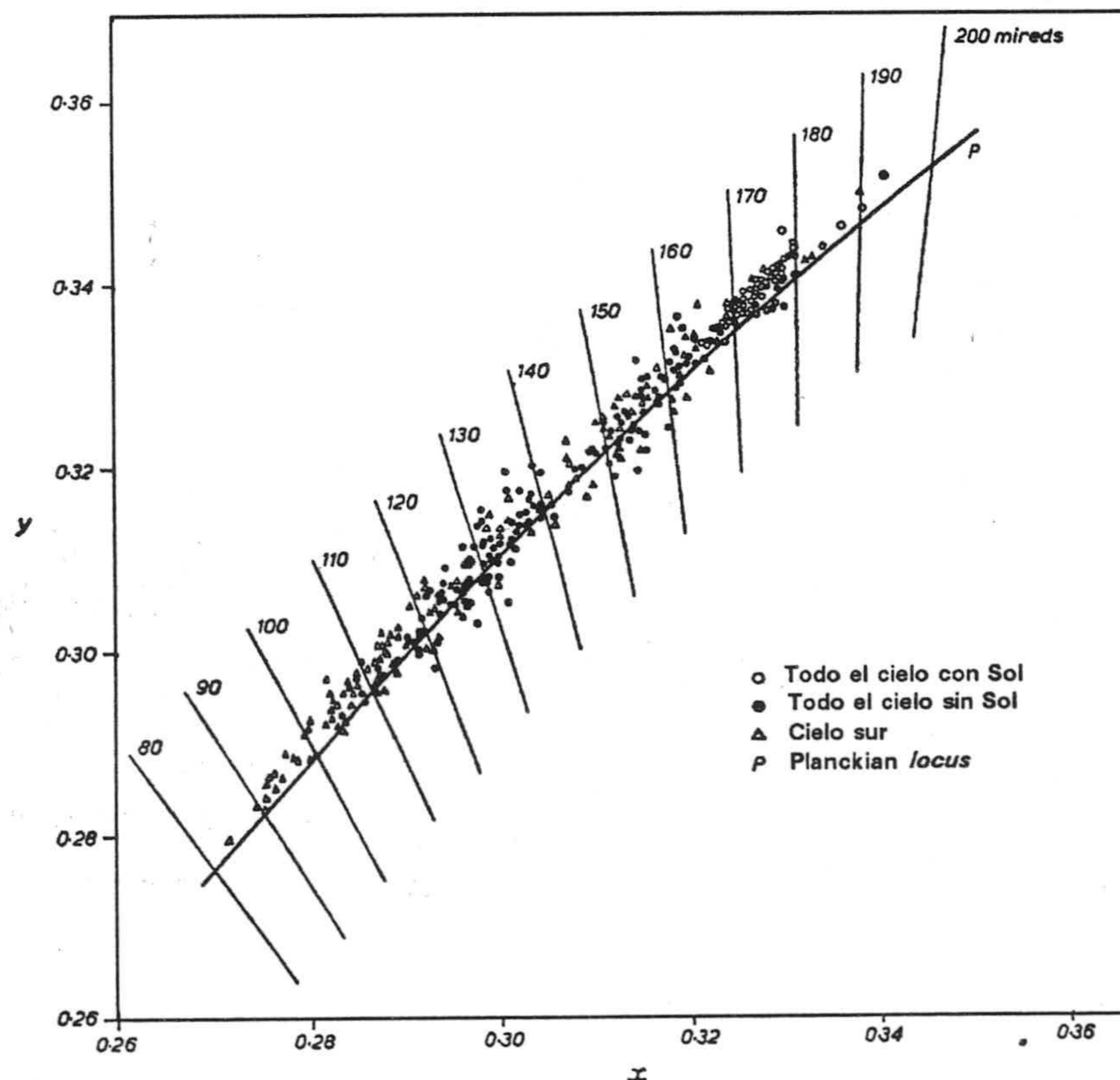


Figura 2.15.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a las medidas de luz-día realizadas por Winch *et al.* [1966] en Pretoria en 1964 y 1965.

En la figura 2.16 se muestra el histograma de TCC de las medidas de Winch *et al.* Aunque la selección de las medidas no fue aleatoria en ninguno de los casos, las condiciones de Pretoria parecen ser menos variables que las de Enfield (Henderson y Hodgkiss), pero con las mismas características: la amplia y bastante uniforme extensión de las coordenadas de cromaticidad del cielo norte (o cielo sur en el caso de medidas realizadas en el hemisferio sur de la Tierra), y la posición de la TCC más frecuente. El predominio de los días despejados en el clima de Pretoria es evidente en el histograma. Este trabajo es el único que permite la comparación de medidas realizadas en el hemisferio sur con las abundantes y aceptadas medidas realizadas en el hemisferio norte.

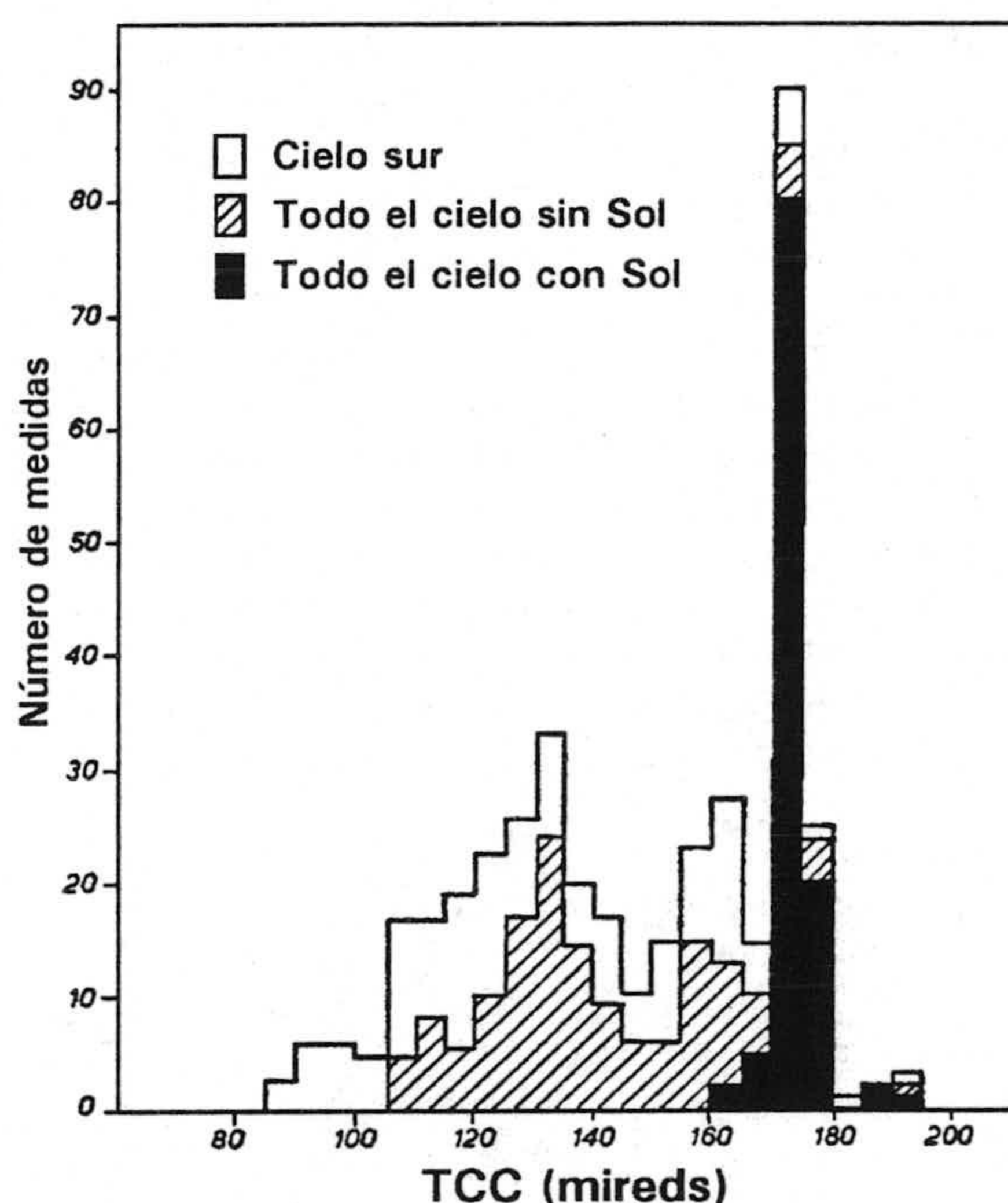


Figura 2.16.- Histograma de TCC (expresada en mireds) de la luz-día medida por Winch *et al.* [1966] en Pretoria.

Das y Sastri [1965] midieron solamente 16 distribuciones espectrales de energía del cielo tropical, entre 340 y 700 nm en Nueva Delhi (India) durante los meses del monzón (Julio, Agosto y Septiembre), para comparar la luz-cielo de Nueva Delhi, (India), con las de Abbot-Gibson (ver en Henderson [1970]), y las distribuciones RD. Sus coordenadas de cromaticidad de la luz-cielo se localizan cerca del Planckian locus, con temperaturas de color correlacionadas entre 6.000 K y 15.000 K, situándose en su mayoría hacia la zona verde del diagrama, alejándose de forma muy marcada del locus del Cuerpo Negro para altas TCC. Sin embargo, para cielos cubiertos se sitúan hacia la región de los púrpuras.

Posteriormente, estos mismos autores, Sastri y Das [1968] presentan en otro artículo un análisis más completo sobre un conjunto de 187 medidas espectrales de luz del cielo norte obtenidas durante un año en Delhi, (India). Las medidas fueron

realizadas entre 300 y 750 nm, tomadas en intervalos de 10 nm, tardando en su adquisición 7,5 minutos y corrigiendo las curvas para tener en cuenta la variación en la irradiancia.

Las coordenadas de cromaticidad cubren un área muy extensa del diagrama (figura 2.17) con TCC entre 4.000 y 20.000 K, situándose un considerable número de puntos hacia la región de los púrpuras, algo que es destacable debido a ser inusual, en comparación con otros trabajos. Sastri y Das advirtieron que, al llevar a cabo medidas durante o después de una tormenta de polvo, las coordenadas de cromaticidad se situaban hacia la región de los púrpuras. Por el contrario, las cromaticidades cercanas a la región verde se obtuvieron bajo condiciones de monzón cuando la atmósfera estaba libre de polvo debido a la lluvia.

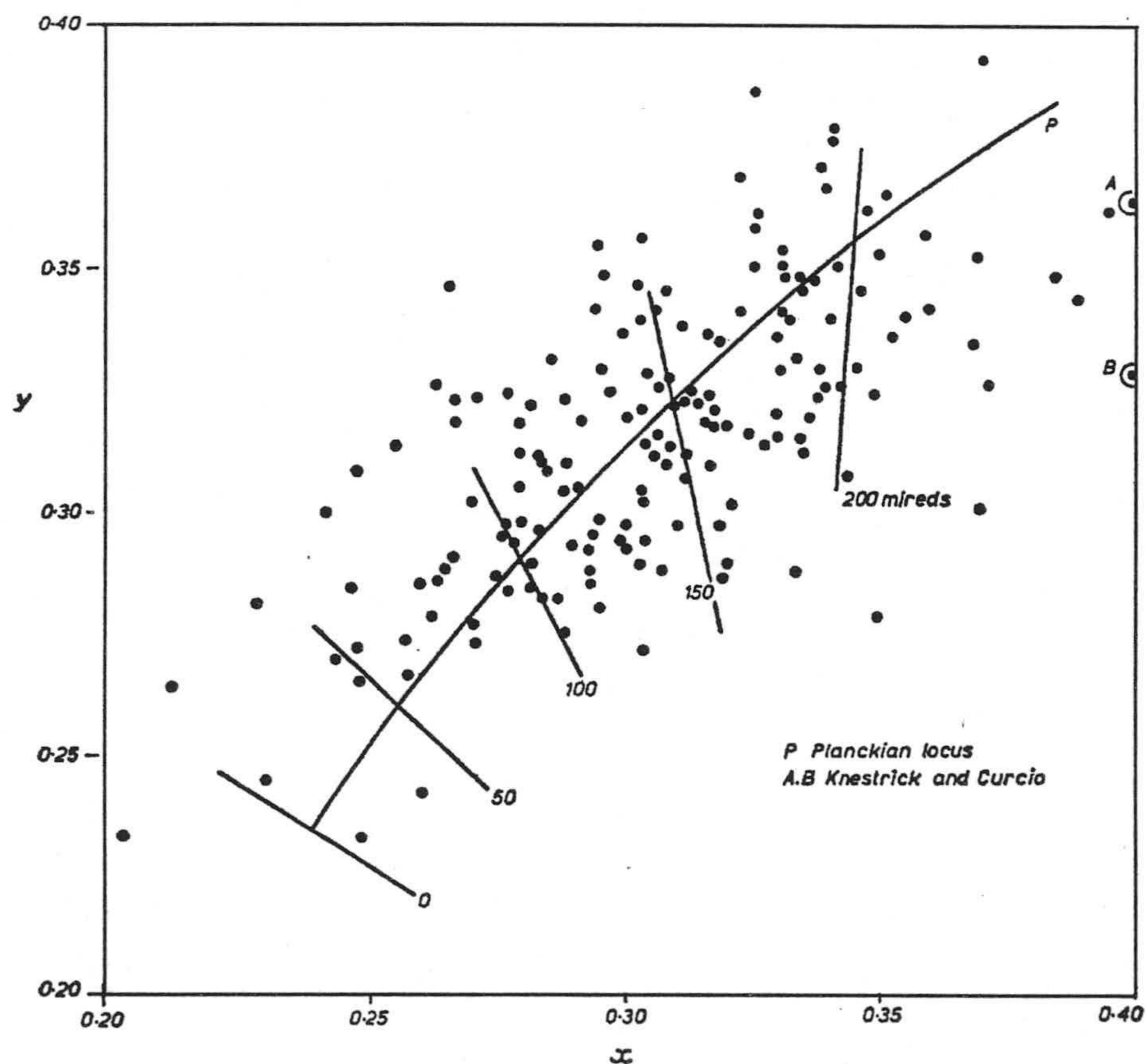


Figura 2.17.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a las medidas de luz-día realizadas por Sastri y Das [1968] en Delhi en 1964 y 1965.

La tendencia previamente apuntada por otros autores (Chamberlin *et al.* [1963], Nayatani y Wyszecki [1963], Condit y Grum [1964], Henderson y Hodgkiss [1964], Nayatani *et al.* [1967]) sobre la distribución de las coordenadas de cromaticidad sobre una línea de menor pendiente que el *locus* del Cuerpo Negro fue confirmada por Sastri y Das. A pesar de la gran extensión de su nube de puntos, Sastri y Das se atrevieron a realizar el cálculo del *locus* representativo de sus medidas, aunque no sin dar información numérica de éste en su artículo.

Debido a que la mitad de los puntos medidos se sitúan por debajo del *locus* del Cuerpo Negro, hacia la región de los púrpuras, algo no encontrado previamente y por tanto sospechoso de ser un resultado erróneo, los autores se plantearon la posibilidad de rellenar las fuertes bandas de absorción encontradas en sus distribuciones espectrales medidas (situadas en 430, 490 y 520 nm) con la intención de comprobar si estas bandas eran las responsables de esos resultados anómalos, sin encontrar una respuesta positiva.

Sastri y Das sometieron sus 187 curvas a un análisis de vectores propios para obtener distribuciones espectrales características a distintas TCC y poder comparar sus resultados con los de otros trabajos. Los autores criticaron la diferencia de comportamiento del análisis de vectores propios para cada uno de los 3 subconjuntos de medidas de Judd *et al.* [1964] y para el conjunto total. Afirmaron que la diferencia podía estar debida a que los subconjuntos de distribuciones espectrales no eran lo suficientemente grandes para representar todos los tipos de variaciones de luz-día. Consideraron que sus curvas eran más representativas, a pesar de ser un número más pequeño que las de Judd *et al.* [1964], ya que fueron realizadas durante todo un año.

Sus ocho primeros vectores propios contribuyen en un 94%, siendo la contribución del primer vector propio de un 66% y la de los dos primeros vectores de un 82%. Estas contribuciones son muy pequeñas si las comparamos con la de otros autores, pero comprensibles si observamos la gran variación de las medidas en cuanto a coordenadas cromáticas y por ende en sus distribuciones espectrales.

Para reconstruir distribuciones espectrales a distintas TCC (sólo 4.800, 5.500, 6.500, 7.500 y 10.000 K), utilizaron el vector principal y los dos primeros vectores propios como hizo Judd *et al.*, a pesar de la escasa contribución anteriormente destacada. Aseguraban que la reconstrucción con estos tres vectores era satisfactoria excepto en el rango de 300 a 330 nm (de hecho algunas reconstrucciones presentaban valores negativos de irradiancia), reconociendo que sus valores no debían tomarse en consideración debido a la pobre sensibilidad de su aparato de medida en ese rango espectral.

El siguiente trabajo donde se realizó una comparación de medidas experimentales con los datos RD tuvo lugar en Amagasaki, (Japón). En esta ciudad **Nayatani, Hitani y Minato** [1967], midieron la luz del cielo norte a una elevación de 45°, entre 310 y 720 nm, y una resolución espectral que variaba desde 1,5 a 18 nm, con la intención de comparar los resultados con los recomendados por el Comité CIE E-1.3.1.

Como cada medida tardaba 4 minutos en completarse, los autores corrigieron todas las curvas teniendo en cuenta el cambio de la iluminancia durante ese tiempo. Las 112 curvas fueron medidas en invierno, encontrando que la mayoría tenía unas coordenadas de cromaticidad por encima del *locus* del Cuerpo Negro (hacia la región de los verdes). De las 112 medidas, 41 de ellas se situaban por encima de la curva recomendada por la CIE, y 71 por debajo. Las coordenadas con TCC superiores a 12.000 K se situaban generalmente por encima de la curva de luz-día de la CIE, y aquellas con TCC por debajo de 6.200 K lo hacen por debajo, como se aprecia en la figura 2.18.

Podemos apreciar, asimismo, que los puntos, sobre el diagrama cromático, están menos esparcidos que los de otros autores (excepto los de Budde). Esto sugiere que el conjunto de medidas no es muy representativo al haber sido adquirido únicamente en invierno. Sin embargo es significativo que, como ocurre en el trabajo de Sastri y Das [1968], para altas TCC los puntos estén más separados del *locus* del Cuerpo Negro que para bajas TCC de manera que su *locus* posee menor pendiente.

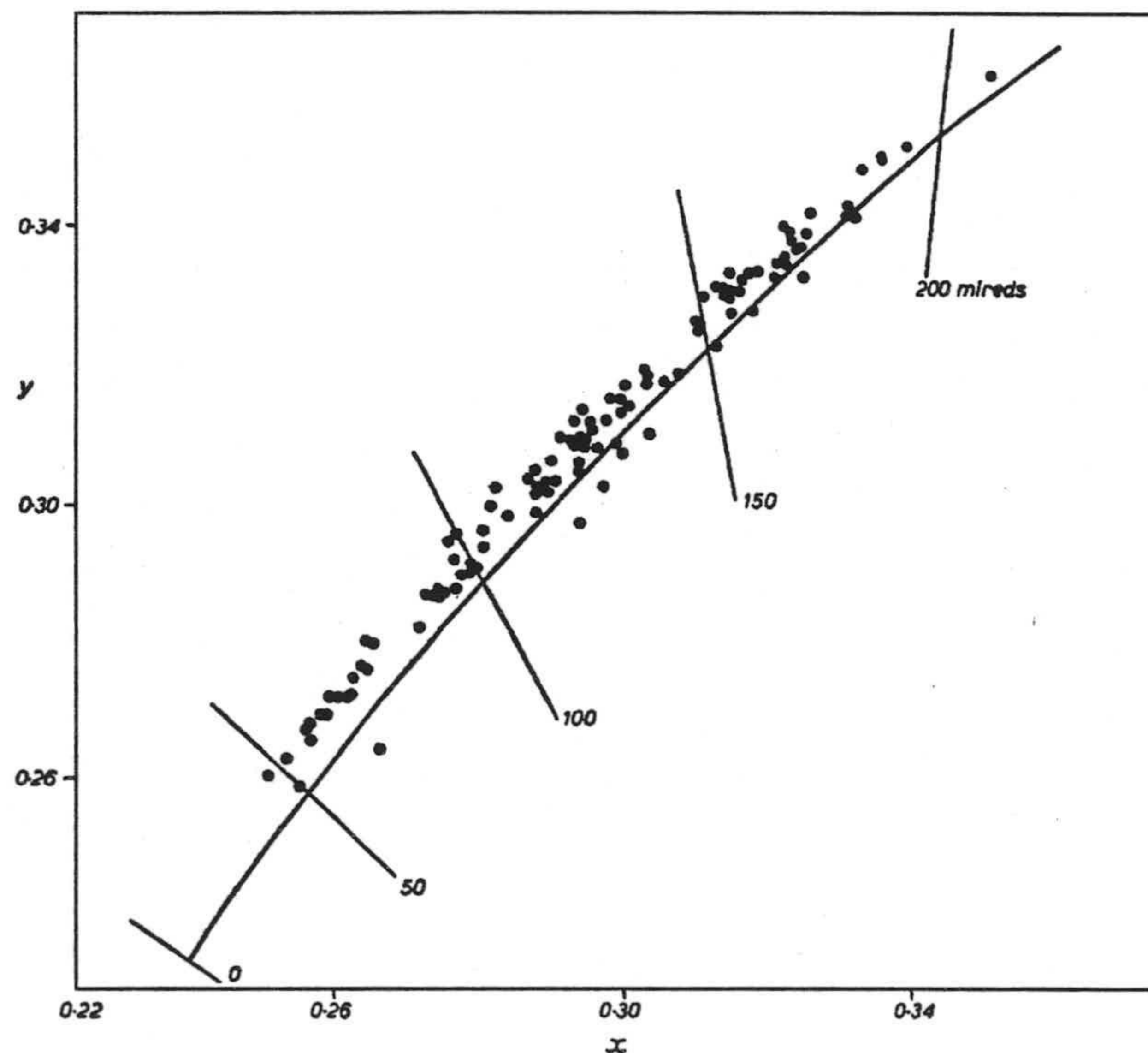


Figura 2.18.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a las medidas de luz-cielo norte realizadas por Nayatani *et al.* [1967] en Amagasaki.

Nayatani *et al.* compararon las curvas adquiridas en Amagasaki con curvas RD, reconstruyendo sus curvas utilizando el método y los vectores propuestos por la CIE. Los resultados obtenidos confirman que ambas curvas coinciden bastante bien en la región visible. Sin embargo aparecen discrepancias en la región ultravioleta, donde los valores obtenidos por los autores son un 8% superiores a los de la CIE.

Hasta la aparición de este trabajo la evaluación de la similitud entre curvas espectrales se había realizado de una forma meramente descriptiva, nunca de forma cuantitativa. Nayatani *et al.* fueron los primeros que lo hacen, utilizando el índice de metamerismo propuesto por Nimeroff y Yurow [1965] obteniendo valores cuantitativos de las diferencias cromáticas entre medidas experimentales y curvas RD con la misma TCC. Los autores afirman, a partir de los resultados obtenidos, que no existen diferencias visuales entre las medidas de Amagasaki y las RD.

Otra investigación japonesa se desarrolló en Nagaoka casi simultáneamente a la realizada en Amagasaki. **Ando, Ikemori y Sekine** (ver Henderson [1970]) trabajaron en dos lugares distintos, con 25 y 95 m de elevación respectivamente, con equipos y métodos similares, midiendo la luz del cielo norte a 45°, principalmente al mediodía durante 9 meses. La duración de la medida era de 2,5 a 3 minutos, de forma que los autores rechazaron (no corrigieron) algunas de las medidas debido al cambio de la irradiancia durante ese tiempo. En la figura 2.19 se muestra las coordenadas de cromaticidad de las 303 curvas observándose, una vez más, la tendencia de que el *locus* que las representa posea una pendiente menos acusada que la del *locus* del Cuerpo Negro o el CIE *locus*. Muy pocos datos se situaban por debajo del *locus* del Cuerpo Negro. Estos autores también utilizaron un índice de metamerismo para comparar sus curvas espectrales con las RD, encontrando resultados similares a los obtenidos por Nayatani *et al.* También fueron usados otros dos métodos para comparar curvas espectrales, entre ellos el *índice general de rendimiento de color*, cuyo resultado era superior al 95%.

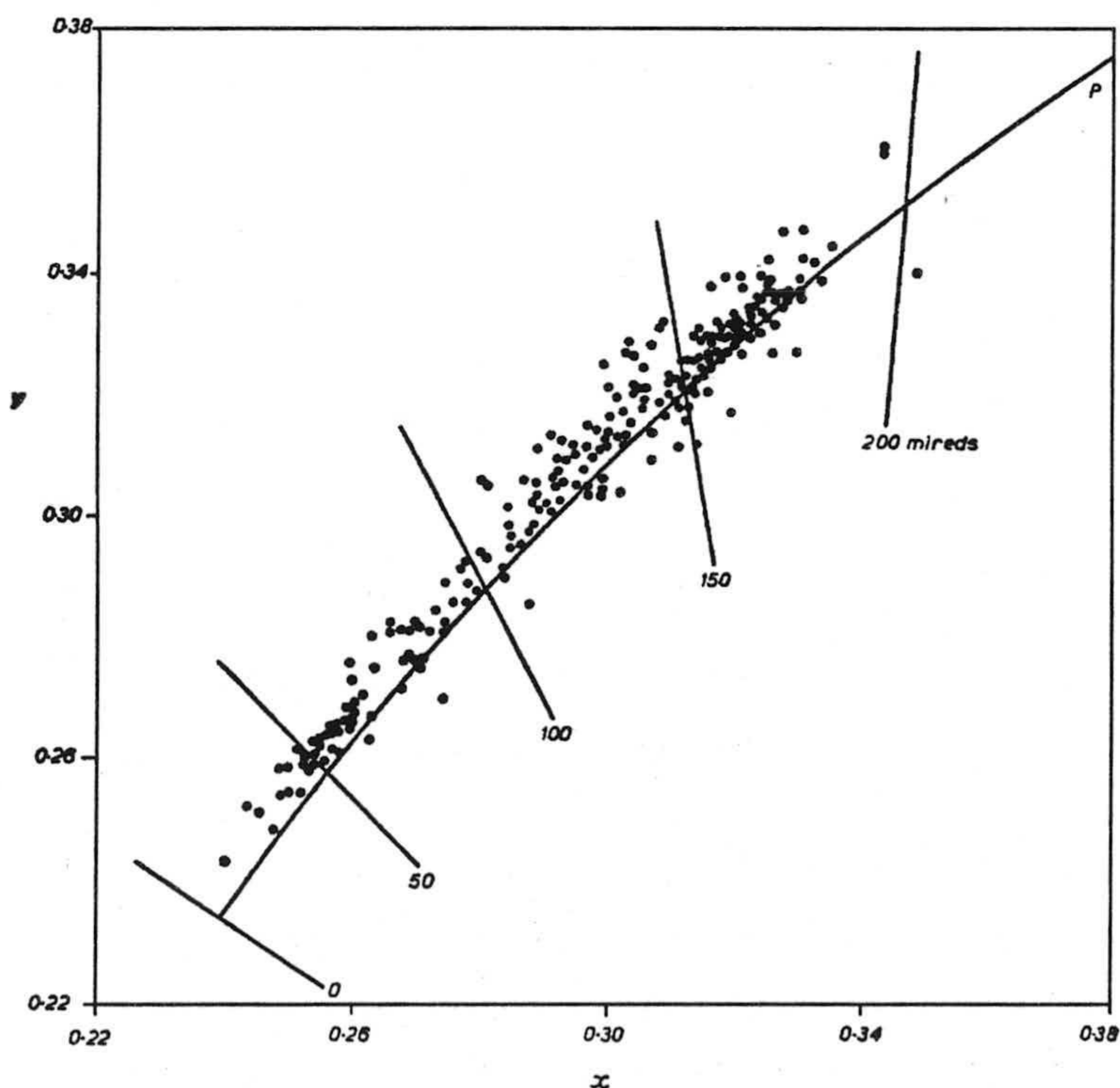


Figura 2.19.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a las medidas de luz-cielo norte realizadas por Ando *et al.* (ver Henderson [1970]) en Nagaoka.

El histograma de TCC de este trabajo, una vez extendida la campaña hasta Junio del 1967, es el que se muestra en la figura 2.20, en donde las observaciones se separan atendiendo a las condiciones del cielo (despejado o cubierto). El máximo sobresaliente de 160 a 170 mireds (5.880 a 6.250 K) para cielos cubiertos no fue observado en ningún trabajo previo.

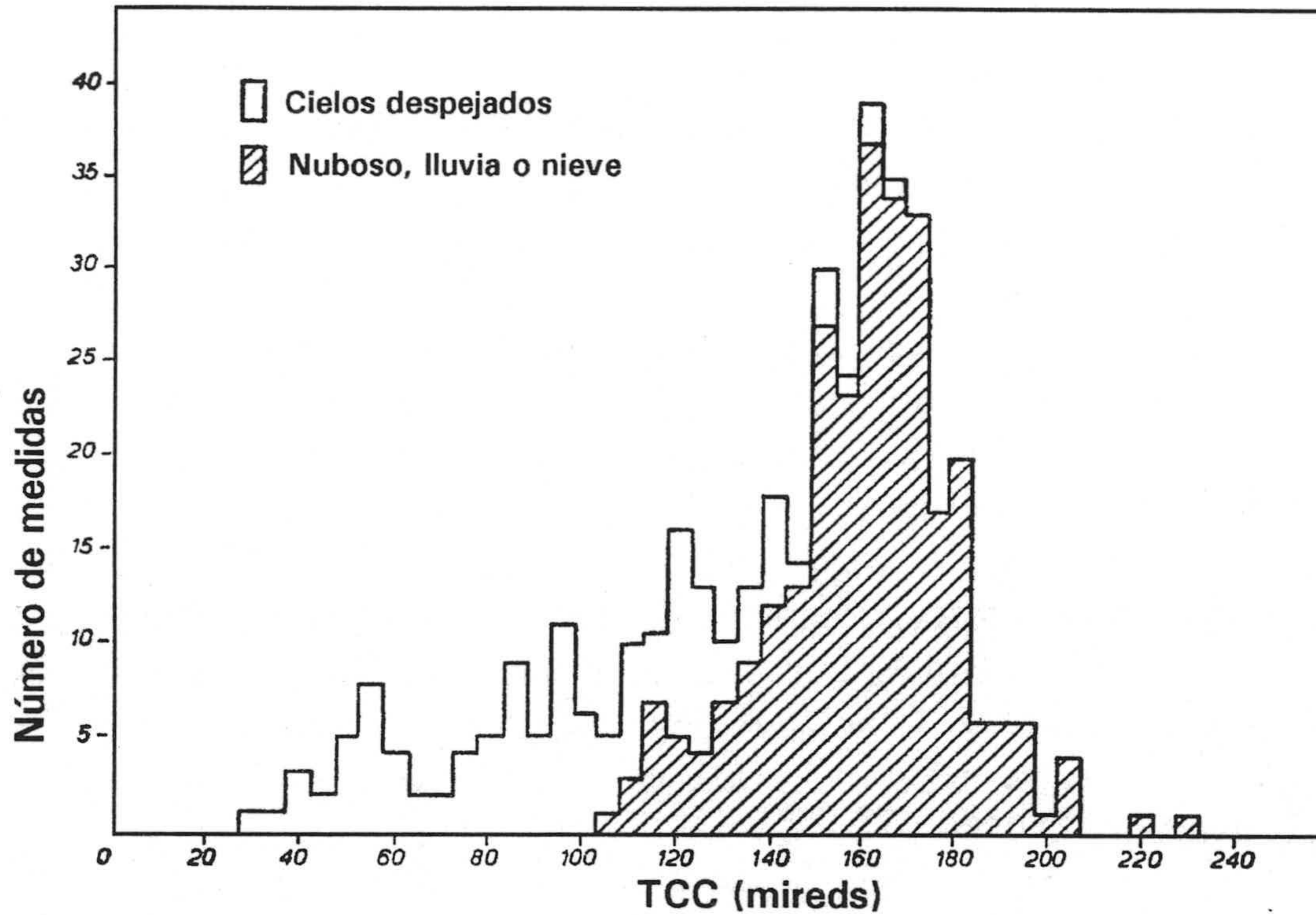


Figura 2.20.- Histograma de TCC (expresada en mireds) de la luz-cielo norte medida por Ando *et al.* (ver Henderson [1970]) en Nagaoka.

Otro extenso trabajo fue llevado a cabo por Tarrant [1968] en Inglaterra entre 1963 y 1967, aunque no de forma continúa. El equipamiento que utilizó para adquirir las medidas y su procesamiento ulterior fue bastante más complejo que el de los trabajos previos, mejorando la resolución espectral. Midió alternativamente luz-cielo norte y luz-cielo sur (ésta última incluyendo a veces luz-sol). El intervalo espectral de las 391 medidas estaba comprendido entre 300 y 800 nm, con un ancho de banda de 1,2 nm. Los diagramas cromáticos de Tarrant muestran una distribución muy similar a la de Judd *et al.*, como se puede apreciar en la figura 2.21, en las que se hace distinción por tipo de cielos, y en la figura 2.22, donde aparecen todas las medidas sin distinción.

Tarrant encontró que las curvas de luz del cielo norte poseían una TCC entre 5.000 y 11.000 K mientras que para el cielo sur la variación era menor, de 4.800 a 8.000 K, confirmando que el perfil espectral variaba más para la orientación norte que para sur. En este último caso el color puede variar únicamente entre el correspondiente a luz solar directa y el de un cielo totalmente cubierto. Para la orientación norte sólo se

recibía luz-cielo y por tanto existía un gran rango de condiciones atmosféricas posibles. Tarrant aseguraba que cuando las medidas se realizaban con las dos orientaciones en las mismas condiciones de cielo, los perfiles espectrales medidos con orientación norte contenían mayor componente azul (a no ser que el cielo estuviera totalmente cubierto).

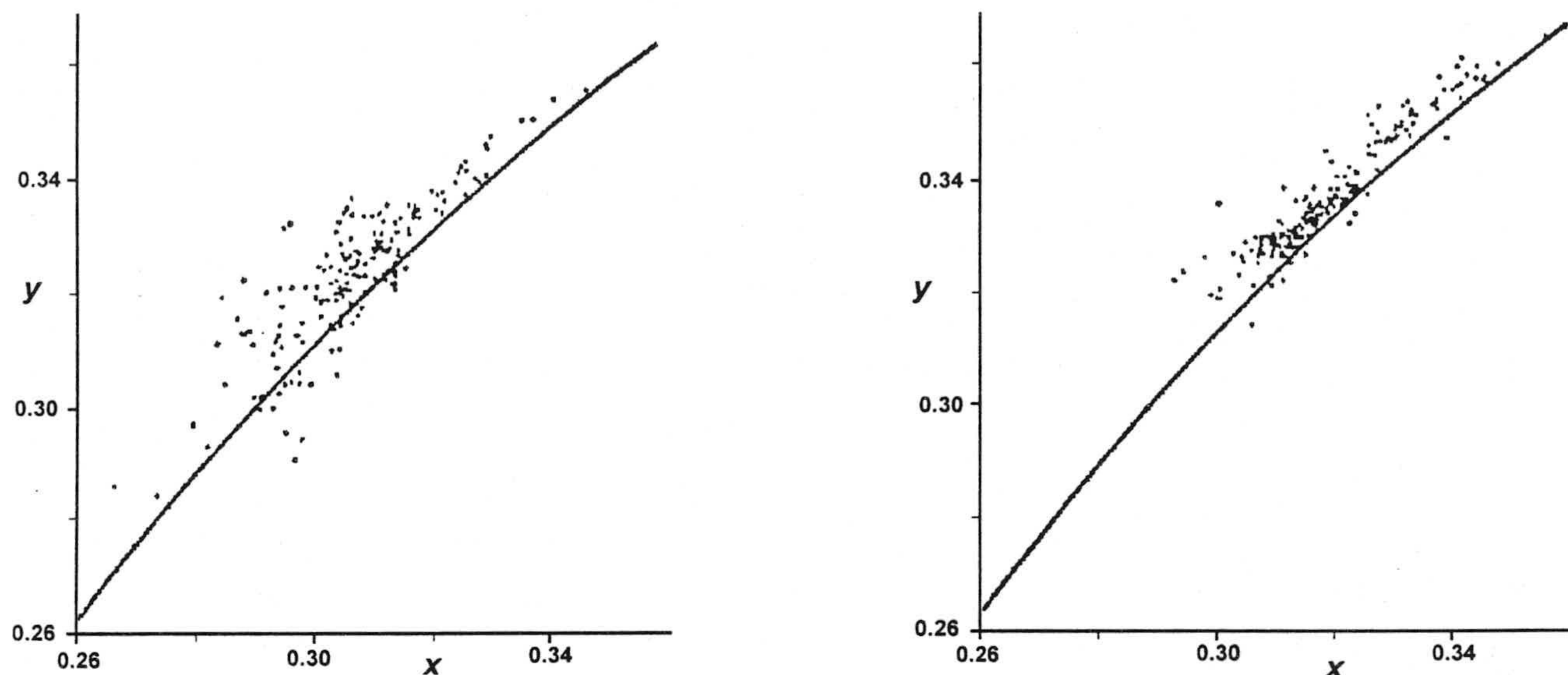


Figura 2.21.- Coordenadas de cromaticidad de las medidas de Tarrant [1968] en el diagrama CIE 1931. La figura de la izquierda corresponde a las medidas de cielo norte y la de la derecha a las de cielo sur.

Los histogramas presentados por Tarrant estaban realizados para intervalos de TCC de 10 mireds, obteniendo que el más frecuente para cielo norte era el comprendido entre 140 y 160 mireds (6,250 K - 7,150 K), mientras que para cielo sur era el de 150 a 160 mireds (6,250 K - 6,670 K). Sin hacer distinción entre la luz del cielo norte y la del cielo sur Tarrant obtuvo el histograma mostrado en la figura 2.23, donde el autor utilizó intervalos de mireds más anchos que en los demás trabajos que hemos citado en este capítulo.

De las observaciones de Tarrant, el 95% (366) fueron realizadas en Putney, Londres, a 15 m de altitud, y el resto (25) en Saffron Waldon, Essex, a 100 m en un ambiente rural. No encontró grandes diferencias espectrales entre las curvas medidas en estos dos sitios, ni entre el perfil espectral de curvas medidas en verano e invierno con la misma TCC. Entre las curvas de luz cielo norte y sur existía cierto incremento en la irradiancia por debajo de 350 nm y por encima de 690 nm para las curvas de cielo norte. Aunque reconoce que las dos atmósferas no deben ser iguales, el efecto que observa es de un aumento del esparcimiento en atmósferas contaminadas, que produce el mismo efecto que el de un crecimiento de la cantidad de nubes en el cielo.

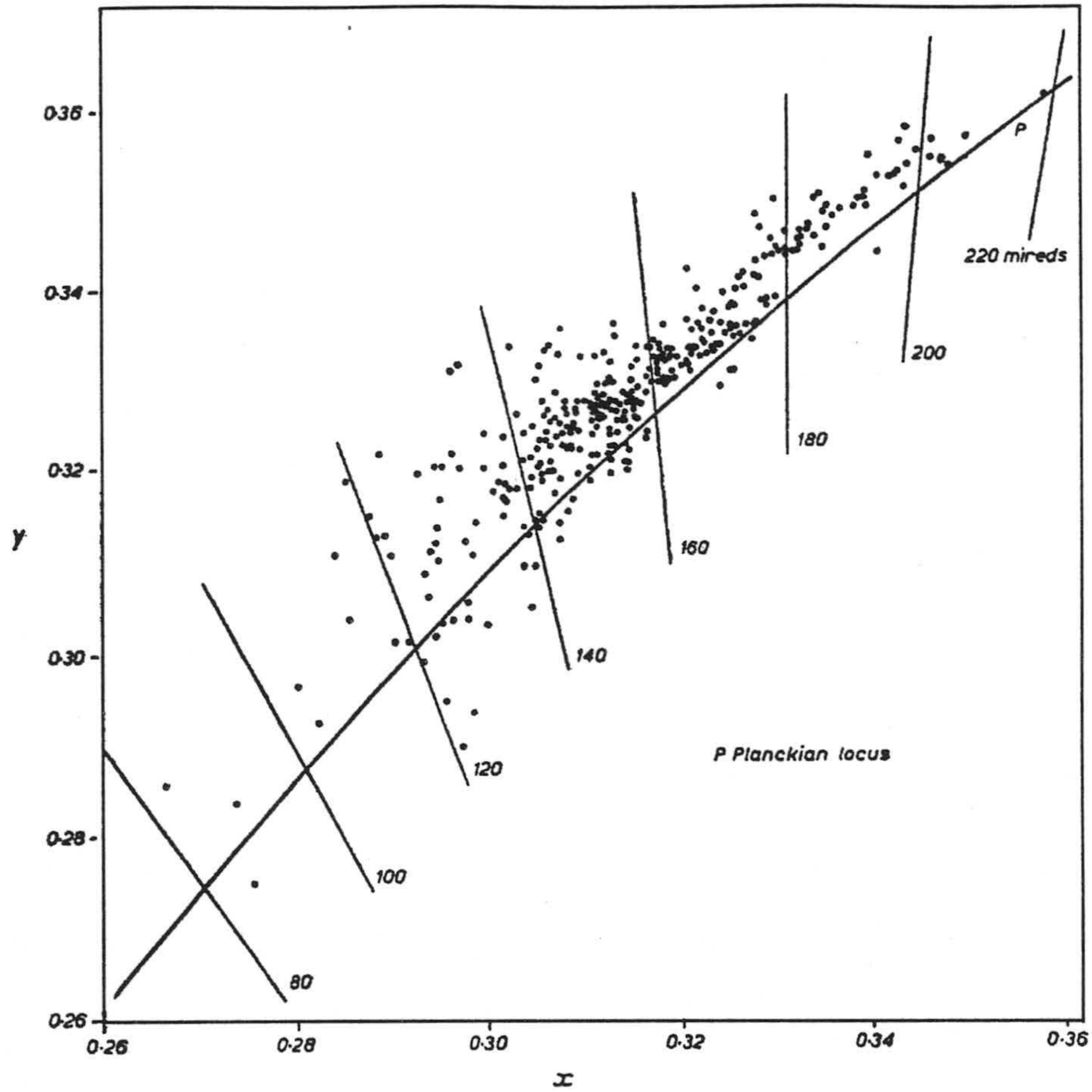


Figura 2.22.- Coordenadas de cromaticidad de todas las medidas de Tarrant [1968].

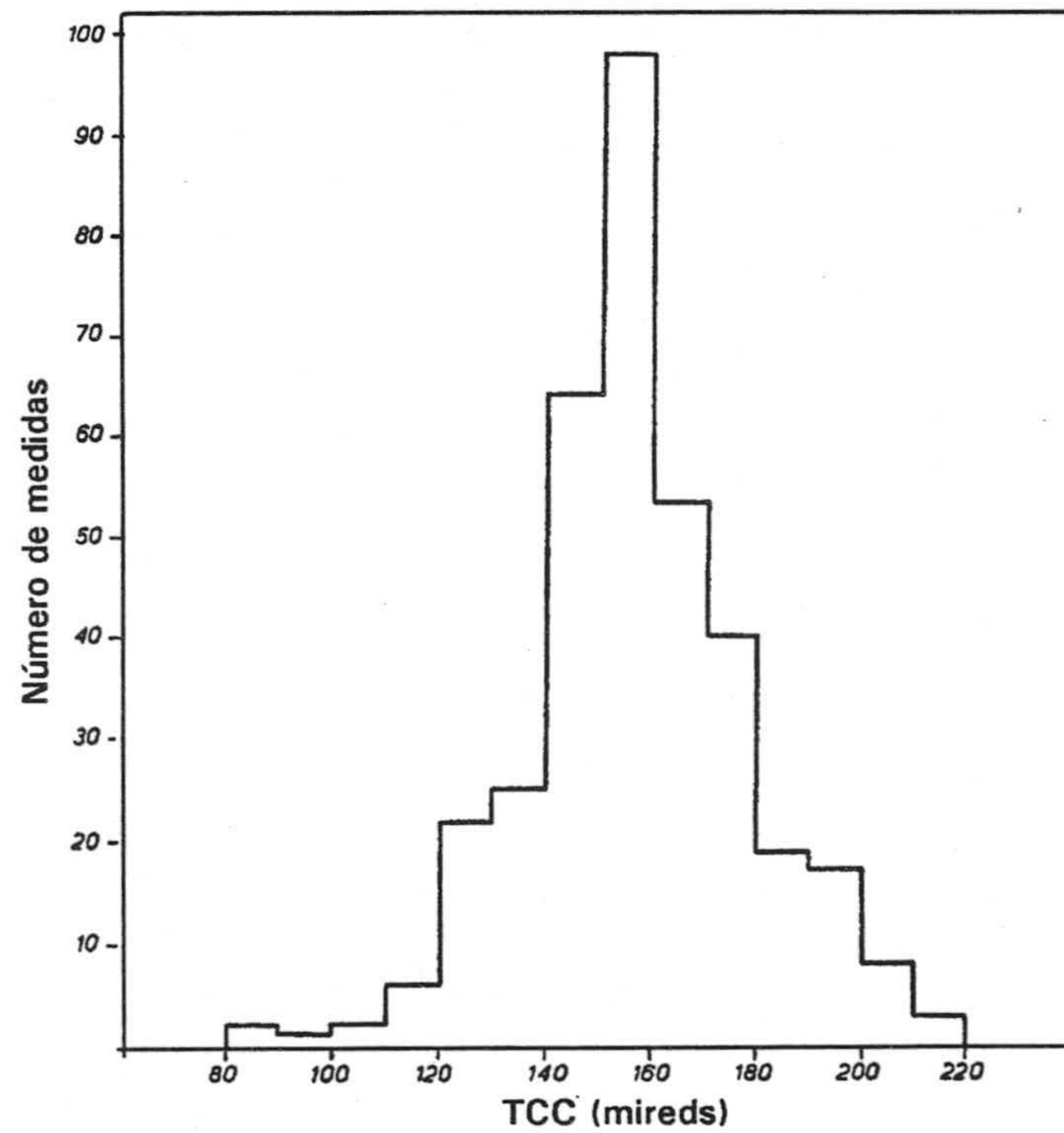


Figura 2.23.- Histograma de TCC (expresada en mireds) de la luz-día medida por Tarrant [1968]

Tarrant intentó estudiar la posible correlación entre las condiciones atmosféricas (cantidad de nubes, dirección del viento y hora del día) y las coordenadas de cromaticidad, pero sus intentos fueron infructuosos. Sin embargo observó un cambio importante hacia las TCC altas durante las mañanas, y cierta estabilidad en el resto del día. Esta característica fue atribuida al incremento del esparcimiento, producto del crecimiento de la contaminación atmosférica durante las mañanas. Así mismo observó que el efecto de la elevación solar era mucho menor del esperado.

Las medidas de Tarrant estaban afectadas por la falta de sensibilidad del detector usado por encima de los 700 nm. En el resto del espectro visible sus curvas mostraban el mismo perfil que las medidas por otros autores. Hasta la fecha todo parece indicar que el contenido de ultravioleta de la luz-día no está correlacionado de ninguna manera con el contenido en el visible, pero Winch *et al.* [1966] encontró, de forma consistente, altos valores de ultravioleta, y en menor grado también fueron observados por Nayatani *et al.* [1967]. En este sentido, los resultados de Tarrant concuerdan bastante con los de Winch *et al.*, y son inusuales en una atmósfera contaminada como la de Londres. La discrepancia con respecto a las curvas RD es más evidente entre 360 y 400 nm, donde las dificultades en la calibración no son tan graves como ocurre para cortas longitudes de onda. La aparición de este trabajo impulsó un interés sobre la variación natural de la luz-día en la región ultravioleta, y su medida.

De forma análoga a como hizo Winch *et al.* con sus medidas, Tarrant dividió las suyas (en cielo norte y cielo sur) para promediarlas entre 150 y 160 mireds, obteniendo dos curvas con TCC cercanas a 6.500 K y mostradas en la figura 2.24.

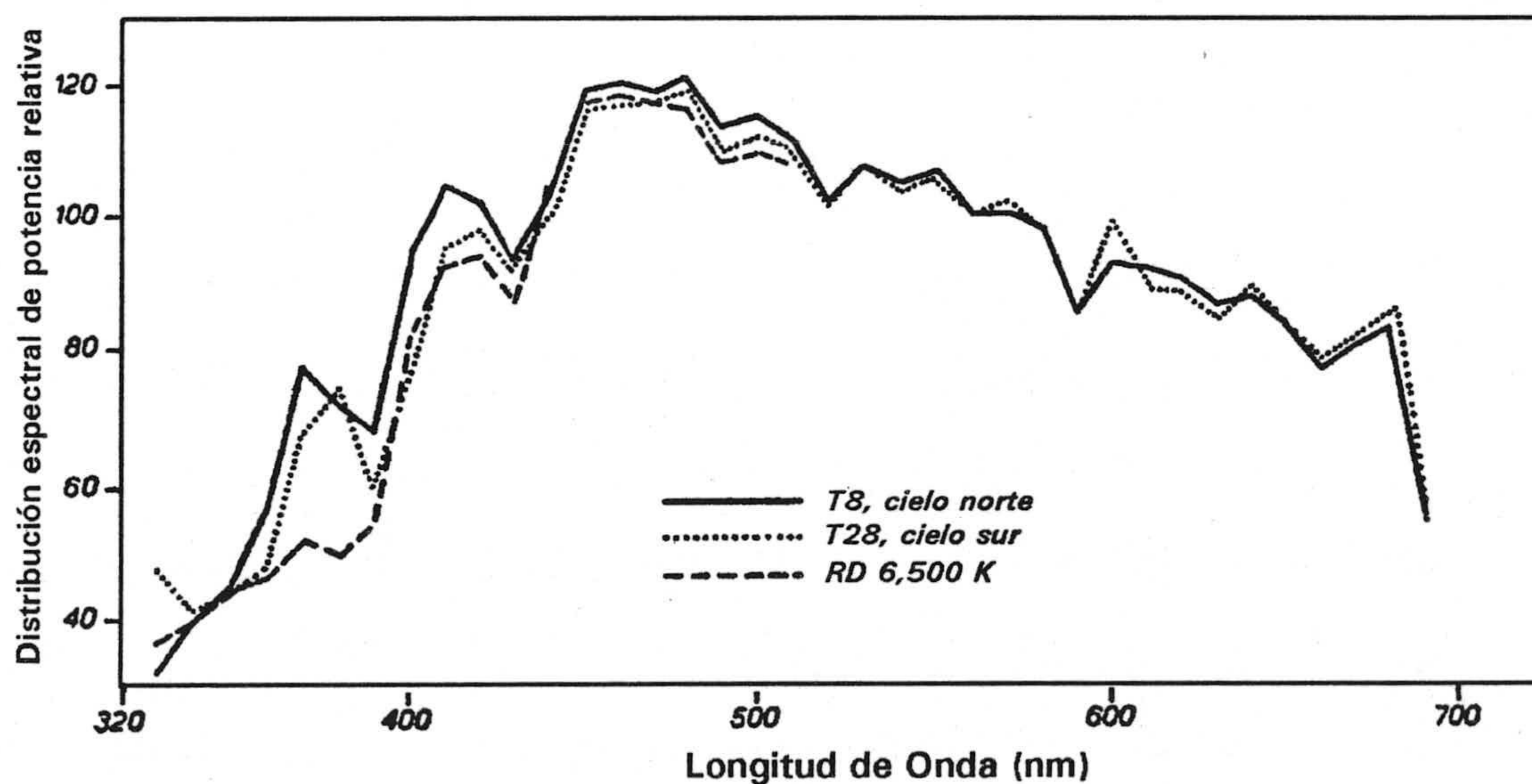


Figura 2.24.- Distribuciones espectrales promedio de las medidas de luz-día, obtenidas por Tarrant [1968], con TCC comprendidas entre 150 y 160 mireds, distinguiendo entre cielo norte y cielo sur, así como la distribución espectral del D₆₅

Tarrant concluyó su trabajo afirmando que en el rango visible los perfiles espectrales de dos medidas con la misma TCC son prácticamente iguales. Sostenía, asimismo, que la contaminación introduce materiales que favorecen el esparcimiento en vez de la absorción, y que su efecto es similar al de una capa delgada y uniforme de nubes. Aseguraba que el perfil en la región del ultravioleta era altamente variable y que se veía afectado ampliamente por la longitud del camino óptico.

Un proyecto inusual fue realizado por **Knestrick y Curcio** [1967] en el Laboratorio de Investigación Naval de Washington D.C., (EE.UU.). Midieron la radiancia espectral procedente de pequeñas áreas del horizonte para varias elevaciones y acimuts solares, sobre tierra y sobre agua, entre 380 y 1.000 nm. Los autores anotaron las condiciones atmosféricas (cantidad de nubes y humedad relativa), pero no aplicaron ningún tipo de corrección sobre las curvas debido a que el tiempo que tardaban en la adquisición de cada medida espectral era de tan sólo 1,5 minutos. La polarización de la radiación también fue medida pero los cálculos mostraron que sus efectos eran despreciables.

De las 45 curvas obtenidas dos terceras partes correspondían a amaneceres o atardeceres, con elevaciones solares entre $+11^\circ$ y $-5,5^\circ$. Muchas de estas medidas poseían TCC menores que las usuales para luz-día, y los perfiles espectrales eran muy distintos de los obtenidos en el caso de luz solar directa o luz-cielo correspondiente a áreas mayores de cielo. Los autores no determinaron las coordenadas de cromaticidad de sus medidas, algo que hubiera sido muy útil, aunque posteriores cálculos sobre algunas de las curvas suministradas confirman que se sitúan hacia la región de los púrpuras, y bastante alejadas del *locus* del Cuerpo Negro.

2.7. Trabajos en los años 70

Sastri y Manamohanan [1971] realizaron 60 medidas de la radiación procedente del cielo norte en Bombay, (India), durante dos semanas, siguiendo el mismo procedimiento que Sastri y Das en Delhi. A pesar de la notable diferencia existente entre ambas atmósferas (la de Bombay posee muchas áreas industriales, contaminantes, polvo, y alta humedad), los autores no encuentran diferencias significativas en los detalles de los perfiles espectrales. Como los contaminantes industriales consisten principalmente en hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y de carbón, afirman que la mayoría de las fuertes absorciones de estos contaminantes se producen en el infrarrojo y no en la región visible o ultravioleta.

Casi la totalidad de las coordenadas de cromaticidad se situaban hacia la región de los verdes y con TCC comprendidas entre 7000 K y ∞ K, figura 2.25. Los datos con altas TCC se sitúan hacia los verdes mientras que los de baja TCC caen hacia los púrpuras. Las razones esgrimidas por los autores, para explicar las altas TCC encontradas, se basan en que durante los meses de medida, los cielos estaban generalmente despejados, después de un período de lluvias, con alta humedad y brumas matinales. El *locus* de las medidas de Bombay se comporta como el de Delhi.

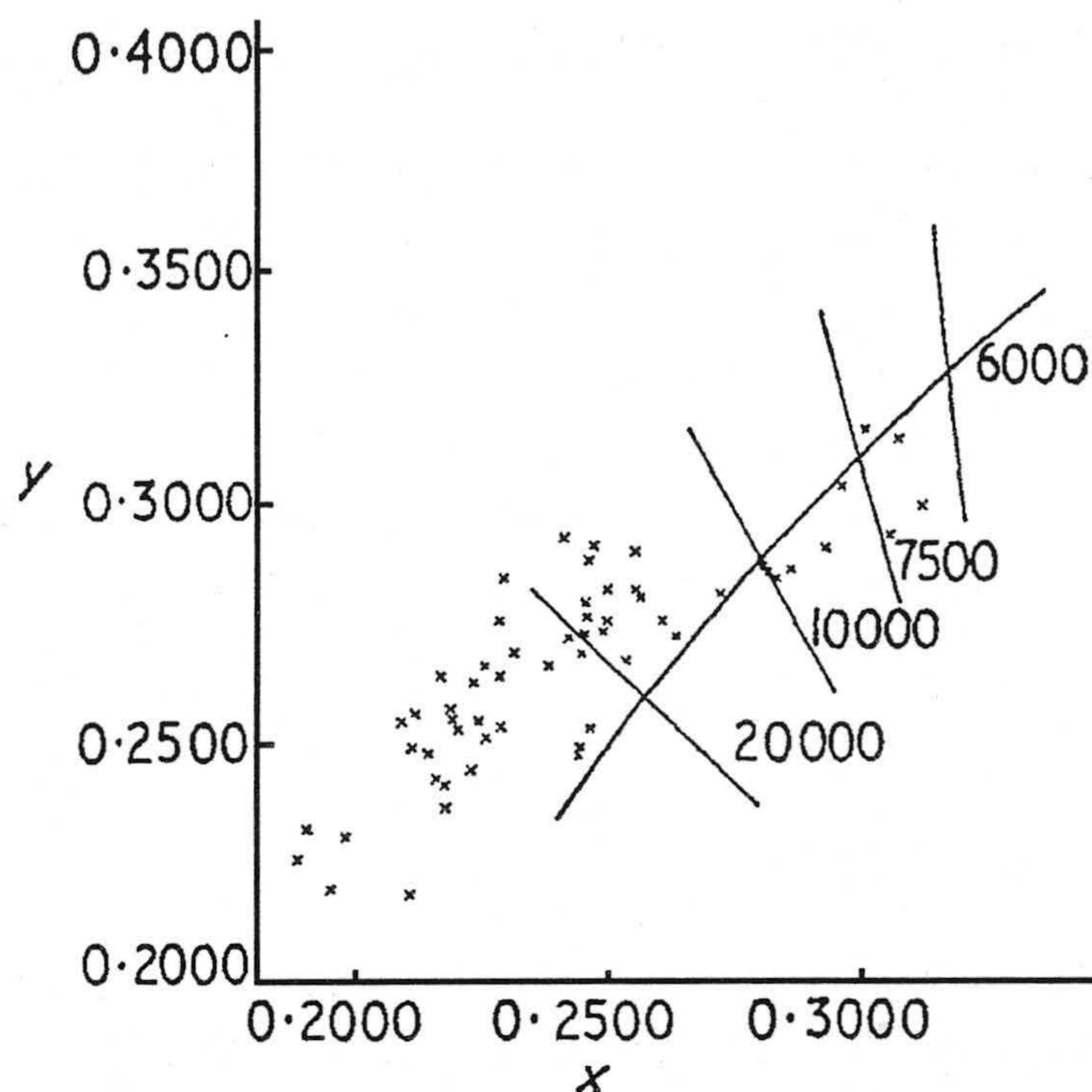


Figura 2.25.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a las medidas de luz-cielo norte realizadas Sastri y Manamohanan [1971] en Bombay.

Las 60 curvas fueron sometidas a un análisis de vectores propios. Los ocho primeros poseían un peso del 97% en la traza de la matriz calculada. El primer vector lo hacía en un 69% y los dos primeros en un 82%. El perfil espectral de los dos primeros vectores no posee el mismo comportamiento que los calculados por Sastri y Das y por Judd *et al.* Atribuyen este hecho a que los datos de Bombay no son significativos debido a que el período de medida fue únicamente dos semanas y no podía ser representativo de todas las condiciones atmosféricas posibles. Debido a esto, los autores no intentaron reconstruir curvas a partir de los vectores calculados.

Con respecto al contenido de ultravioleta y las interesantes diferencias entre distintos trabajos, los autores afirmaron que esta disparidad de resultados se podía deber a la limitación en la precisión de los aparatos usados, a la variación en la actividad solar y a las variaciones latitudinales de ozono; sugerían, por tanto, que el estudio tenía que ser más continuo, realizando un mayor número de medidas en este intervalo espectral.

Kok [1972] utiliza las medidas, anteriormente descritas, obtenidas por Winch *et al.* (422 de luz-día, luz-cielo total y luz-cielo sur), para estudiar la influencia de la contaminación en la atenuación de la radiación. Compara las medidas que fueron obtenidas en días despejados con las realizadas en días con la atmósfera muy contaminada para comprobar la existencia de absorción selectiva debida a la contaminación. Concluyó afirmando que, si esta absorción existía, era muy despreciable en el rango en el que se habían medido las distribuciones (300-750 nm), resultado que concuerda con los de Tarrant [1968] y Sastri y Das [1968].

Comparando sus curvas con las de otros autores (Henderson y Hodgkiss [1963], Judd *et al.* [1964], Condit y Grum [1964], Tarrant [1968]) Kok reparó en los altos valores de la irradiancia en el rango ultravioleta obtenidos en Pretoria, afirmando que la radiación ultravioleta causa tremendas decoloraciones en los tintes y deterioros de algunos materiales expuestos a la luz-día en dicha ciudad. Por ello aconsejaba realizar medidas similares al nivel del mar para comprobar si el alto contenido en ultravioleta se debía únicamente a la elevada altitud de Pretoria o ocurría de forma similar en otros lugares del hemisferio sur. Kok ya señalaba, en su trabajo, que el contenido de ozono en la atmósfera durante el verano es inferior que en invierno y dado que sus medidas fueron realizadas principalmente en la estación estival, la absorción debida al ozono era menor, incrementándose la radiación ultravioleta recibida.

Otra posible explicación de este hecho, sugerida por Kok, estaba relacionada con el método de medida utilizado por otros autores, ya que estos medían la radiación recibida sobre una superficie plana, orientada en un determinado ángulo, sin recibir de este modo, luz de todo el hemisferio, ocultando una parte del cielo que contribuye, de forma notable, a la irradiancia en la región ultravioleta. Kok insistió sobre el hecho de que las curvas RD, adoptadas y recomendadas por la CIE, poseían un contenido demasiado bajo en las regiones ultravioleta y azules, en comparación con las halladas en Pretoria.

Otro trabajo importante es el de **Dixon** [1978] en el que se realizaron dos series de medidas de distribuciones espectrales de luz-día y luz-cielo en dos lugares del sudeste de Australia, uno situado en terreno urbano y el otro en el campo. Ambos conjuntos de medidas fueron sometidos a un análisis de vectores propios. La principal motivación del autor fue la palpable diferencia entre los resultados obtenidos en el hemisferio norte y los realizados en el hemisferio sur en cuanto al contenido ultravioleta así como en las características colorimétricas de las curvas medidas.

El primer conjunto de 290 medidas, de luz-día, entre 280 y 2800 nm, fue realizado durante siete meses en Coburg (Victoria), ciudad cercana a un área suburbana industrial. El segundo conjunto estaba compuesto por 240 distribuciones

espectrales, de luz-día y luz-cielo, medidas durante dos semanas en la ciudad de Bendigo. Más de la mitad de estas medidas fueron rechazadas debido a que presentaban una gran variación en la irradiancia durante el tiempo de medida (2 minutos). Las restantes (123 del conjunto de Bendigo y 113 de Coburg) fueron sometidas a un análisis de vectores propios. En su artículo Dixon proporcionó información gráfica y numérica de los cuatro primeros vectores propios así como del vector principal, afirmando que los tres primeros vectores de Bendigo contribuían en un 99,1%, mientras que para los datos de Coburg se necesitaban cuatro vectores propios para obtener una contribución del 92,8%.

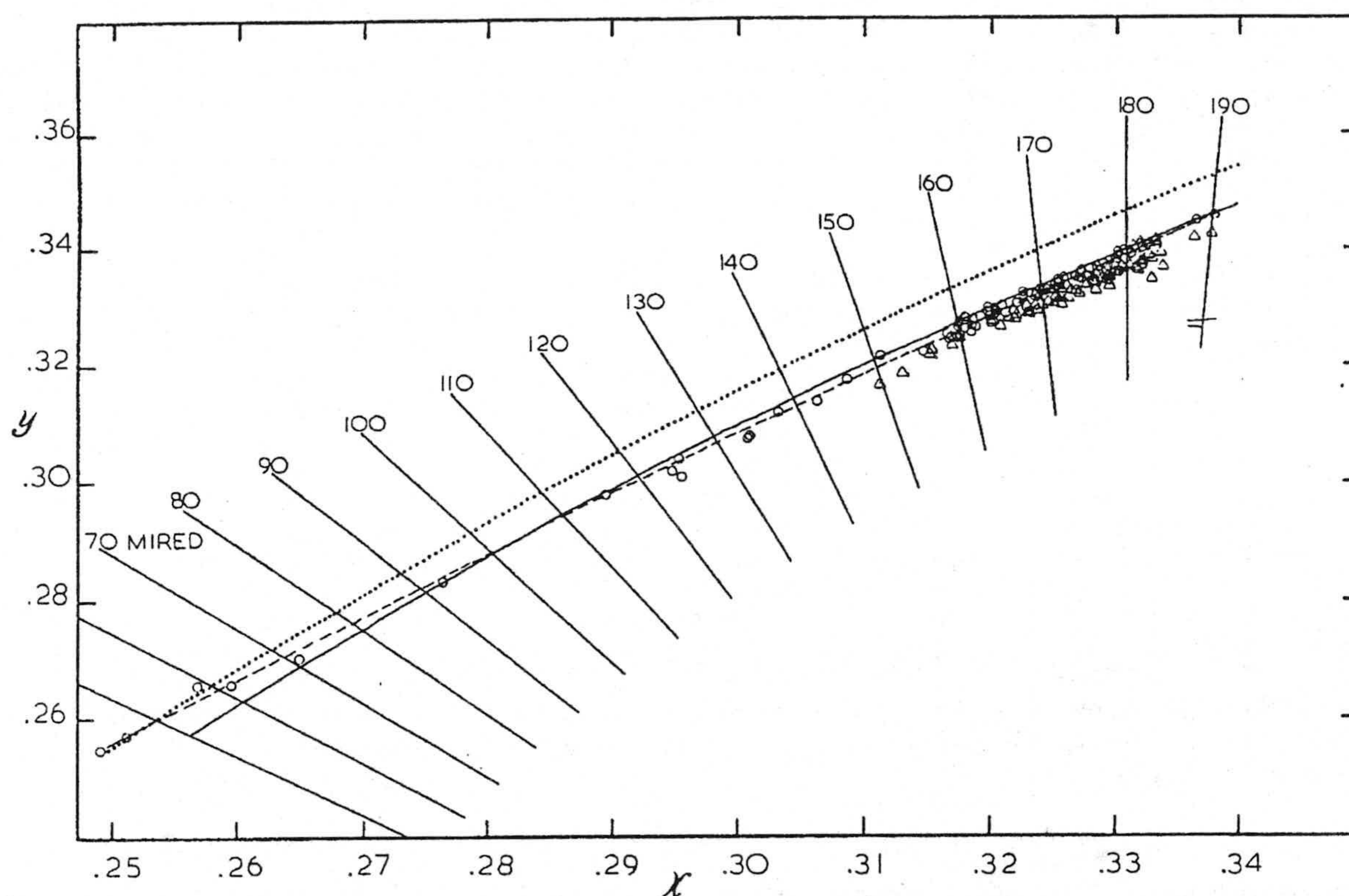


Figura 2.26.- Coordenadas de cromaticidad de las medidas de luz-día de Dixon [1978]. (Círculos: datos de Bendigo; triángulos: datos de Coburg; línea discontinua: *locus* de Bendigo $y_B = -0.960x_B^2 + 1.585x_B - 0.08054$; línea de puntos: CIE *locus*; línea continua: *locus* del Cuerpo Negro).

Las coordenadas de cromaticidad, cuyas TCCs están entre 5000 K y 8000 K, mostradas en la figura 2.26, se sitúan muy cercanas al *locus* del Cuerpo Negro, hacia la región de los púrpuras, mostrando un comportamiento discordante al encontrado por otros autores, ya que las medidas adquiridas en la India por Sastri y Das [1968] y por Sastri y Manamohanan [1971] se sitúan mucho más alejadas del *locus* del Cuerpo Negro, hacia los púrpuras, que las de Dixon, siendo la variación verde-púrpura de las medidas de otros autores mucho mayor que la encontrada por Dixon. Asimismo, para los datos de Bendigo se observa un desplazamiento hacia la zona de los verdes para altas TCC como el citado por Nayatani *et al.* [1967] y Sastri y Manamohanan [1971].

La menor TCC ocurre con el cielo parcialmente cubierto y con el Sol no oculto, mientras que las mismas condiciones, pero con el Sol oculto, producen la mayor TCC, tal y como se observa en la figura 2.27. Entre estos dos extremos los cielos totalmente cubiertos producen TCC ligeramente superiores a las encontradas en cielos despejados.

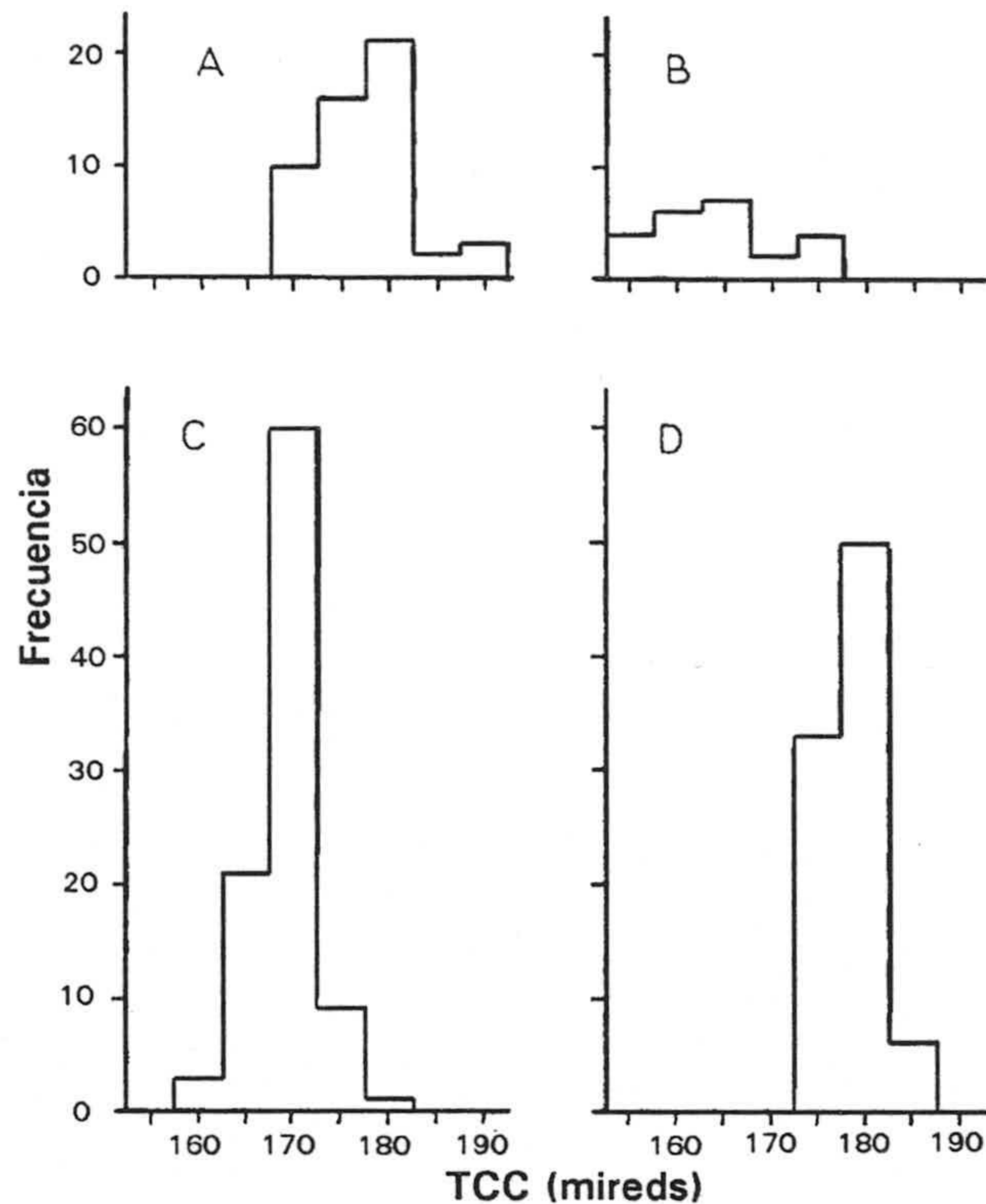


Figura 2.27.- Histogramas de TCC (expresados en mireds) de la luz-día medida por Dixon [1978]. (A: cielos parcialmente nubosos con el Sol libre; B: idem que A pero con el Sol oculto; C: cielos completamente cubiertos; D: días completamente despejados).

La diferencia de color entre el CIE *locus* y los datos de Dixon es aproximadamente 12 veces el radio medio de la elipse de MacAdam, referida en cada punto, diferencia suficiente para causar un pequeño, pero perceptible, cambio del color de los objetos que nos rodean.

La *ratio* ultravioleta-visible de las curvas obtenidas en Bendigo, figura 2.28, es muy superior a la citada por Judd *et al.* (y por tanto por la CIE) y a la de las curvas de Coburg es comparable a la referida por Winch *et al.* en Pretoria y atribuida a la gran altitud de esta ciudad. Los datos de Bendigo presentan el mismo comportamiento (en cuanto a *ratio*) que los de Winch *et al.* a bajas TCC, pero manifiestan menor dependencia con la TCC que cualquier otro conjunto de medidas citadas en la bibliografía. Los resultados de Coburg, adquiridos en verano, muestran mayor *ratio* que los de Bendigo tomados en primavera.

2.8. Trabajos más recientes

Deben transcurrir casi más dos décadas para que aparezcan de nuevo algunos trabajos relacionados con las características espectrales y colorimétricas de la luz-día y luz-cielo.

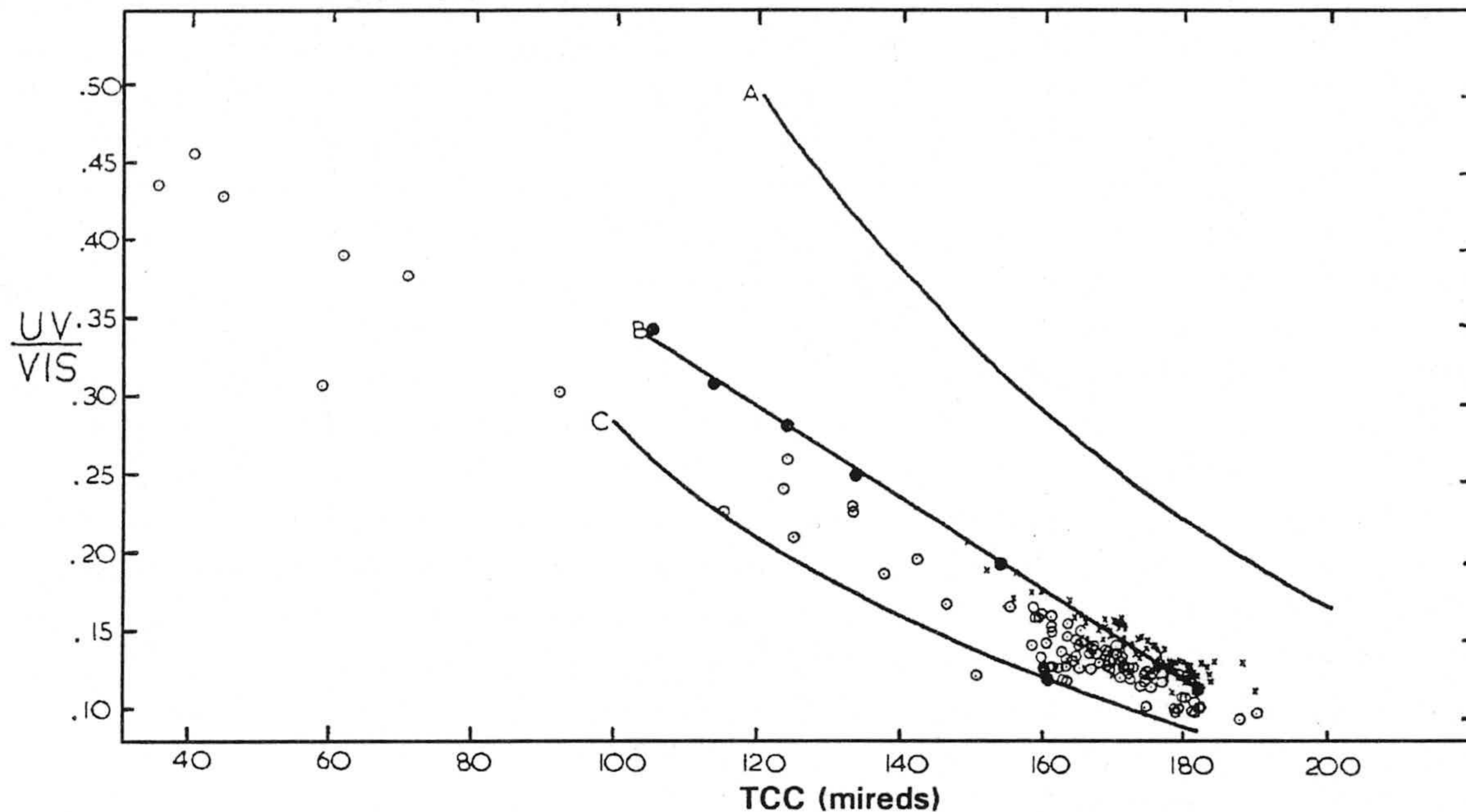


Figura 2.28.- Cociente entre la radiación ultravioleta (300-400 nm) y la radiación visible (400-700 nm) en las curvas espectrales de luz-día de Dixon [1978]. (Círculos abiertos: medidas en Bendigo; cruces: medidas en Coburg; curva A: Cuerpo Negro; curva B y círculos cerrados: medidas de Winch *et al.* [1966]; curva C: medidas de Judd *et al.* [1964].

Sekine [1991] analiza la influencia de la densidad de aerosoles, la elevación solar, la distancia angular con respecto al Sol, y la luz reflejada en la superficie terrestre en las distribuciones espectrales de luz-día y luz-cielo en días despejados y sus cromaticidades, utilizando para ello curvas calculadas teóricamente. Sekine obtiene tres conclusiones: 1) Las cromaticidades de la luz-cielo norte en latitudes altas poseen mayores TCC que en latitudes bajas; 2) las cromaticidades de la luz-cielo norte en latitudes bajas se distribuyen con un ligero desplazamiento hacia los verdes para altas TCC, y hacia los púrpuras para bajas TCC, en comparación con las obtenidas en latitudes altas; 3) La diferencia en la distribución de cromaticidades de luz-día recibida sobre una superficie horizontal entre latitudes altas y latitudes bajas es mucho menor que en la distribución de cromaticidades de luz-cielo norte.

A pesar de recalcar esas tres conclusiones en el resumen de su artículo, existen otras que merecen ser destacadas por su importancia: 1) cuando la densidad de aerosoles en la atmósfera es pequeña, disminuye el rango de cromaticidades de la luz-cielo a lo largo de la dirección del CIE *locus*, poseyendo altas TCC y situándose por encima del CIE *locus* (hacia la región de los verdes); 2) a medida que la elevación

solar disminuye el rango de cromaticidades de la luz-cielo a lo largo del *locus* se incrementa; 3) en medidas de luz-día en las que se incluye la luz-sol, sus cromaticidades varían levemente con el contenido de aerosoles y se sitúan por encima del *locus* del Cuerpo Negro con TCC en torno a 6.000 K; 4) el *locus* que representa las medidas de luz-día (luz de todo el cielo con o sin luz-sol) viene dado por la expresión $y=2,026x-1,703x^2-0,142$, curva que se acerca al *locus* del Cuerpo Negro para bajas TCC y al CIE *locus* para altas TCC, como se observa en la figura 2.29. En esta figura y en la 2.30 se muestran algunos de los resultados obtenidos por Sekine mediante análisis numérico.

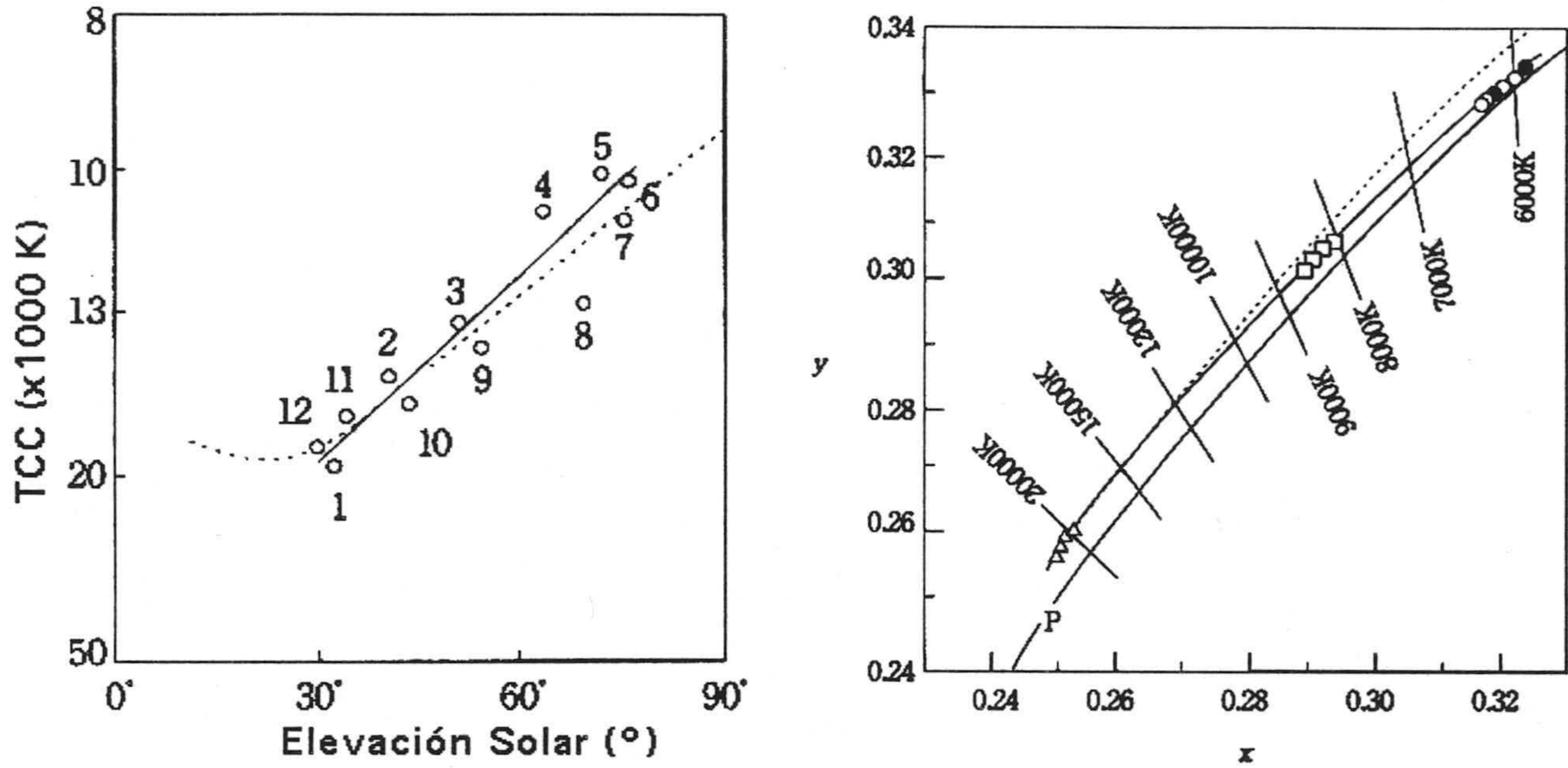


Figura 2.29.- En la figura de la izquierda se muestra la variación, entre meses del año, de la TCC de la luz-cielo norte en días despejados en función de la elevación solar; en la figura de la derecha se presentan las coordenadas de cromaticidad de luz-día (círculos) y luz-cielo (cuadrados y triángulos) en días despejados. Ambas figuras fueron obtenidas, mediante análisis numérico, por Sekine [1991].

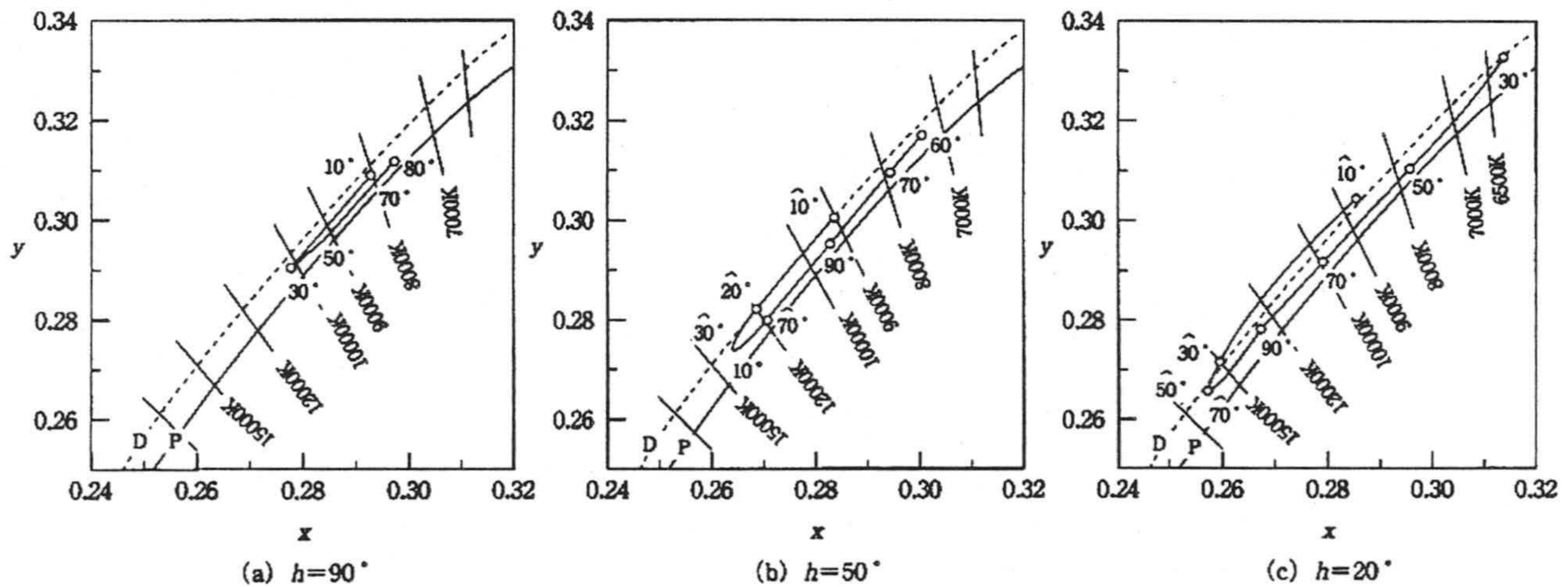


Figura 2.30.- Coordenadas de cromaticidad de luz-cielo despejado a lo largo del meridiano y antimeridiano solar, para tres elevaciones solares, obtenidas mediante análisis numérico por Sekine [1991]

Lee [1994a] utiliza su algoritmo de análisis colorimétrico de imágenes fotográficas (Lee [1988]), para estudiar la variación del color de la luz-cielo a lo largo de distintos meridianos en días despejados, haciendo hincapié en los crepúsculos. Usar imágenes fotográficas le permite trabajar con campos de visión extremadamente pequeños y poder llevar a cabo un estudio irrealizable (desde el punto de vista del tiempo consumido) con un espectrorradiómetro. Lee analiza la variación colorimétrica a lo largo de algunos meridianos solares afirmando que el *locus* del Cuerpo Negro no es apropiado como referencia colorimétrica de la luz procedente de pequeñas regiones del cielo (pequeños campos de visión) debida a la tremenda variedad existente en éstas, confirmando los resultados de Knescrik y Curcio [1967].

Lee afirma, a partir de sus resultados, que la gama de colores y sus purezas son bastantes pequeños comparados con nuestras expectativas de ellos. La mínima pureza colorimétrica se alcanza no en el horizonte como había estado establecido sino un 1° por encima de éste, aunque es imperceptible visualmente. En la figura 2.31 mostramos algunas de las curvas medidas por Lee en distintos lugares de los EE.UU. Hay que resaltar que este es el primer trabajo, de los mencionados en este capítulo, donde se utiliza el diagrama cromático CIE-1976 (u' , v'). Utilizando diagramas tridimensionales analiza la relación entre luminancias y cromaticidad en sus medidas, observando que el punto donde la evolución cromática sobre un meridiano se tuerce coincide con un máximo o mínimo de luminancia, concluyendo que no podemos estudiar ambas magnitudes por separado pues están intrínsecamente relacionadas. Lee manifiesta en su artículo que pocos fenómenos en óptica atmosférica poseen una gran gama de colores y altas purezas colorimétricas.

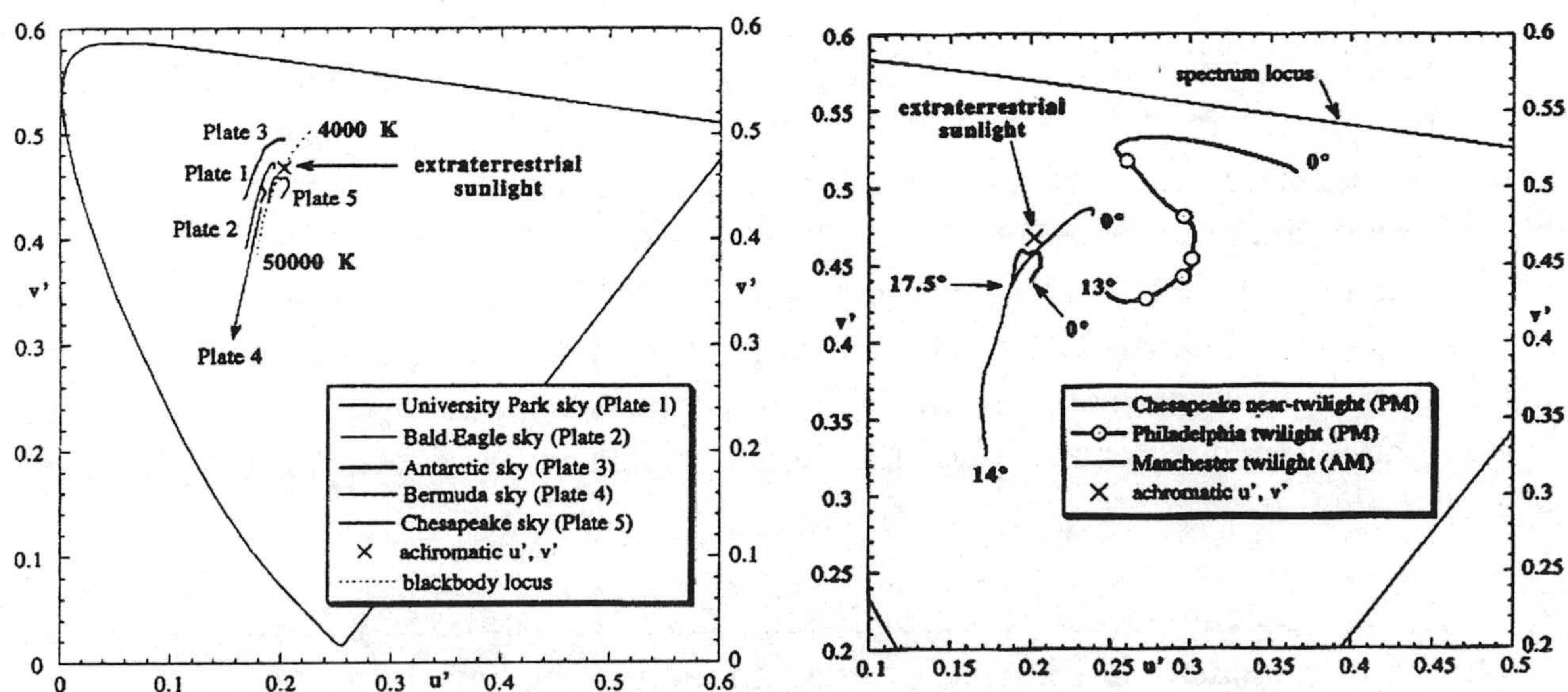


Figura 2.31.- Curvas de cromaticidad (en el diagrama cromático CIE 1976) de luz-cielo meridionales analizadas por Lee [1994a]. (Figura de la izquierda: medidas durante el día; figura de la derecha: medidas durante crepúsculos).

En nuestro departamento, en 1998, **Hernández-Andrés, Romero, García-Beltrán y Nieves** [1998] analizaron, desde el punto de vista puramente espectral, la semejanza entre curvas de luz-día reconstruidas a partir de los vectores que componen 4 bases publicadas desde los años 60 y obtenidas en distintas partes del mundo (Judd *et al.* [1964], Sastri y Das [1968], Dixon [1978]) y una base propia generada a partir de curvas de luz-día medidas en Granada. El número de curvas fue de 252, adquiridas durante 3 meses, y se utilizaron dos métodos de reconstrucción distintos (uno haciendo uso de la ortogonalidad de los vectores, y el otro, similar al recomendado por la CIE, en el que se realiza la reconstrucción conociendo las coordenadas de cromaticidad x e y de la curva).

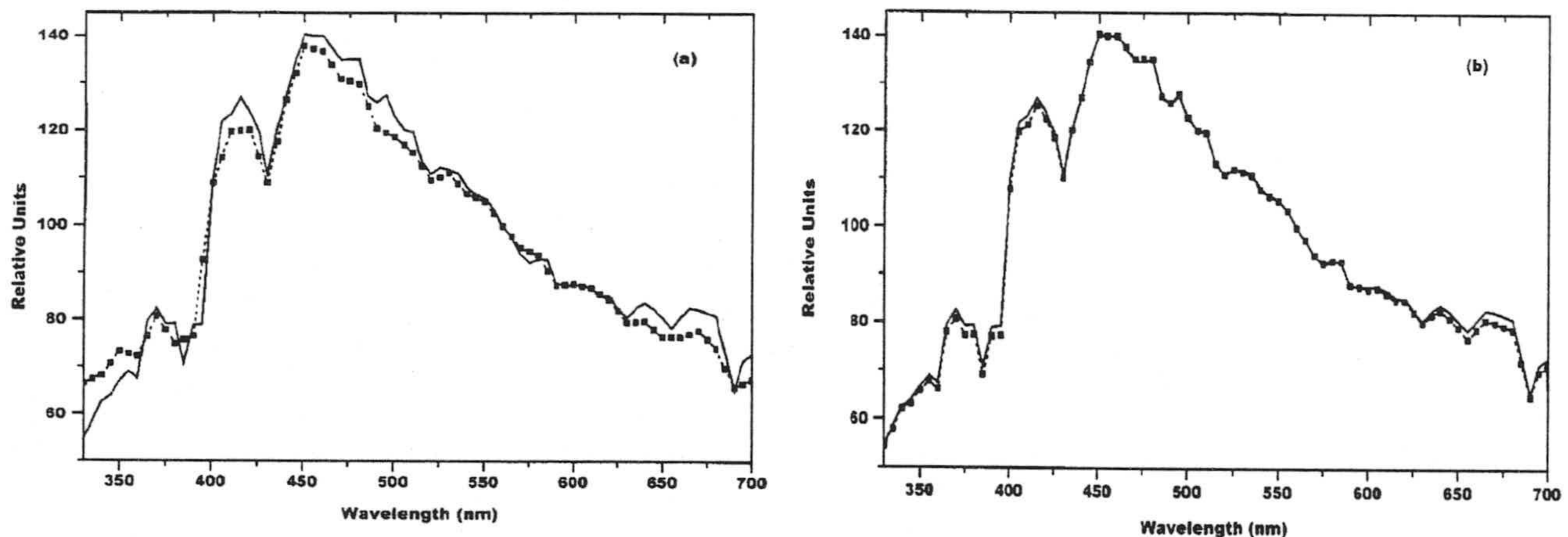


Figura 2.32.- Reconstrucción de una misma curva, usando dos bases distintas: (a) base de la CIE y coeficiente de bondad: 0.99925, (b) base construida con las 252 curvas adquiridas en Granada y coeficiente de bondad: 0.99996. (Línea continua: curva original; cuadrados unidos con línea de puntos: curva reconstruida).

Asimismo definieron un coeficiente de bondad de ajuste (usado previamente por Romero, García-Beltrán y Hernández-Andrés [1997]) que permitía evaluar la semejanza espectral dependiendo del valor que tomaba dicho coeficiente. Los autores comprobaron que el mejor método de reconstrucción es el que hacía uso de la ortogonalidad de los vectores propios; y que la base más adecuada (exceptuando la obtenida con las medidas de Granada) es la propuesta por la CIE, aunque se requieren más de tres vectores para obtener aceptables reconstrucciones espectrales. En la figura 2.32 se muestran dos reconstrucciones de la misma curva espectral, utilizando dos bases distintas.

El más reciente de los artículos publicados es el de **Slater y Healey** [1998]. En este trabajo se analiza la dimensionalidad requerida, en una base de vectores, para reconstruir curvas de luz-día en el visible y en el infrarrojo cercano. Es el primer trabajo que tiene en cuenta un rango espectral tan amplio (400 - 2500 nm). Las 2560 curvas utilizadas para generar los vectores no fueron medidas experimentalmente, sino generadas mediante un programa de transferencia radiativa, denominado MODTRAN 3.5, simulando un amplio conjunto de condiciones atmosféricas. Los autores no dan

ningún tipo de información colorimétrica de las curvas generadas aunque si lo muestran numéricamente los siete vectores obtenidos en el rango espectral 330-700 nm. En la figura 2.33 se muestra la distribución espectral de los 3 primeros vectores, siendo muy relevante la nula semejanza con los obtenidos de forma experimental por todos los autores citados anteriormente en este capítulo. Así, por ejemplo, ni el segundo ni el tercer vector se corresponden con la variación amarillo-azul y verde-rosa respectivamente apuntada por el resto de autores.

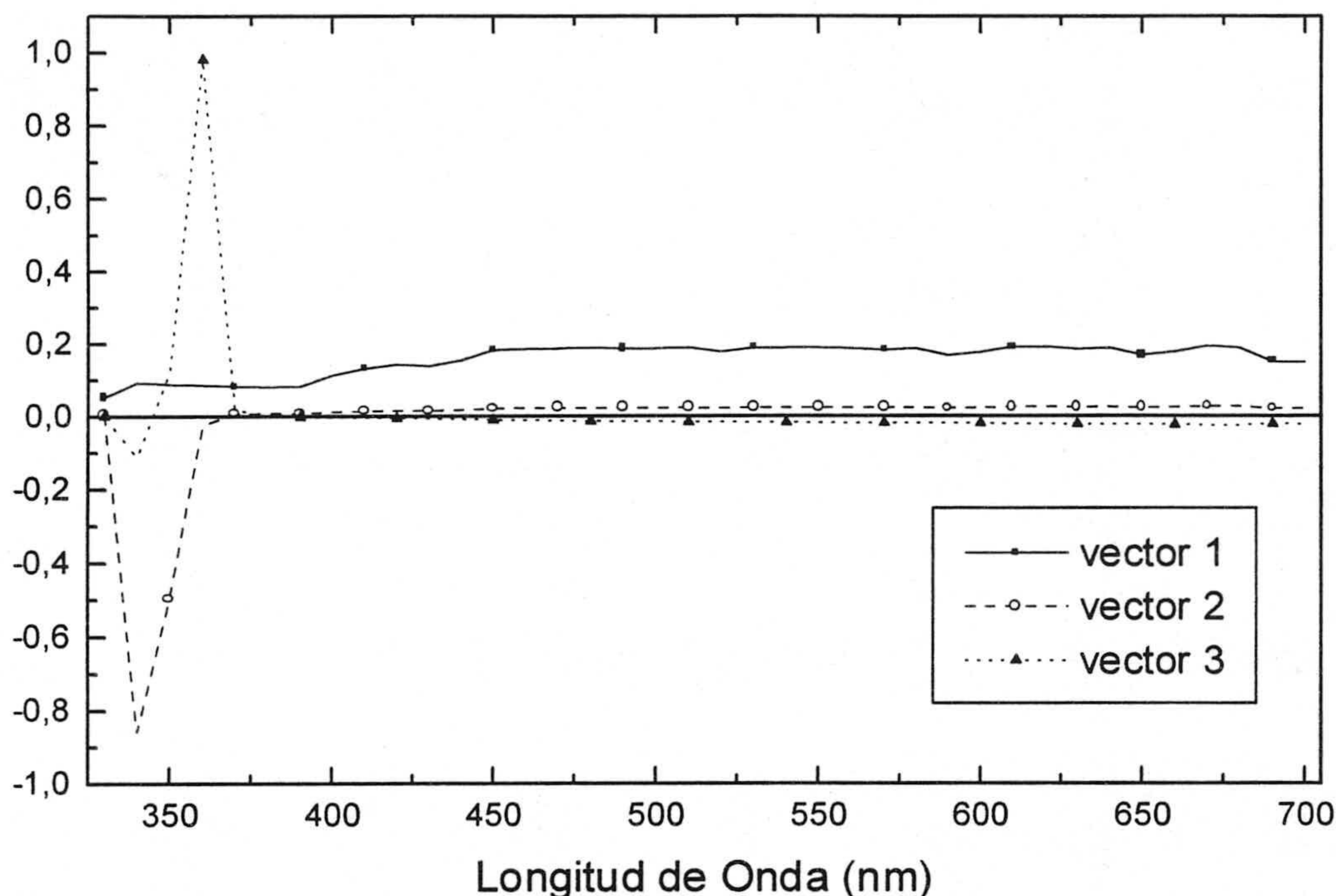


Figura 2.33.- Distribución espectral de los tres primeros vectores obtenidos por Slater y Healey [1998] en el rango espectral 330-700 nm.

Los resultados confirman los de Judd *et al.* [1964] en el espectro visible, en cuanto al uso de tres vectores propios para reconstruir de forma adecuada cualquier curva de luz-día. El número de vectores requerido, en el rango (400-2500 nm), aumenta hasta siete. Hay que reprochar a este trabajo, que aunque las curvas generadas, según los autores, "*representan un amplio rango de condiciones atmosféricas*", sólo son válidas para días completamente ideales conforme a un modelo; sin embargo la mayoría de los días las condiciones atmosféricas no son tan *perfectas* y se necesita medir experimentalmente para tener en cuenta lo que ocurre en la naturaleza.

Capítulo 3:

Instrumentación y medidas

“Un cielo está teñido del azul más vivo,
y su atmósfera singularmente esclarecida
por la luz del sol que refleja la blancura de la Sierra Nevada”
Viajero en Granada, Miguel de Lafuente Alcántara

Tras el estudio pormenorizado de los trabajos existentes en la literatura (que hemos realizado en el capítulo 2), observadas sus carencias y vislumbradas sus posibles soluciones, el paso siguiente en nuestro trabajo consistió en diseñar la campaña de medidas experimentales. En este capítulo detallamos las características que describen dicha campaña.

3.1. Elección del lugar de medida

En primer lugar se hizo necesario elegir cuál iba a ser el lugar desde el cual se realizarían las medidas. Debería ser un lugar cercano a nuestro lugar habitual de trabajo y que además tuviese una visión del cielo lo menos obstaculizada por edificios y/o montañas.

La azotea, situada en la cuarta planta de la sección de Físicas de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada poseía (y posee) ambas características y por ello fue elegida para llevar a cabo una campaña de este tipo. Está situada dentro de un área urbana en el centro de la ciudad de Granada, en el sur de España, y está rodeada de edificios (facultades, hoteles, apartamentos), que apenas limitan el campo de visión. La tabla III.1 muestra las coordenadas geográficas del lugar de medida elegido.

Latitud	37° 11' N
Longitud	3° 35' O
Altura sobre el nivel del mar	680 metros

Tabla III. 1.- Coordenadas geográficas de la azotea de Físicas.

Sobre la superficie que ocupa la azotea se eligió como lugar de medida aquel que poseía menos obstáculos que ocultarían el cielo. En la gráfica 3.1 se ha dibujado el perfil del horizonte geográfico desde la posición del espectrorradiómetro en la azotea. Con este horizonte, sólo un 7 por ciento de la bóveda celeste está oculta.

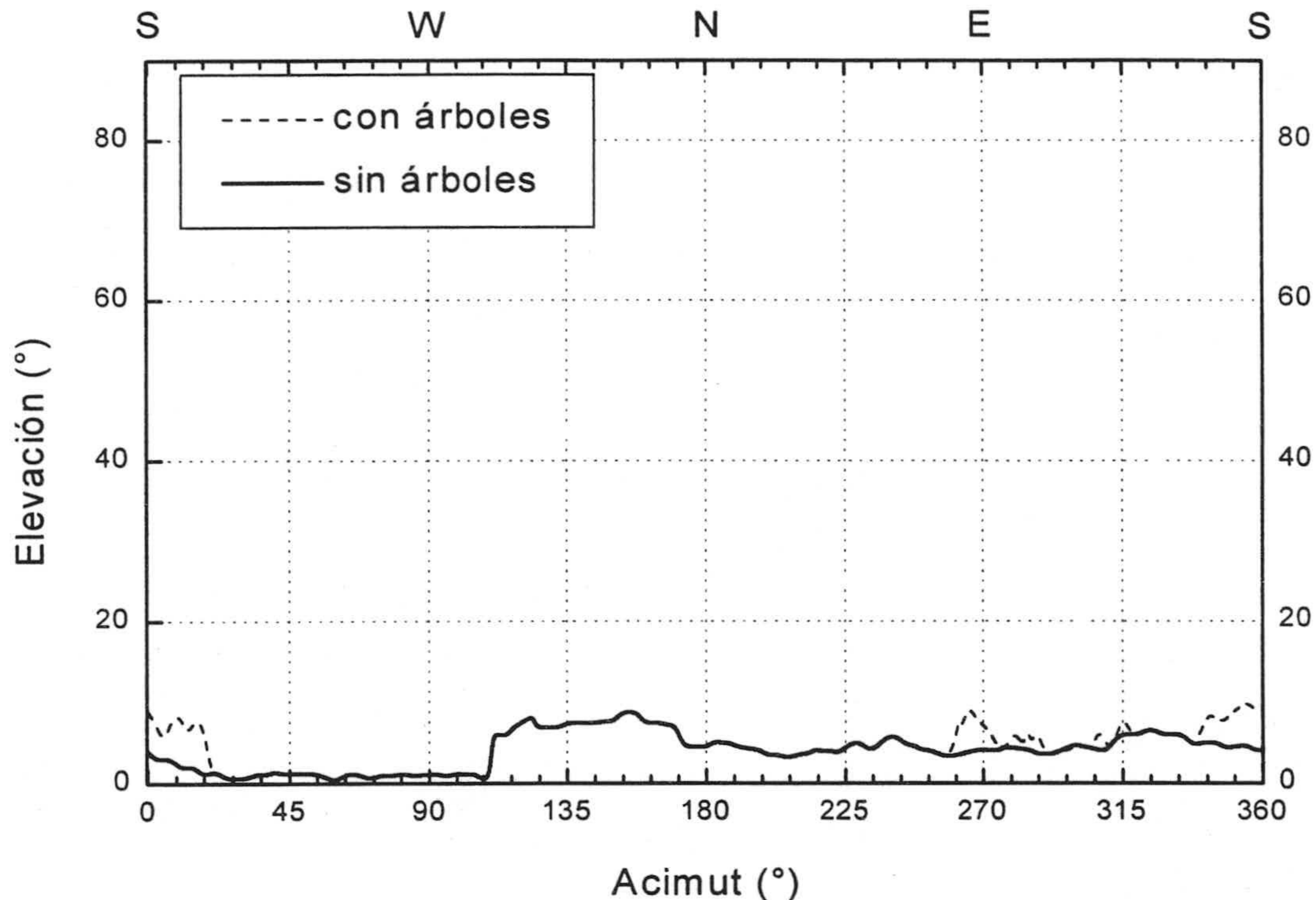


Figura 3. 1.- Perfil del horizonte visto desde la azotea de Físicas.

Los árboles y arbustos que componen los jardines adyacentes son tanto de hoja caduca como de hoja perenne. El cambio en el color de esta vegetación es bastante significativo entre los meses de la primavera y verano y los de otoño e invierno. La variación en la reflectancia espectral del suelo en los alrededores del lugar de medida puede ser un factor que influya levemente en el color de la luz-día medida, y que analizaremos en capítulos posteriores.

3.2. Variables medidas experimentalmente

Al tener como objetivo principal la caracterización espectral y colorimétrica de la luz-día recibida en Granada, y observada la ambigüedad en cuanto al uso y significado de dicho término en la literatura, es esencial aclarar si nos estamos refiriendo a luz directa del Sol, luz esparcida por la atmósfera, o a posibles combinaciones de éstas.

Decidimos no mezclar distintos tipos de medidas y realizar por separado tres estudios diferentes con distintos tipos de distribuciones espectrales de potencia consideradas como luz natural en la literatura:

1. Medidas de luz-día: irradiancia espectral global incidente sobre una superficie horizontal con un campo de 2π sr.
2. Medidas de luz-cielo en días despejados: radiancia espectral proveniente de una región pequeña de la bóveda celeste (campo de visión: 3°).
3. Medidas de luz-día durante crepúsculos: irradiancia espectral global incidente sobre una superficie horizontal con un campo de 2π sr para elevaciones solares entre 5° y -5° .

A continuación describiremos con detalle cada una de estas medidas, enfatizando aquellos aspectos de las medidas que son importantes a la hora de poder realizar comparaciones con los resultados encontrados por otros autores.

3.2.A.- Medidas de luz-día

En vista de las deficiencias de los trabajos sobre los aspectos colorimétricos y espectrales de la luz-día publicados en la literatura no sólo en cuanto a duración temporal de la campaña de medidas sino también en cuanto al número de medidas, decidimos llevar a cabo una campaña de medidas de luz-día con la duración, frecuencia y número de medidas adecuadas para que los resultados posteriores fuesen representativos de la luz natural recibida en Granada.

Esta primera campaña de medidas correspondiente a medidas espectrales de irradiancia global sobre una superficie horizontal duró dos años completos, empezando el 9 de Febrero de 1996 y finalizando el 9 de Febrero de 1998. En este tipo de medidas realizadas nuestro receptor recibe luz proveniente del Sol (luz-sol), cuando éste se halle por encima del horizonte geográfico, así como la esparcida por la atmósfera terrestre (luz-cielo) procedente de toda la bóveda celeste. En el caso de que el Sol esté oculto (detrás de montañas, por debajo del horizonte u oculto por nubes) el receptor solamente recibirá la luz procedente de todo el cielo.

Se predeterminaron como días de medida tres días por semana: lunes, miércoles y viernes. Las medidas se llevaron a cabo desde el amanecer hasta el anochecer. Por limitaciones en la relación señal/ruido del espectrorradiómetro utilizado, la primera y última medida del día se realizaron cuando el Sol estaba situado en torno a 4 grados por debajo del horizonte.

Todas las medidas de este tipo fueron realizadas en el rango espectral 300-1100 nm, con una resolución espectral de 1 nm, empleando nuestro dispositivo 40 segundos en adquirir cada medida. El intervalo de tiempo entre dos medidas consecutivas se fijó inicialmente en una hora. Sin embargo este intervalo se redujo a diez minutos para medidas durante el amanecer y atardecer (elevaciones solares por debajo de 5°), ya que era precisamente cuando las variaciones temporales en el perfil espectral (y por tanto el color) de la luz-día eran más acusadas.

El número de días de medidas ascendió a 220, durante los cuales se llevaron a cabo 2.600 medidas. En la figura 3.2 mostramos el número de medidas por día, observándose lógicamente cómo este número es más alto en verano que en invierno. Los huecos se corresponden con periodos de calibración de los aparatos de medida o bien con periodos de lluvias en los cuales era imposible medir.

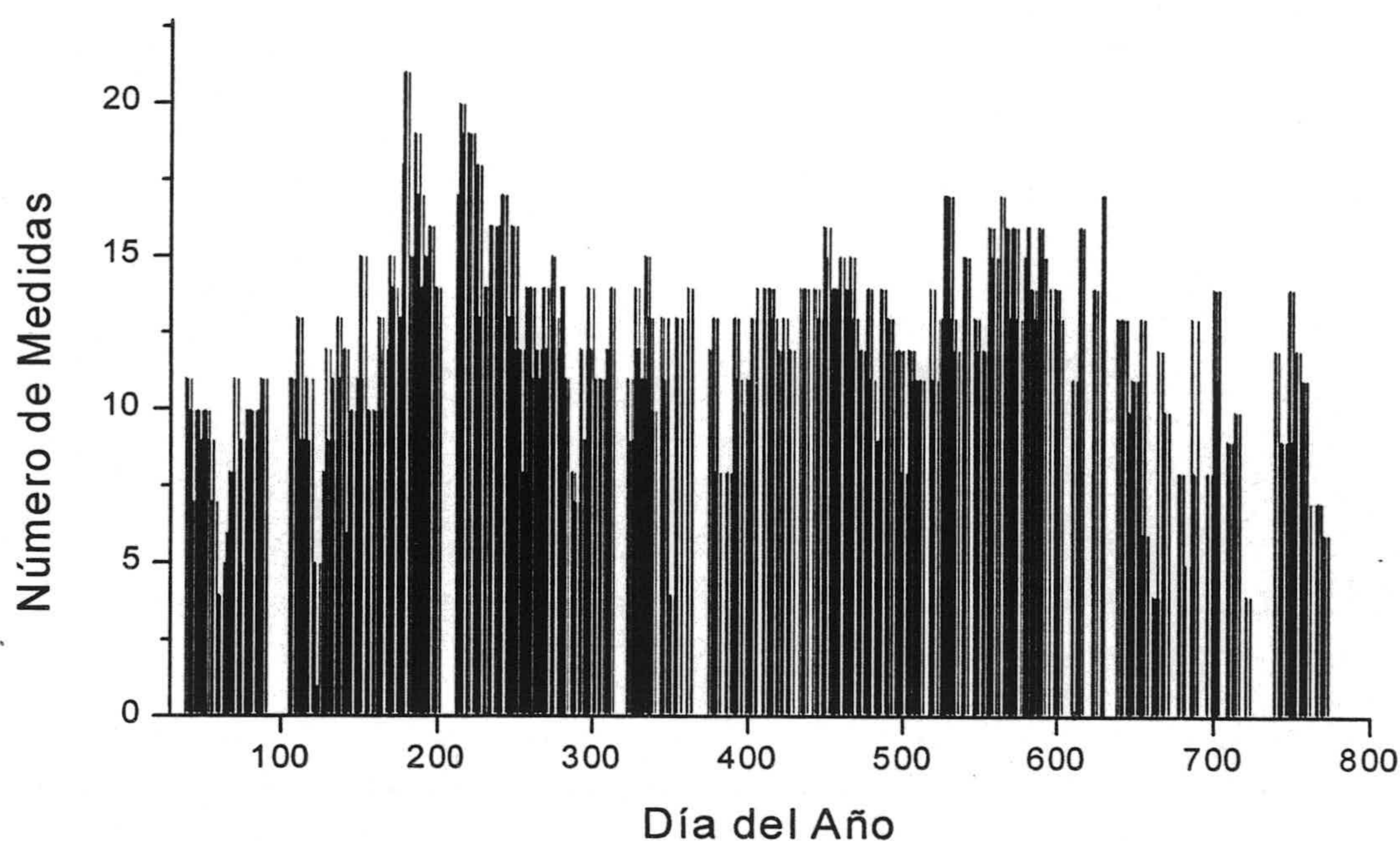


Figura 3. 2.- Número de medidas por día durante los dos años de campaña. Los días del año se cuentan a partir del 1 de Enero de 1996.

Esta campaña de medidas se convierte en la más extensa desde el punto de vista temporal (2 años) y en cuanto al número de medidas (2.600) así como en la más completa ya que abarca todas las horas del día, haciéndolo de forma sistemática.

Durante estos 220 días se cubrieron todas las condiciones atmosféricas posibles en Granada: cielos despejados, parcialmente nubosos, completamente cubiertos, neblinas, nieblas, calinas, brumas, etc. Un ejemplo de esta afirmación se muestra en la figura 3.3, en la que mostramos una distribución espectral medida cuando una tormenta estaba situada encima de Granada pero todavía no había empezado a llover: un rayo cayó cuando se realizaba la medida, obteniéndose una curva espectral anómala, que fue eliminada del conjunto.

Simultáneamente a la realización de la medida espectral de luz-día se midió la radiación esparcida (por la atmósfera) y la radiación global sobre una superficie horizontal, utilizando para ello un piranómetro cuyas características se detallarán más adelante. El principal propósito de adquirir estas medidas era para servir como control de calidad en cuanto a la posible variación de la irradiancia medida por el espectrorradiómetro durante los 40 segundos que duraba la adquisición de la curva espectral ya que la lectura del piranómetro permitía descartar *in situ* medidas *erróneas*.

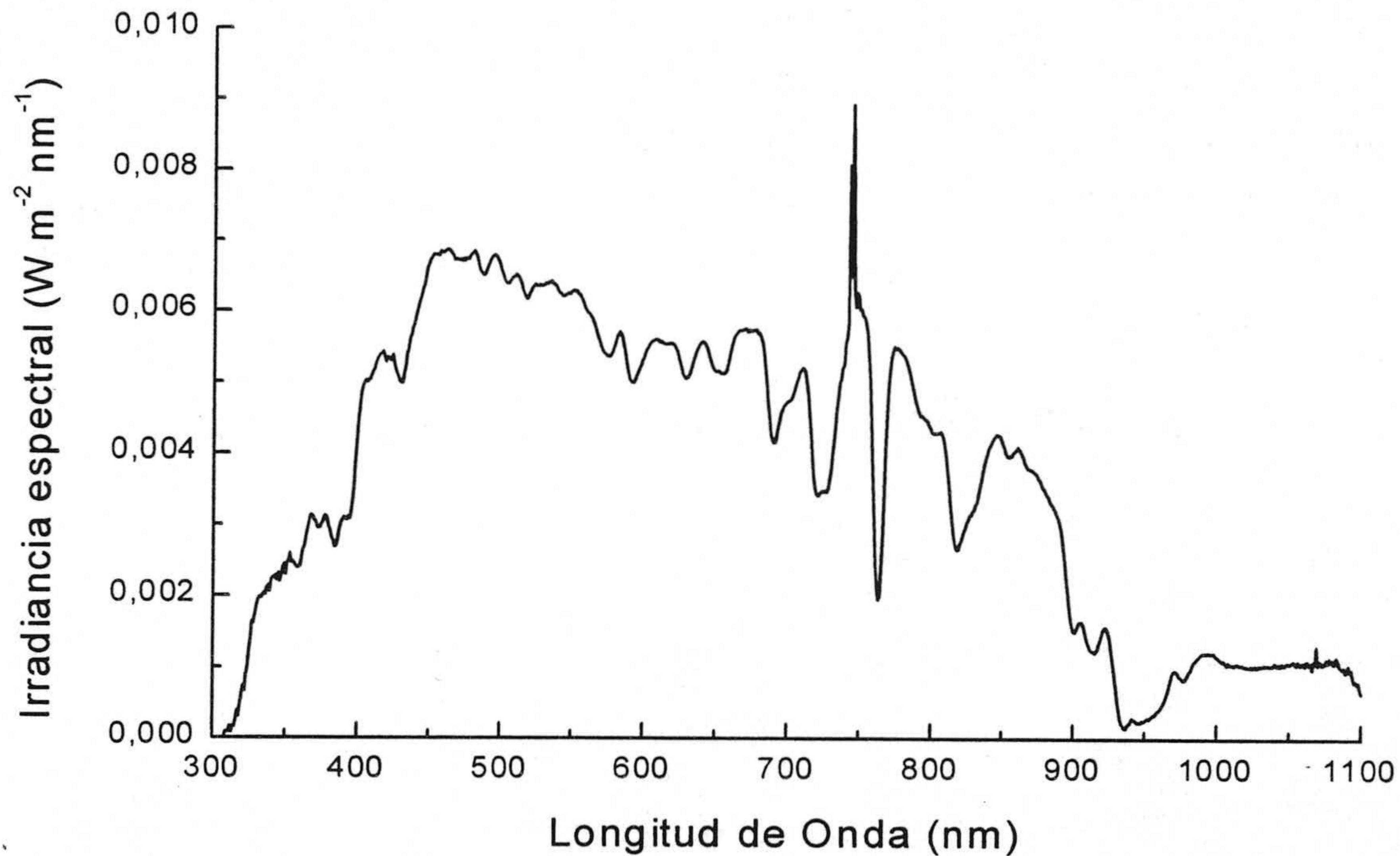


Figura 3.3.- Medida realizada el 16/04/1997, a las 17:56 GMT, con un pico anómalo debido a un rayo de una tormenta.

Cada medida espectral era almacenada junto con la fecha, hora y minutos, temperatura y humedad sobre la azotea de Físicas, así como una evaluación puramente visual de las condiciones atmosféricas.

Esta extensa campaña, que acabamos de describir, se completó con otros dos tipos de medidas de luz natural que a continuación detallaremos. Después de comprobar (tal y como determinaremos en el próximo capítulo) que la variación de las características espectrales (y colorimétricas) de la luz-día a lo largo de un año era inexistente, decidimos limitar en el tiempo, aunque no en el número de medidas, las dos siguientes campañas (luz-cielo en días despejados y luz-día crepuscular).

3.2.B.- Medidas de luz-cielo en días despejados

La forma de adquirir este tipo de medidas difiere notablemente del descrito previamente. Nosotros estábamos interesados en analizar medidas de la radiancia espectral proveniente de distintas regiones del cielo (luz-cielo) únicamente en días despejados.

La elección de este tipo de días no es arbitraria: hay que tener en cuenta que en la obtención de este tipo de medidas interesa hacer barridos en distintos meridianos (Lee [1994a, 1994b], Hall [1979], Sekine [1991], Sekine [1992], Zibordi y Voss [1989], Winter *et al.* [1995], Harrison y Coombes [1988]) para poder caracterizar y estudiar los resultados en función de la posición del punto del cielo en el que se está midiendo. Únicamente en días despejados la variación temporal del color y de la luminancia del cielo apenas cambia, si el intervalo de tiempo considerado es pequeño. De ahí que hayamos limitado nuestro estudio a este tipo de cielos.

Para realizar este tipo de medidas al espectrorradiómetro se le acopló, mediante una fibra óptica, un telescopio con un campo de visión de 3° . Este telescopio se situó sobre la montura de un pirheliómetro que nos permitía dirigir manualmente el telescopio a la posición de la bóveda celeste deseada en cada medida. La incertidumbre en la selección de la elevación y acimut de observación era de $\pm 0.1^\circ$ y $\pm 1^\circ$ respectivamente.

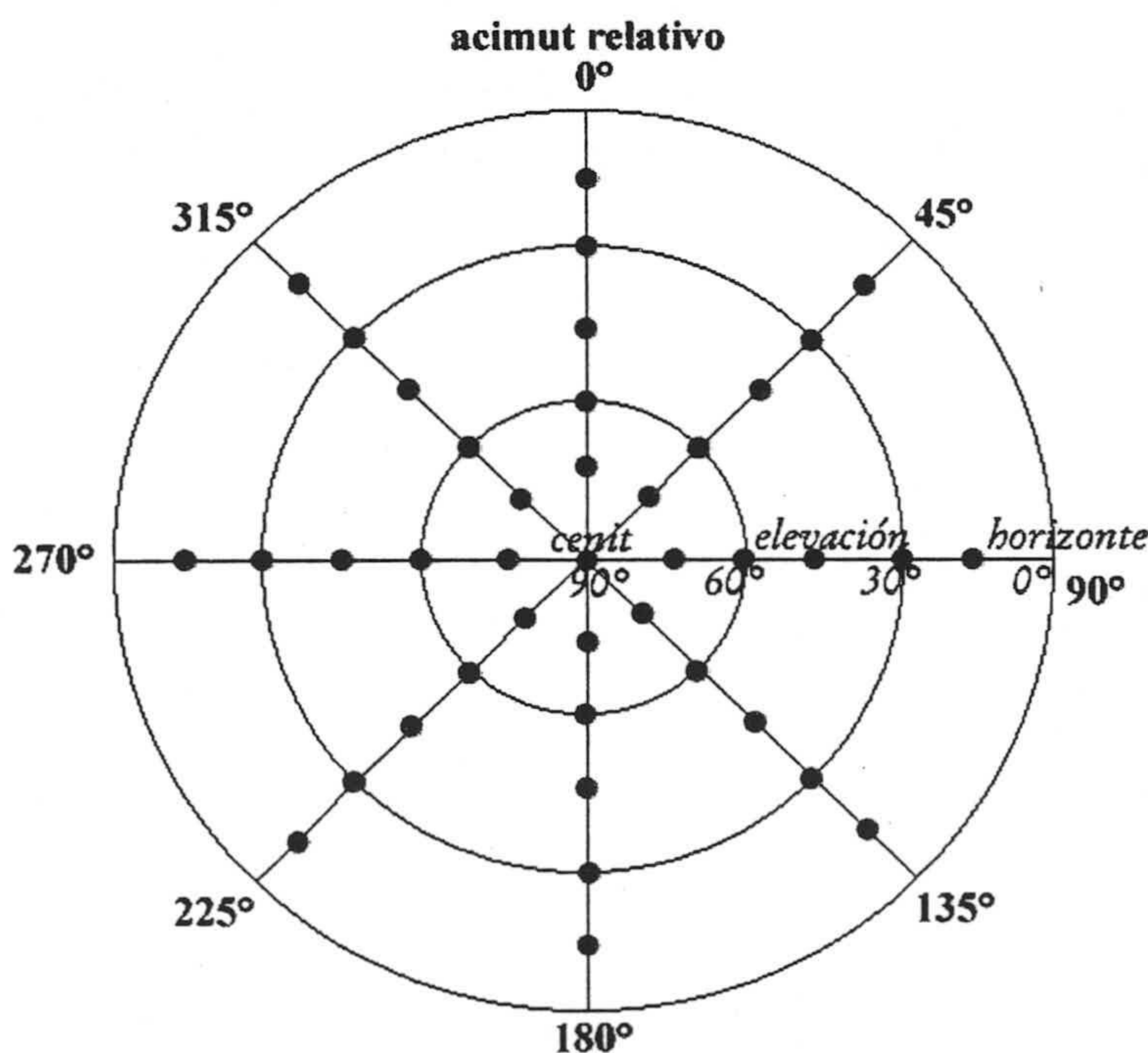


Figura 3. 4.- Puntos del cielo, relativos al Sol, donde se realizaron las medidas de luz-cielo.

Al iniciar la adquisición de este tipo de medidas se fijó el rango espectral en 300-1100 nm, y la resolución espectral en 5 nm. Pronto advertimos que era demasiado

elevado el tiempo que transcurría en la realización de cada medidas, y por tanto el Sol cambiaba bastante su posición (y, por ende, las características espectrales y colorimétricas de la luz-cielo). Decidimos, pues, disminuir el rango espectral a la región visible 380-780 nm manteniendo la misma resolución espectral. Esta decisión nos permitió realizar tres medidas espectrales por minuto.

En la figura 3.4 se muestran los puntos del cielo en donde se realizaron las medidas de luz-cielo. Se eligieron 4 meridianos, con 11 puntos por meridiano. De esta forma cada conjunto estaba compuesto por 44 medidas, tardando en su adquisición menos de 20 minutos. Los cuatro meridianos elegidos están referidos a la posición del Sol, estableciéndose ésta dos veces por barrido. La mínima elevación en el horizonte se fijó en 15° , dado el perfil del horizonte geográfico mostrado en la figura 3.1.

El conjunto de medidas de luz-cielo fue adquirido durante 7 meses (desde Febrero de 1998 hasta Agosto de 1998) y está formado por un total de 1.567 curvas espectrales.

3.2.C.- Medidas de luz-día en crepúsculos

Hemos completado la memoria de doctorado midiendo la evolución temporal de la radiación global espectral recibida sobre una superficie horizontal durante los crepúsculos (elevaciones solares entre 5° y -5° con respecto al horizonte astronómico). Durante este intervalo de elevaciones solares la variación temporal en los perfiles espectrales, y por tanto en las características colorimétricas, de las curvas de luz-día es muy acusada. Se hace necesario, pues, realizar este tipo de medidas con un intervalo de tiempo entre ellas muy pequeño.

Durante cada crepúsculo realizábamos casi un centenar de medidas, espaciadas entre ellas en unos 30 segundos. Cada medida espectral comprendía el rango espectral de 380-780 nm, con una resolución espectral de 5 nm. Con estos parámetros el espectrorradiómetro tardaba ~ 12 segundos en la adquisición de cada medida.

Desde Septiembre de 1998 a Marzo de 1999 (7 meses), el número de crepúsculos medidos fue de 16, obteniéndose 1.485 medidas espectrales. De éstos 16 crepúsculos, 3 se realizaron con cielos totalmente cubiertos, 9 de ellos con cielos totalmente despejados, y el resto (4) en condiciones mixtas.

3.3. Espectrorradiómetro utilizado

El espectrorradiómetro que hemos usado en la adquisición de las medidas espectrales es un espectrorradiómetro portátil LI-1800 de la casa LI-COR, inc., que fue adquirido en el verano de 1995 con cargo al proyecto de infraestructura de la C.I.C.Y.T. IN94-0563.

El sistema óptico del LI-1800 posee 4 componentes principales: el receptor coseno, una rueda con 7 filtros, un monocromador de red holográfica, y un detector de silicio, tal y como se esquematiza en la figura 3.5.

La luz entra al LI-1800 a través de un receptor coseno que consiste en un colector translúcido de teflón, con forma de bóveda, que deja pasar el flujo radiante siguiendo la ley coseno de Lambert, y que recibe radiación desde todos los ángulos de un hemisferio, posee un campo de visión de 180° (2π sr), permitiendo al espectrorradiómetro medir flujos radiantes por unidad de área (irradiancias).

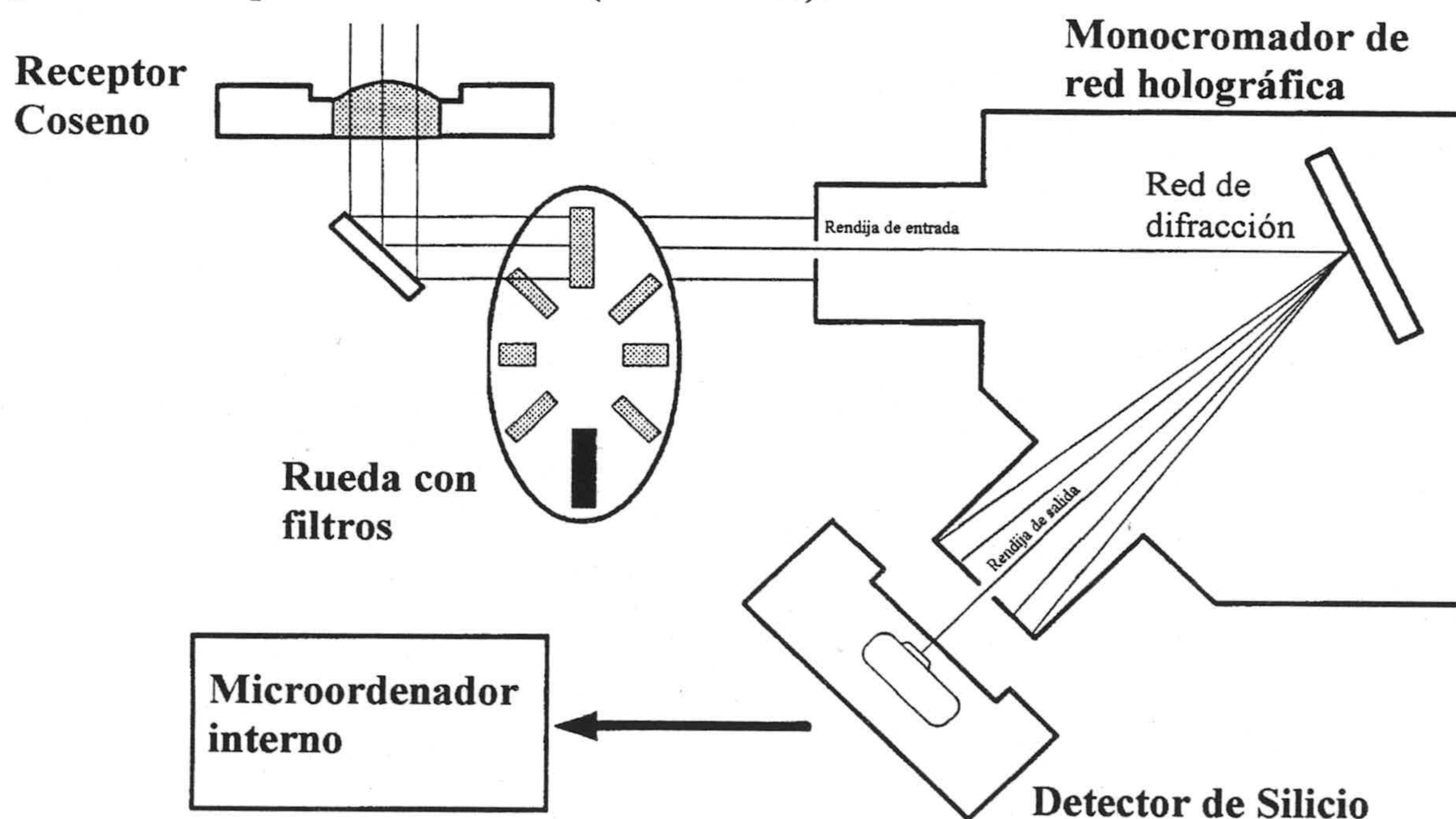


Figura 3. 5.- Esquema del funcionamiento del espectrorradiómetro LI-1800.

Después pasa por una rueda de 7 filtros antes de entrar en el monocromador. Durante cada medida espectral el microordenador, que posee el LI-1800 en su interior, rota automáticamente la rueda de filtros para seleccionar el filtro apropiado para la región espectral en la que está midiendo. Posteriormente, el monocromador dispersa la radiación policromática transmitida a través de la rueda de filtros incidiendo sobre el detector de silicio. Los componentes esenciales del monocromador son la rendija de entrada, la red de difracción y la rendija de salida.

La rendija de entrada es rectangular. Cuanto más pequeña sea ésta, menor ancho de banda tendrá la radiación dispersada. La red de difracción dispersa la radiación en distintas direcciones dependiendo de la longitud de onda. Girando la red de difracción (mediante un mecanismo calibrado que posee el espectrorradiómetro) se seleccionan las longitudes de onda que pasan a través de la rendija de salida. La rendija de salida restringe el ancho de banda de la radiación que llega al detector, y es su tamaño el que determina la resolución espectral de las medidas realizadas. En nuestro caso, ambas rendijas tienen una anchura de 0,5 milímetros, y proporcionan un ancho de banda a mitad de pico de 6 nm en todo el intervalo espectral de medida (300-1100 nm).

La radiación recibida en el detector de silicio produce una corriente proporcional a la cantidad de radiación. Esta corriente es amplificada, convirtiéndola en voltaje, que pasa a través de un convertidor analógico-digital, y proporcionan una señal de salida digital al microordenador interno del LI-1800. El detector es un fotodiodo de silicio y entre sus propiedades destacan su robustez mecánica, una mínima fatiga, y su buena estabilidad térmica, sobre todo entre 400 y 950 nm. En la tabla III.2 hemos mostrado la dependencia térmica de dicho detector. Otras especificaciones importantes del espectrorradiómetro se han resumido en la tabla III.3.

Dependencia Térmica	Longitud de Onda
-0,1% / °C	350 nm
0,05% / °C	400-950 nm
0,5% / °C	1000 nm
1-2% / °C	1100 nm

Tabla III. 2.- Dependencia térmica del detector de silicio.

Rango espectral	300-1100 nm (seleccionable)
Ancho de banda	6 nm
Elemento dispersivo	Red de difracción de 800 rendijas/mm
Resolución espectral	1, 2, 5, 10 nm (seleccionable)
Precisión en el muestreo	± 2nm
Tiempo de medida	40 segundos (de 300 a 1100 nm, cada 1 nm) 15 segundos (de 400 a 700 nm, cada 1 nm) 12 segundos (de 370 a 790 nm, cada 5 nm)
Ruido (Irradiancia Equivalente)	$7 \cdot 10^{-4}$ W m ⁻² nm ⁻¹ en 300 nm $4 \cdot 10^{-4}$ W m ⁻² nm ⁻¹ en 350 nm $1,5 \cdot 10^{-4}$ W m ⁻² nm ⁻¹ en 400 nm $8 \cdot 10^{-5}$ W m ⁻² nm ⁻¹ entre 500 y 800 nm $6 \cdot 10^{-5}$ W m ⁻² nm ⁻¹ entre 800 y 1040 nm $1,5 \cdot 10^{-4}$ W m ⁻² nm ⁻¹ en 1100 nm

Tabla III. 3.- Principales características técnicas del espectrorradiómetro LI-1800

3.4. Calibración del espectrorradiómetro

La precisión de las medidas realizadas con un instrumento que mida la radiación óptica depende principalmente de la fiabilidad de la calibración del instrumento y de su sensibilidad. Todos los dispositivos de medida de radiación necesitan ser calibrados periódicamente debido a que sus componentes ópticas y electrónicas se desajustan con el tiempo. Para los espectrorradiómetros, la calibración es mucho más importante que para los sensores de banda ancha, ya que las desviaciones son espectralmente dependientes.

El espectrorradiómetro fue adquirido con un dispositivo de calibración óptica (1800-02) que permite la calibración de las medidas de radiación realizadas con el LI-1800. Este dispositivo contiene una lámpara halógena de tungsteno, calibrada en fábrica, de 200 W que opera con una temperatura de color aproximada de 3.150 K. Un suministro de potencia altamente regulado controla tanto su corriente como su tensión, manteniéndose la potencia de la lámpara en un valor constante ($\pm 0,1\%$), incrementando la estabilidad de ésta en comparación con sistemas que sólo controlan la corriente.

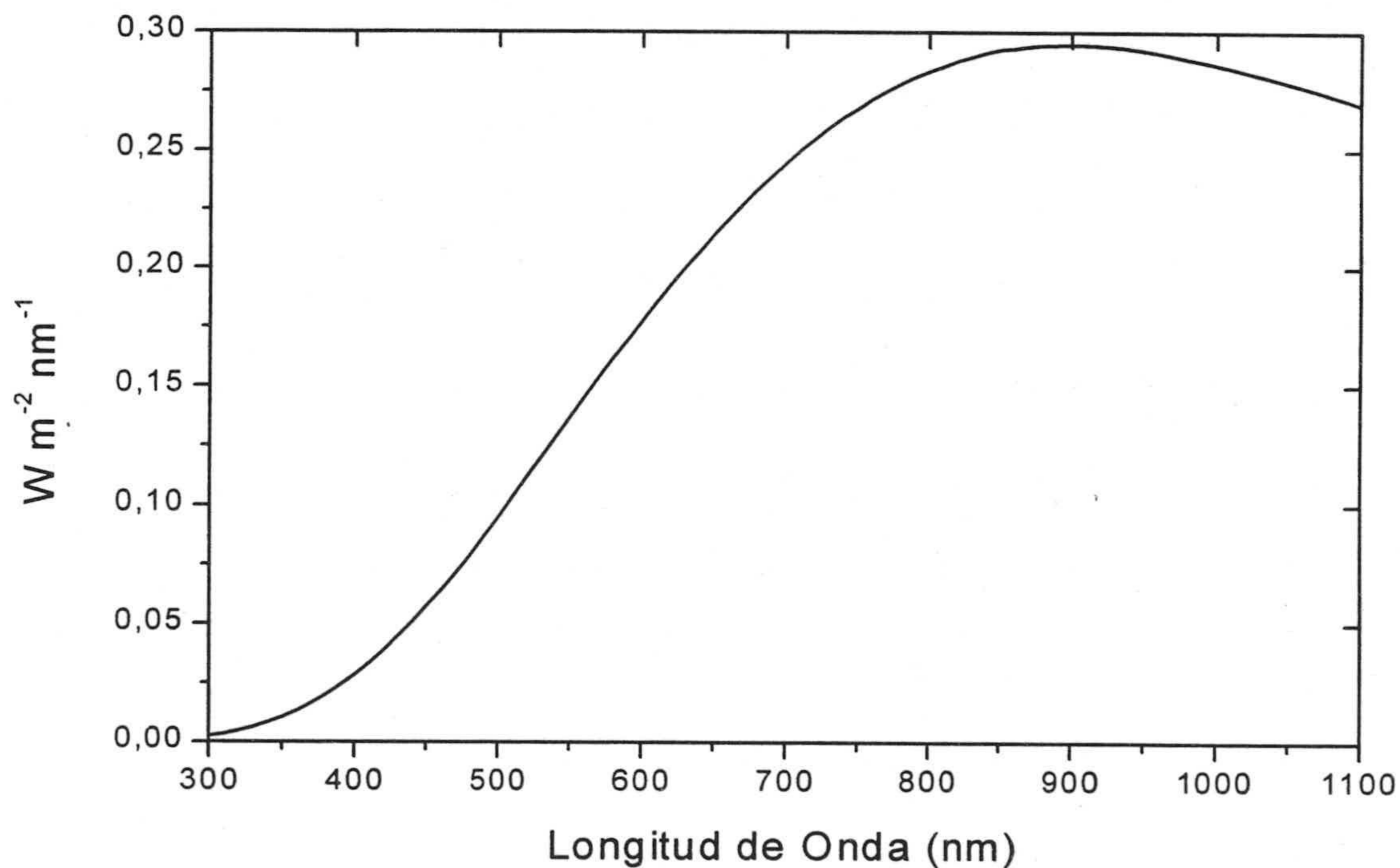


Figura 3. 6.- Irradiancia espectral de la lámpara usada para la calibración del espectrorradiómetro.

El espectrorradiómetro fue inicialmente calibrado en fábrica por LI-COR y la información de esta calibración nos fue suministrada por el fabricante. La calibración en términos absolutos del espectrorradiómetro se obtiene a través de la irradiancia espectral ($W m^{-2} nm^{-1}$) de una lámpara estándar, figura 3.6, que produce una señal en el espectrorradiómetro cuando se utiliza bajo unas condiciones prescritas. Las lámparas estándares que forman parte del 1800-02 fueron, a su vez, calibradas con respecto a una lámpara estándar primaria suministrada por el *U.S. National Bureau of Standards (NBS)*.

La máxima incertidumbre en la irradiancia espectral de una fuente estándar es de un 4% en 300 nm y un 2% entre 500 y 1100 nm.

El fichero de calibración se realiza promediando 10 medidas de la lámpara de calibración en pasos de 1 nm en todo el rango espectral (300-1100 nm), generándose un fichero que contiene el promedio de la señal del fotodiodo (en milivoltios), durante las 10 medidas, para cada longitud de onda. Posteriormente el fichero de calibración se obtiene dividiendo el fichero de salida (en mV) entre el fichero que contiene la irradiancia espectral de la lámpara de calibración (en $W m^{-2} nm^{-1}$). Las calibraciones así realizadas poseen una incertidumbre entre $\pm 3\%$ y 10% , mostradas en la tabla III.4, relativas al NBS.

Rango espectral	Incertidumbre
300 nm	$\pm 10\%$
450 nm	$\pm 5\%$
550 nm	$\pm 4\%$
650-800 nm	$\pm 3\%$
1100 nm	$\pm 5\%$

Tabla III.4.- Incertidumbre en la calibración con respecto al NBS

Para medir con el LI-1800 fuentes de radiación no conocidas (E_n) se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$E_n = \frac{D_n}{K} \quad K = \frac{D_s}{E_s}$$

siendo D_n = señal repuesta del detector con la fuente de radiación no conocida (mV)

K = fichero de calibración ($mV W^{-1} m^2 nm$)

D_s = señal respuesta del detector con la fuente estándar (mV)

E_s = irradiancia espectral absoluta de la fuente estándar ($W m^{-2} nm^{-1}$)

En la figura 3.7 se muestran los 2 ficheros de calibración, para el receptor coseno utilizado en las medidas de luz-día y luz crepuscular, el último obtenido en nuestro laboratorio y utilizado durante la campaña de medidas así como el fichero de calibración de fábrica, observándose que las mayores variaciones se han producido en la región ultravioleta tal y como se refleja en la tabla III.5, donde hemos promediado las variaciones entre ficheros de calibración sucesivos, agrupándolas en 3 rangos espectrales (ultravioleta, visible e infrarrojo). Esta *intervariación* es más acentuada en el rango ultravioleta (300-380 nm) y en menor medida en el rango infrarrojo (780-1100 nm) que en el rango visible (380-780 nm). También se puede observar cómo el paso del tiempo, (y por tanto el uso y envejecimiento de las componentes del espectrorradiómetro), produce una variación en la respuesta espectral del mismo más acusada a medida que se

incrementa su utilización. Todas estas variaciones entran dentro de los márgenes previstos por el fabricante.

Rango espectral	1ª calibración vs calib. fábrica	2ª calibración vs 1ª calibración	3ª calibración vs 2ª calibración	4ª calibración vs 3ª calibración	5ª calibración vs 4ª calibración
300-1100 nm	0,82 %	0,77 %	2,91 %	3,06 %	3,08%
300-380 nm	1,19 %	0,64 %	7,79 %	6,31 %	9,98%
380-780 nm	0,72 %	0,24 %	2,11 %	1,72 %	1,77%
780-1100 nm	0,85 %	1,47 %	2,69 %	3,92 %	2,97%

Tabla III. 5.- Variación espectral promediada entre calibraciones sucesivas del espectrorradiómetro con el receptor coseno.

De forma análoga se calibró la respuesta del espectrorradiómetro cuando se le acopló el telescopio de 3° usando una fibra óptica. Dado que la campaña de medidas de luz-cielo es menos extensa en el tiempo (seis meses) sólo se calibró una vez, justo antes de comenzar las medidas. En la figura 3.8 mostramos el fichero de calibración de la respuesta del espectrorradiómetro con el telescopio de 3° acoplado.

El espectrorradiómetro también fue calibrado periódicamente en longitud de onda utilizando para ello un láser de He-Ne (632,8 nm).

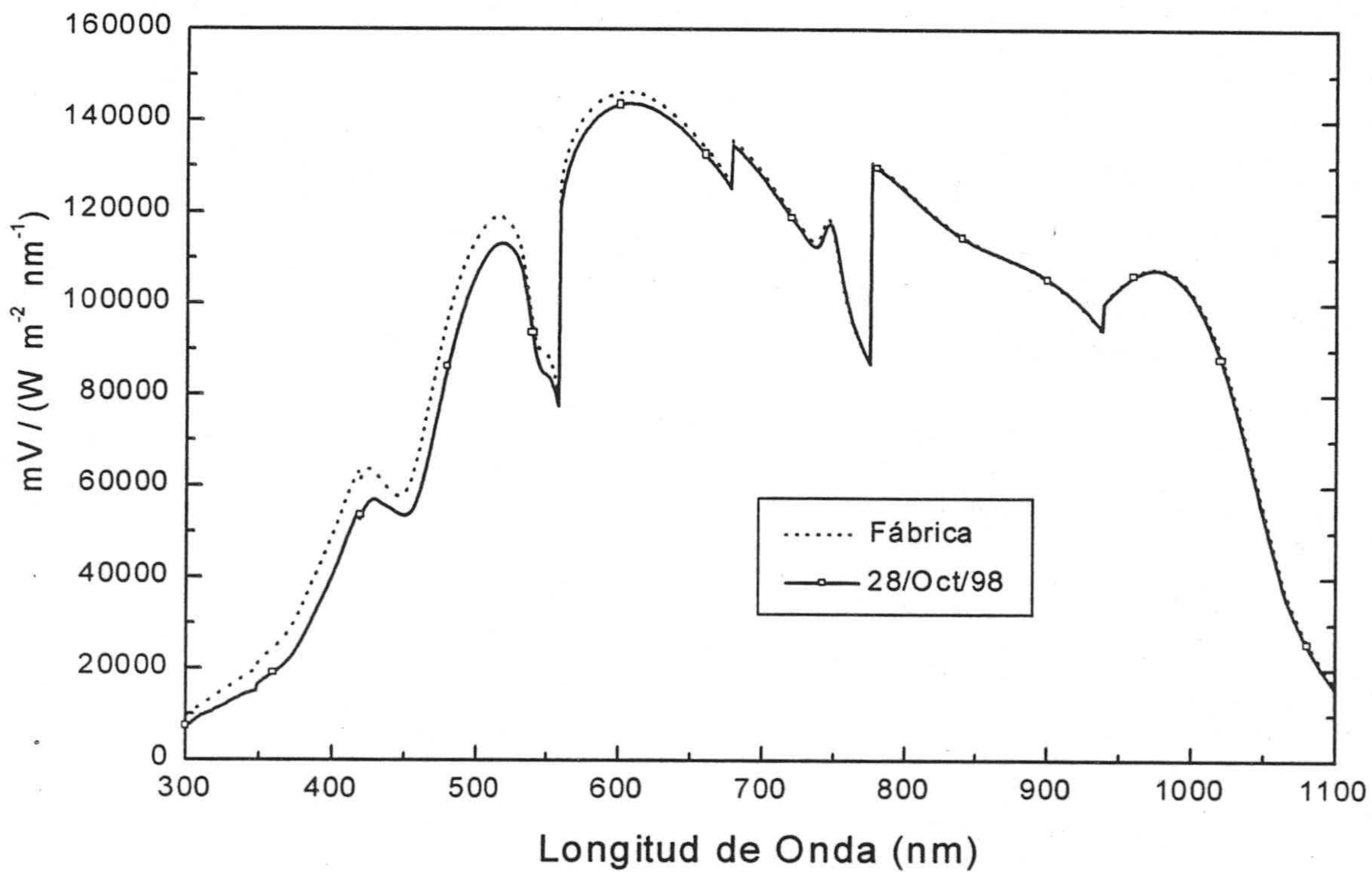


Figura 3. 7.- Dos ejemplos de dos ficheros de calibración del espectrorradiómetro con el receptor coseno.

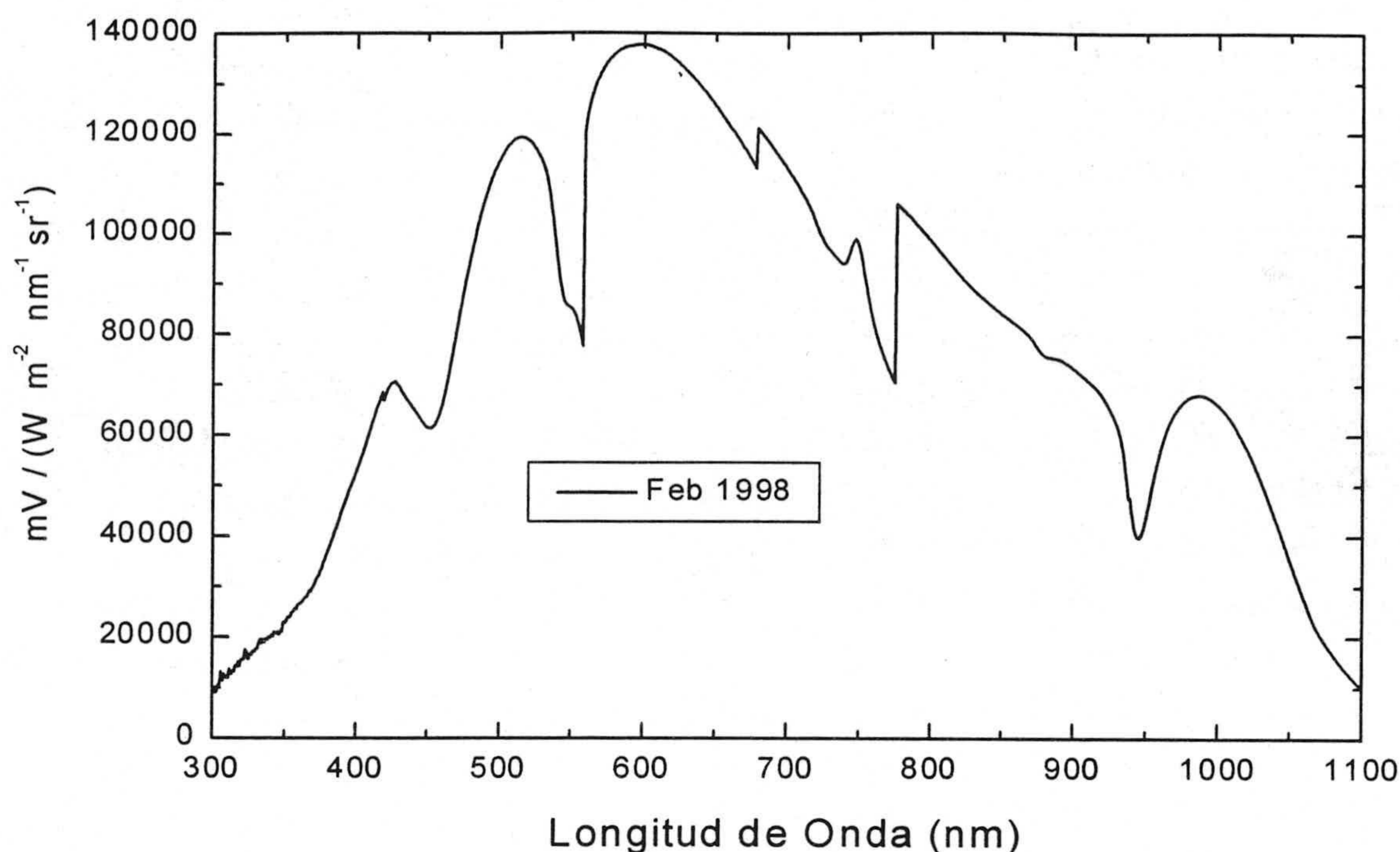


Figura 3. 8.- Fichero de calibración del espectrorradiómetro con el telescopio de 3° usando una fibra óptica.

3.5. Piranómetros

Los dos piranómetros utilizados para medir la radiación *global* (luz solar directa y luz esparcida) y *difusa* (únicamente luz esparcida) durante las medidas espectrales de la radiación global pertenecen al Grupo de Física de la Atmósfera del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada y están considerados como instrumentos de primera clase de acuerdo con la clasificación de piranómetros de la Organización Meteorológica Mundial (WMO).

Ambos piranómetros son de la casa *Kipp&Zonen* y están diseñados de forma que permiten la medida de la irradiancia (flujo radiante) sobre una superficie plana, que procede de la radiación solar directa y de la radiación esparcida incidente procedente de todo el hemisferio. Se situaron horizontalmente, cercanos al espectrorradiómetro, y a la misma altura sobre el suelo de la azotea (1,2 m). En la figura 3.9 y en tabla III.6 se suministran las características técnicas básicas de los dos piranómetros utilizados (CM 11) en distintas épocas. Ambos piranómetros fueron calibrados por miembros del Departamento de Física Aplicada.

	CM 11	
Ángulo de visión	2π sr	
Irradiancia	0-1000 W/m ²	
Factor de calibración	12,35 μV/Wm ⁻²	5,22 μV/Wm ⁻²
Rango espectral	305-2800 nm	
Tiempo de respuesta	24 s (99% respuesta)	
Estabilidad	< ± 0.5 % por año	
No linealidad	±0,7% (para <100W/m ² y para >500W/m ²)	
Respuesta coseno	< ±3% con una elevación solar de 10°	
Respuesta con la temperatura	max. ±1% entre -10°C y 40°C	
Fechas de uso	9 Feb. 1996- 7 Nov. 1996	7 Nov. 1996- 9 Feb. 1998

Tabla III. 6.- Características de los dos piranómetros usados.

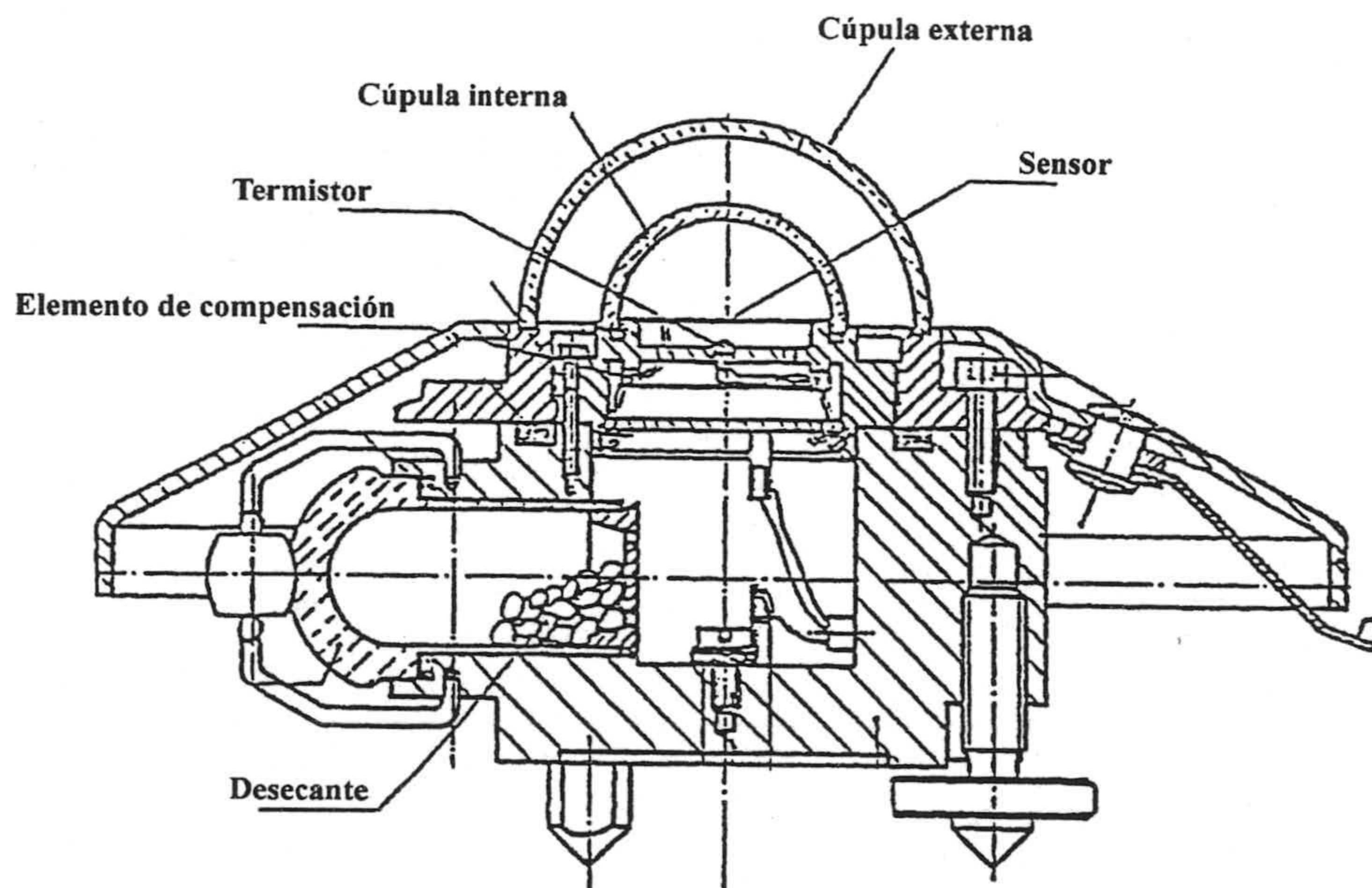


Figura 3. 9.- Esquema del piranómetro CM 11.

3.6. Obtención, almacenamiento y tratado de la información

Cada medida realizada se almacenaba en la memoria interna del espectrorradiómetro. Al final de cada día estos ficheros eran transferidos a una unidad de almacenamiento magnética. En cada fichero el espectrorradiómetro almacenaba la fecha, hora, rango e intervalo espectral de la medida.

Como ejemplo, en la campaña de luz-día, el rango espectral elegido era 300-1100 nm y el intervalo espectral de 1 nm. Cada fichero constaba, pues, de 801 longitudes de onda con su correspondiente valor de la irradiancia medida.

La conexión de un ordenador personal portátil al espectrorradiómetro facilitó la gestión de funciones mediante un programa que emula una terminal. Además este programa nos permitió el cálculo y almacenamiento de las siguientes magnitudes:

- irradiancia/radiancia integradas en distintos rangos espectrales
- coordenadas de cromaticidad x e y , usando las funciones de mezcla del observador patrón CIE 1931
- temperatura de color correlacionada (expresada en K)
- iluminancia/luminancia
- irradiancia/radiancia en el UV (irradiancia integrada entre 300 y 380 nm)
- irradiancia/radiancia en el visible (irradiancia integrada entre 380 y 780 nm)
- irradiancia/radiancia en el IR (irradiancia integrada entre 780 y 1100 nm)

Otras magnitudes fueron calculadas posteriormente, entre ellas:

- elevación y acimut solares
- coordenadas de cromaticidad u' y v' (CIE 1976)

3.7. Trayectoria solar

Conociendo la latitud y longitud de la azotea de Físicas así como la hora, minutos, y segundos en los que se realizaba cada una de las medidas espectrales de luz-día o luz-cielo, pudimos calcular la posición del Sol (Iqbal [1983]), sin tener en cuenta la refracción en la atmósfera, otra variable muy importante a la hora de analizar las características espectrales y colorimétricas de estas medidas.

En la figura 3.10 se muestran las máximas elevaciones solares en los solsticios de invierno y verano y en la 3.11 el recorrido en elevación y acimut del sol tanto en verano como en invierno en Granada en relación con la hora local (2:00+GMT en verano, 1:00+GMT en invierno). Con la duración del día en Granada, por ejemplo, un día de medidas en verano, correspondiente a la campaña de luz-día, podía empezar a las 6:45 y acabar a las 21:45 (horas locales).

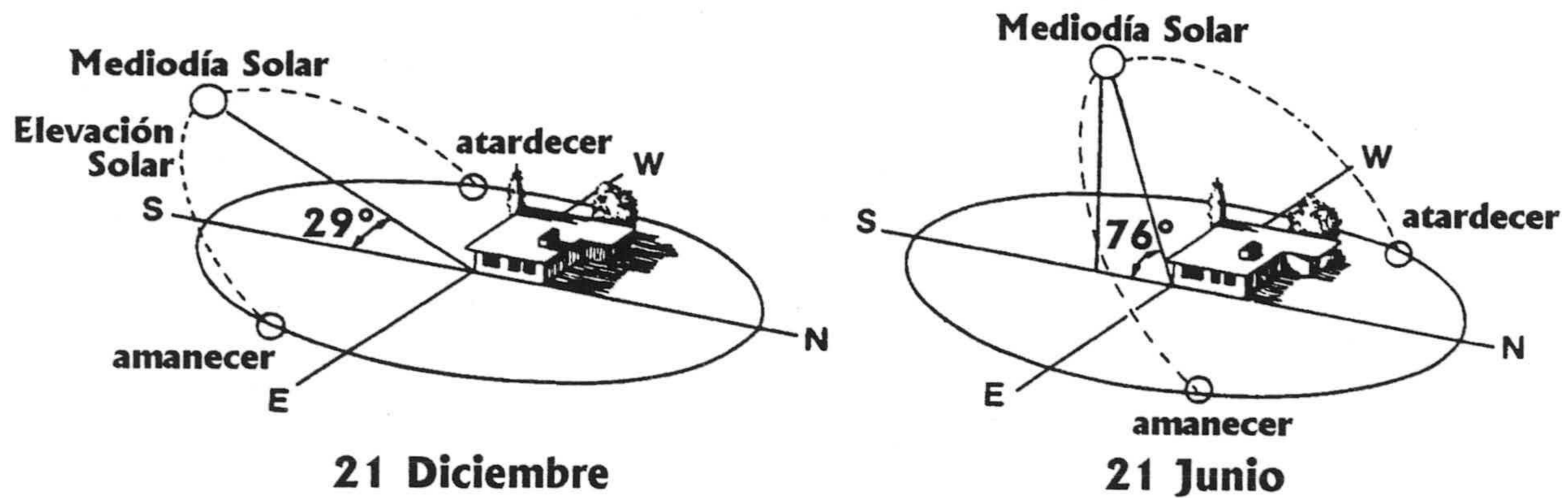


Figura 3.10.- Máximas elevaciones solares en los solsticios de Granada

Con la frecuencia en la adquisición de las medidas de luz-día anteriormente descrita, se obtuvieron los histogramas de elevaciones solares medidas que se muestran en las figuras 3.12 a) y b). La anchura de los dos histogramas es de 10° y 1° respectivamente. Ambos histogramas muestran un número mayor de medidas con elevaciones solares bajas. En concreto, para elevaciones solares por debajo de 5° el número de medidas es de 748 (28,8 % del total). También mostramos, en la figura 3.13, los histogramas de elevaciones solares correspondientes al conjunto de medidas de luz-cielo.

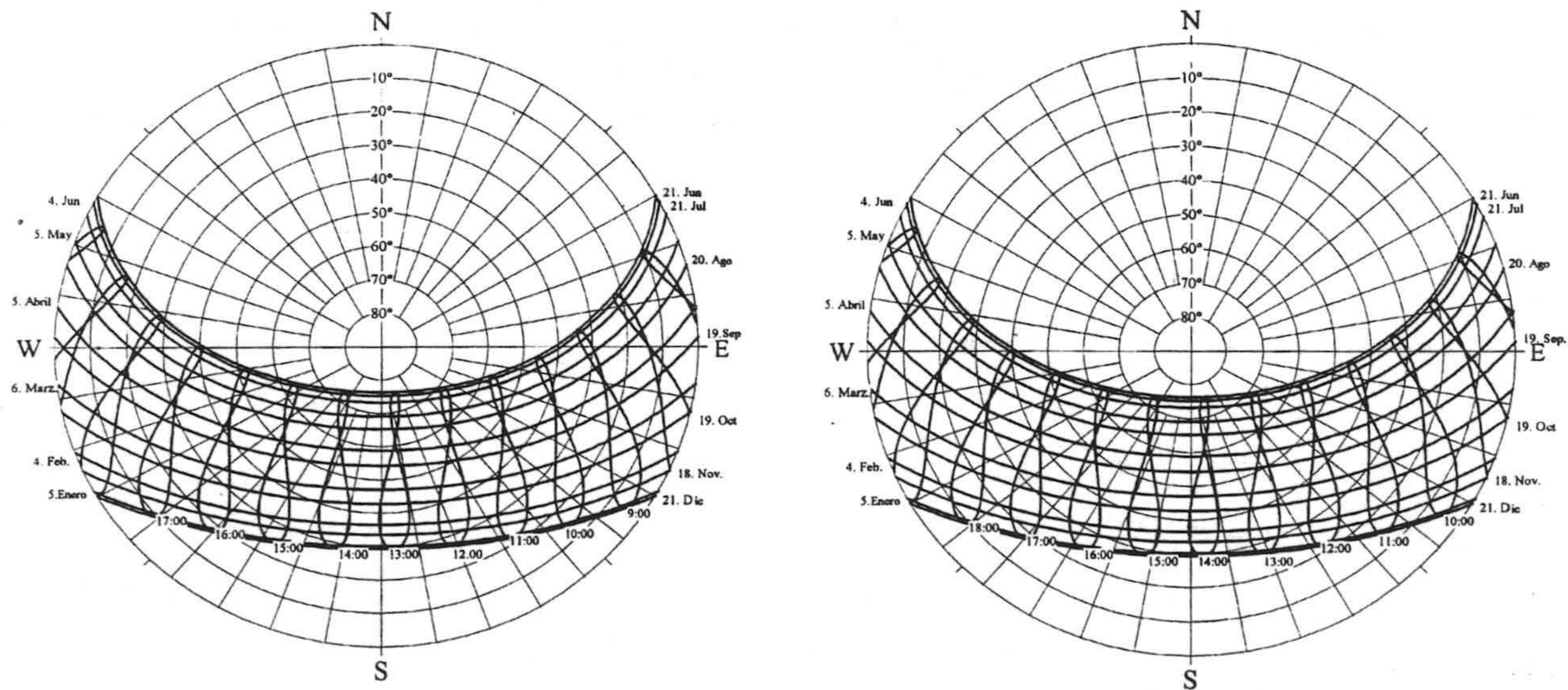


Figura 3.11.- Diagramas polares en Granada con el horario de a) invierno, b) verano

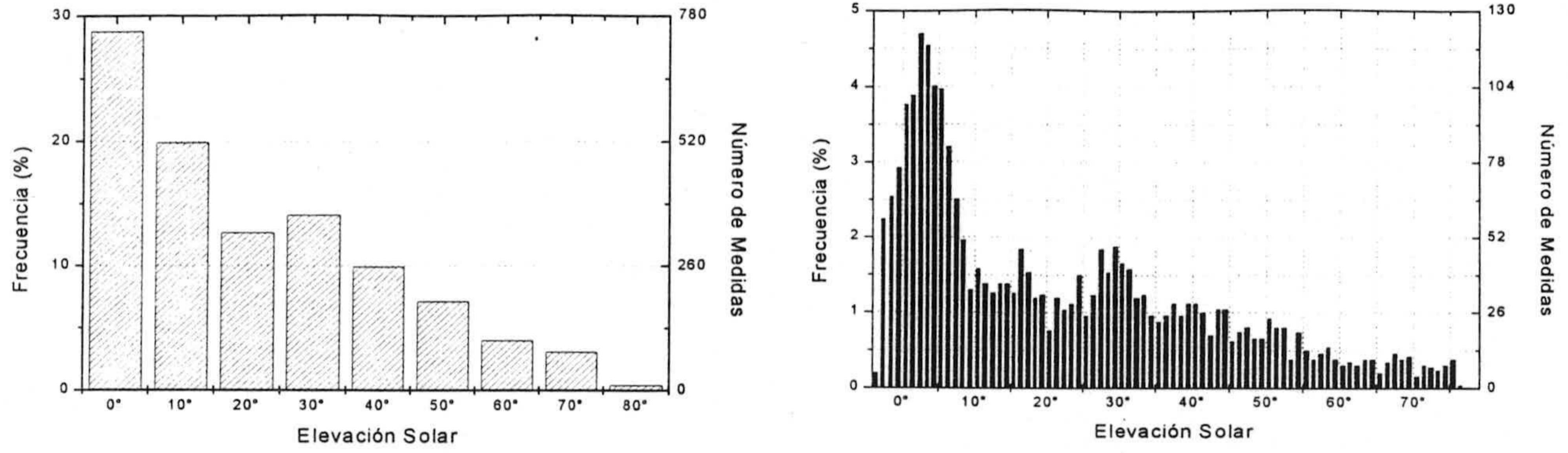


Figura 3.12.- Histogramas de elevaciones solares en la campaña de medidas de luz-día. Anchos de los intervalos: a) 10°, b) 1°

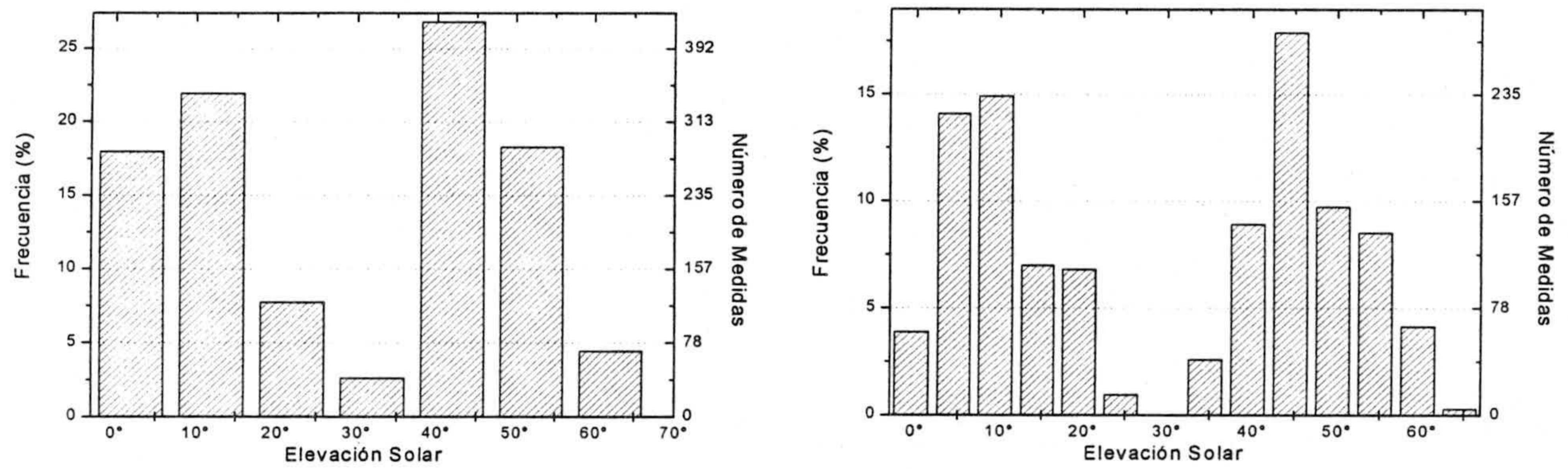


Figura 3.13.- Histogramas de elevaciones solares en la campaña de medidas de luz-cielo para cielos despejados. Anchos de los intervalos: a) 10°, b) 5°

Capítulo 4: Medidas de luz-día

“Su estructura antigua, que es la lógica, obedece a la necesidad de quebrar la fuerza excesiva del sol y de la luz, de detener las corrientes del viento cálido; por eso sus calles son estrechas e irregulares no anchas ni estrechas”
Granada la bella, Angel Ganivet

En este capítulo describiremos las medidas correspondientes a la campaña de luz-día, cuya adquisición ha sido detallada en el capítulo previo. El análisis de las 2.600 medidas espectrales, de las que está compuesta esta campaña, será abordado desde un triple punto de vista: colorimétrico, fotométrico y espectral.

Nos centraremos, para llevar a cabo el análisis colorimétrico, en dos variables: coordenadas de cromaticidad y temperatura de color correlacionada de nuestras medidas, ya que, entre otras razones, éstas son las variables que nos pueden suministrar mayor información sobre las características colorimétricas y, asimismo, han sido las dos variables más estudiadas y analizadas en los trabajos descritos en el capítulo 2 (*Revisión Bibliográfica*) y por tanto serán muy útiles como elementos de comparación.

Sin embargo, no pretendemos que este capítulo se convierta, en cuanto al enfoque del análisis, en una mera copia de los trabajos publicados en la literatura, sino en un complemento a éstos, donde queden subsanadas y complementadas las deficiencias que presentan; así, por ejemplo, cada medida espectral irá acompañada de una información suplementaria (estación del año, elevación solar, condiciones atmosféricas, etc.) que nos permitirá acometer nuestro análisis desde distintos enfoques.

En cuanto al análisis espectral, estudiaremos los perfiles espectrales de los vectores propios, que obtendremos a partir de nuestros datos, comparándolos con los publicados en la literatura por otros autores, así como la dimensionalidad requerida para reconstruir las curvas espectrales. Ampliaremos el estudio espectral analizando el contenido ultravioleta, en el cual existen grandes discrepancias entre distintos autores.

4.1. Coordenadas de Cromaticidad

El cálculo de las coordenadas de cromaticidad de las 2.600 medidas espectrales de luz-día ha sido realizado utilizando las funciones de mezcla del observador patrón CIE-1931, ya que en todos los trabajos mencionados en el capítulo 2 -excepto uno que utiliza el observador patrón 1964 (Lee [1994a])- se hace uso de estas funciones de mezcla. Además su uso nos permite trabajar en el sistema de referencia por excelencia en colorimetría.

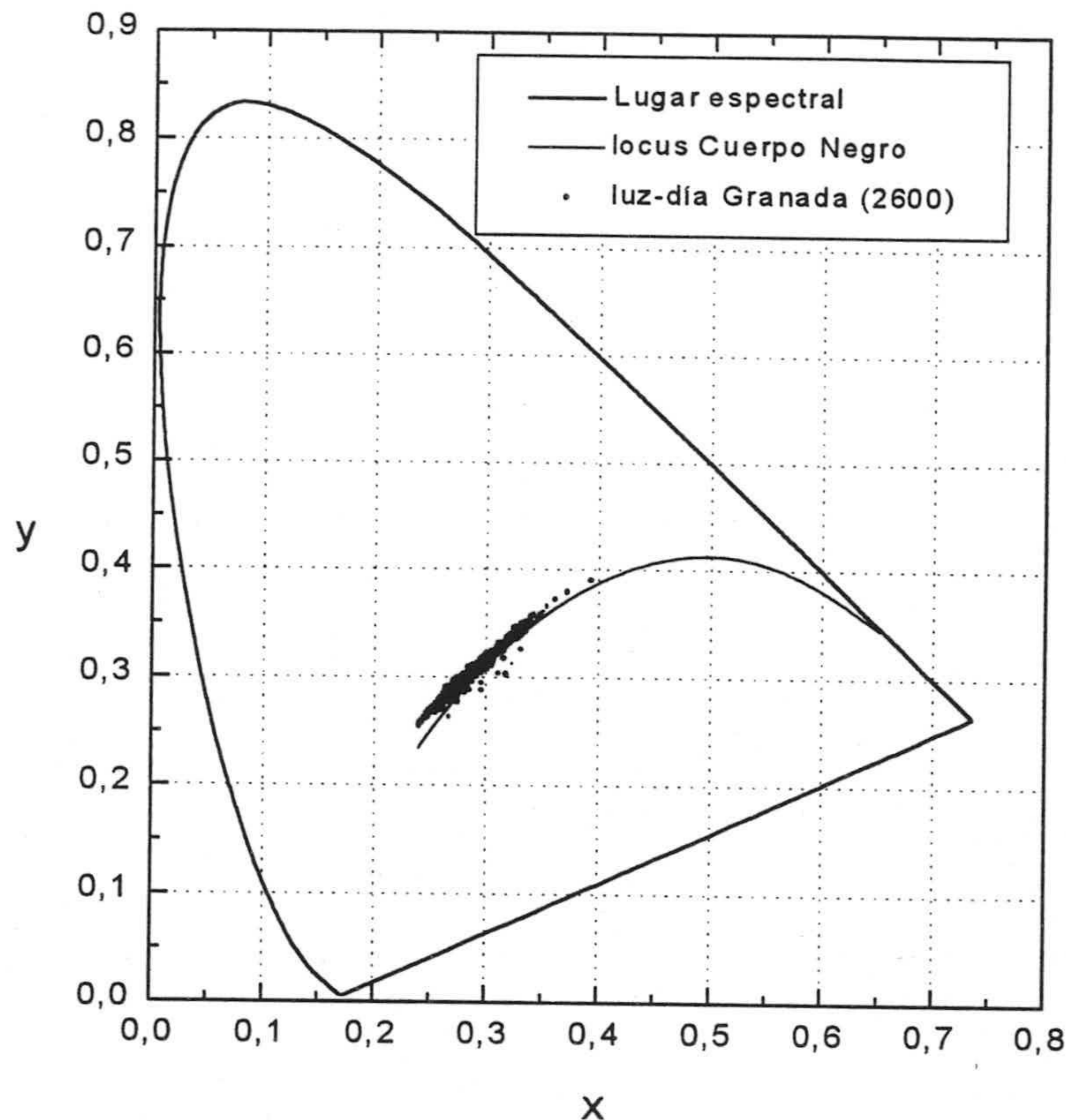


Figura 4.1.- Coordenadas de cromaticidad, en el diagrama cromático CIE 1931, correspondientes a las 2.600 medidas espectrales de luz-día obtenidas en Granada.

En la figura 4.1 se han representado estas coordenadas de cromaticidad y en la figura 4.2 hemos ampliado la región del diagrama cromático de interés, dibujando el *locus* correspondiente a estas 2.600 medidas de luz-día de Granada, obtenido mediante análisis de mínimos cuadrados:

$$y = -0,05188 + 1,55320 x - 1,09234 x^2 \tag{4.1}$$

Comparando esta distribución de las coordenadas de cromaticidad en el diagrama cromático, con la obtenida por otros autores, se observan ciertas características que conviene destacar.

En primer lugar se aprecia una gran extensión de la nube de puntos en el eje x, siendo 0,2397 y 0,3936 el valor mínimo y máximo respectivamente. El tamaño de la

distribución de puntos sobre el eje x es una de las mayores encontradas en la literatura, siendo análoga, en cuanto a extensión, a la obtenida por Judd *et al.* [1964].

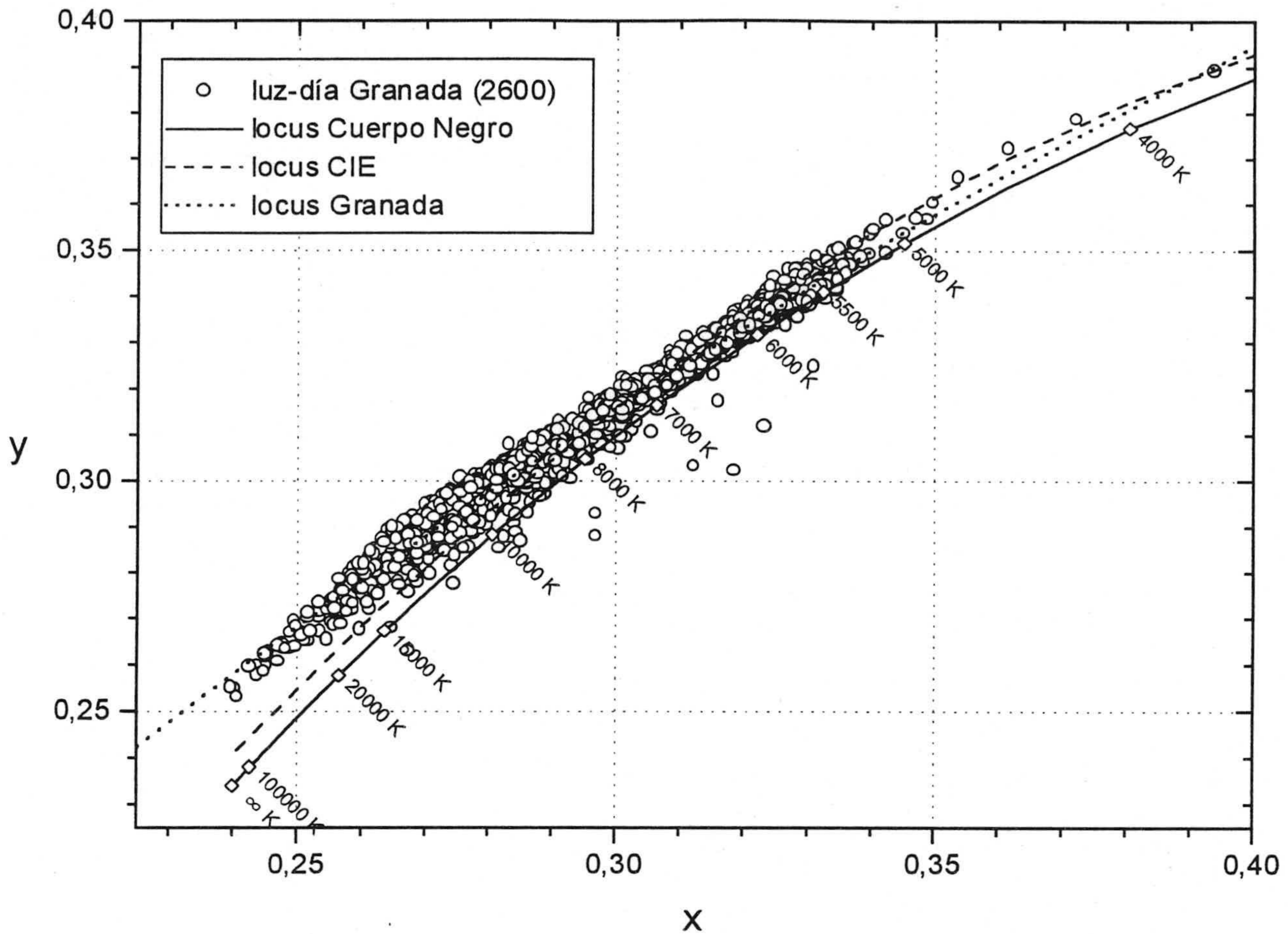


Figura 4.2.- Coordenadas de cromaticidad de las 2.600 medidas de luz-día y su *locus* correspondiente en el diagrama cromático CIE 1931.

Otra característica de nuestras medidas es su poco alejamiento del *locus* del Cuerpo Negro, si bien se separa ligeramente de éste para TCCs por encima de 7.000 K. Este comportamiento se asemeja, en cierta medida, al encontrado por Henderson y Hodgkiss [1963], Chamberlin *et al.* [1963], Nayatani y Wyszecki [1963], Condit y Grum [1964], Winch *et al.* [1966], Nayatani *et al.* [1967], Ando *et al.* [1967] y Dixon [1978], y difiere del presentado por Sastri y Das [1968], Tarrant [1968], Sastri y Manamohanan [1971] y Knestrick y Curcio [1967].

A pesar de corresponderse con la mayor campaña realizada hasta la fecha, se observa un gran agrupamiento de las coordenadas en torno a su propio *locus*, siendo éste mayor para TCCs por debajo de 12.000 K.

La mayoría de las medidas se sitúan por encima del *locus* del Cuerpo Negro, hacia la región de los verdes. Sólo una treintena (de un total de 2.600) lo hacen por debajo, hacia los púrpuras, confirmando los resultados obtenidos por Henderson y Hodgkiss [1963], Condit y Grum [1964], Winch *et al.* [1966], Nayatani *et al.* [1967], Ando *et al.* (ver

Henderson [1970]), Tarrant [1968]. Hay que resaltar que existen, únicamente, dos trabajos en los que la mayoría de sus datos poseen coordenadas de cromaticidad por debajo del *locus* del Cuerpo Negro, hacia la región de los púrpuras (Sastri y Das [1968], y Dixon [1978]).

El *locus* correspondiente a las medidas de luz-día de Granada posee menos pendiente que el *locus* de la CIE. De hecho, ambas curvas se cortan en dos puntos (0,390, 0,387) y (0,302, 0,318). Esto significa que el *locus* de Granada, para TCCs superiores a 7.500 K se sitúa por encima del CIE *locus*, mientras que para TCCs inferiores a 7.500 K lo hace por debajo, como puede observarse en la figura 4.3. Este mismo resultado fue descrito por la mayoría de autores (Chamberlin *et al.* [1963], Nayatani y Wyszecki [1963], Condit y Grum [1964], Henderson y Hodgkiss [1964], Nayatani *et al.* [1967], Sastri y Das [1968] Dixon [1978]).

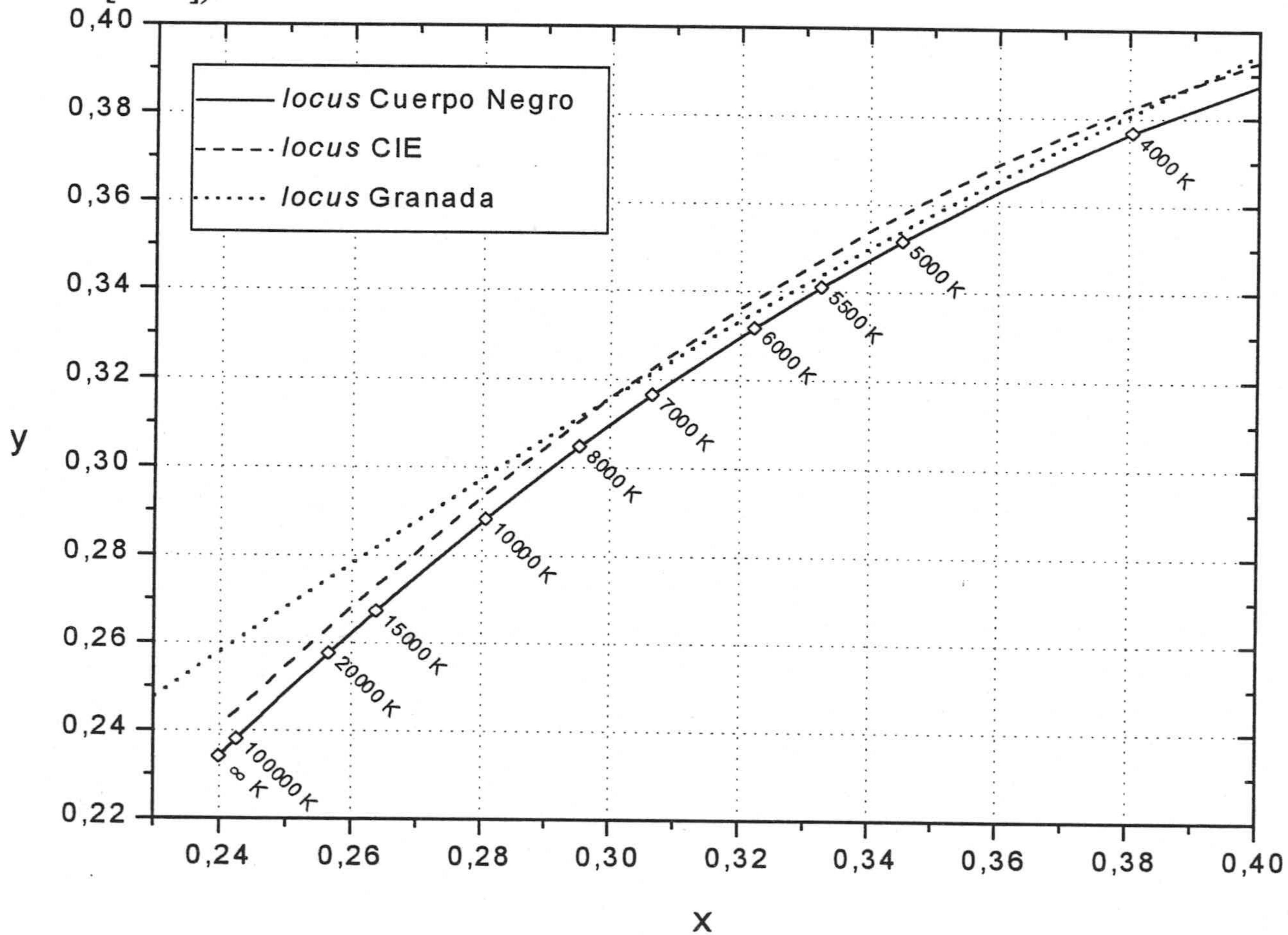


Figura 4.3.- Comparación entre el *locus* de luz-día de Granada, el CIE *locus*, y el *locus* del Cuerpo Negro en el diagrama cromático CIE 1931.

Asimismo existe una gran separación entre el CIE *locus* y el *locus* de Granada para TCCs superiores a 8.000 K, tal y como se observa en la figura 4.3. Si evaluamos esta separación mediante distancias Euclídeas, la distancia máxima entre ambos *loci* es de $\sim 0,011$. Como comparación, para la región donde ocurre el máximo alejamiento (TCC ~ 35.000 K), la longitud del semieje menor de la elipse de MacAdam [1943] alcanza un

valor de 0,0007 y de 0,003 el semieje mayor, lo cual provoca que el máximo alejamiento entre dichos *locus* esté en torno a 9 unidades de MacAdam.

A pesar de no ser usual, en la mayoría de trabajos similares existentes en la literatura, hemos representado las coordenadas de cromaticidad de las 2.600 curvas en el diagrama CIE 1976, recientemente utilizado por Lee [1994a], mostrado en la figura 4.4, calculando asimismo el *locus* en este diagrama:

$$v' = -0,21199 + 5,20932 u' - 9,01087 u'^2$$

En este diagrama podemos apreciar, claramente, la diferencia de comportamiento entre el CIE *locus* y el *locus* de Granada para temperaturas de color superiores a 8.000 K.

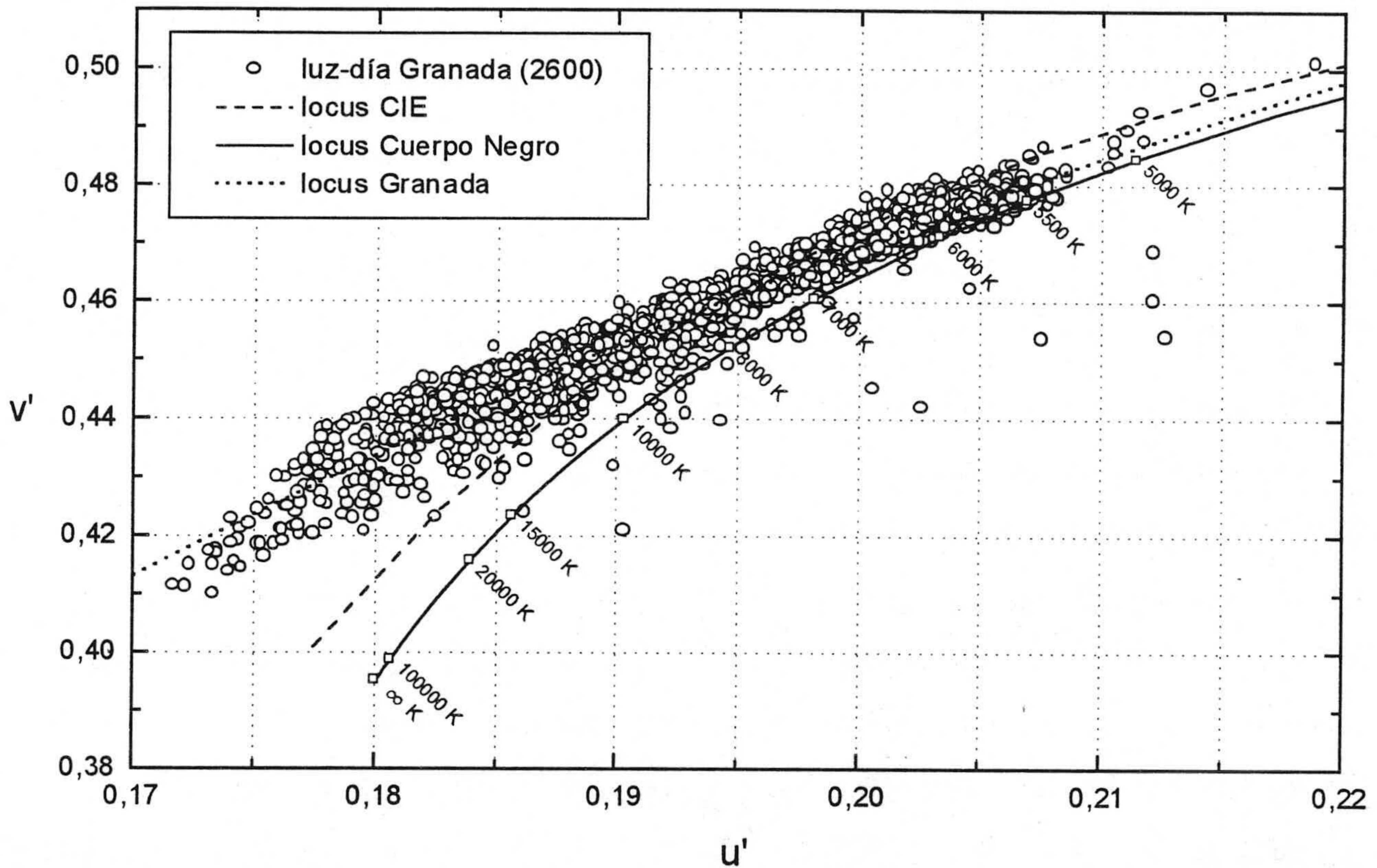


Figura 4. 4.- Coordenadas de cromaticidad de las 2.600 medidas de luz-día y su *locus* correspondiente en el diagrama cromático CIE 1976.

Si comparamos gráficamente, figuras 4.5 y 4.6, distintos *loci* obtenidos por otros autores que realizaron medidas de luz-día con el obtenido con las 2.600 medidas de Granada, se observa en primer lugar que la longitud del *locus* de Granada (que depende de la dispersión de los datos experimentales, en el diagrama cromático, según el eje x) es la más extensa. Este resultado corrobora uno de los objetivos iniciales de esta memoria de doctorado: nuestra campaña de medidas se convierte en la más extensa y en la más representativa de todas las publicadas en la literatura hasta la fecha, en cuanto a que atiende a dos años completos de medidas, mientras que las anteriores sólo lo hacían a periodos limitados inferiores a un año.

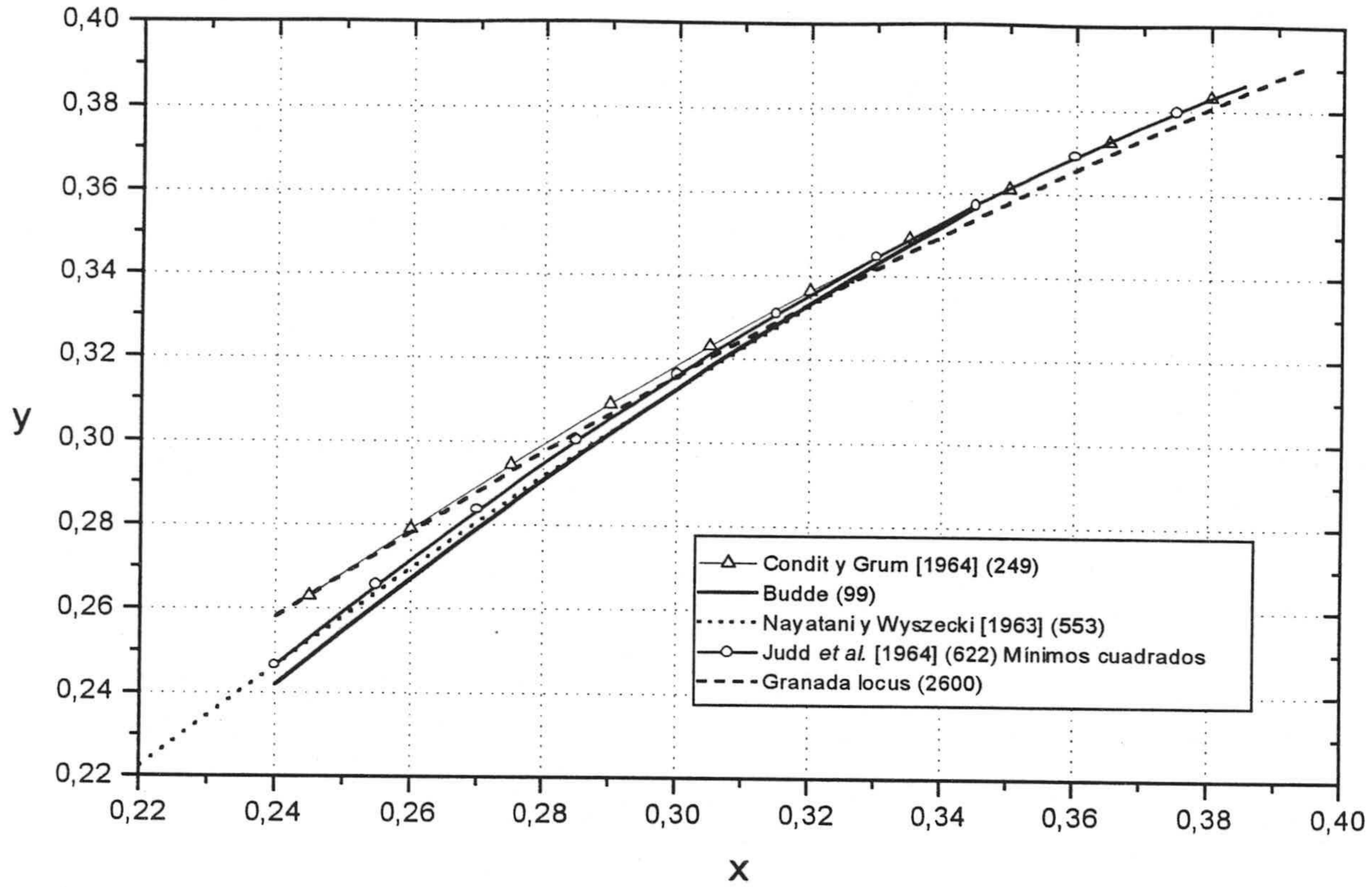


Figura 4. 5.- Representación en el diagrama cromático CIE-1931 de algunos *loci* publicados en la literatura, con los autores, el año (entre corchetes) y el número de medidas (entre paréntesis).

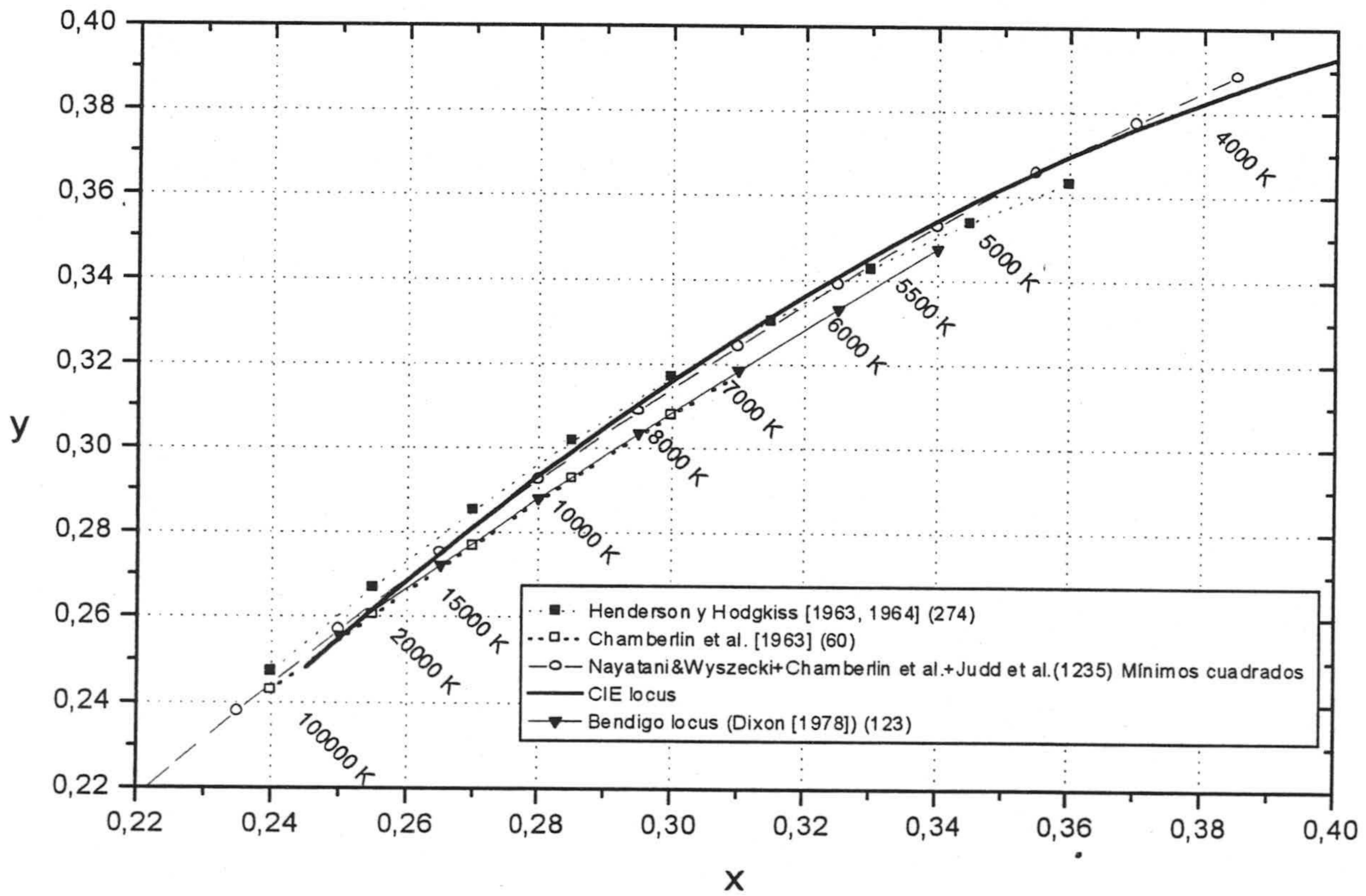


Figura 4. 6.- Representación en el diagrama cromático CIE-1931 de algunos *loci* publicados en la literatura, con los autores, el año (entre corchetes) y el número de medidas (entre paréntesis).

Otro resultado destacable, y también observado en estas dos figuras, es que el *locus* de Granada, junto al *locus* de Condit y Grum [1964], son los que más alejados se encuentran del *locus* del Cuerpo Negro para altas TCCs (hacia la región de los verdes). Sin embargo, para bajas TCCs el de Granada es el más cercano de todos. Por el contrario, el *locus* de Bendigo (Dixon [1978]) es el más alejado hacia la región de los púrpuras.

4.2. Temperatura de color correlacionada (TCC)

El concepto de temperatura de color correlacionada (TCC) fue introducido en el capítulo 1. En los trabajos aludidos en el capítulo 2, sus distintos autores han mostrado repetidamente que el conocimiento de las coordenadas de cromaticidad de la luz-día o de su TCC nos permite estimar su distribución espectral de potencia en el espectro visible. Aunque la irradiancia espectral de una medida de luz-día determina, de forma única, su TCC, en principio cabría pensar que el metamerismo (entiendo por éste, como hacen algunos autores, el fenómeno por el cual dos señales de color con distintos perfiles espectrales poseen la misma TCC) no sea un buen estimador de la distribución relativa de potencia espectral.

En la práctica, sin embargo, el esparcimiento en la atmósfera actúa usualmente como una función de transferencia espectral bastante suave para la luz solar, limitando, de esta forma, el posible metamerismo tanto en la luz-día como en la luz-cielo, convirtiendo a la TCC en un útil atajo para especificar las características colorimétricas y espectrales de la luz natural. De hecho la CIE describe la distribución relativa de irradiancia de distintas fases típicas de luz-día apoyándose, únicamente, en TCC entre 4.000 K y 25.000 K.

La TCC constituye, pues, una fuente de información primordial, aunque no suficiente, a la hora de describir las características no sólo colorimétricas sino también espectrales de cualquier tipo de luz natural. Por tanto dedicaremos buena parte de este capítulo a analizar de forma exhaustiva la TCC de las distintas medidas de luz-día adquiridas en esta memoria de doctorado.

En la figura 4.7 se muestra el histograma correspondiente a las temperaturas de color correlacionadas de las 2.600 medidas de luz-día, observándose que la TCC más frecuente (45,3%, 1.177 medidas) es la comprendida entre 5.500 y 6.000 K. Nuestro rango de TCCs viene limitado por el valor mínimo de 3.758 K (uno de los más bajos encontrados en la literatura) y el valor máximo de 34.573 K. En la figura 4.8 hemos ampliado dicho histograma, limitando la representación a TCCs comprendidas entre 5.000 y 12.500 K. En ambas figuras el ancho de cada intervalo es de 500 K. El segundo intervalo más frecuente (10,5%, 274 medidas) es el comprendido entre 6.000 y 6.500 K.

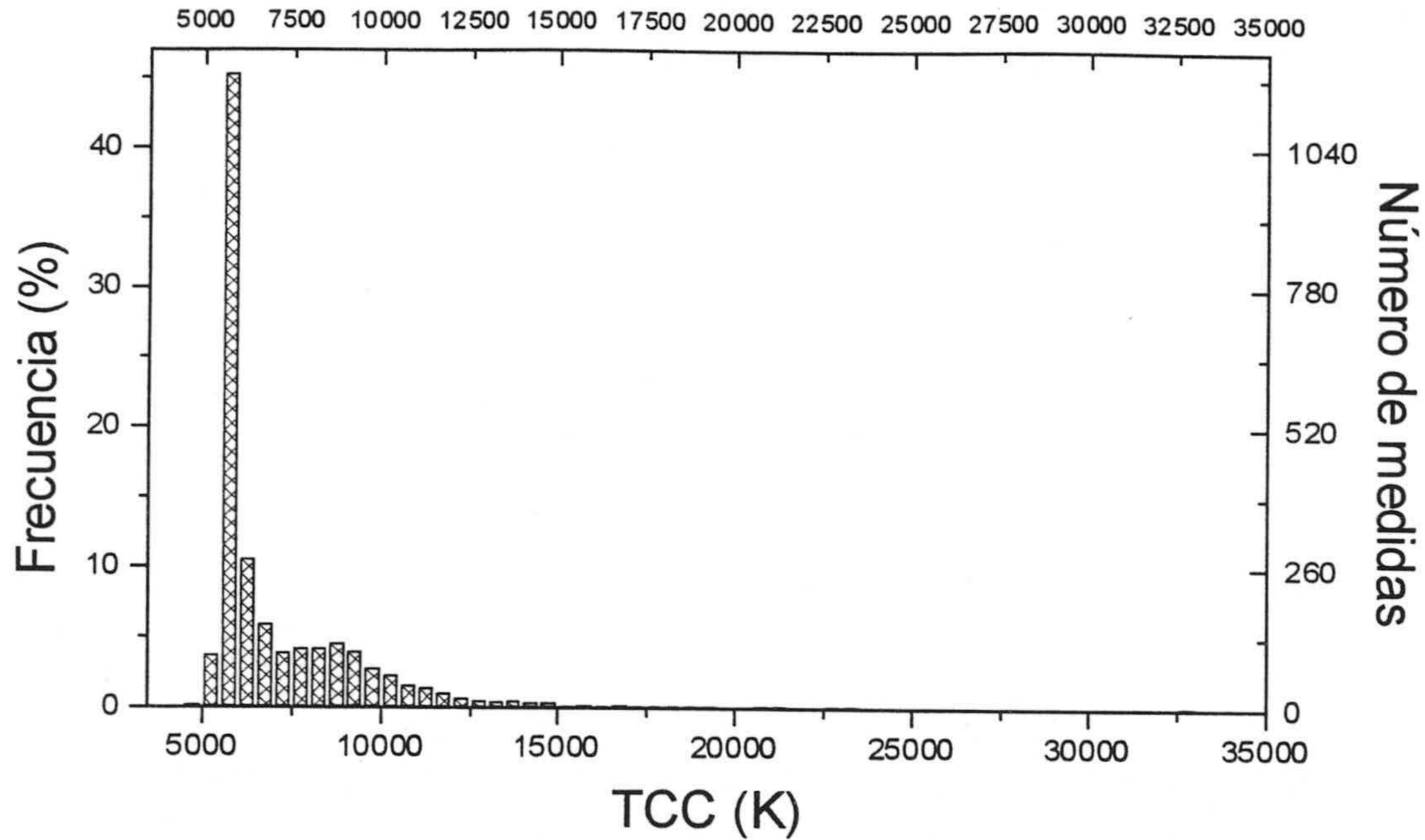


Figura 4. 7.- Histograma de TCC correspondiente a las 2.600 medidas de luz-día.

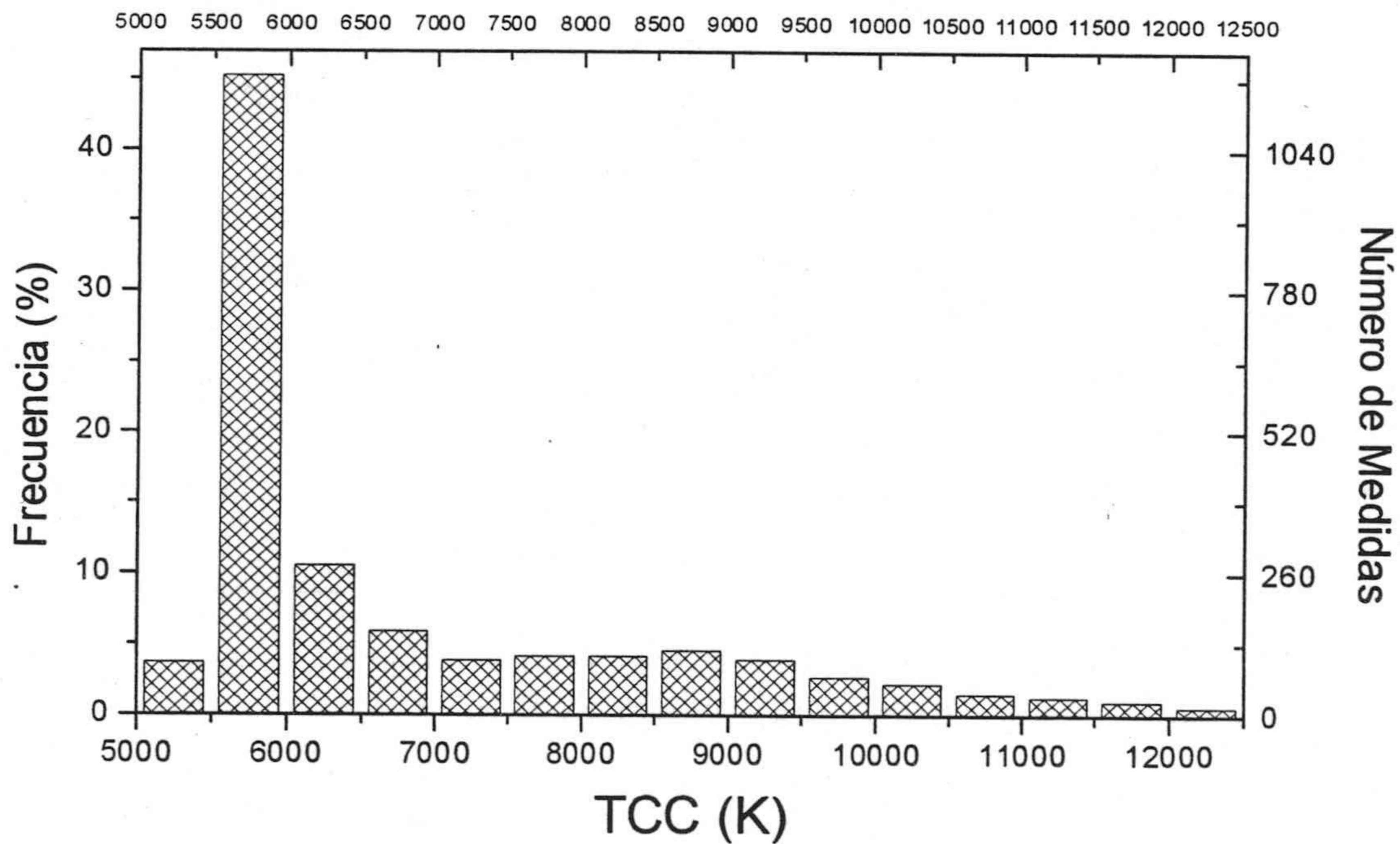


Figura 4. 8.- Detalle del histograma de la figura 4.7.

Para realizar una comparación con los resultados obtenidos por otros autores, debemos expresar las TCCs en mireds (ya que estas han sido las unidades usualmente usadas en la mayoría de los trabajos, a la hora de presentar histogramas) obteniendo el mostrado en las figura 4.9, en donde cada intervalo posee un ancho de 5 mireds. Con esta representación el intervalo más frecuente es el comprendido entre 175 y 180 mireds (5.555 K - 5.714 K), con un 22,3% de las medidas.

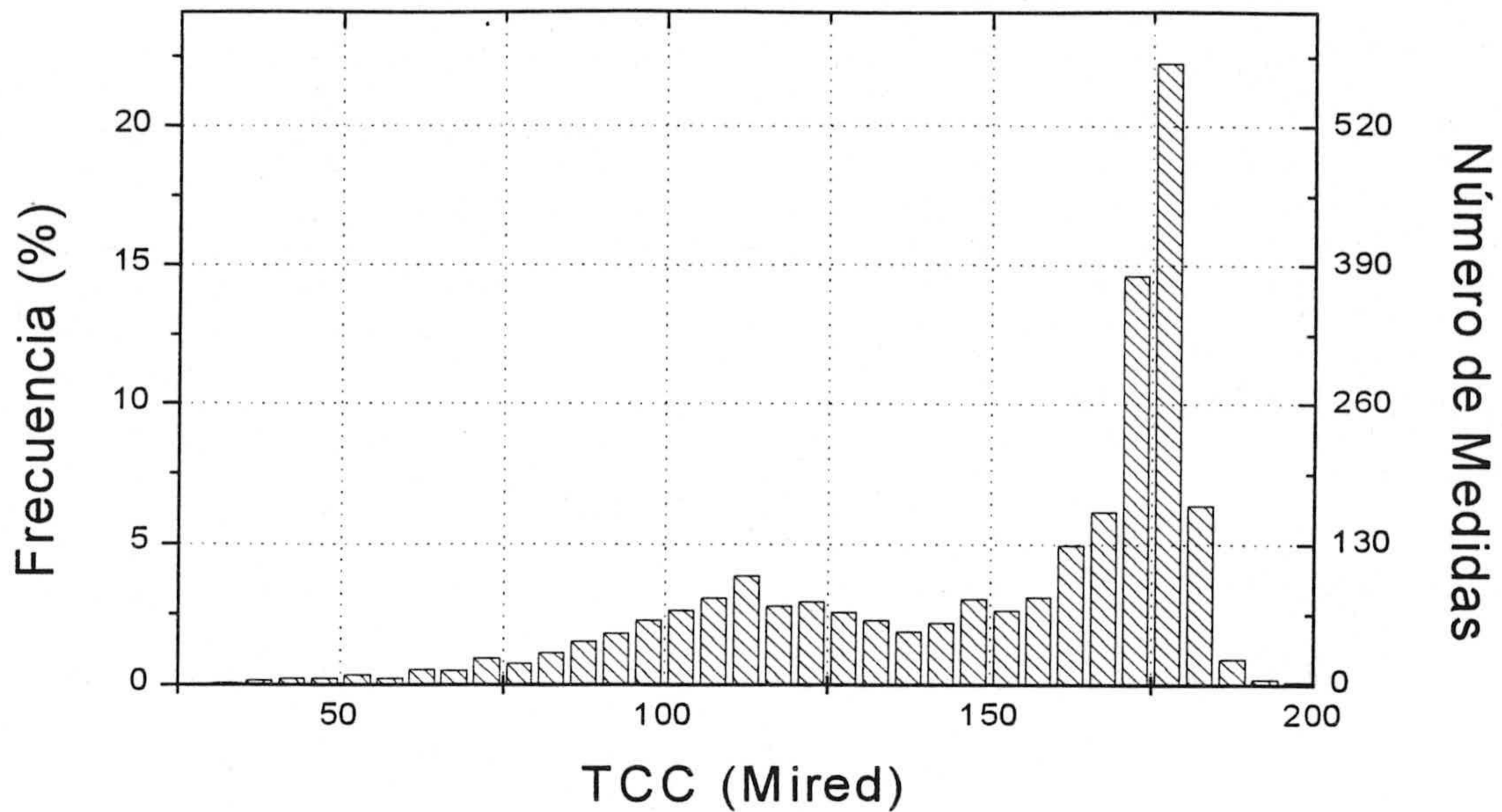


Figura 4. 9.- Histograma de TCC expresado en mireds de las medidas de luz-día

Los trabajos publicados no coinciden en el intervalo de TCC más frecuente. Hay que tener en cuenta que este dato no sólo es insuficiente para informar acerca de las características colorimétricas de la luz recibida en algún lugar, sino que además depende del tipo de medida que se esté analizando y de las condiciones atmosféricas.

Un factor que influye de forma determinante en el intervalo de TCC que predomina en un conjunto de medidas es precisamente la forma de llevar a cabo dichas medidas, en cuanto a su frecuencia y su distribución temporal a lo largo del periodo de campaña. Es obvio que, por ejemplo, el resultado al hacer un muestreo temporal aleatorio no debe ser equiparable al encontrado al realizar las medidas sólo para unas determinadas elevaciones solares.

Sería deseable, por tanto, diseñar una campaña de medidas para las cuales el rango de TCC que más frecuentemente ocurriera en la naturaleza fuera el más frecuentemente medido. Si así sucediera en todos los trabajos, y el tipo de medidas adquiridas y las condiciones atmosféricas presentes fuesen similares, el rango de TCC más frecuente debería ser semejante en todos los trabajos realizados en el mismo lugar. En un capítulo previo (Capítulo 3: *Instrumentación y medidas*) pusimos énfasis en dejar claro que nuestra forma de medir, en cuanto al muestreo temporal de un fenómeno natural, debía tener la duración, frecuencia y número de medidas adecuadas para que los resultados (inferidos a partir de las medidas) fuesen representativos de la luz natural recibida en Granada. Creemos que nuestra campaña satisface dichas condiciones y que, por tanto, nuestros resultados, a pesar de no coincidir plenamente con los publicados en la literatura, son representativos de lo que ocurre en Granada.

En la tabla IV.1. mostramos los intervalos de TCC más frecuentes obtenidos en algunos de los trabajos publicados en la literatura, pudiéndose observar cierta disparidad de resultados.

Artículo	Tipo de medida	Intervalo de TCC más frecuente (mireds)
Henderson y Hodgkiss [1963]	Cielo norte	165-180
	Todo el cielo sin Sol	145-150
	Todo el cielo con Sol	170-175
Collins [1965]	Todas (luz-cielo en 4 cuadrantes, y luz-día)	165-170
Winch <i>et al.</i> [1966]	Cielo sur	115-120, 160-165
	Todo el cielo sin Sol	130-135
	Todo el cielo con Sol	170-175
Ando <i>et al.</i> [1967]	Cielo norte, cielo despejado	95-100, 120-125
	Cielo norte, cielo cubierto o lluvia	160-165
Tarrant [1968]	Todas (luz-cielo norte y luz-cielo sur)	150-160
Dixon [1978]	Parcialmente nuboso con Sol no oculto	177,5-182,5
	Parcialmente nuboso con Sol oculto	162,5-167,5
	Completamente cubiertos	167,5-172,5
	Completamente despejados	177,5-182,5

Tabla IV. 1.- Intervalos de TCC más frecuentes en la literatura.

La mayoría de las distribuciones, correspondientes a medidas de luz-día (luz-cielo + luz-sol) que se han publicado en la literatura concuerdan en que la TCC más frecuentemente observada se sitúa entre 170 y 180 mireds (5.550 y 5.880 K). Todas estas observaciones fueron realizadas de tal forma que pueden ser consideradas como un muestreo aleatorio si se agrupan todas ellas. Hay cierta evidencia, por consiguiente, para pensar que dicho rango de TCC es el que más frecuentemente ocurre así como el que más frecuentemente ha sido observado, resultado que nosotros confirmamos con nuestro amplio conjunto de 2.600 medidas adquirido de forma sistemática durante un período de dos años. Sin embargo esta concordancia en los correspondientes a distintas investigaciones llevadas a cabo en diferentes lugares del mundo a lo largo de casi 4 décadas contrasta con las recomendaciones de la CIE para utilizar el iluminante D₆₅ con una TCC de aproximadamente 6.500 K (154 mireds) como representante de luz-día.

Ahondando en estos histogramas observamos que los resultados de Dixon [1978] son los que más se asemejan a los nuestros. El histograma que presenta Dixon para días parcialmente nubosos con el Sol no oculto (figura 2.27), y días completamente despejados tienen como intervalo más frecuente el comprendido entre 177,5 y 182,5 mireds.

Si agrupamos las medidas atendiendo a las condiciones atmosféricas presentes en el momento de la realización de cada medida, y que fueron anotadas tras un examen visual del estado del cielo, podemos examinar la dependencia de las características colorimétricas en función de las condiciones atmosféricas, de forma análoga a como lo han hecho distintos investigadores. Nosotros hemos clasificado nuestras 2.600 medidas de luz-día en los tres tipos de condiciones atmosféricas mostrados en la tabla IV.2, en la que hemos incluido el rango de TCC abarcado por cada uno de los tres tipos de cielo.

Tipo	Condiciones atmosféricas	Número de medidas	Rango TCC
1	Cielo totalmente despejado	757	5.373 K - 32.754 K
2	Cielo totalmente cubierto	216	3.758 K - 34.572 K
3	Resto de tipos de cielos	1627	4.864 K - 26.728 K

Tabla IV. 2.- Clasificación de las medidas de luz-día. Se incluye el número de medidas y el rango de TCC abarcado para cada tipo.

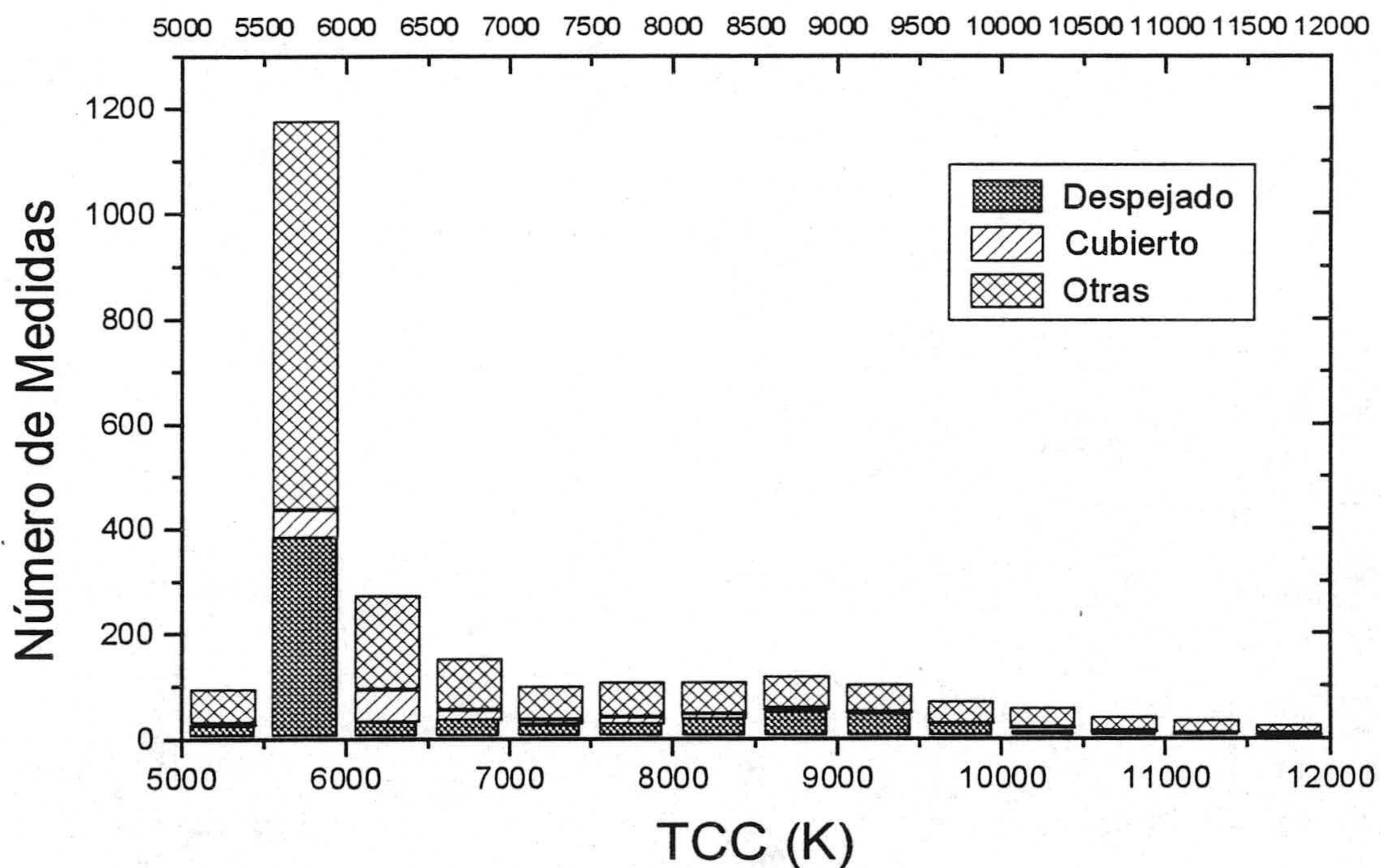


Figura 4. 10.- Histograma (parcial) de TCC teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas.

Teniendo en cuenta dicha clasificación el rango de TCC más amplio (ver tabla IV.2) es el correspondiente a cielos cubiertos, indicándonos este resultado la mayor variabilidad espectral de la irradiancia global para este tipo de cielos. Los histogramas de TCC, expresados en K, se muestran en las figuras 4.10 y 4.11. En esta última figura observamos que intervalo de TCC más frecuente no coincide para días con cielos despejados (5.500-6.000 K) y días con cielos cubiertos (6.000-6.500 K). El segundo intervalo más frecuente para cielos despejados va desde 8.500 a 9.000 K, mientras que para cielos cubiertos es 5.500-6.000 K. De forma análoga a como hemos hecho anteriormente, presentamos en las figuras 4.12 y 4.13 estos histogramas expresados en mireds.

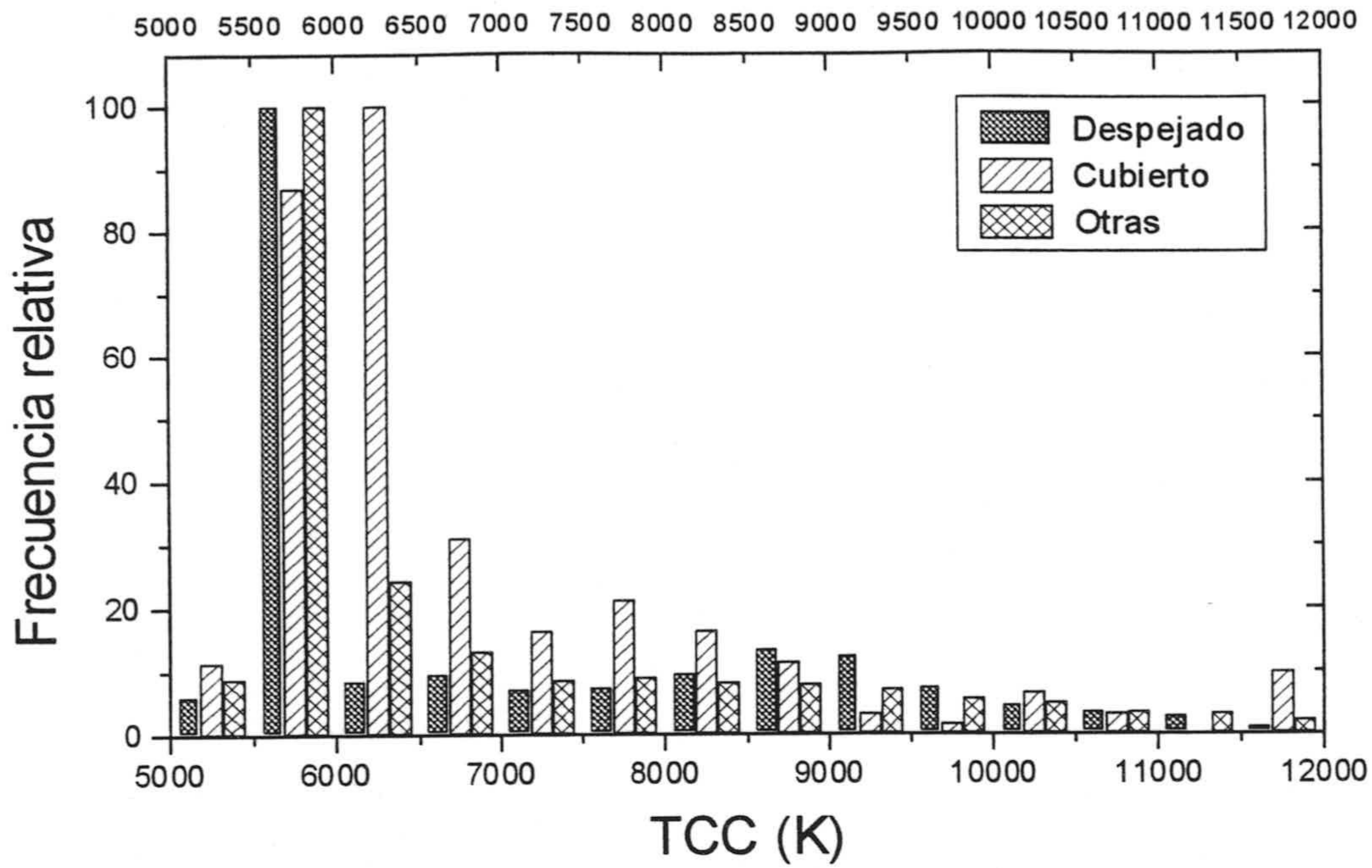


Figura 4. 11.- Frecuencia relativa de TCC en función de las condiciones atmosféricas.

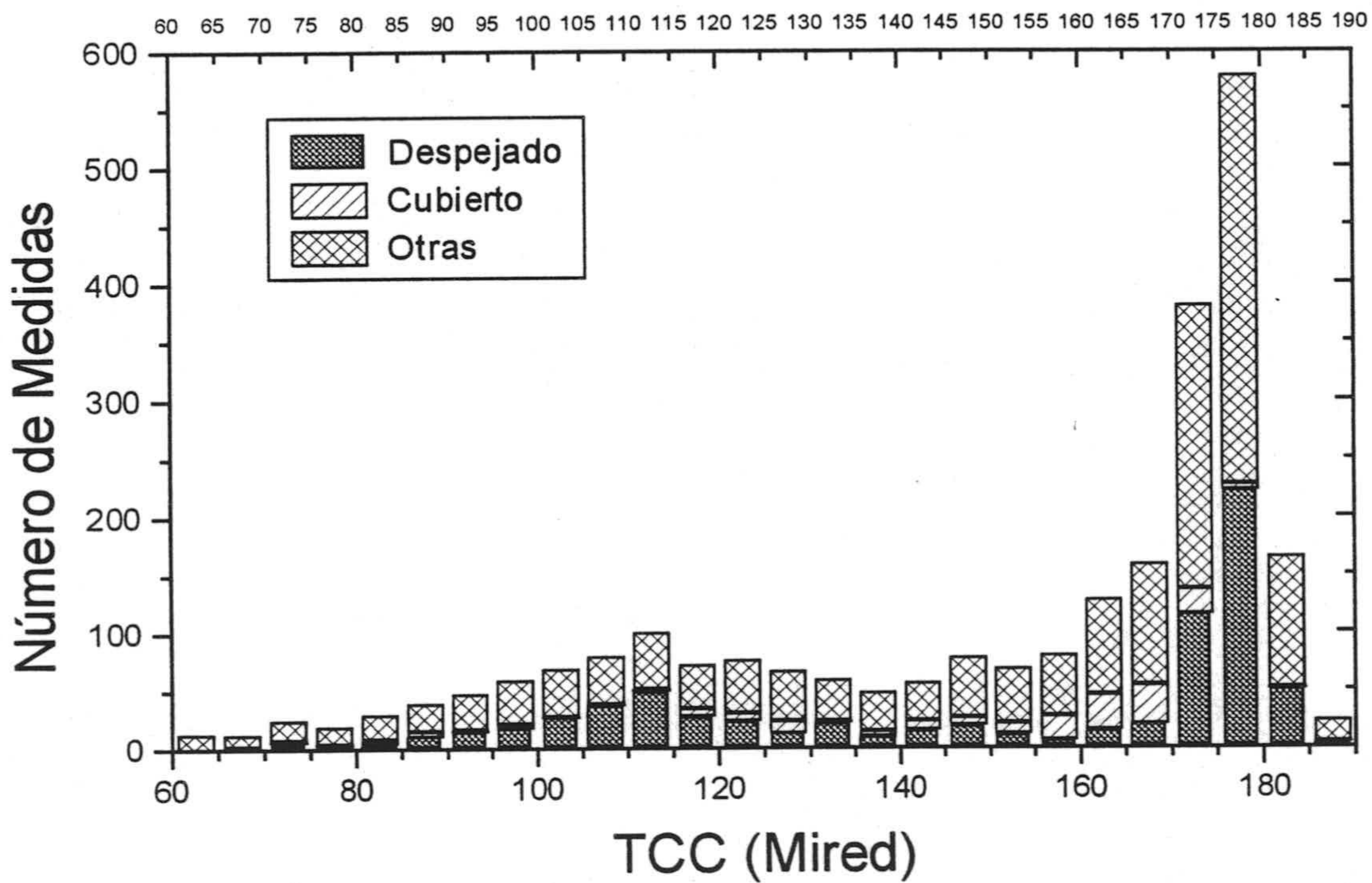


Figura 4. 12.- Detalle del histograma de TCC, expresado en mireds, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas.

Atendiendo a dicha clasificación nuestras medidas de luz-día con cielos totalmente despejados poseen el intervalo de TCC más frecuente entre 175 y 180 mireds (5.555-5.715 K), modificándose a 165-170 mireds (5.880-6.060 K) para cielos totalmente cubiertos, obteniendo resultados análogos a los encontrados por Dixon [1978].

De nuevo hemos de reiterar que la manifiesta disparidad en las formas de presentar los resultados así como en la tendencia a mezclar distintos tipos de medidas en los trabajos publicados en la literatura hacen casi imposible la comparación entre distintas investigaciones, salvo en casos muy concretos.

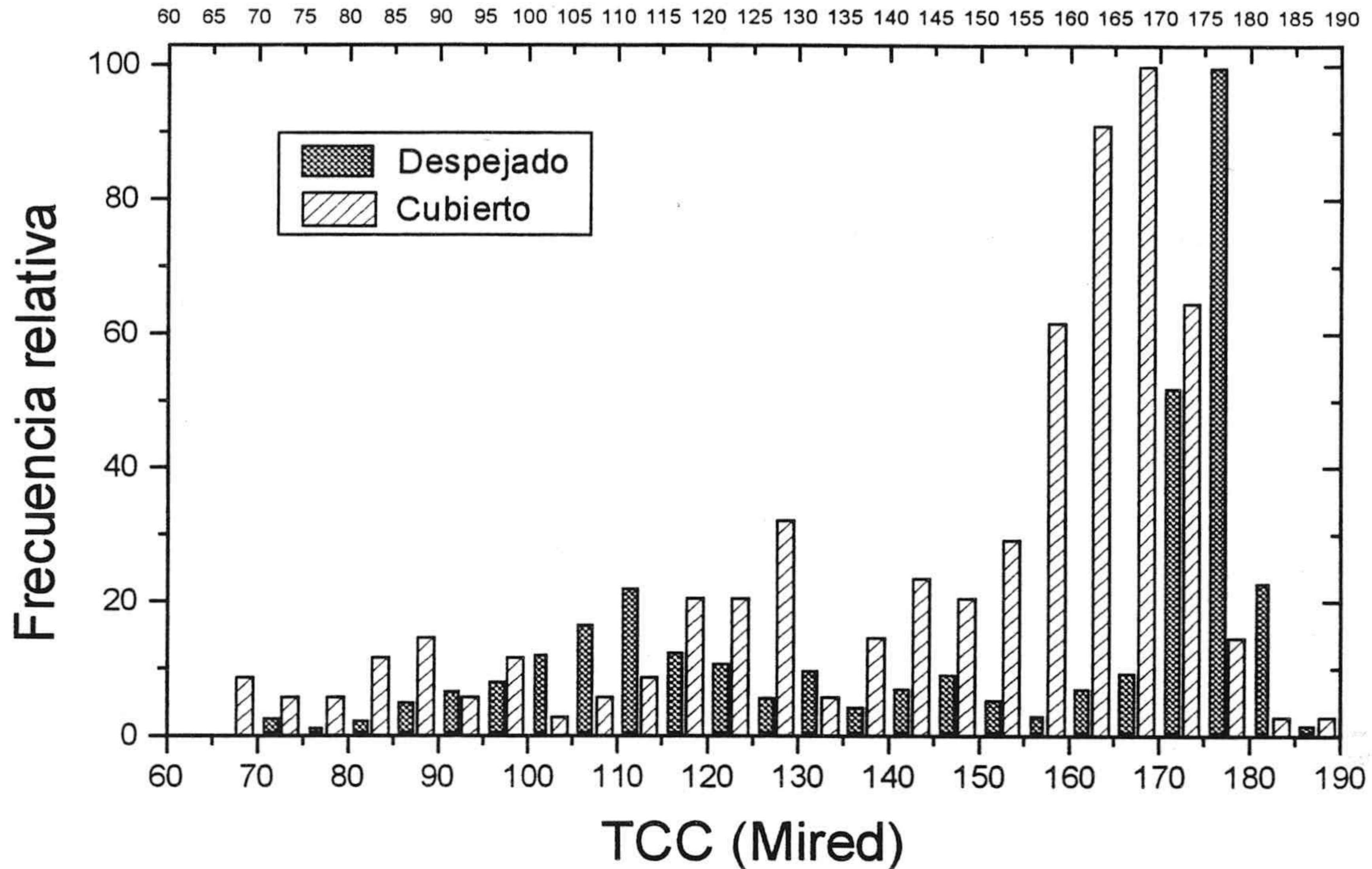


Figura 4. 13.- Frecuencia relativa de TCC, expresado en mireds, en función de las condiciones atmosféricas.

Como anunciamos al comenzar este capítulo, el hecho de haber adquirido, junto a cada medida, una serie de datos adicionales, nos permite analizar las características colorimétricas de nuestras medidas teniendo en cuenta su relación con respecto a dichas variables adquiridas. Una de ellas, altamente aludida en otros trabajos, es la elevación solar.

Utilizando los dos grupos de medidas de luz-día (cielos despejados y cielos cubiertos) hemos agrupado las elevaciones solares en intervalos de 5°, y calculado la media y la desviación estándar de la TCC, obteniendo los resultados que se muestran en la figura 4.14 y 4.15.

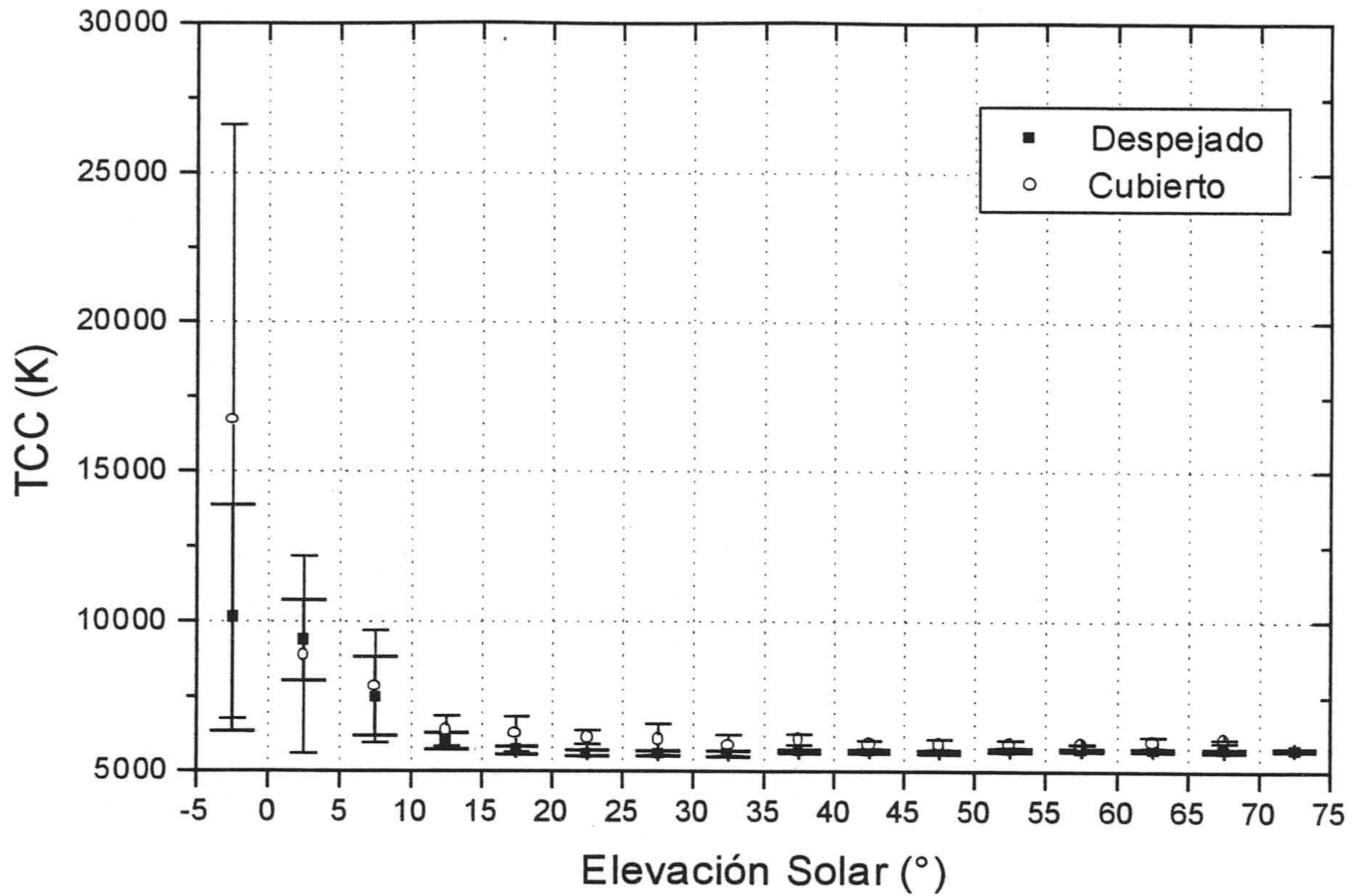


Figura 4. 14.- Evolución de la TCC, expresada en K, con la elevación solar. Los puntos se corresponden con los promedios y las barras con desviaciones estándar.

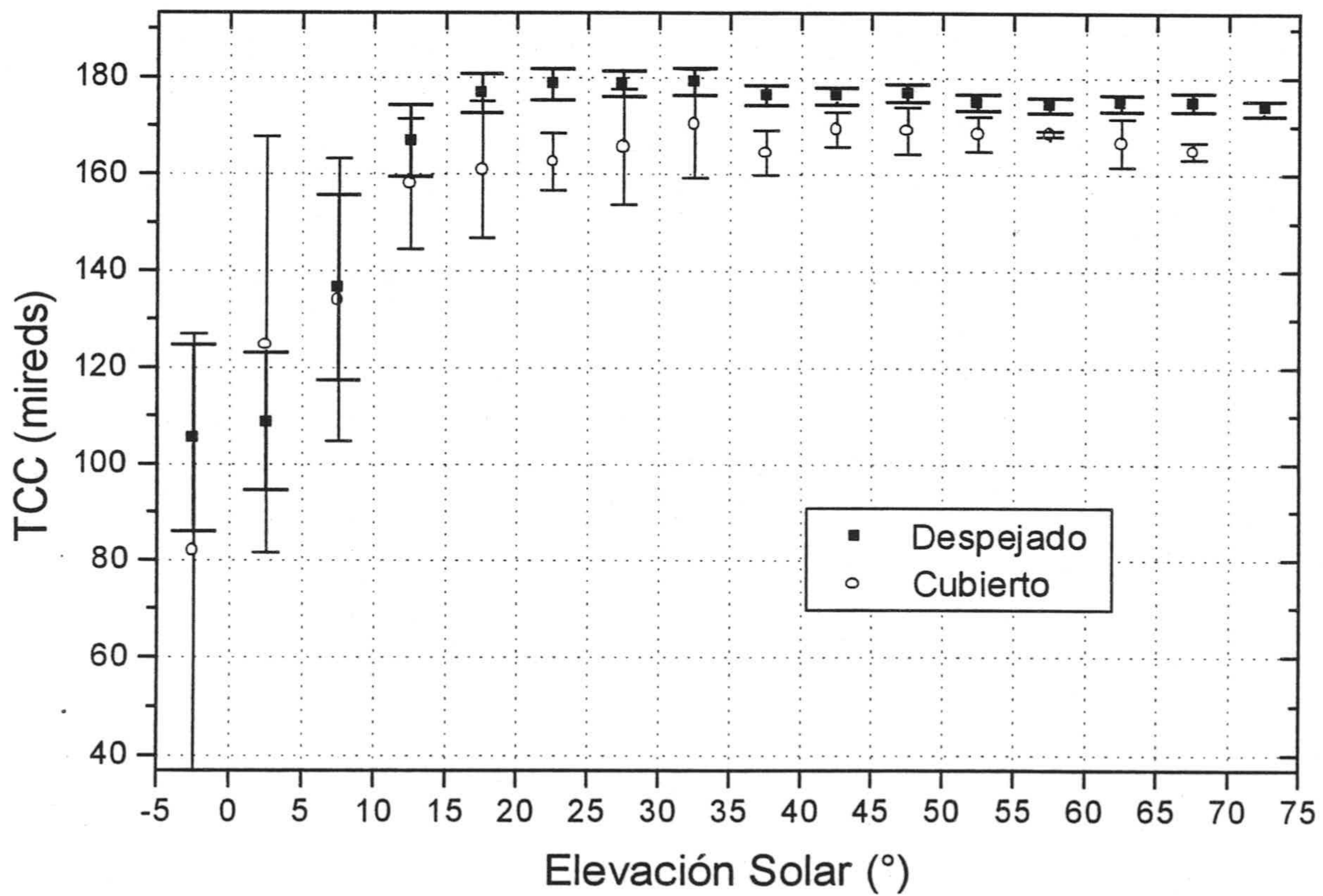


Figura 4. 15.- Evolución de la TCC, expresada en mireds, con la elevación solar. Los puntos se corresponden con los promedios y las barras con desviaciones estándar.

Se puede apreciar en ambas figuras que la TCC promedio (expresada en K) para cielos cubiertos es superior a la encontrada en cielos despejados, para todas las elevaciones solares superiores a 5° , estando comprendida esta ligera diferencia entre 300 K y 500 K (8-15 mireds). Las barras de error asociadas a los días cubiertos son más amplias que para cielos despejados. Esta abundante variabilidad de TCC encontrada con cielos cubiertos es inherente al propio concepto de cielo cubierto; bajo esta denominación se incluyen distintos tipos de nubes. Por el contrario, el concepto de cielo despejado es menos ambiguo y presentará menor variabilidad en su color, para una misma elevación solar, cuando, como en este apartado, nos estamos refiriendo al que presenta la luz recibida sobre una superficie horizontal.

En ambas figuras observamos que para elevaciones solares por debajo de 5° (amaneceres, anocheceres y crepúsculos) la variabilidad en TCC es la más amplia, siendo imposible fijar un estándar. Bajo estas condiciones (masas ópticas elevadas), por encima de 10° la desviación estándar en la TCC puede abarcar los 10.000 K con cielos cubiertos y 4.000 K en cielos despejados (45 y 20 mireds respectivamente). La imposibilidad de obtener un resultado concluyente para bajas elevaciones solares, dada la enorme variabilidad encontrada, fue la principal motivación para estudiar de forma pormenorizada y exhaustiva (incrementando la frecuencia temporal en las medidas) la evolución temporal durante crepúsculos de las características colorimétricas, fotométricas y espectrales de la luz-día, llevado a cabo en esta Memoria de Doctorado (capítulo 6).

Si ampliamos la figura 4.14, como hemos hecho en la figura 4.16, y observamos la evolución de la TCC para elevaciones solares por encima de 10° , apreciamos un resultado novedoso para cielos despejados ya que la TCC disminuye al crecer la elevación solar, alcanzando un mínimo en el intervalo comprendido entre 20° y 35° de elevación solar; en este rango de elevaciones solares la combinación de luz-sol y luz-cielo es tal que, en días con cielos totalmente despejados, el color de la luz-día recibida sobre la superficie terrestre es el *más amarillo* que podemos encontrar en este tipo de días, no existiendo ninguna referencia a este mínimo en la literatura. Este mínimo no puede explicarse atendiendo únicamente a la relación entre los valores globales de la luz-sol y luz-cielo pues el cociente entre ambas magnitudes alcanza su valor máximo para las máximas elevaciones solares. Posteriormente la TCC se incrementa ligeramente con la elevación solar y toma un valor casi constante (~ 5.700 K) a partir de 50° . Si comparamos este último valor de TCC con el que se alcanza en el *mínimo* (elevaciones solares entre 20° y 35°), podríamos pensar que no es significativo, pues la diferencia entre ambos valores es inferior a 200 K. Sin embargo esta pequeña diferencia en TCC se traduce en una distancia Euclídea nada despreciable, en el diagrama cromático CIE-1931, de $\sim 0,007$, que equivale a 6 unidades de MacAdam.

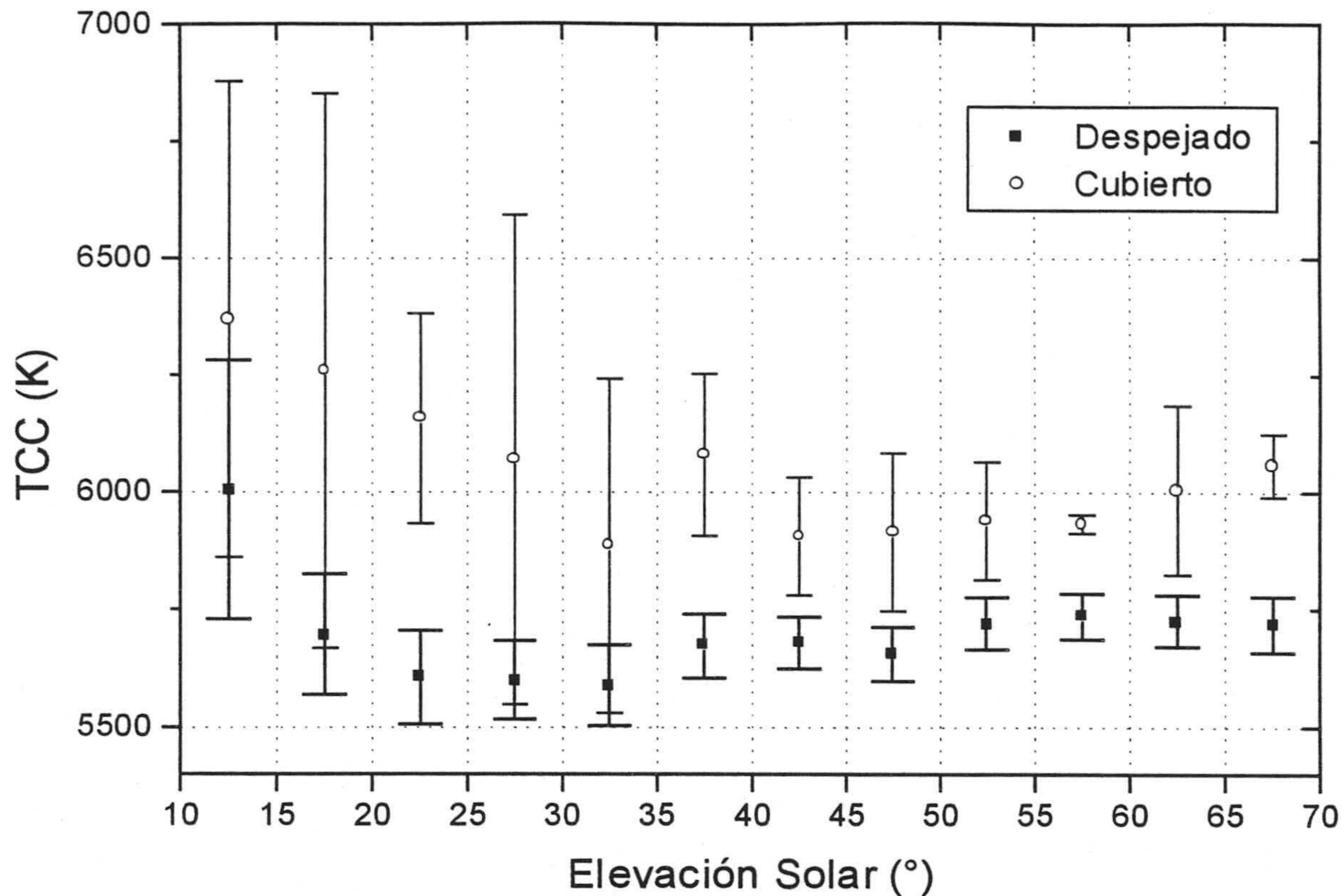


Figura 4. 16.- Ampliación de la figura 4.14 para elevaciones solares por encima de 10°.

El mínimo para cielos cubiertos también se alcanza en el mismo intervalo de elevaciones solares que para cielos despejados aunque la evolución con esta variable no es tan clara, tal y como se refleja en la figura 4.16.

Otro estudio interesante de nuestras medidas consiste en analizar la posible variación de las características colorimétricas de la luz-día a lo largo de un año. El hecho de poseer una campaña de medidas cuya duración temporal es de dos años completos nos permite dirimir la existencia o no de esta variación, al menos en lo que respecta a la luz-día recibida en Granada. Para ello hemos agrupado nuestro conjunto de 2.600 datos por estaciones del año.

Centrándonos en la distribución de puntos en el diagrama cromático CIE-1931, no se aprecian diferencias, al menos perceptibles de forma visual. Si concretamos nuestro análisis al comportamiento de los *loci*, observamos, figura 4.17, como las diferencias entre los cuatro mostrados, correspondientes cada uno a una estación del año, son insignificantes, salvo para TCC altas. Por encima de 20.000 K los *loci* correspondientes a las estaciones de verano e invierno son los que se sitúan más hacia la región de los verdes, aunque hemos de insistir en que esa diferencia es casi insignificante pues la máxima distancia Euclídea entre estos *loci* es de 0,002, y equivale a dos unidades de MacAdam.

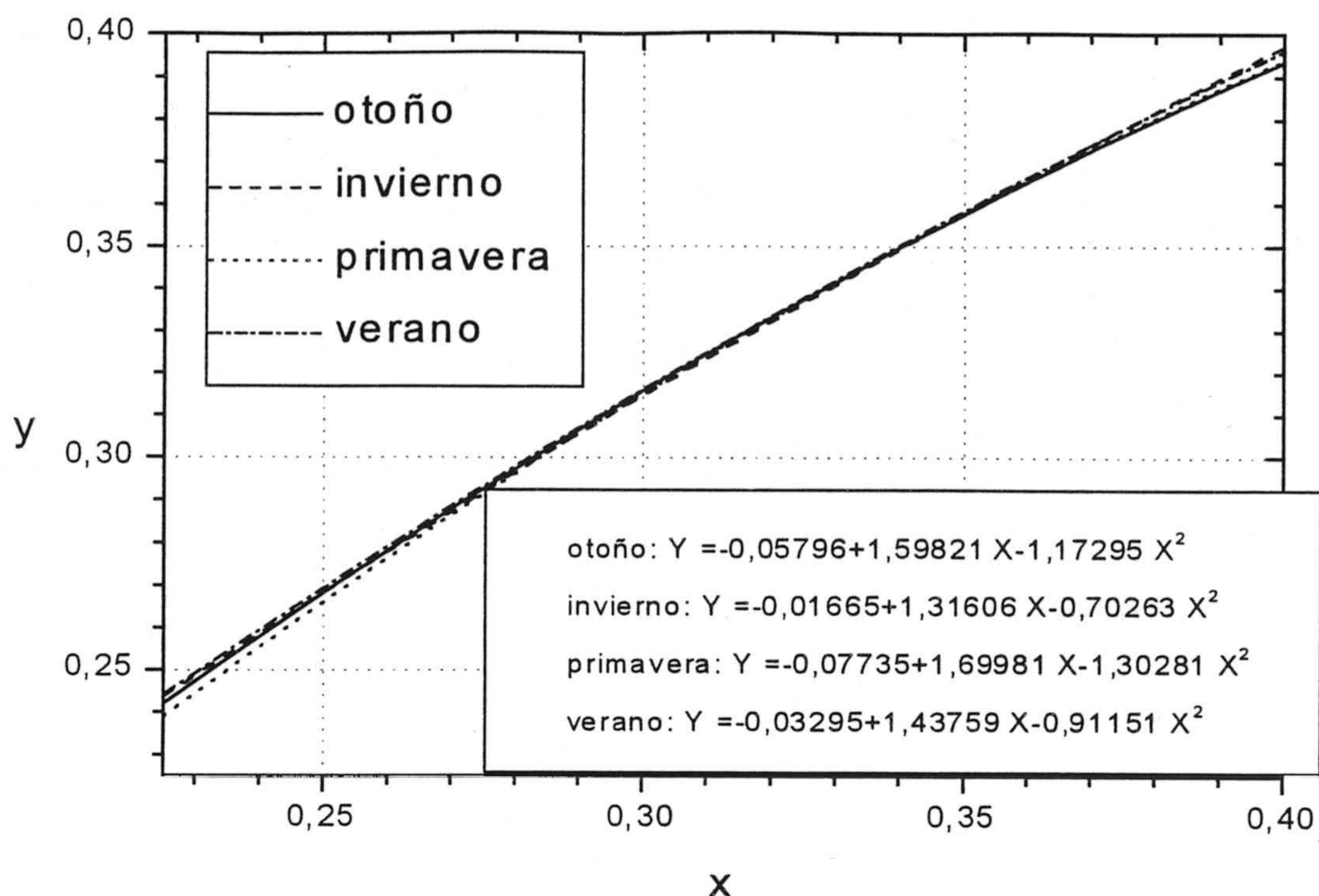


Figura 4. 17.- Representación de los *loci* correspondientes a las cuatro estaciones del año de las 2.600 medidas de luz-día, en el diagrama cromático CIE-1931.

Esta ligera diferencia en la disposición de los *locus* correspondientes a distintas estaciones del año, sólo es evidente para altas TCCs, justamente cuando la contribución a la luz-día de la luz-sol es pequeña, y queda dominada por la luz-cielo. La reflectancia espectral de la superficie terrestre influye en la composición espectral de la luz-día puesto que parte de la luz que incide sobre la superficie se refleja hacia la atmósfera y por esparcimiento puede volver a formar parte de la luz-cielo. Si en los alrededores del lugar de medida dominara la vegetación verde, la luz-cielo tendría una distribución espectral ligeramente superior en los verdes, que podría percibirse en la luz-día cuando la componente que dominase en este tipo de medidas fuese precisamente la luz-cielo, es decir, para bajas elevaciones solares que se corresponden con altas TCCs. Sin embargo el hecho de que nuestro *locus* correspondiente a las medidas realizadas en invierno sea el más cercano se halle hacia la región de los verdes está en desacuerdo con el razonamiento anterior, ya que cabría esperar que fuesen los *locus* de primavera y verano los que se acercasen más hacia los verdes.

Recordemos que el *locus* es la curva (polinomio de grado 2) que mejor ajusta las coordenadas de cromaticidad en el diagrama cromático: como tal es sensible, entre otros factores, al peso que tengan los datos en el ajuste. Por tanto la pequeña diferencia encontrada en la disposición de estos *loci* no garantiza la existencia de variación cromática entre medidas realizadas en distintas estaciones del año.

La extensa duración temporal de nuestra campaña nos ha permitido adquirir una variedad de medidas más amplia que si hubiésemos limitado nuestro estudio a un año; de hecho cuanto más extensa sea la campaña más probabilidad tendremos de obtener una mayor, y más completa, caracterización de todas las condiciones meteorológicas posibles, como así ha ocurrido.

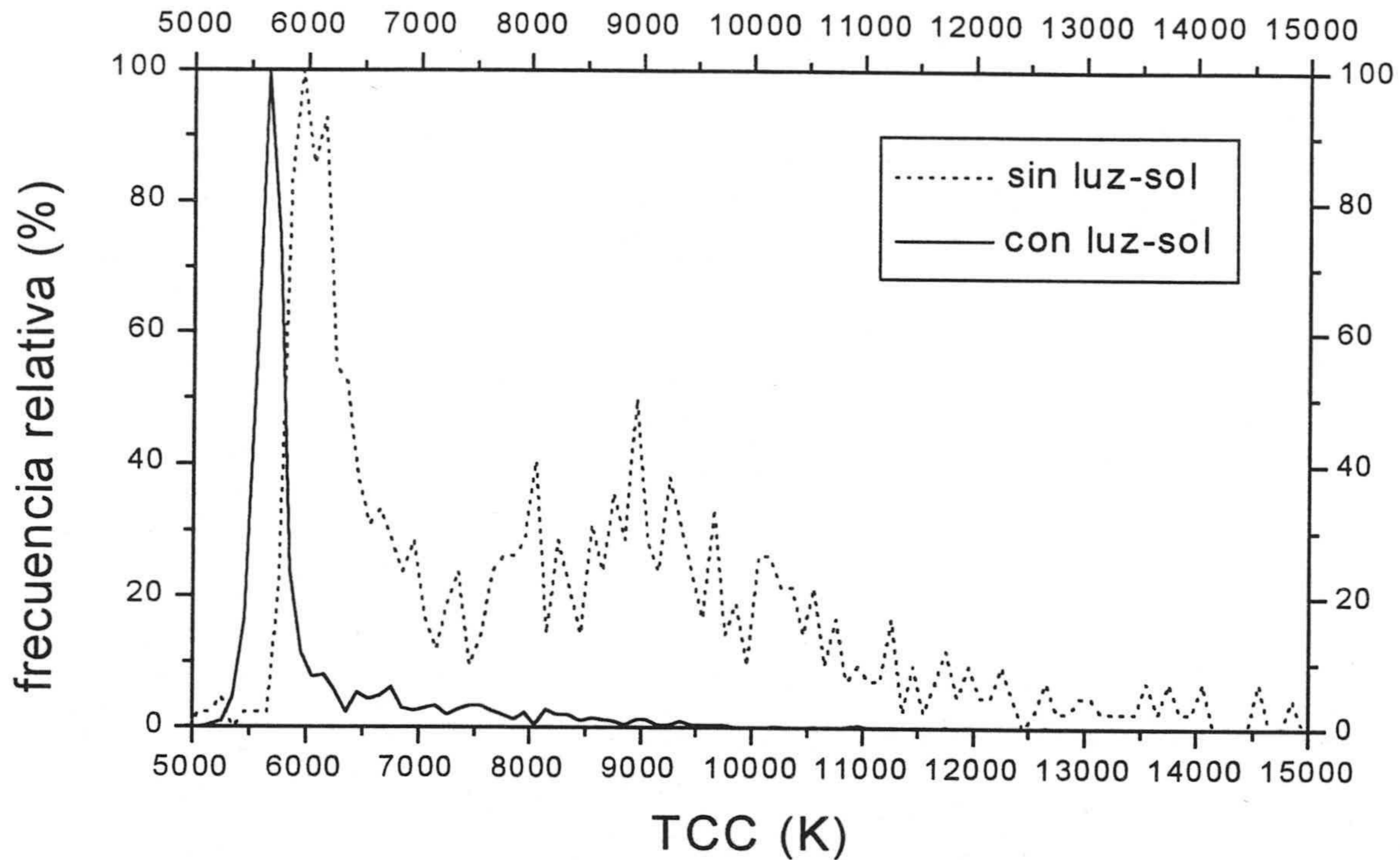


Figura 4. 18.- Histograma de TCC en función de la presencia o no de luz-sol en las 2.600 medidas de luz-día. (Ancho del intervalo: 100 K)

Haber unido a cada distribución espectral la medida de la radiación difusa, global y directa mediante piranómetros nos permite completar el análisis colorimétrico de la luz-día con el estudio de la posible influencia de estas tres cantidades. Si analizamos la influencia de la presencia o no de luz-sol, bien sea debido a que el Sol esté situado por debajo del horizonte geográfico o bien por la presencia de nubes, observamos en primer lugar, figura 4.18, como la TCC posee mayor variabilidad justamente cuando no se recibe luz-sol. El intervalo de TCC más frecuente disminuye casi 400 K con la presencia de luz-sol. Es conveniente analizar esta influencia con la elevación solar; agrupando ésta última en intervalos de 5° , observamos como la presencia de luz-sol disminuye en ~ 550 K la TCC de la luz-día para elevaciones solares entre 10° y 50° , y en ~ 250 K para elevaciones solares superiores a 55° , tal y como se aprecia en la figura 4.19, y no los 2.000 K que describen Henderson y Hodgkiss [1963].

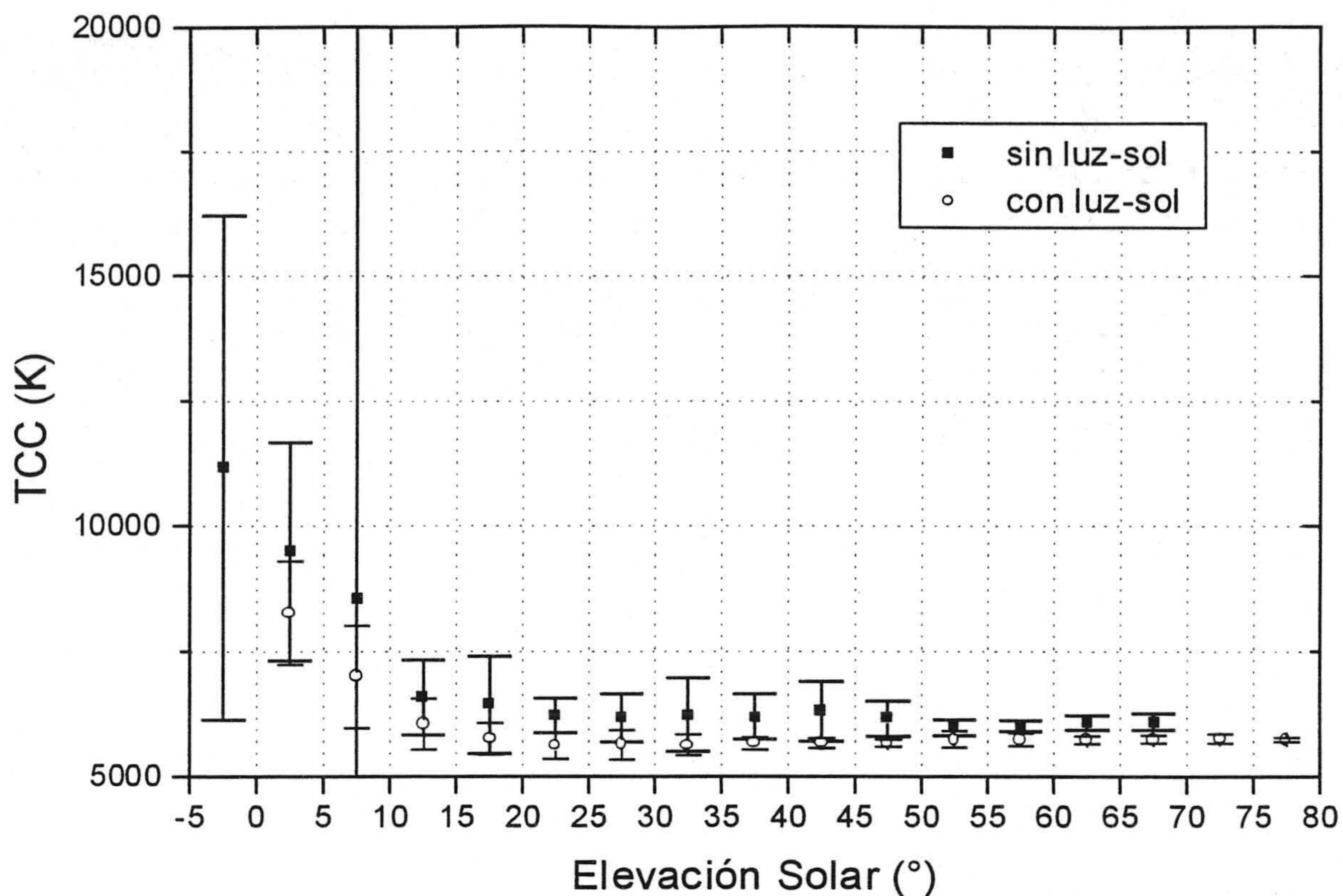


Figura 4. 19.- Evolución de la TCC con la elevación solar y la presencia de luz-sol.

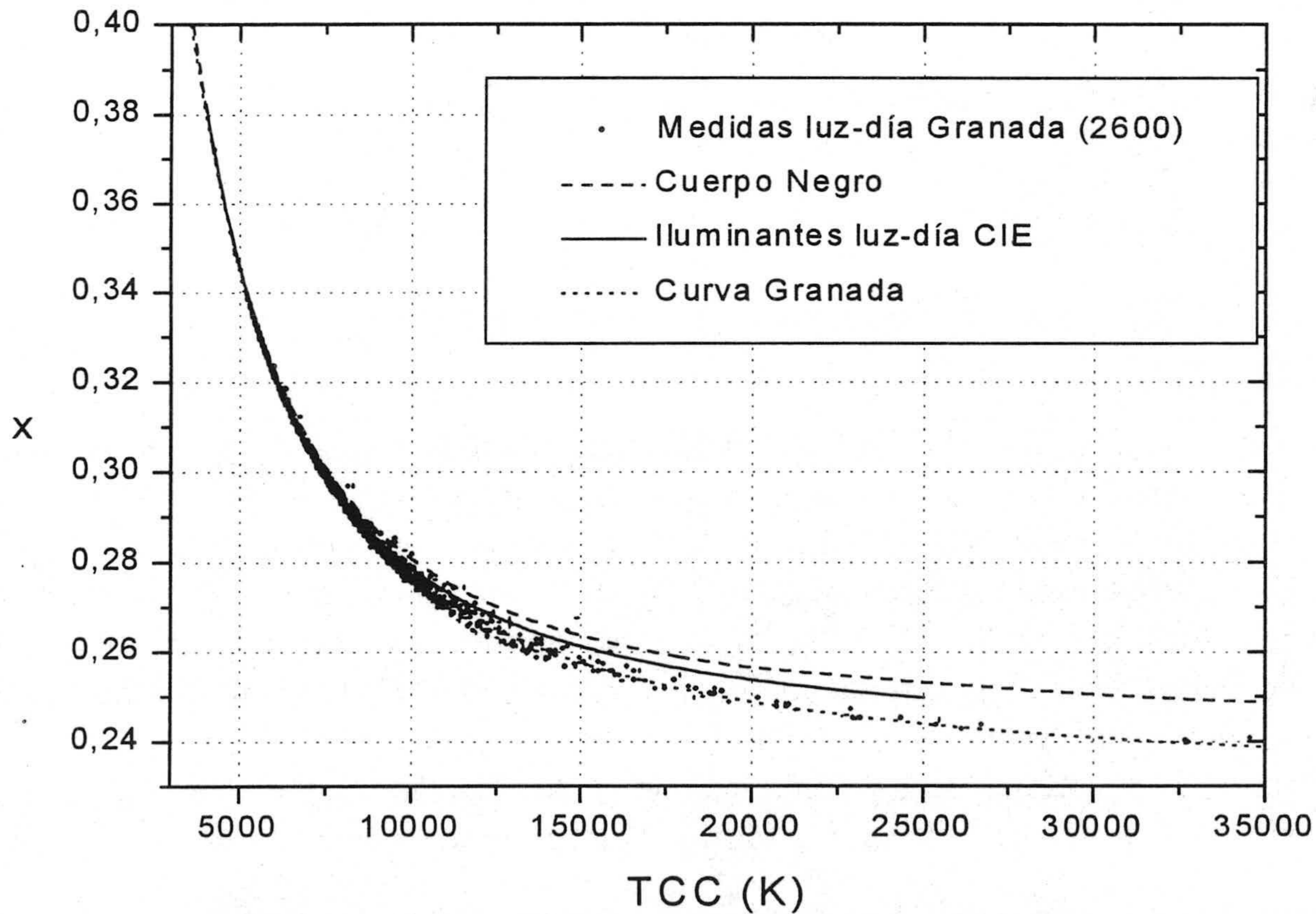


Figura 4. 20.- Relación entre la coordenada de cromaticidad x y la TCC.

Debemos, antes de pasar a describir las características fotométricas de la luz-día, analizar la relación empírica entre la coordenada de cromaticidad x y la TCC, ya que nos hará falta en el último apartado de este capítulo, pues es la base para el método de reconstrucción de curvas espectrales recomendado por la CIE. En la figura 4.20 hemos representado dicha relación para el Cuerpo Negro, para los iluminantes de luz-día de la CIE y la curva que mejor ajusta los datos de Granada, cuya ecuación es:

$$x_G = 0,22779 + \frac{3,32948 \cdot 10^2}{TCC_G} + \frac{1,96441 \cdot 10^6}{TCC_G^2} - \frac{3,45242 \cdot 10^9}{TCC_G^3} \quad (4.2)$$

4.3. Características fotométricas

La magnitud fotométrica asociada con la irradiancia espectral es la iluminancia, y ambas están relacionadas mediante una ecuación en forma integral:

$$E_v = K_m \int_{380}^{780} E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

A pesar de la gran variación espectral entre distintas curvas de luz-día, (ver figura 4.21), existe una relación lineal casi perfecta entre la iluminancia y la irradiancia integrada, en el rango espectral en el que se han obtenido las medidas de luz-día (300-1100 nm), tal y como se observa en la figura 4.22, en donde hemos utilizado la escala logarítmica en ambos ejes. La ecuación empírica para nuestras medidas, que liga ambas magnitudes (la irradiancia expresada en W/m^2 y la iluminancia expresada en luxes), con un coeficiente de correlación de 0,99963, es:

$$E_v = -130,98162 + 138,48198 \cdot \int_{300}^{1100} E_e(\lambda) d\lambda$$

Muchos autores manifiestan, de forma errónea, que la evolución es la responsable de que el sistema visual humano se haya optimizado de tal forma que el máximo en el espectro solar coincide con el máximo de la curva de sensibilidad espectral del ojo humano. Recientemente Lynch y Soffer [1999] han echado por tierra, de forma elegante, esta *creencia*: si la función de distribución de irradiancia espectral promedio recibida en la superficie terrestre se dibuja en función de la longitud de onda, su máximo se localiza en torno a los 500 nm, valor muy cercano al máximo de la función de eficiencia luminosa fotópica (550 nm). Ahora bien, si dicha función de distribución se dibuja en función de la frecuencia su máximo se sitúa en el infrarrojo ($\sim 3 \cdot 10^{14}$ Hz), como se observa en la figura 4.23.

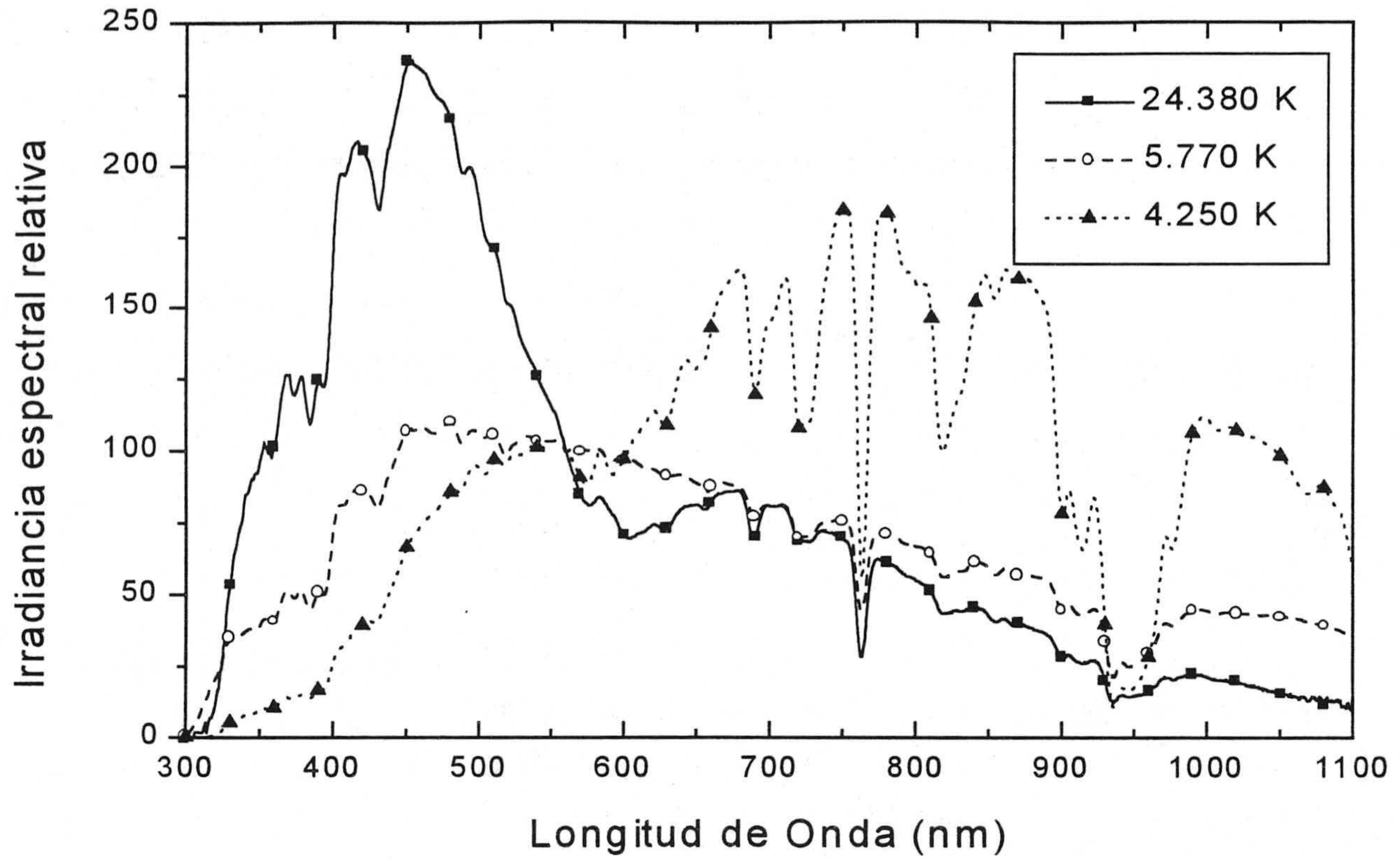


Figura 4. 21.- Ejemplo de tres medidas de luz-día con perfiles espectrales bien distintos.

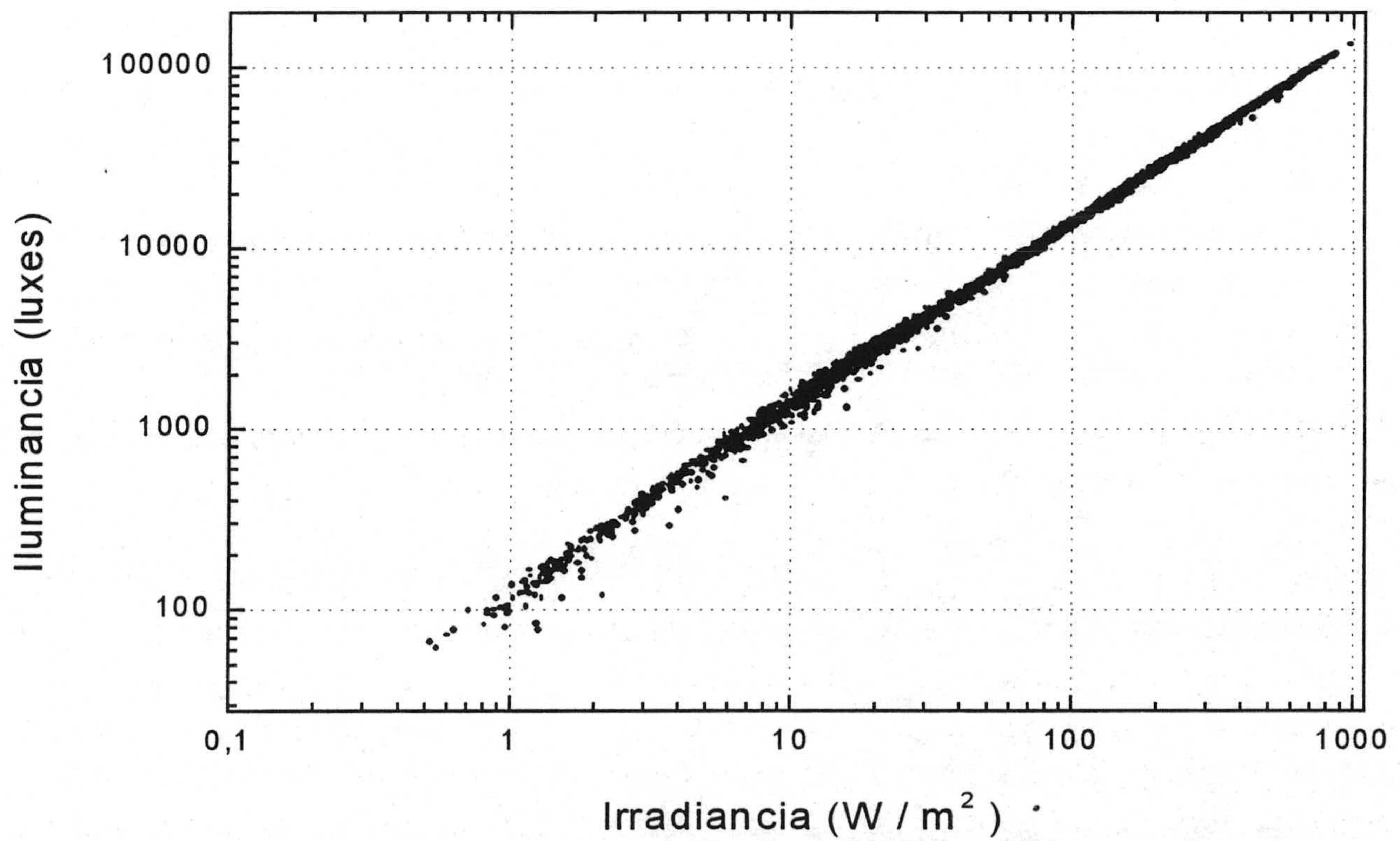


Figura 4. 22.- Relación entre iluminancia e irradiancia (integrada entre 300 y 1100 nm) para las 2.600 medidas espectrales de luz-día.

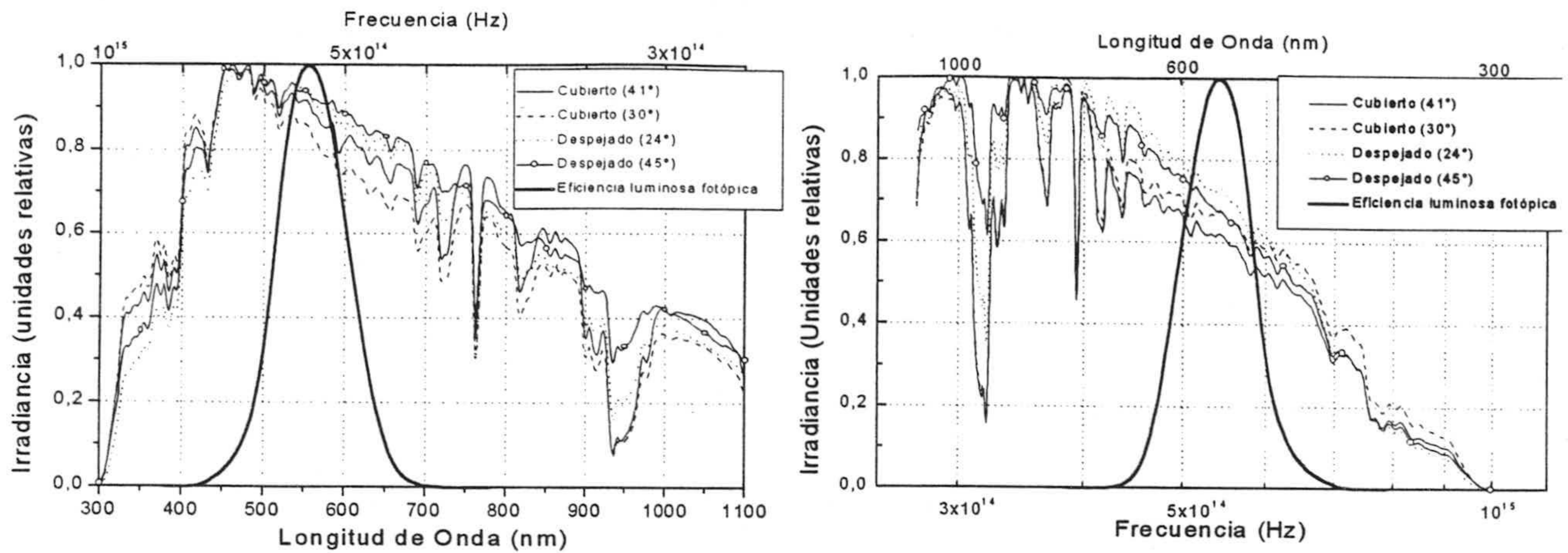


Figura 4. 23.- Representación de 4 medidas de irradiancia espectral y de la curva de eficiencia luminosa fotópica. Izquierda: en función de la longitud de onda. Derecha: en función de la frecuencia.

Esta aparente contradicción está justificada ya que estamos comparando la distribución de irradiancia espectral (potencia por unidad de área y unidad de intervalo de longitud de onda) con la función de eficiencia luminosa (unidades de lumenes/watt para cada longitud de onda). Al cambiar de unidades, en la primera de ellas no basta con sustituir longitudes de onda por frecuencias, pues hay que tener en cuenta el Jacobiano $dv/d\lambda = -c/\lambda^2$ asociado a dicho cambio de unidades. Sin embargo no ocurre lo mismo para la función de la eficiencia luminosa ya que su máximo permanece inalterado ante cualquier cambio de unidades.

Podríamos acudir al consabido recurso de la evolución de la especie humana para justificar la relación lineal entre iluminancia e irradiancia integrada, anteriormente observada: el sistema visual humano ha evolucionado de forma tal que optimiza la respuesta (iluminancia) ante cambios en la irradiancia integrada es completamente lineal a pesar de la variación en el perfil espectral de las curvas de irradiancia espectral recibidas en la superficie terrestre. En la figura 4.24 se aprecia esta relación integrando la irradiancia únicamente en el espectro visible (380-780 nm); en este caso la relación lineal es mucho más evidente en todo el rango de valores abarcado por nuestras medidas y la ecuación (con un coeficiente de correlación de 0,99993) se convierte en:

$$E_v = -232,19679 + 207,30852 \cdot \int_{380}^{780} E_e(\lambda) d\lambda$$

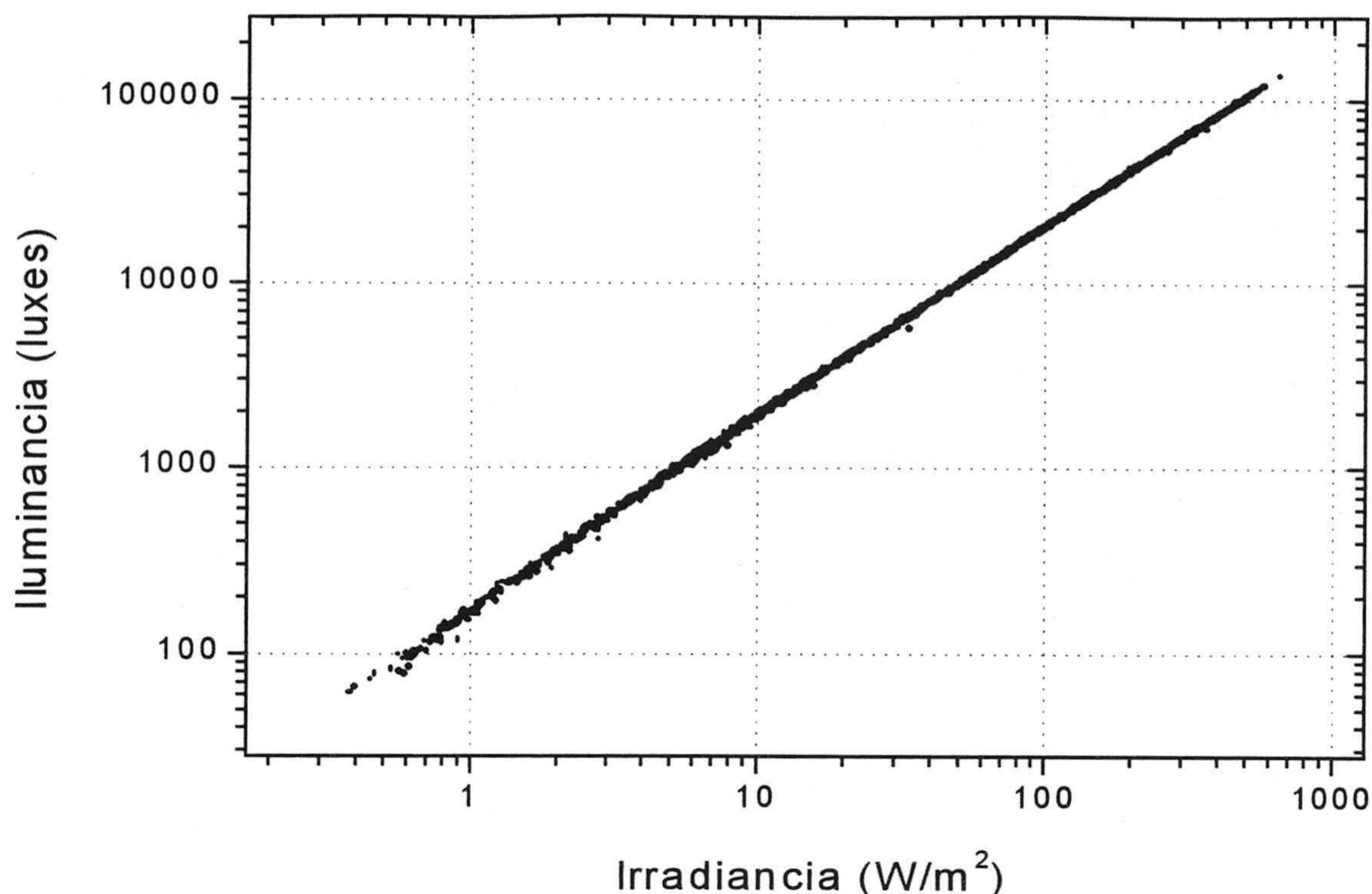


Figura 4. 24.- Relación entre iluminancia e irradiancia (integrada entre 380 y 780 nm) para las 2.600 medidas espectrales de luz-día.

Dado que la mayoría de los procesos que sufre la radiación en la atmósfera son espectralmente selectivos y que en muchas aplicaciones es esencial conocer los datos fotométricos en lugar de los radiométricos (más abundantes y más fáciles de medir) es primordial estudiar la posibilidad de estimar los unos (fotométricos) a partir de los otros (radiométricos). Entra en juego una magnitud que une ambas: la eficacia luminosa. Esta magnitud se define como el cociente entre el valor de la magnitud fotométrica y el valor de su magnitud radiométrica asociada integrada en todo el espectro solar. Sin embargo nosotros hemos restringido, por razones obvias, esta integración al espectro visible (380-780 nm). Así por ejemplo: el cociente entre la iluminancia y la irradiancia integrada de la que se deriva, integrada en el espectro visible, nos da como resultado la eficacia luminosa que se mide en lumen/W.

En el trabajo de Perez *et al.* [1987] se afirma que la relación entre las magnitudes radiométricas y las fotométricas asociadas “*todavía posee preguntas sin respuesta, causando grandes errores potenciales*” cuando se convierten valores numéricos de un tipo a otra.

En todos los trabajos que hemos encontrado en la literatura (entre ellos Perez *et al.* [1987], Olseth y Skartveit [1989], Perez *et al.* [1990], Molineaux *et al.* [1995], Pohlen *et al.* [1996]) en los que se evalúa la eficacia luminosa bajo distintas condiciones atmosféricas con la intención de modelizar su comportamiento, se usan datos empíricos

recogidos mediante sensores integrados, y no mediante espectrorradiómetros. Los sensores utilizados para medir dichas magnitudes fotométricas poseen filtros cuya transmitancia espectral se asemeja a la curva de eficiencia fotópica. Es por tanto muy importante disponer de datos sobre iluminancias o luminancias que se deriven de datos espectrorradiométricos para poder evaluar la dependencia de la eficacia luminosa con distintos parámetros atmosféricos.

Aunque no es uno de los objetivos de esta Memoria de Doctorado hemos querido mostrar el valor de la eficacia luminosa en las medidas de esta campaña, en función de la elevación solar (figura 4.25). Al observar la figura 4.24 cabría pensar que el cociente entre iluminancia e irradiancia (mostrado en la figura 4.25) debería tomar un valor constante. Sin embargo esto no sucede. Representaciones gráficas como la de la figura 4.24 no permiten apreciar las diferencias encontradas en el cociente de las dos magnitudes analizadas.

Se observa que a partir de los 20° la eficacia luminosa toma un valor casi constante, en torno a 208 lumen/W, independientemente de las condiciones atmosféricas. Para elevaciones solares bajas ésta posee una gran variabilidad aunque en términos generales a medida que el Sol se eleva por encima del horizonte, la eficacia luminosa incrementa su valor desde los 140 lumen/W hasta los 200 lumen/W que alcanza para elevaciones solares en torno a 10° .

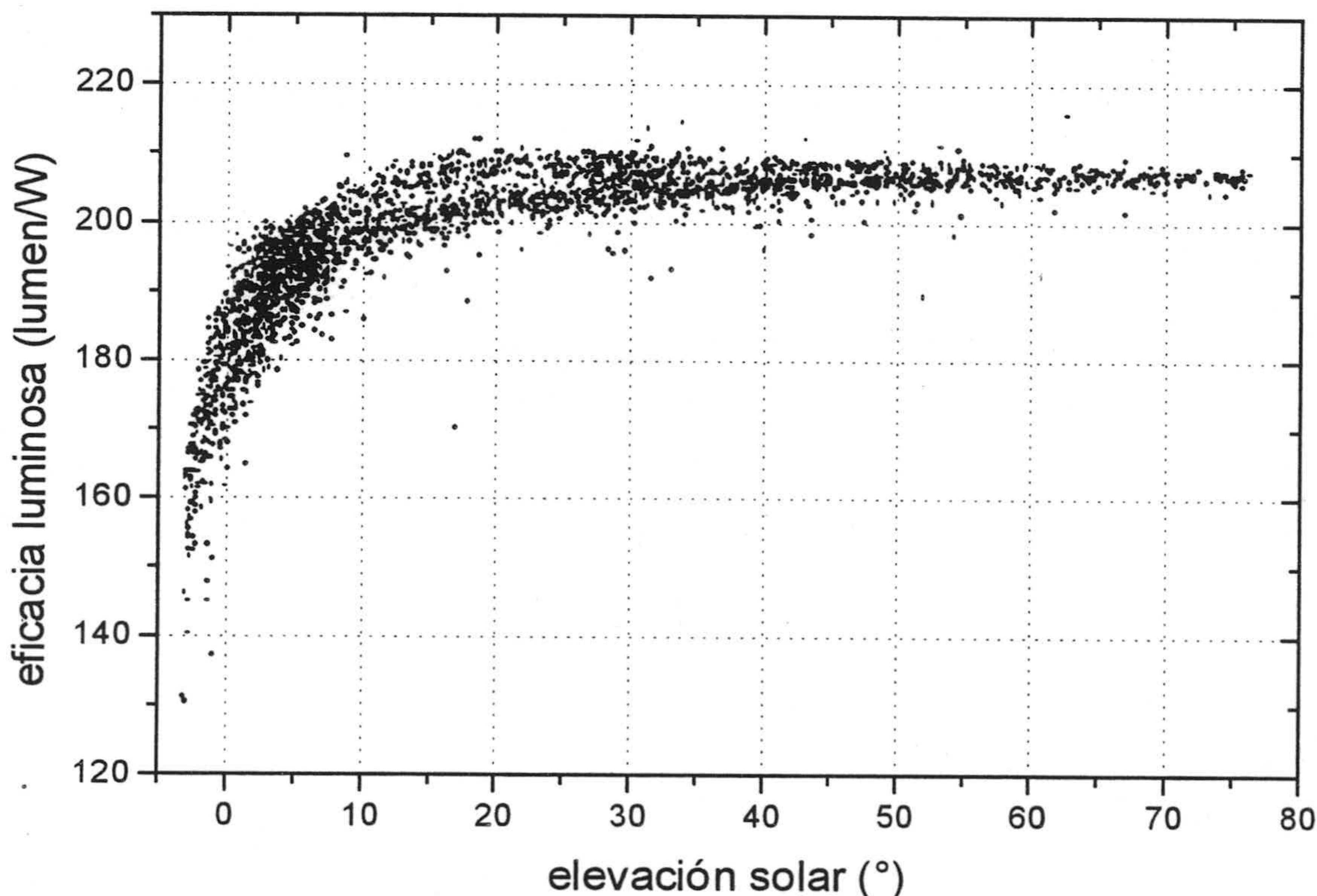


Figura 4. 25.- Eficacia luminosa (cociente entre iluminancia e irradiancia integrada en el rango espectral 380-780 nm) en función de la elevación solar.

4.4. Análisis de vectores propios y análisis de autovectores

Ambos métodos, bastante parecidos entre sí, están basados en la suposición de que todas las curvas que componen el conjunto, sobre el que se va a aplicar estos análisis, pueden ser representadas como combinación lineal de un número finito de curvas fundamentales.

4.4.A.- Análisis de vectores propios

Como resultado de aplicar este método, descrito por Simonds [1963], sobre el conjunto de curvas se obtienen una serie de vectores. El primero de ellos, $S_0(\lambda)$, representa el promedio de todas las curvas, y por eso se le denomina vector promedio. El resto de los vectores, llamados vectores propios, $V(\lambda)$, se ordenan en orden decreciente de su autovalor. De esta forma nos aseguramos que el primer vector propio representa la mayor cantidad de variabilidad en el conjunto de curvas, el segundo representa la segunda mayor cantidad de variabilidad, y así sucesivamente. Cuando los vectores propios se multiplican por un escalar y se le suman al vector promedio, se puede reconstruir una curva cuya similitud con la original dependerá del número de vectores usados y la correlación existente en el conjunto de curvas. Estrictamente hablando, si se tienen curvas (vectores) de dimensión N , harán falta N vectores para reconstruir de forma perfecta las curvas.

Cuando reconstruimos una curva del conjunto, su distribución espectral de potencia se calcula:

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + \sum_i M_i V_i(\lambda) \quad (4.3)$$

donde M_i son los escalares que multiplican a los vectores $V_i(\lambda)$. Los valores triestímulo correspondientes a la curva reconstruida se calculan mediante:

$$X_D = \sum S_D(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda$$

y como los escalares M_i son independientes de la longitud de onda, para una curva dada:

$$X_D = X_0 + \sum_i M_i X_i$$

donde X_0 es el valor triestímulo para el vector promedio S_0 , y X_i es el valor triestímulo para el vector propio $V_i(\lambda)$. Como

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

entonces las coordenadas de cromaticidad pueden ser calculadas a partir de X_0 , Y_0 y Z_0 y los valores MX , MY y MZ de cada vector. De aquí se pueden relacionar los valores de M con x , y , X_0 , Y_0 , Z_0 , X_i , Y_i y Z_i .

Solamente si se restringe el número de vectores propios utilizados en la ecuación 4.3 a sólo dos,

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1V_1(\lambda) + M_2V_2(\lambda)$$

se obtiene una relación unívoca entre los dos escalares y las coordenadas de cromaticidad:

$$M_1 = \frac{(X_0Y_2 - X_2Y_0) + (Y_0S_2 - Y_2S_0)x + (X_2S_0 - X_0S_2)y}{(X_2Y_1 - X_1Y_2) + (Y_2S_1 - Y_1S_2)x + (X_1S_2 - X_2S_1)y} \quad (4.4)$$

$$M_2 = \frac{(X_1Y_0 - X_0Y_1) + (Y_1S_0 - Y_0S_1)x + (X_0S_1 - X_1S_0)y}{(X_2Y_1 - X_1Y_2) + (Y_2S_1 - Y_1S_2)x + (X_1S_2 - X_2S_1)y}$$

siendo $S_0 = X_0 + Y_0 + Z_0$ $S_1 = X_1 + Y_1 + Z_1$ $S_2 = X_2 + Y_2 + Z_2$

Para los vectores propuestos por Judd *et al.* [1964] y adoptados por la CIE, se obtienen los valores mostrados en la tabla IV.3.

X_0	102434	Y_0	106769	Z_0	123630
X_1	1866	Y_1	1914	Z_1	34810
X_2	2133	Y_2	762	Z_2	-2355

Tabla IV. 3.- Valores de los coeficientes de las ecuaciones para los datos de Judd *et al.* [1964]

Así, los valores de M_1 y M_2 , para los datos de Judd *et al.*, se obtienen a partir de las coordenadas de cromaticidad mediante:

$$M_1 = \frac{-1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D}$$

$$M_2 = \frac{0,0300 - 31,4424x_D + 30,0717y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D}$$

A menudo es más conveniente utilizar una descripción, con temperaturas de color correlacionadas, de las distribuciones espectrales de luz-día que mediante sus coordenadas de cromaticidad. El Comité de Colorimetría de la CIE-E.1.3.1, propuso que la temperatura de color correlacionada T_C de un iluminante D está relacionada con la coordenada de cromaticidad x (posteriormente la coordenada y se obtiene a partir de la expresión del *locus* de la CIE) de la siguiente forma:

Para TCCs entre 4.000 K y 7.000 K:

$$x_D = -4,6070 \frac{10^9}{T_C^3} + 2,9678 \frac{10^6}{T_C^2} + 0,09911 \frac{10^3}{T_C} + 0,244063$$

Para TCCs entre 7.000 K y 25.000 K:

$$x_D = -2,0064 \frac{10^9}{T_C^3} + 1,9018 \frac{10^6}{T_C^2} + 0,24748 \frac{10^3}{T_C} + 0,237040$$

Estas dos últimas ecuaciones fueron adoptadas por la CIE en Agosto de 1966 (CIE [1968]). Las distribuciones estandarizadas RD, construidas mediante este método de la CIE, son conocidas como D6500 (D_{65}), D5500 (D_{55}), etc, según el valor de la TCC. Aunque se puede calcular la distribución espectral para cualquier TCC, según el método expuesto, la CIE recalca la necesidad de mantener el D_{65} como el estándar principal, siendo el D_{55} y el D_{75} las posibles alternativas si fuesen necesarias.

Una de las ventajas de este sencillo método se fundamenta en el hecho de que nos permite calcular cualquier distribución espectral allí donde no existan datos experimentales.

4.4.B.- Análisis de autovectores

El método analítico usado para obtener los autovectores, descrito en Parkkinen *et al.* [1989], está basado en la transformación de Karhunen-Loève, y ha sido utilizado en trabajos realizados en nuestro departamento (Romero *et al.* [1997], Hernández-Andrés *et al.* [1998], García-Beltrán *et al.* [1998]).

Utilizando este método todos los vectores obtenidos $V_j(\lambda)$ son ortogonales entre sí:

$$\langle V_a | V_b \rangle = 0 = \sum_i V_a(\lambda_i) V_b(\lambda_i) \quad a \neq b$$

Para reconstruir matemáticamente una curva espectral $E_E(\lambda)$ se emplea la expresión:

$$E_R(\lambda) = \sum_{i=1}^p \langle E_E(\lambda) | V_i(\lambda) \rangle V_i(\lambda) \quad (4.5)$$

donde $E_R(\lambda)$ es la curva espectral reconstruida y p es el número de autovectores con el que se desea realizar la reconstrucción.

Se necesitarían N autovectores para conseguir una reconstrucción exacta de una curva original compuesta por N valores espectrales. Pero dado que las curvas espectrales, que forman parte de la base de la cual se van a extraer los autovectores, poseen cierto parecido espectral, podemos restringir el número de autovectores sin pérdida aparente de información. Cuanto mayor sea el parecido espectral entre curvas menor será el número de autovectores necesario para una correcta reconstrucción. Hay que ser conscientes de que el número de autovectores requerido también dependerá de la finalidad de las curvas reconstruidas: es obvio que no se le debe exigir la misma calidad espectral a las reconstrucciones cuando estas van a ser usadas para cálculos colorimétricos o con fines espectrales.

4.5. - Evaluación de la similitud espectral

Para comparar el parecido espectral entre dos curvas utilizaremos un coeficiente, basado en la desigualdad de Schwartz, previamente usado en varios trabajos realizados en nuestro departamento (Romero *et al.* [1997], Hernández-Andrés *et al.* [1998], Pérez-Ocón *et al.* [1999]).

El coeficiente al que nos referimos, y que denotaremos con las iniciales de su acrónimo en inglés, GFC (*goodness-fitting coefficient*) se calcula como:

$$GFC = \frac{\left| \sum_j E_E(\lambda_j) E_R(\lambda_j) \right|}{\left| \sum_j [E_E(\lambda_j)]^2 \right|^{1/2} \left| \sum_j [E_R(\lambda_j)]^2 \right|^{1/2}}$$

El *GFC* es el coeficiente de correlación múltiple *R*, y coincide con la raíz cuadrada del *VAF* (*variance accounted for*) (Montgomery [1991], Draper *et al.* [1981]). El *GFC* toma valores entre 0 y 1, donde 1 indica una reconstrucción exacta.

Dado que la calidad de las reconstrucciones espectrales depende del valor del *GFC* hemos realizado una división en tres categorías distintas. Estas tres divisiones se han formado ateniéndonos al valor que tomaba el *GFC*, mostrados en la tabla IV.4. Así, por ejemplo, cuando el *GFC* de una reconstrucción supere el valor de 0,995 diremos que la calidad de ésta es aceptable. En el capítulo 2 (figura 2.32) incluimos dos ejemplos de reconstrucción con distintos valores del *GFC*.

GFC	Calidad
≥ 0,995	Aceptable
≥ 0,999	Buena
≥ 0,9999	Muy buena o excelente

Tabla IV. 4.- División de calidades en las reconstrucciones espectrales.

4.6.- Vectores propios y autovectores de Granada

Anteriormente hemos detallado dos métodos bastante parecidos que nos permiten sacar partido de la correlación existente en un conjunto de medidas espectrales y poder reconstruir dichas medidas mediante combinación lineal de un número finito de curvas (o vectores) fundamentales. Dado que las sutiles diferencias existentes entre ellos no influirán en los resultados que mostraremos a continuación hemos decidido utilizar únicamente uno de ellos (el que nos proporciona autovectores). Esto autovectores serán utilizados en los

dos métodos de reconstrucción descritos anteriormente (el de la CIE y el que hace uso de la ortogonalidad entre autovectores).

En la *Revisión Bibliográfica* constatamos que los rangos espectrales en los que se habían llevado a cabo medidas espectrales de luz-día y posteriores análisis de vectores propios eran distintos de unos trabajos a otros. Este hecho motivó que nuestro estudio espectral realizado sobre el conjunto de 2600 medidas espectrales obtenidas originalmente en el amplio rango espectral de 300 a 1100 nm se dividiera en 10 rangos espectrales distintos, para analizar la posible influencia del tamaño y de la posición del rango espectral.

Rango espectral	Regiones cubiertas	Número de valores por curva
300-380 nm	UVB y UVA	17
300-400 nm	UVB, UVA y VIS	21
400-700 nm	Visible	61
780-1100 nm	IRA	65
330-700 nm	UVA y Visible	75
380-780 nm	Visible	81
700-1100 nm	Visible e IRA	81
400-830 nm	Visible e IRA	87
330-830 nm	UVA, Visible e IRA	101
300-1100 nm	UVB, UVA, Visible e IRA	161

Tabla IV. 5.- Rangos espectrales analizados en las medidas de luz-día.

La elección de los límites de los diez rangos espectrales, mostrados en la tabla IV.5, no ha sido arbitraria. Algunos de ellos han sido escogidos para poder comparar nuestros resultados con los de los trabajos publicados en la literatura. También hemos creído interesante considerar el espectro visible en sus dos concepciones más habituales: una restringida al rango 400-700 nm, y otra más extensa entre 380 y 780 nm; en otros rangos (300-380 nm y 300-400 nm) hemos querido tener en cuenta únicamente las regiones del espectro que producen efectos fotobiológicos en los seres vivos.

Para obtener los vectores propios correspondientes a las medidas de Granada, y las posteriores reconstrucciones hemos utilizado una resolución espectral de 5 nm distinta a la original de las medidas experimentales de 1 nm. Este cambio está justificado ya que la resolución espectral usual de las curvas de luz-día y de sus vectores propios es precisamente de 5 nm, para usos prácticos. Una resolución más alta, por ejemplo, de 1 nm, nada habitual, supondría quintuplicar la información numérica correspondiente a cada curva. Con la resolución espectral escogida (5 nm) una medida entre 380 y 780 nm estará compuesta por 81 valores.

El perfil espectral de los autovectores correspondientes a nuestro conjunto de 2.600 medidas de luz-día de Granada es el mostrado en la figura 4.26, en el rango espectral de 380 a 780 nm. Podemos apreciar como el segundo autovector (equivalentemente ocurriría con el primer vector propio) se corresponde con una variación amarillo-azul. Aunque varios autores, entre ellos Judd *et al.* [1964], afirman que el perfil espectral de su tercer autovector se corresponde con una variación verde-púrpura, nosotros no la encontramos (este hecho se detallará en el capítulo 7) en esta campaña de medidas. También son patentes las bandas de absorción (debidas fundamentalmente a O₂ y H₂O) en el tercer autovector, mucho más acentuados que en el primer autovector (vector promedio).

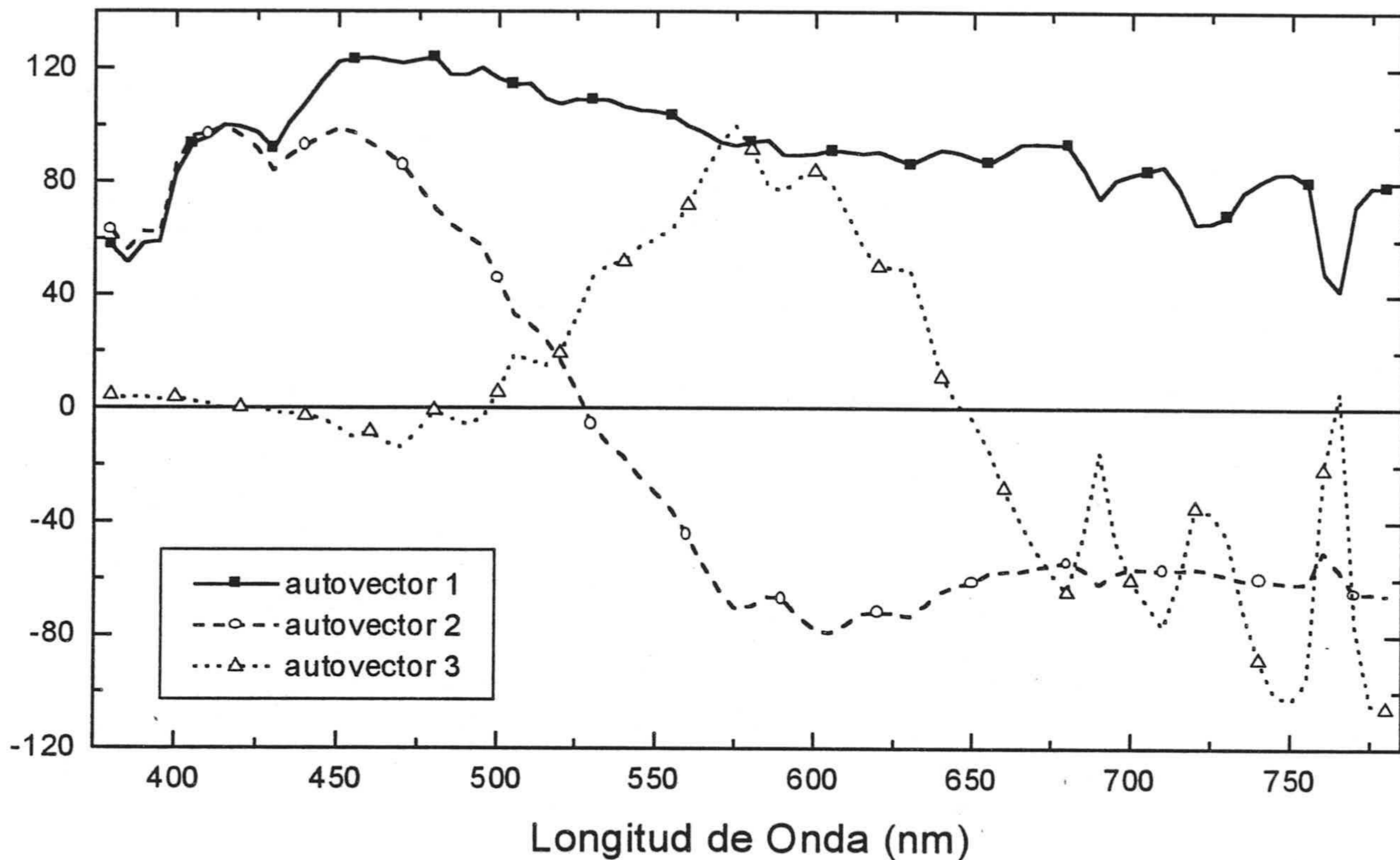


Figura 4. 26.- Perfil espectral de los 3 primeros autovectores obtenidos para el conjunto de 2.600 curvas de luz-día en el rango espectral 380-780 nm, para los datos de Granada.

Como hemos visto en la literatura aludida en el capítulo 2, es usual presentar, como dato revelador de la correlación existente entre curvas espectrales de luz-día, la contribución de los autovalores a la traza de la matriz generada a partir del conjunto de curvas espectrales. Así, por ejemplo, Condit y Grum [1964] afirmaban que sus cinco primeros vectores propios contribuían en un 98,2% al conjunto de medidas de luz-día mientras que la contribución de los 8 primeros vectores propios de Sastri y Das [1968] era únicamente del 94%.

Nosotros hemos realizado este análisis obteniendo los resultados mostrados en la tabla IV.6, en donde hemos incluido en cada rango espectral el número de vectores necesario para que la contribución supere el 99,99%. En contraste con lo publicado por

otros autores, en nuestro conjunto de medidas, con un número pequeño de vectores se consigue una gran contribución. Este hecho está relacionado con la variabilidad espectral obtenida en las medidas y por tanto con la distribución en el diagrama cromático de las coordenadas de cromaticidad asociadas. A medida que la extensión en el diagrama cromático sea mayor es porque la variabilidad espectral es mayor, y por tanto se necesitarán un número mayor de vectores para alcanzar una gran contribución. Recordemos que nuestras medidas presentan poco alejamiento del *locus* que las representa, a pesar de la gran extensión de éste, y de ahí las altas contribuciones encontradas con pocos vectores.

300-380 nm	300-400 nm	400-700 nm	780-1100 nm	330-700 nm
1 - 99,422	1 - 99,589	1 - 98,694	1 - 98,966	1 - 98,614
2 - 99,948	2 - 99,941	2 - 99,850	2 - 99,631	2 - 99,825
3 - 99,977	3 - 99,980	3 - 99,975	3 - 99,955	3 - 99,951
4 - 99,988	4 - 99,992	4 - 99,992	4 - 99,981	4 - 99,990
5 - 99,990			5 - 99,990	
380-780 nm	700-1100 nm	400-830 nm	330-830 nm	300-1100 nm
1 - 98,476	1 - 98,962	1 - 98,388	1 - 98,302	1 - 97,782
2 - 99,720	2 - 99,654	2 - 99,688	2 - 99,672	2 - 99,552
3 - 99,946	3 - 99,932	3 - 99,940	3 - 99,914	3 - 99,811
4 - 99,973	4 - 99,971	4 - 99,972	4 - 99,965	4 - 99,899
5 - 99,991	5 - 99,981	5 - 99,990	5 - 99,987	5 - 99,958
	6 - 99,987		6 - 99,992	6 - 99,980
	7 - 99,993			7 - 99,987
				8 - 99,990

Tabla IV. 6.- Contribución a la traza de los autovalores correspondientes al conjunto de medidas de luz-día de Granada, en 10 rangos espectrales. Nota: el número de cifras significativas elegido es 5, pues utilizando 2 (como Sastri y Das [1968]) perdemos mucha información importante a la hora de analizar estas tablas.

Como se observa en la tabla, en general, cuanto más amplio es el rango espectral considerado el número de vectores requerido es mayor. Sin embargo, como la correlación de las curvas no es similar en todas las regiones espectrales, ese comportamiento no siempre se cumple. Así, para el rango espectral 300-380 nm que engloba a la región UVA y UVB, la correlación es más pobre (quizás debido a la menor precisión que presenta el espectrorradiómetro en esta región) y el número de vectores necesario es mayor que para el rango 400-700 nm, a pesar de que en este último el número de valores por curva es cuatro veces mayor que en el primero. De forma análoga ocurre en la región IRA. De nuevo, todos estos resultados nos confirman que en el espectro visible es donde mayor correlación se observa entre curvas; este resultado podría ser un posible argumento para acudir, de nuevo, a la evolución de la especie humana y por ende a la evolución de su sistema visual para justificar que el rango espectral, en el que es sensible, coincide precisamente con el

rango espectral en el cual la radiación natural recibida sobre la superficie terrestre presenta menor variación espectral (mayor correlación).

En la figura 4.27 se muestra los perfiles espectrales de los 6 primeros autovectores correspondientes al intervalo espectral más amplio (300-1100 nm). Es interesante comparar dichos vectores con los publicados en la literatura y que se corresponden con distintas campañas realizadas en distintos lugares del mundo, aunque son pocos los trabajos que dan información numérica de los vectores (Judd *et al.* [1964], Sastri y Das [1968], Dixon [1978]).

Comparando, en la figura 4.28, el perfil espectral del primer autovector (vector promedio) con los vectores de otros autores (Judd *et al.* [1964] y Sastri y Das [1968]) apreciamos una gran similitud entre el vector de la CIE y el de Granada, particularmente a partir de 500 nm. La diferencia entre estos dos vectores y el de Satri y Das es notable, y de forma muy evidente para longitudes de onda inferiores a 500 nm. Es notorio, asimismo, que el contenido UV es inferior en el vector de Granada aunque debemos recordar que Sastri y Das advierten en su artículo de la poca sensibilidad en el UV de su espectrorradiómetro. La concentración de ozono es la principal responsable del contenido UV en la irradiancia espectral medida, y su concentración varía de forma temporal y de forma local; además los instrumentos de medida poseen poca sensibilidad en esta región. A pesar de que todos estos factores provocan una disminución drástica de la correlación en el UV, es notable la diferencia en los perfiles espectrales de los 3 vectores promedio mostrados en la figura 4.28.

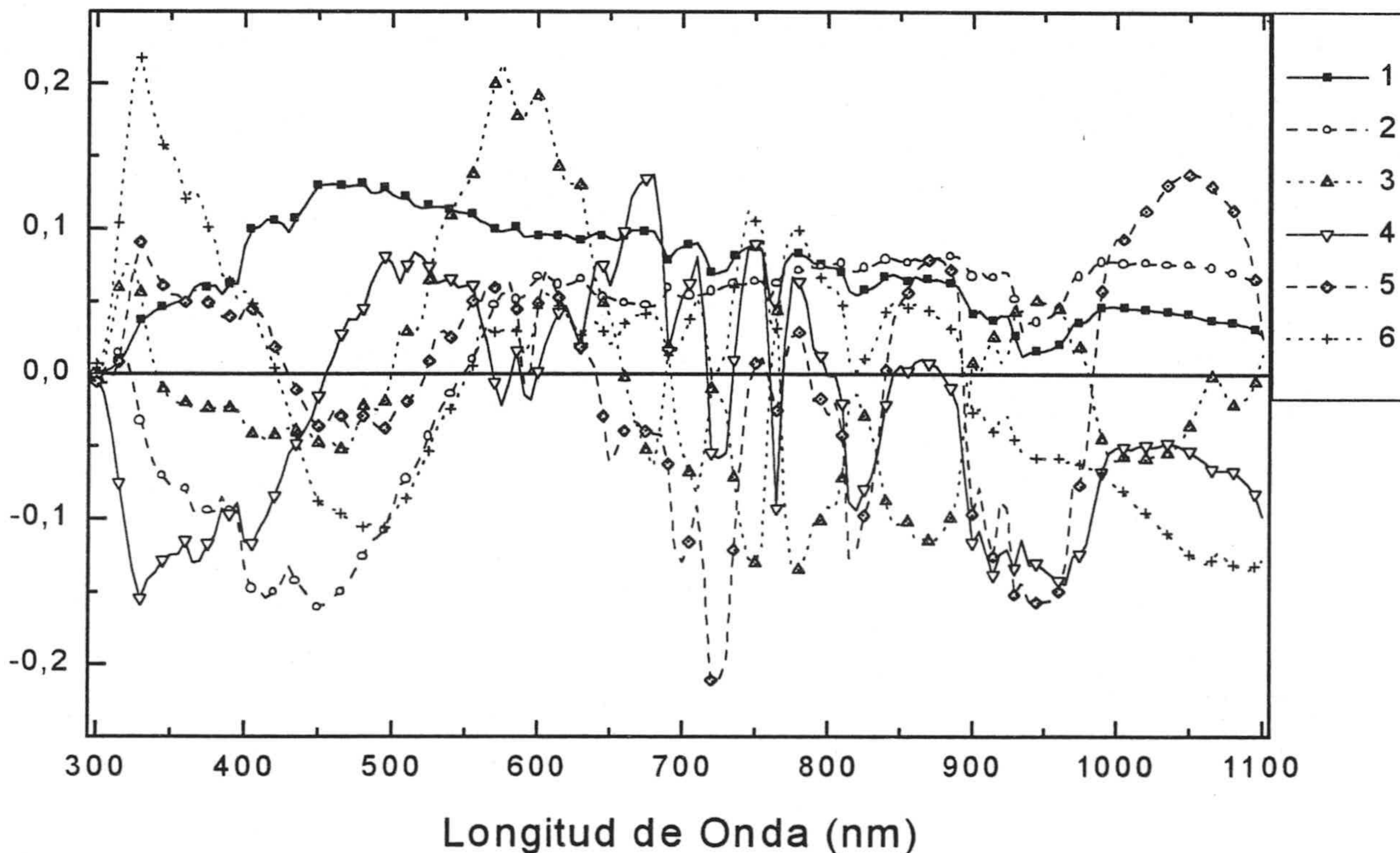


Figura 4. 27.- Seis primeros autovectores en el rango espectral 300-1100 nm.

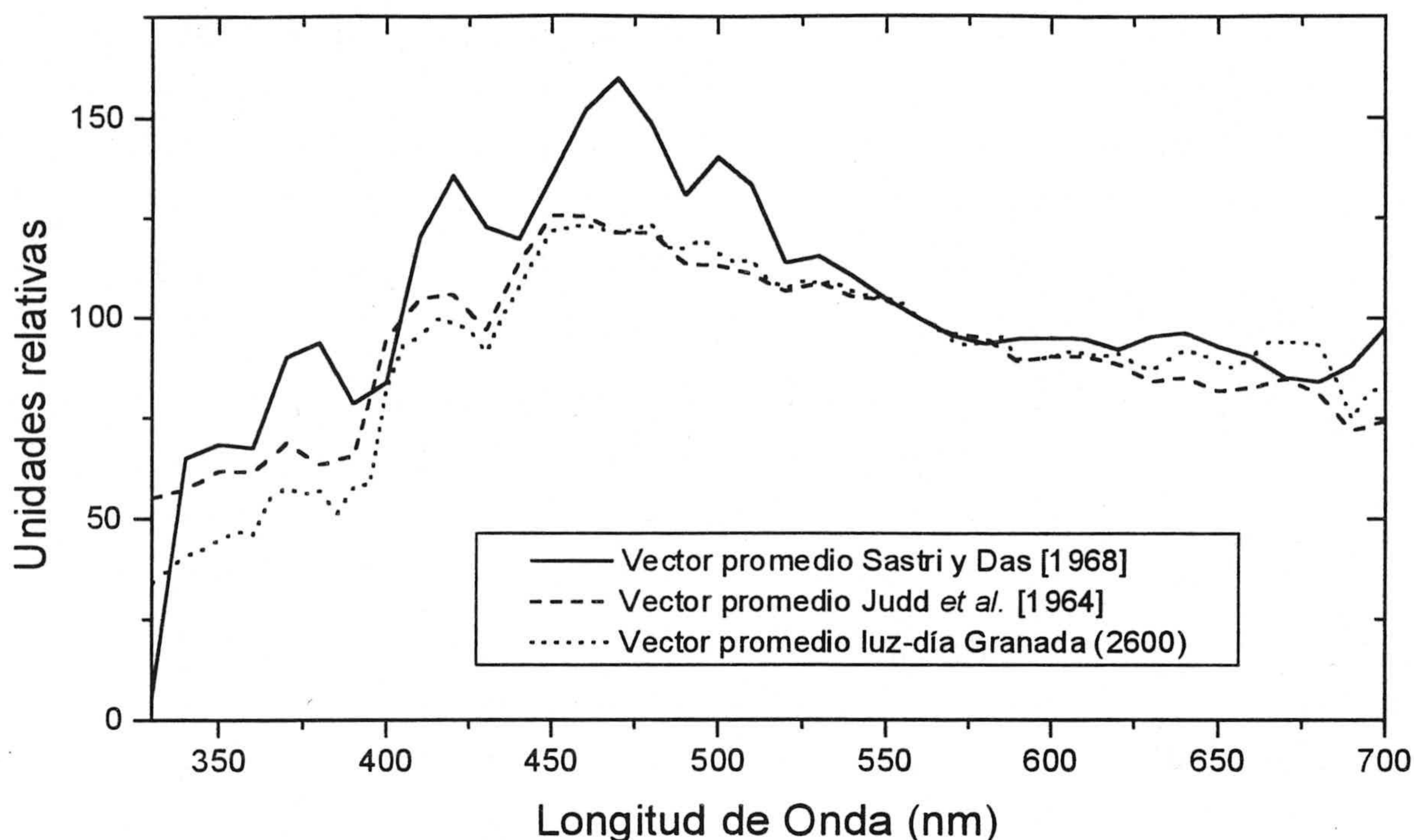


Figura 4. 28.- Comparación de nuestro vector promedio con dos vectores promedio publicados en la literatura en el rango espectral 300-700 nm, y normalizados en 560 nm.

Hemos de ser cautos en estas comparaciones de perfiles espectrales, pues al haber sido normalizados no podemos inferir que la cantidad de UV recibida en Granada sea menor. El tipo de medidas que predomine y las condiciones atmosféricas más frecuentes en el conjunto de medidas del cual se obtienen estos vectores promedio es el factor que influye, de forma determinante, en el perfil espectral de éstos. De hecho, al analizar, en un capítulo posterior, los autovectores correspondientes a las medidas de luz-cielo comprobaremos como el perfil espectral en las longitudes de onda cortas es superior al vector promedio de la CIE, y por tanto también cabría esperar que lo fuese en el UV.

4.7.- Curvas de luz-día estándar

De forma análoga al método adoptado de la CIE para reconstruir curvas espectrales de luz-día, partiendo de su TCC o bien de sus coordenadas de cromaticidad, y utilizando el vector promedio y sólo los dos primeros vectores propios obtenidos para el conjunto de curvas de Granada, se obtienen dos ecuaciones que ligan los escalares que multiplican a ambos vectores propios y las coordenadas de cromaticidad de la curva a reconstruir.

La primera ecuación que vamos a usar en la reconstrucción de curvas es una de las expuestas previamente (4.2), que relaciona la TCC, expresada en K, con la coordenada de cromaticidad x para los datos de Granada:

$$x_G = 0,22779 + \frac{3,32948 \cdot 10^2}{TCC_G} + \frac{1,96441 \cdot 10^6}{TCC_G^2} - \frac{3,45242 \cdot 10^9}{TCC_G^3}$$

A continuación utilizaremos la ecuación del *locus* de Granada (ecuación 4.1):

$$y_G = -0,05188 + 1,55320x_G - 1,09234x_G^2$$

Para calcular las expresiones que ligan los dos escalares M_1 y M_2 con las coordenadas de cromaticidad de la curva a reconstruir usaremos la ecuación 4.4 sustituyendo los valores triestímulo de los vectores obtenidos con los datos de Granada.

Por ejemplo, usando nuestros vectores propios en el rango espectral 380-780 nm, los valores triestímulo son:

X_0	2,39985	Y_0	2,50870	Z_0	2,82181
X_1	-1,33282	Y_1	-1,14816	Z_1	3,08461
X_2	2,30326	Y_2	2,49661	Z_2	-0,19107

Dando lugar a las siguientes ecuaciones, válidas únicamente para reconstrucciones de curvas de luz-día en el rango espectral de 380-780 nm:

$$M_1 = \frac{0,21326 - 7,73754x + 6,74464y}{0,68301 + 6,79867x - 7,53303y}$$

$$M_2 = \frac{-0,58824 - 10,39001x + 11,75181y}{0,68301 + 6,79867x - 7,53303y}$$

En el caso de querer cambiar el rango espectral de las curvas reconstruidas, y dado que los vectores propios cambian de perfil espectral dependiendo de cual sea el rango espectral sobre el que han sido calculados, tendremos que recalcular las expresiones de las ecuaciones anteriormente obtenidas.

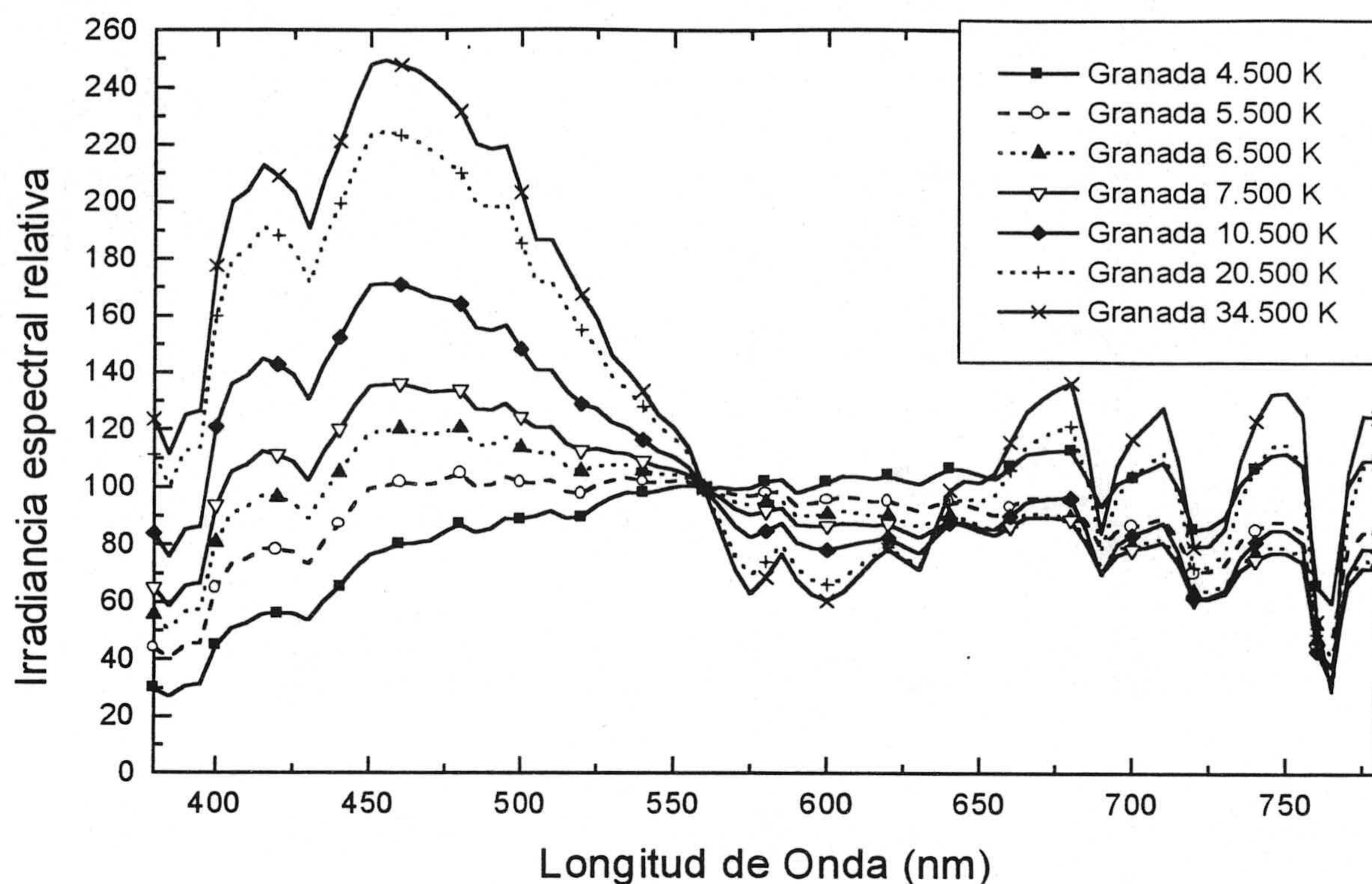


Figura 4. 29.- Reconstrucción, mediante el método de la CIE, de siete curvas con diferentes TCC, con los vectores de Granada, en el rango espectral 380-780 nm, todas ellas normalizadas en 560 nm.

Este método permite reconstruir curvas espectrales de luz-día con cualquier temperatura de color, suponiendo que para una TCC dada, las coordenadas de cromaticidad están determinadas de forma unívoca. Nosotros las utilizaremos para generar curvas espectrales estándar de Granada y compararlas espectralmente con las adoptadas por la CIE y las publicadas por otros autores. Así en la figura 4.29 se muestra la reconstrucción para siete curvas con TCC de 4.500, 5.500, 6.500 y 7.500, 10.500, 20.500 y 34.500 K, respectivamente, en el rango espectral 380-780 nm. Por debajo de 560 nm (valor elegido para normalizarlas) al aumentar la TCC aumenta los valores de las curvas. Sin embargo, aunque para longitudes de onda por encima de 560 nm la tendencia es a disminuir los valores a medida que la TCC aumenta, para las tres últimas (10.500, 20.500 y 34.500 K) el comportamiento no es similar, ya que sus perfiles espectrales se corresponden únicamente con luz-cielo, sin la presencia de la luz-sol.

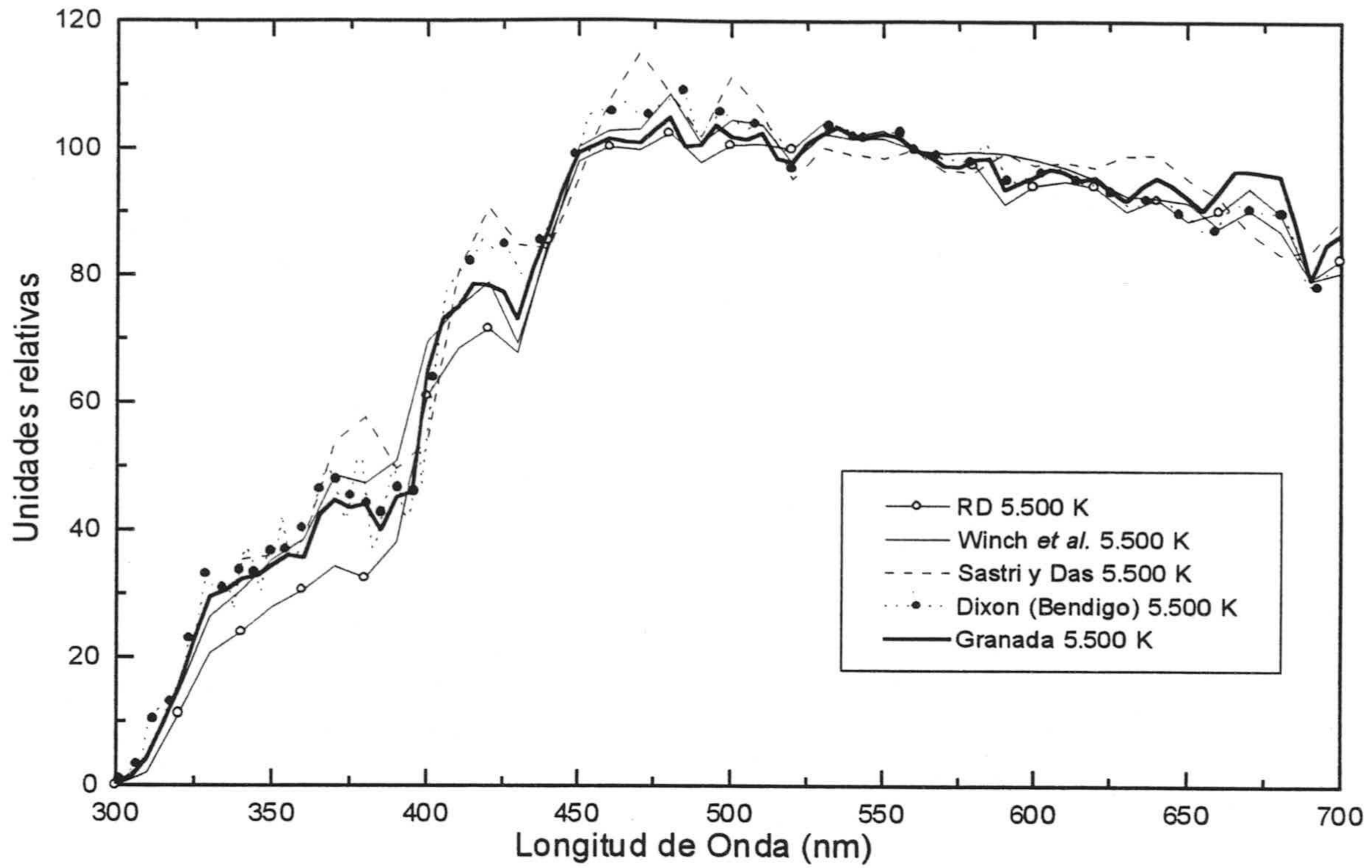


Figura 4. 30.- Comparación de varias distribuciones con la misma TCC (5.500 K).

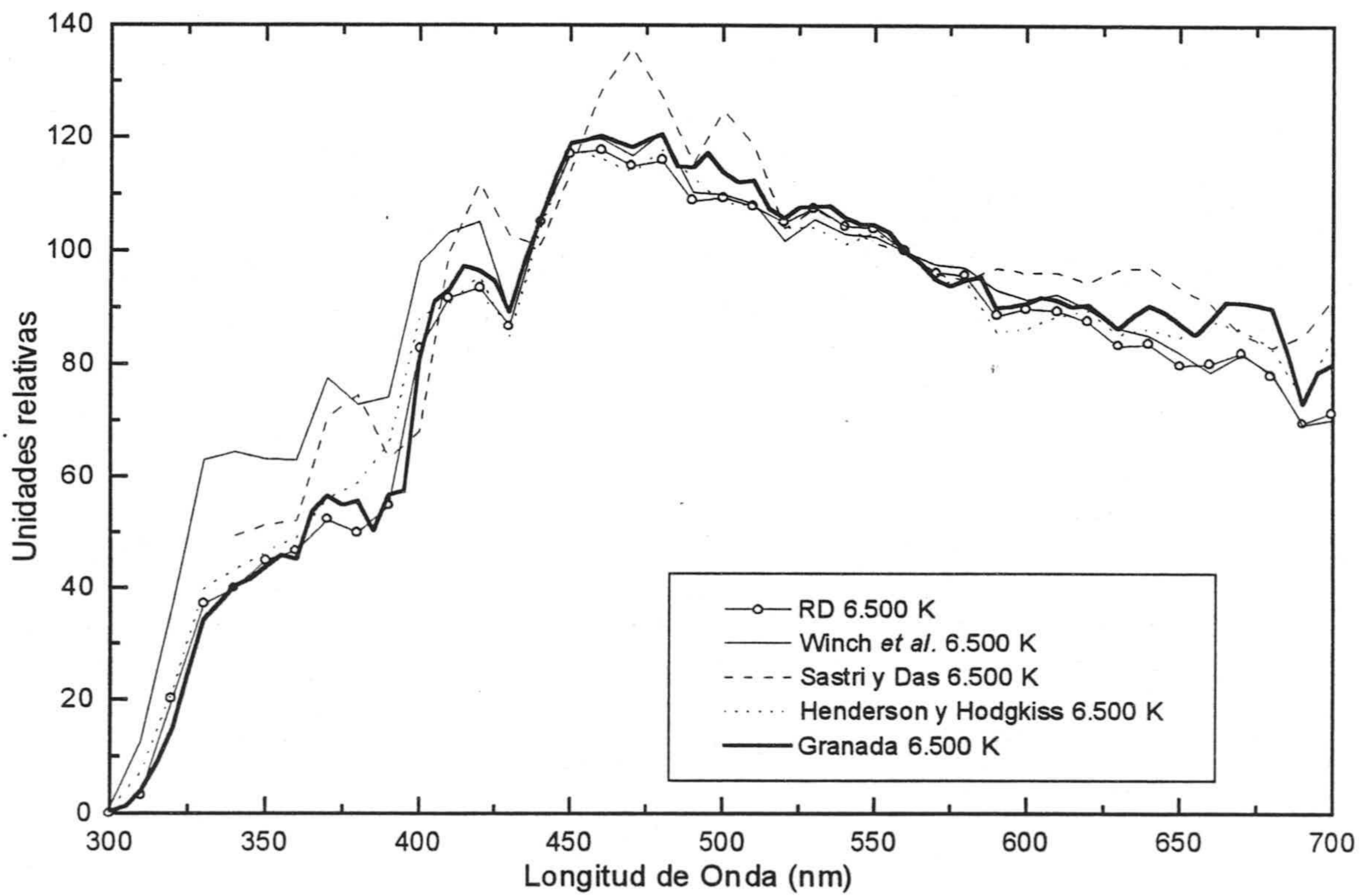


Figura 4. 31.- Comparación de varias distribuciones con la misma TCC (6.500 K).

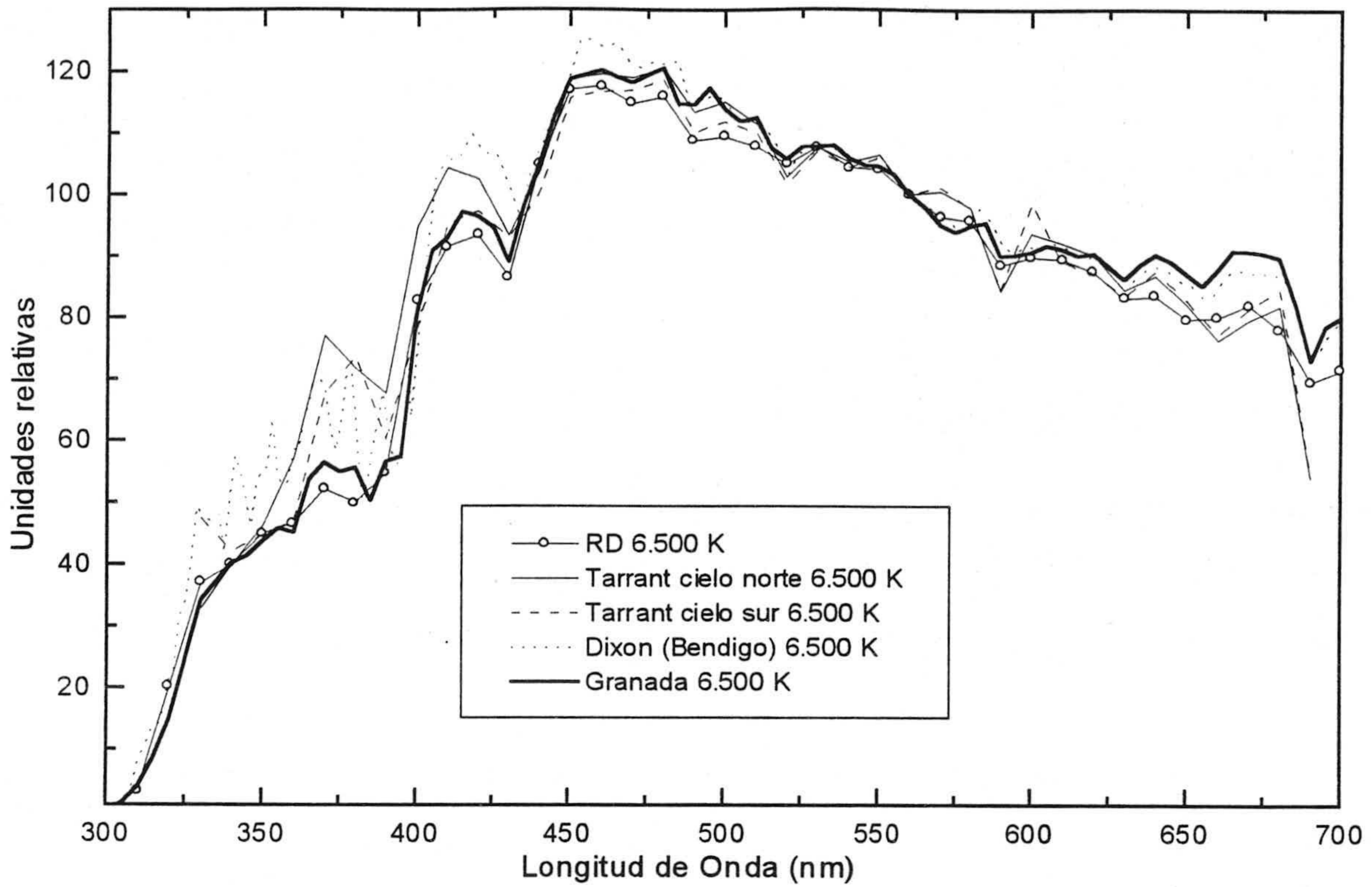


Figura 4. 32.- Comparación de varias distribuciones con la misma TCC (6.500 K).

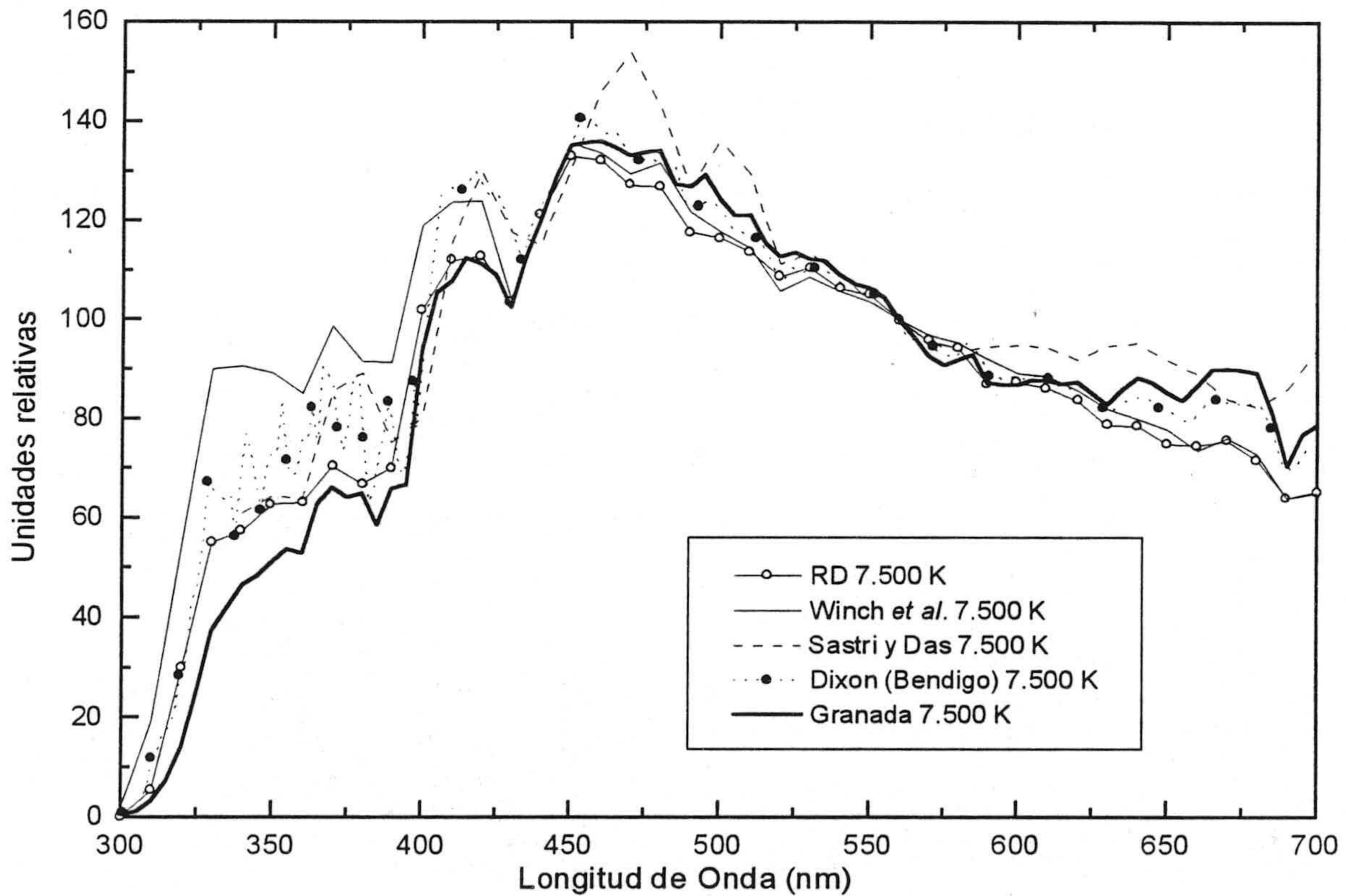


Figura 4. 33.- Comparación de varias distribuciones con la misma TCC (7.500 K).

En las figuras 4.30-4.33 hemos comparado gráficamente los perfiles espectrales de las distribuciones para las TCC más comúnmente encontradas en la literatura (y

recomendadas por la CIE): 5.500, 6.500 y 7.500 K, generadas utilizando el método de reconstrucción anteriormente descrito. La diferencia entre estas curvas es más acentuada a medida que aumenta la TCC, observándose que el mayor parecido existente se produce entre las curvas de Granada y las de la CIE (RD).

4.8.- Calidad de las reconstrucciones

Utilizando el método de la CIE para reconstruir nuestras 2.600 curvas espectrales de luz-día, y usando los autovectores calculados a partir de dicho conjunto de medidas en el rango espectral 380-780 nm, con un intervalo espectral de 5 nm, el GFC medio obtenido es de 0,99543. La limitación del método de la CIE estriba precisamente en el número de autovectores utilizado (sólo 3): puede que este reducido número de vectores no recojan toda la variabilidad existente en los perfiles espectrales de todas las medidas. De hecho sólo un 33% de las reconstrucciones poseen la calidad de buenas (ver tabla IV.4) y únicamente un 4,6% la calidad de muy buenas o excelentes. Si el número de vectores utilizado en la reconstrucción de curvas espectrales no se restringe a sólo 3, como ocurre con el método propuesto por la CIE, y las reconstrucciones se realiza mediante la ecuación 4.4, la calidad de éstas debe ser superior.

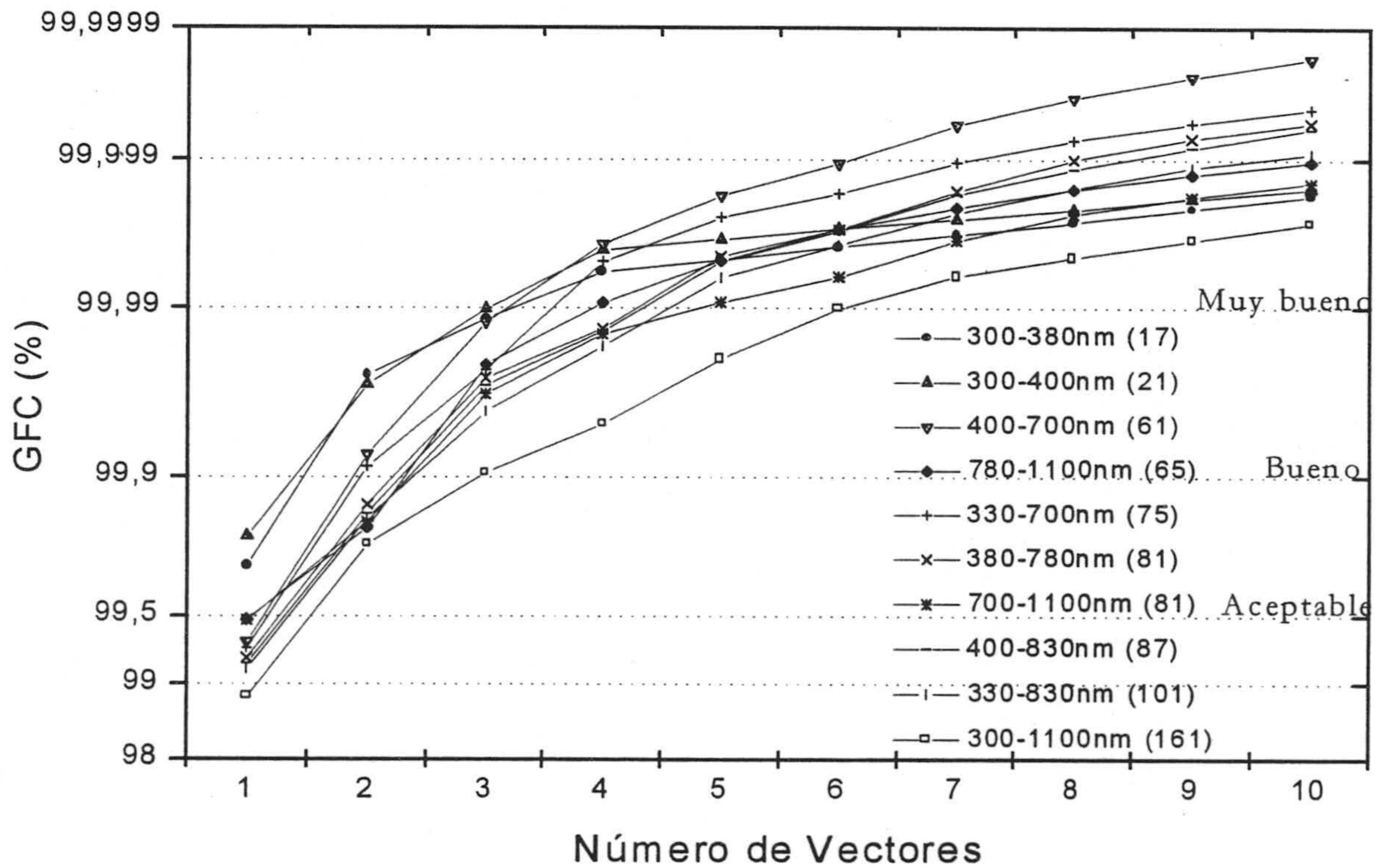


Figura 4. 34.- GFC promedio, utilizando en la reconstrucción un número de autovectores entre 1 y 10, obtenidos en distintos rangos espectrales, para las 2600 medidas de luz-día. Entre paréntesis se presenta el número de valores por curva.

Utilizando este último método de reconstrucción, que hace uso de la propiedad de ortogonalidad entre autovectores, hemos reconstruido las 2.600 curvas espectrales en los 10 rangos espectrales descritos en la tabla IV.5, con un número de autovectores entre 1 y 10, obteniendo los GFC promedio mostrados en la figura 4.34. Como era previsible la calidad media en las reconstrucciones aumenta a medida que incrementamos el número de vectores utilizados.

Rango espectral	Número de autovectores utilizados							
	1	2	3	4	5	6	7	8
300-380 (17)	81,5	99,7	99,9	100				
	25,3	95,9	98,0	98,5	98,7	98,8	99,3	99,4
	0	37,4	78,6	93,4	93,6	94,5	94,9	95,3
300-400 (21)	94,8	99,7	100					
	33,2	94,6	98,3	98,9	99,2	99,4	99,5	99,7
	0,3	36,5	79,2	94,6	94,9	95,2	95,7	95,8
400-700 (61)	67,3	97,1	100					
	12,3	86,1	99,1	100				
	0,5	17,5	65,6	94,1	99,0	99,3	99,5	99,7
780-1100 (65)	65,2	90,0	99,8	100				
	16,8	54,6	98,0	99,3	99,5	99,8	99,8	99,8
	0,3	8,4	43,0	80,5	93,0	95,3	97,2	97,4
330-700 (75)	63,2	96,6	99,7	100				
	9,8	81,6	96,9	99,9	100			
	0,3	10,7	46,9	90,7	97,2	98,4	98,9	99,2
380-780 (81)	64,0	95,2	99,8	100				
	9,1	78,0	97,4	99,5	99,9	100		
	0,1	3,8	29,3	61,5	91,5	97,2	99,1	99,4
700-1100 (81)	70,0	92,4	99,8	99,9	99,9	100		
	15,2	51,5	95,7	98,7	99,5	99,6	99,7	99,7
	0	2,6	22,3	57,8	75,3	85,6	94,8	99,6
400-830 (87)	63,5	94,8	99,8	99,9	100			
	8,0	75,2	96,8	99,2	99,8	100		
	0	2,9	27,5	63,2	90,5	95,7	99,0	99,4
330-830 (101)	59,8	94,4	99,5	100				
	6,6	69,8	92,8	98,9	99,7	100		
	0	2,2	19,2	50,4	86,7	94,5	97,9	98,7
300-1100 (161)	48,0	92,5	98,3	99,5	99,9	100		
	2,9	37,9	70,7	88,5	97,1	99,6	99,8	99,8
	0	0,3	4,5	17,5	48,7	70,7	88,0	92,3

Tabla IV. 7.- Porcentaje de reconstrucciones que superan los 3 valores de GFC elegidos en la tabla IV.4, en diez rangos espectrales, con distinto número de vectores (1 a 8). Entre paréntesis se incluye el número de valores por curva.

La tendencia a aumentar el valor del GFC promedio al incrementar el número de vectores involucrados en la reconstrucción no se mantiene para ciertos rangos espectrales. Así, aunque con un solo vector el GFC promedio en el rango 300-400 nm es el mayor, a partir de 4 vectores apenas aumenta su valor. El rango espectral en el que se alcanzan mejores calidades de reconstrucción resulta ser el 400-700 nm, siempre y cuando el número de vectores sea superior a 4. Por regla general a medida que el número de valores por curva crece disminuye la calidad de las reconstrucciones, aunque no siempre ocurre así; por ejemplo con 5 vectores el GFC promedio en el rango 400-700 nm (61 valores por curva) es superior al obtenido en el rango 300-400 nm (21 valores por curva). Este resultado nos vuelve a confirmar la existencia de mayor variabilidad (menor correlación) cuando incluimos en nuestro análisis la región UV. De forma análoga ocurre al incluir el IR.

Para que la calidad promedio en los diez rangos espectrales considerados sea “buena” el número de vectores utilizados debe ser de al menos 3, y para que sea “excelente” hacen falta más de 6 vectores. Sin embargo no podemos decidir el número de vectores requeridos en base únicamente al GFC promedio; es necesario complementar dicho resultado con el análisis del número de reconstrucciones cuyo GFC supera los tres valores de GFC elegidos en la tabla IV.4 en cada uno de los rangos espectrales y con un número variable de vectores utilizados, tal y como se muestra en la tabla IV.7.

Rango espectral	Calidad de las reconstrucciones		
	Aceptable	Buena	Excelente
300-380 (17)	2	2	8
300-400 (21)	2	3	6
400-700 (61)	2	3	5
780-1100 (65)	3	3	6
330-700 (75)	2	3	5
380-780 (81)	2	3	6
700-1100 (81)	3	3	8
400-830 (87)	3	3	6
330-830 (101)	3	4	7
300-1100 (161)	3	5	10

Tabla IV. 8.- Número de vectores requerido para que más del 95% de las reconstrucciones superen los tres valores de GFC (0,995, 0,999 y 0,9999). Entre paréntesis se incluye el número de valores por curva.

El número de vectores necesario para que más de un 95% de las reconstrucciones superen la calidad “buena” varía desde 2 en el rango espectral más pequeño (300-380 nm), hasta 5 en el rango más amplio (300-1100 nm). Un análisis análogo se presenta en la tabla IV.8 para todos los rangos espectrales, en donde se presenta el número de vectores

requerido para que más del 95% de las reconstrucciones superen los tres valores de GFC (0,995, 0,999 y 0,9999).

Observamos claramente como el número de vectores necesario se incrementa, por regla general, a medida que aumenta el tamaño del rango espectral considerado. Únicamente cuando nos encontramos con un rango espectral en donde la correlación es muy alta esta tendencia no se satisface. De nuevo estos resultados nos permiten afirmar que en la región visible es donde las distribuciones espectrales de irradiancia global sobre una superficie horizontal presentan una correlación superior.

En el caso de estar únicamente interesados en las reconstrucciones espectrales en el rango visible el número de vectores requeridos se sitúa entre 3 y 6. Este resultado difiere de las recomendaciones de la CIE en las cuales sólo se usan 3 vectores. Si nuestro interés está en la calidad de las reconstrucciones desde un punto de vista espectral el número de vectores ha de incrementarse hasta al menos 5, en el rango visible. Si añadimos la región UV o la IR, se hacen necesarios al menos 7 vectores, (resultado que concuerda con lo expuesto por Slater y Healey [1998]); y si se incluyen ambas a la vez (rango espectral 300-1100 nm) el número de vectores requerido crece hasta 9 o 10. Ésta sería la dimensión adecuada, de una base de vectores, para poder reconstruir las curvas espectrales en ese amplio rango espectral.

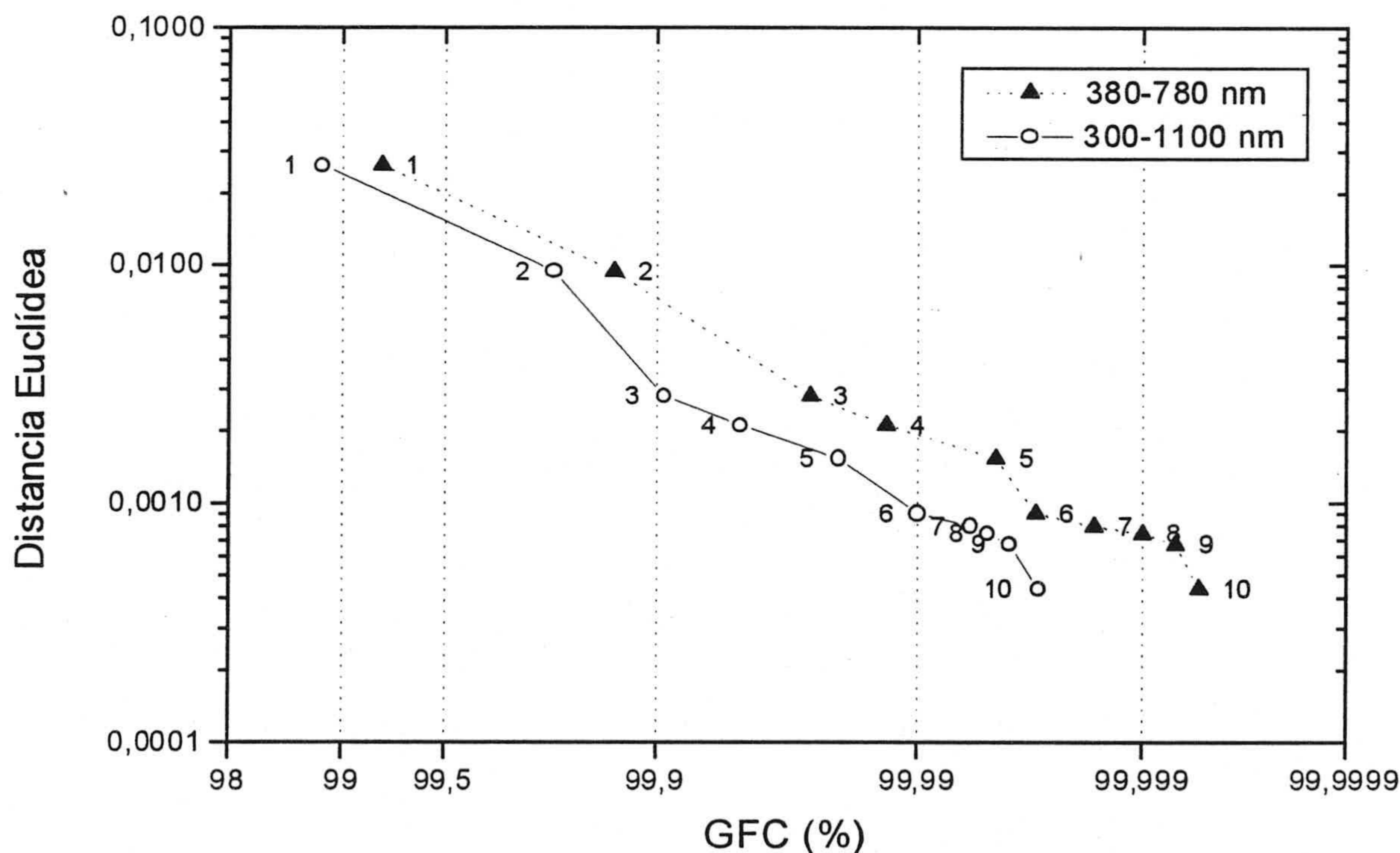


Figura 4. 35.- Distancia Euclídea promedio entre coordenadas de cromaticidad en función del GFC promedio, en los rangos espectrales 380-780 nm y 300-1100 nm, para un número de autovectores usado entre 1 y 10.

Es conveniente no pasar por alto que aunque estemos interesados en la calidad de las reconstrucciones desde un punto de vista únicamente espectral, a medida que el

parecido espectral entre curvas sea mayor la semejanza colorimétrica entre la curva original y la reconstruida aumentará. Sin embargo la relación entre la calidad espectral y la calidad colorimétrica no es una relación sencilla. Como ejemplo mostramos en la figura 4.35 la evolución de la distancia Euclídea promedio entre coordenadas de cromaticidad (de la curva original y la reconstruida) y el GFC promedio obtenido en las 2.600 reconstrucciones realizadas en dos rangos espectrales distintos (380-780 nm y 300-1100 nm) para un número de vectores utilizados entre 1 y 10.

Como las coordenadas de cromaticidad se evalúan en el intervalo espectral correspondiente a la región visible (380-780 nm) en ambos rangos espectrales las distancias Euclídeas son similares aunque no lo son los GFC. A medida que se incrementa el número de vectores utilizados las distancias colorimétricas se reducen de forma drástica, sobre todo con los tres primeros vectores. Posteriormente (para un número de vectores superior a 5) la distancia colorimétrica continua reduciéndose pero levemente.

4.9. Contenido de UV

Comparando el contenido de UV de nuestras medidas, y su posible correlación con la TCC, ver figura 4.36, observamos como, en primer lugar, no existe correlación completa entre la TCC y el dicho cociente (UV/visible). Para una TCC dada, el radiador del Cuerpo Negro posee mayor cociente que las curvas experimentales de luz-día. Este resultado ya fue encontrado por Henderson y Hodgkiss [1963] (figura 2.7) y por Dixon [1978] (figura 2.28). Asimismo, nuestras medidas poseen menor cociente UV/visible que las medidas de Winch *et al.* [1966] y las de Henderson y Hodgkiss [1963], sobre todo el rango de TCCs. El mismo comportamiento ocurre entre las medidas de Granada y las de Judd *et al.* [1964] (figura 2.28), poseyendo estas últimas mayor cociente UV/visible sólo para altas TCCs (expresadas en K); para bajas TCCs ambos conjuntos de medidas poseen, aproximadamente, el mismo valor del cociente.

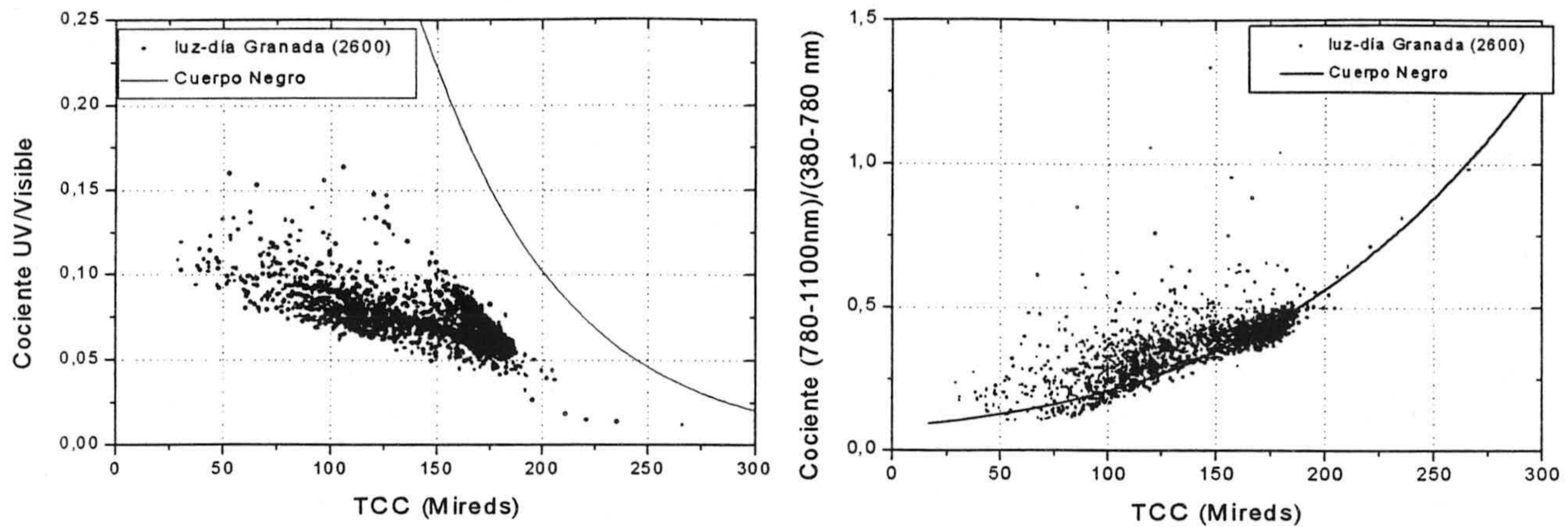


Figura 4. 36.- Izquierda: Cociente entre la radiación UV (300-380 nm) y la radiación visible (380-780 nm). Derecha: Cociente entre la radiación IR (780-1100 nm) y la radiación visible (380-780 nm).

Hemos de recordar que, según Sastri y Manamohanan [1971], el contenido UV obtenido por Winch *et al.* [1966] y Tarrant [1968] es mucho mayor que el de Judd *et al.* [1964] y Sastri y Das [1968], afirmando que la discordancia entre curvas de distintos autores en el UV, excepto a los resultados distintos achacables a la altura del lugar, deben estar debidos a la limitación de sensibilidad y precisión de los aparatos utilizados en la adquisición de las medidas espectrales en dicha región del espectro electromagnético, o posiblemente a la variación de la actividad solar, o posibles variaciones latitudinales en el contenido de ozono.

De forma análoga, y dado que nuestras medidas espectrales se extendían hasta los 1100 nm, podemos estudiar el cociente entre la irradiancia espectral en el intervalo IR (780-1100 nm) y en el intervalo visible (380-780 nm) en función de la TCC, como hacemos en la figura 4.36, observando que este cociente presenta mayor correlación con la TCC que el cociente UV, asemejándose en dependencia al Cuerpo Negro.

Tal y como hicimos al comparar los perfiles espectrales de nuestros autovectores con los de otros autores el hecho de que los cocientes mostrados en la figura 4.36 sean mayores o menores que los presentados en otros trabajos no indica que la cantidad absoluta de UV (o IR) recibida en Granada sea mayor o menor que en otros lugares. Estos cocientes únicamente nos dan información del contenido relativo en las curvas, y este contenido depende enormemente del tipo de medida realizada (luz-día, luz-cielo, etc.) y de las condiciones atmosféricas predominantes. Dado que en todas nuestras medidas incluyen la luz-sol (cuando está presente), el contenido relativo de UV debe ser inferior a trabajos en los que medían luz-cielo. Análogamente, el contenido relativo en el IR debe ser mayor por la presencia de la luz-sol.

Asimismo hemos comprobado que para las medidas de Granada dichos cocientes analizados no presentan dependencia con la estación del año. Este resultado no coincide

con el obtenido por Winch *et al.* [1996] y Dixon [1978] puesto que estos autores encontraron mayores cocientes en verano que en invierno. A pesar de que en estos dos trabajos se menciona este último resultado, en ninguno de ellos se proporciona información cuantitativa (gráfica o numérica), ni de la forma de comparar entre estaciones.

Nuestras medidas no son aptas para observar la variación a lo largo del año del contenido de ozono en la atmósfera y por tanto de la radiación UV recibida en la superficie terrestre. La incertidumbre, que posee nuestro espectrorradiómetro en esta región espectral, en la obtención de valores absolutos impide que podamos concluir en este punto.

En la figura 4.37, donde se muestra la dependencia de los cocientes UV/Vis e IR/Vis con la elevación solar, se pone de manifiesto que existe mayor correlación para el segundo cociente. La mayor variación en el valor de ambos cocientes se obtiene para bajas elevaciones solares para las cuales la presencia o no del Sol es la que modifica sustancialmente el valor de los cocientes. Debido a que el Sol varía en la posición por la que sale o se pone, y nuestro horizonte geográfico, descrito en el capítulo 3, no es uniforme, se aprecia una distribución no homogénea de datos para elevaciones solares por debajo de 10°.

La presencia del Sol en el horizonte produce un decrecimiento en el cociente UV/Vis y un crecimiento en el IR/Vis. A medida que la elevación solar aumenta, el primer cociente va incrementando su valor de forma paulatina. Sin embargo, el cociente IR/Vis no aumenta con la elevación solar sino que alcanza un valor estable en torno a 0,4.

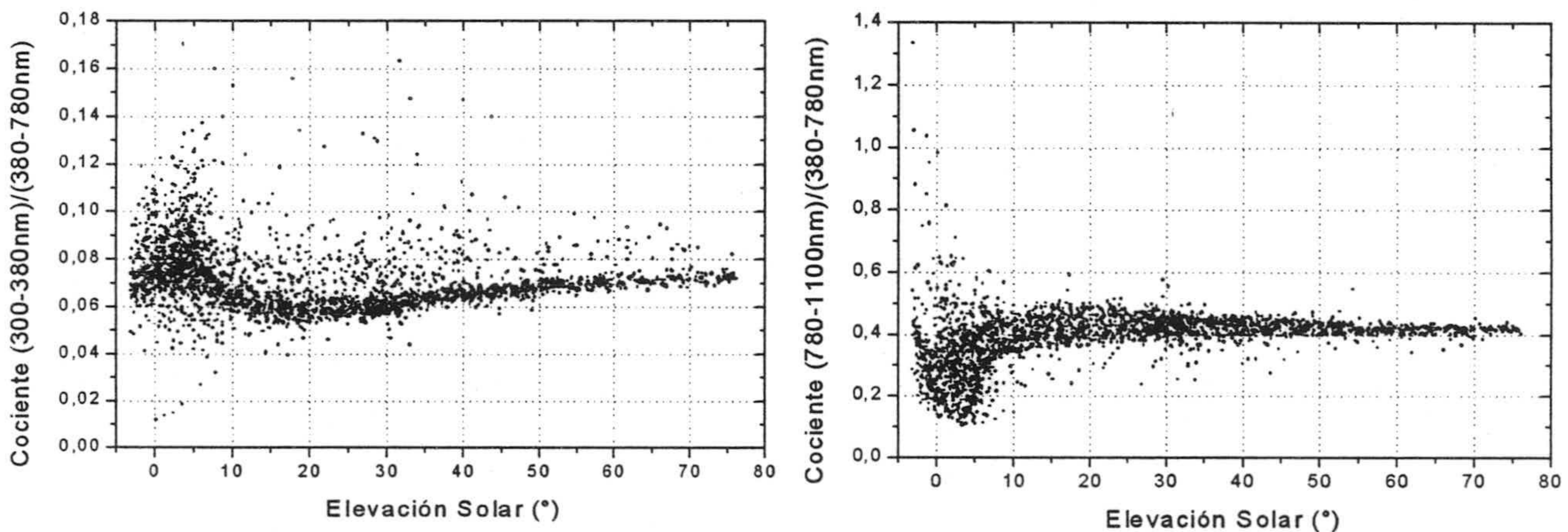


Figura 4. 37.- Evolución del cociente UV/Vis e IR/Vis con la elevación solar en las medidas de luz-día de Granada.

Por último, hemos incluido una gráfica, figura 4.38, en la que se analiza la evolución de la cantidad de UV con la elevación solar para días completamente despejados y días con cielos completamente cubiertos. La correlación del contenido UV con la elevación solar en días despejados es completa. Por el contrario en días con cielos

totalmente cubiertos, el contenido UV depende del tipo y cantidad de nubes que cubren el cielo, no presentando correlación con la elevación solar.

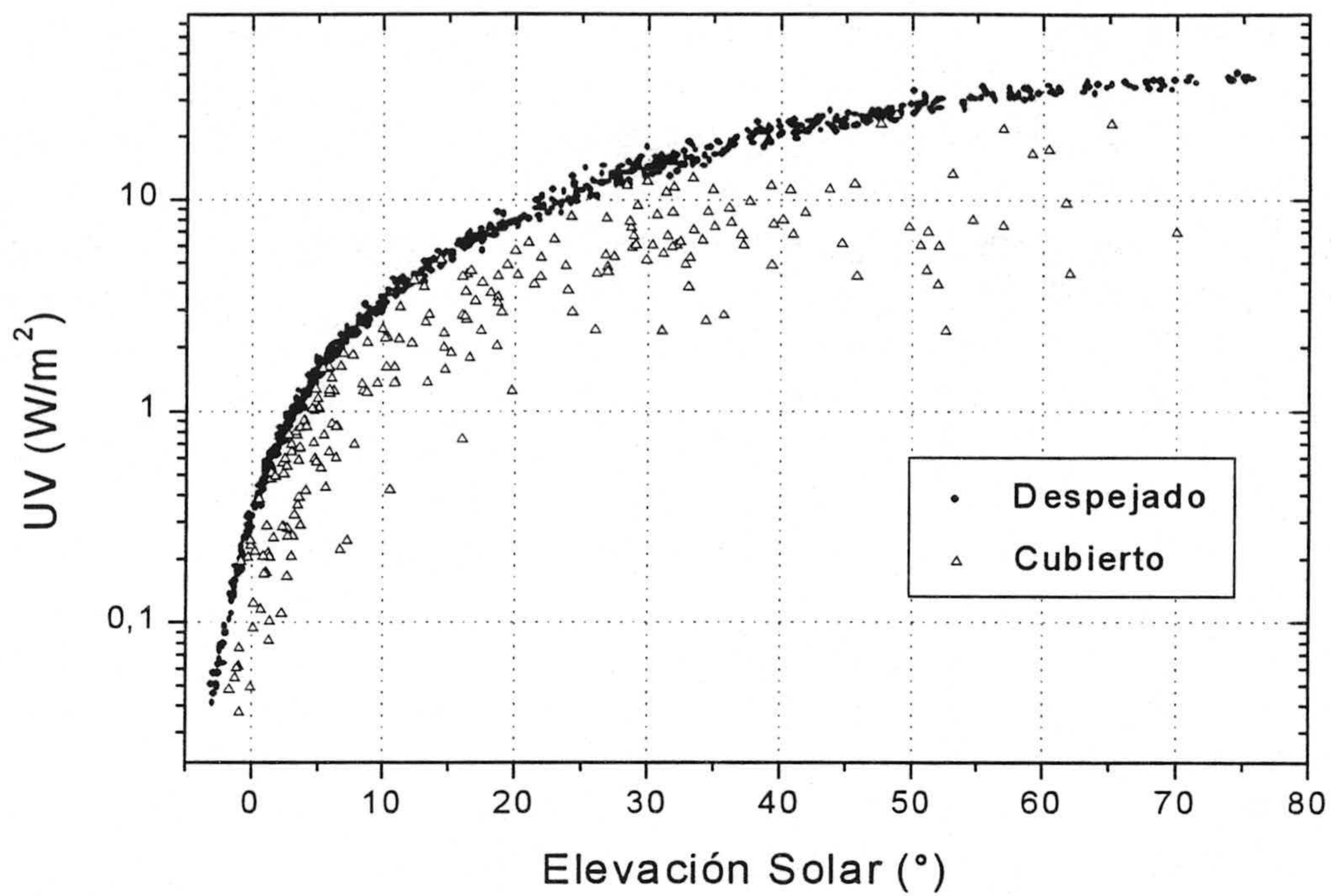


Figura 4. 38.- Evolución del contenido UV con la elevación solar para días completamente despejados y días con cielos completamente cubiertos.

Capítulo 5:

Medidas de luz-cielo

“Allí el cielo no es como otros cielos,
hay en el aire un vaho que tamiza los colores
y que dulcifica el tono de los horizontes,
hasta el punto de que la mirada
parece reposarse en océanos de terciopelo”
Cuatro días en Granada, Alejandro Dumas

En un capítulo anterior (capítulo 3) detallamos las características de esta segunda campaña de medidas. La principal motivación en la realización de este tipo de medidas fue la ausencia, hasta la fecha, de similares trabajos experimentales en la literatura. Por ello nos planteamos llevar a cabo una serie de medidas espectrales de luz-cielo (con un campo de visión pequeño) únicamente en días despejados, con la intención de analizar sus características colorimétricas y espectrales, de forma análoga a como lo hemos hecho en el capítulo anterior.

5.1. Coordenadas de Cromaticidad

En la figura 5.1 podemos observar la distribución de coordenadas de cromaticidad de las 1.567 medidas de luz-cielo realizadas con el telescopio con un campo de visión de 3° (0,105 sr), y su *locus* correspondiente, que se sitúa por encima y aproximadamente paralelo al CIE *locus* (hacia la región de los verdes), y cuya ecuación viene dada por:

$$y = -0,2477 + 2,72203 x - 2,77935 x^2$$

En esta misma figura hemos incluido el diagrama cromático CIE-1931 completo y el *locus* del Cuerpo Negro. La región abarcada por estas medidas experimentales de luz-cielo en días despejados, y señalada en la figura 5.1 mediante un recuadro, es mucho más amplia que la obtenida para luz-día, a pesar de su menor extensión temporal. El valor mínimo y máximo en el eje x es de 0,2328 y 0,3948 respectivamente, convirtiéndose en la mayor extensión, sobre dicho eje, encontrada en la literatura (capítulo 2). Existe, por tanto, mayor variabilidad en la cromaticidad del cielo (aun considerando únicamente días despejados) que en la cromaticidad de la luz-día, resultado que obviamente será refrendado cuando realicemos el análisis espectral.

Debemos destacar que ninguna de nuestras medidas de luz-cielo posee coordenadas de cromaticidad por debajo del *locus* del Cuerpo Negro; de hecho la mayoría (~90 %) se sitúan por encima del CIE *locus*. Esto provoca, además, que nuestro *locus* sea el que más alejado se encuentra hacia los verdes, de todos los publicados en la bibliografía, para TCCs inferiores a 7.000 K. El gran agrupamiento de las medidas en torno a su propio *locus* observado para las medidas de luz-día se repite para las de luz-cielo: es notable, a pesar del gran rango de TCCs abarcado, la poca separación de nuestras medidas con respecto al *locus* que las representa.

Únicamente en las medidas visuales del color del cielo realizadas por Nayatani y Wyszecki [1963] se aprecian unas coordenadas de cromaticidad tan cercanas a la región de los azules, incluso algunas de ellas con TCC por encima de ∞ K, como las observadas en nuestra campaña.

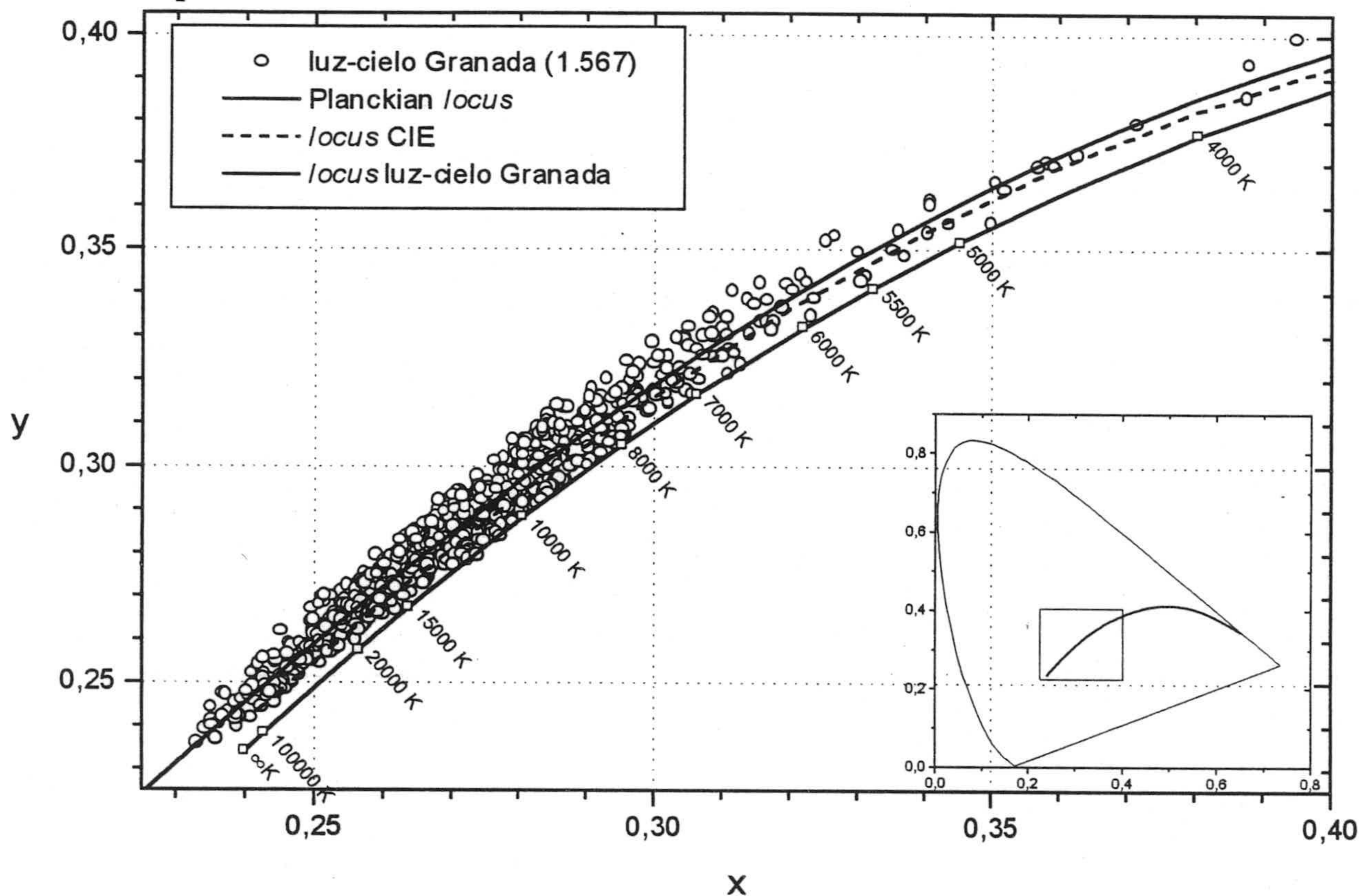


Figura 5. 1.- Coordenadas de cromaticidad de las 1.567 medidas de luz-cielo y su *locus* correspondiente en el diagrama cromático CIE 1931. En la parte inferior derecha hemos incluido el diagrama completo donde hemos señalado el recuadro abarcado en la figura grande.

De igual forma, hemos representado en el diagrama cromático CIE-1976 las 1.567 coordenadas de cromaticidad, figura 5.2, y calculado su *locus*, que viene expresado mediante:

$$v' = -0,90274 + 11,79398 u' - 24,56191 u'^2$$

En este diagrama es más evidente el alejamiento del *locus* correspondiente a nuestras medidas experimentales del *locus* de la CIE para altas TCCs. Aunque para bajas

TCCs ambos *locus* coinciden en posición, para TCCs superiores a 8.000 K el *locus* de Granada empieza a alejarse hacia la región de los verdes.

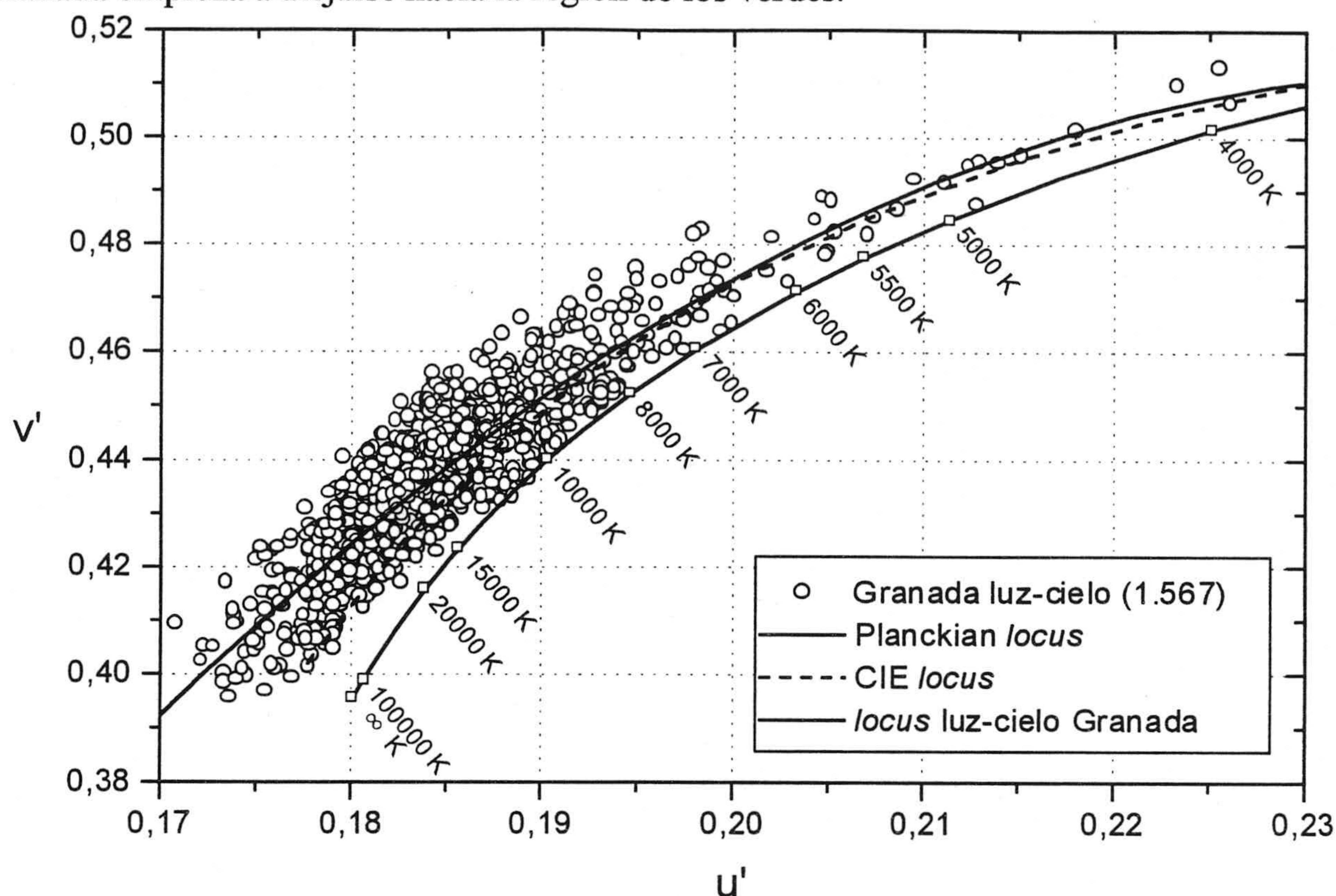


Figura 5. 2.- Coordenadas de cromaticidad de las 1.567 medidas de luz-cielo y su *locus* correspondiente en el diagrama cromático CIE 1976.

Las coordenadas de cromaticidad de estas medidas, con un FOV de 3°, caen dentro de una región bien limitada (en días con cielos totalmente despejados). Teniendo en cuenta cómo se obtienen las coordenadas de cromaticidad de un estímulo que es suma a su vez de dos estímulos (sus coordenadas de cromaticidad se hallan sobre la línea recta que une las dos coordenadas de cromaticidad de los dos estímulos originales, según la regla del centro de gravedad) es razonable suponer que si midiésemos luz-cielo procedente de regiones más amplias del cielo (p.ej. cuadrantes, etc.) las coordenadas de cromaticidad caerían también dentro del área de coordenadas de cromaticidad antes mencionada.

5.2. Temperatura de color correlacionada (TCC)

Nuestro estudio de las temperaturas de color correlacionadas correspondientes a las 1.567 medidas de luz-cielo sirvió para comprobar que la información que el espectrorradiómetro nos suministraba, en cuanto a TCC, era incompleta para valores superiores a 100.000 K. De hecho en 6 de nuestras medidas, cuya TCC debía ser superior a dicho valor, el espectrorradiómetro nos daba el mensaje “*value out of range*”. Puestos en

contacto con el fabricante, éste nos confirmó que el algoritmo que utilizaba el espectrorradiómetro para calcular TCC estaba basado en el trabajo de Robertson [1968]. Sin embargo la ejecución de este algoritmo en el espectrorradiómetro sólo es válida para obtener TCCs por debajo de 100.000 K. Para solventar esta contrariedad tuvimos que aplicar la definición de TCC para calcular las 6 TCCs correspondientes a dichas 6 medidas; este cálculo será detallado de forma pormenorizada en un capítulo posterior (capítulo 7). Asimismo otras dos medidas (del conjunto de 1.567) poseían coordenadas de cromaticidad que se situaban fuera de la región del diagrama cromático donde es posible asociar TCC.

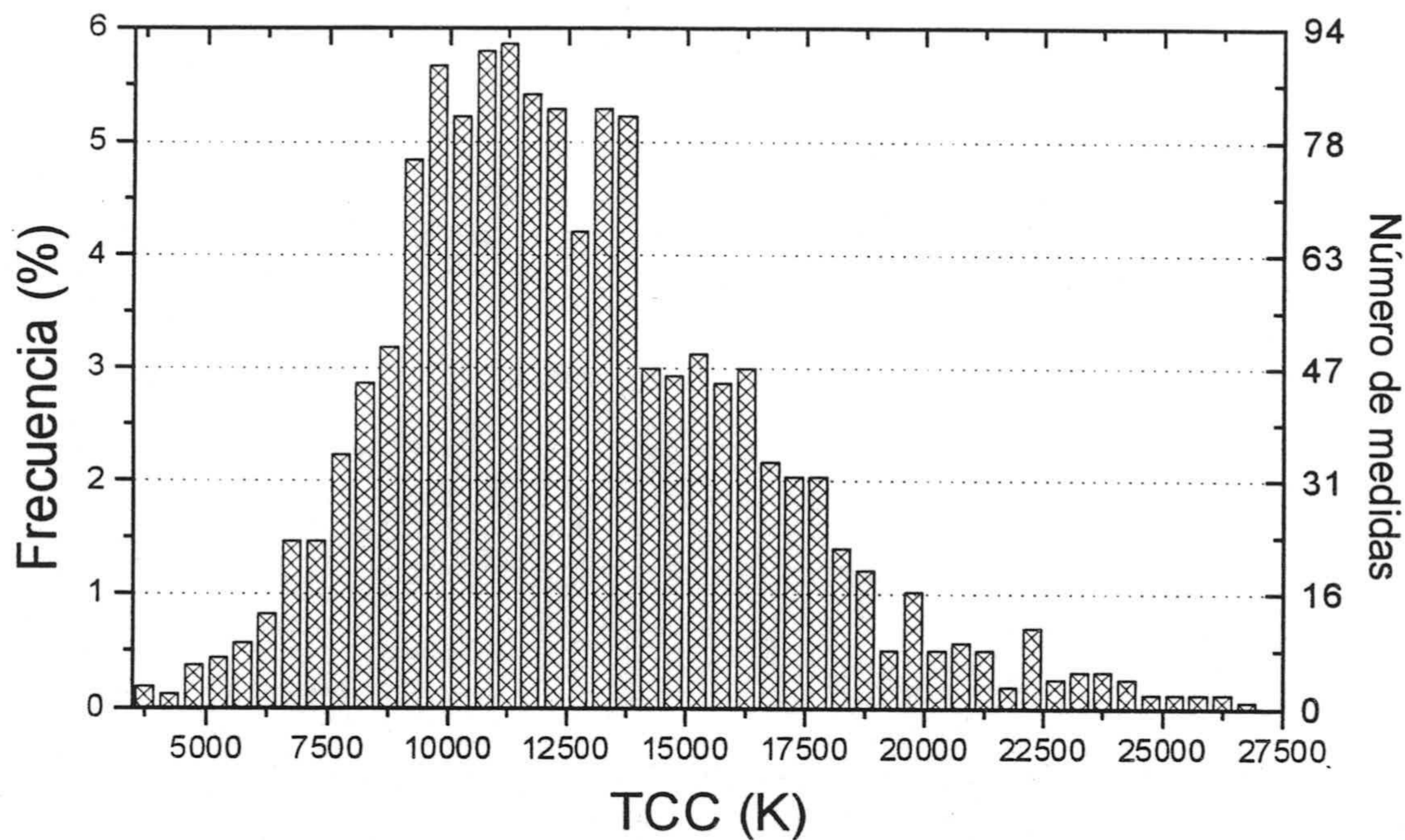


Figura 5. 3.- Histograma (parcial) de TCC correspondiente a las 1.567 medidas de luz-cielo en días despejados.

Una vez completada la información insuficiente proporcionada por el espectrorradiómetro, estamos en condiciones de realizar el estudio de las TCC. En primer lugar el rango de TCCs abarcado por nuestras medidas de luz-cielo va desde 3.804 K a 577.624 K, sin contar con las 2 medidas que no poseen TCC. En la figura 5.3 mostramos el histograma parcial de TCC puesto que sólo hemos representado en el eje de abscisas TCCs comprendidas entre 3.000 K y 27.500 K en intervalos de ancho 500 K, apreciándose que el intervalo de TCC más frecuente es el comprendido entre 11.000 K y 11.500 K. Otra característica destacable de este histograma es su forma, pues sigue aproximadamente una distribución normal, similar únicamente al presentado por Tarrant [1968] (ver figura 2.23).

Expresando el histograma de TCC en mireds (con intervalos de ancho 5 mireds), figura 5.4, el intervalo más frecuente se sitúa entre 70 y 75 mireds. Este resultado no concuerda con ninguno de los publicados en la literatura; el único trabajo que se asemeja es el llevado a cabo por Ando *et al.* (ver Henderson [1970]), en donde al medir luz del

cielo norte en días despejados encuentran un máximo en su histograma de TCC entre 95 y 100 mireds. Hemos de señalar que nuestra campaña de medidas espectrorradiométricas de luz-cielo con campos de visión pequeños (sólo 3°) es la primera que se ha realizado hasta la fecha, y por tanto los resultados encontrados no tienen porqué concordar con la de otros autores, pues todos los publicados, y mencionados en el capítulo de revisión bibliográfica, fueron llevados a cabo con campos más grandes, siendo el Henderson y Hodgkiss [1963] el más pequeño (6°).

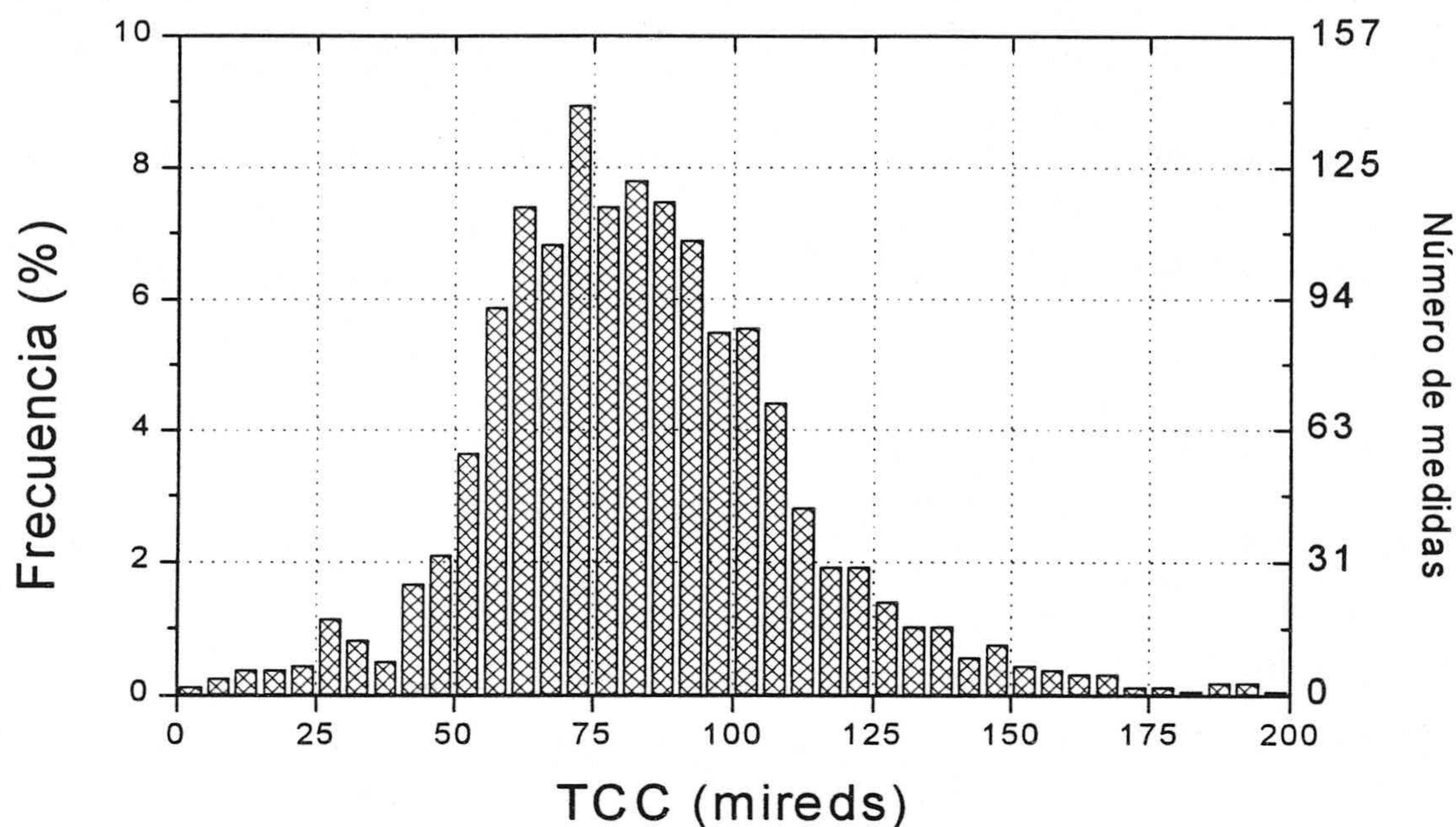


Figura 5. 4.- Histograma de TCC, expresado en mireds, de las medidas de luz-cielo.

5.3. Posición sobre la bóveda celeste

En las figuras 5.6-13 hemos dibujado las coordenadas de cromaticidad, en el diagrama cromático CIE 1931, correspondientes a varios barridos en el meridiano solar y antimeridiano solar (cuyos puntos han sido señalados en la figura 5.5.A), así como en el meridiano perpendicular al solar (puntos mostrados en la figura 5.5.B) para varias elevaciones solares (~60°, ~20°, ~10° y ~1°). No tendría sentido incluir en este análisis todos y cada uno de los barridos realizados en esta campaña de medidas; por tanto, hemos considerado interesante incluir sólo algunos, los más significativos (bien distintos entre sí), puesto que el resto poseen similares características. En algunos de estos barridos hemos incluido puntos con elevaciones de 10° y 5° (no dibujados en la figuras 5.5), cuando estos se situaban por encima del horizonte topográfico.

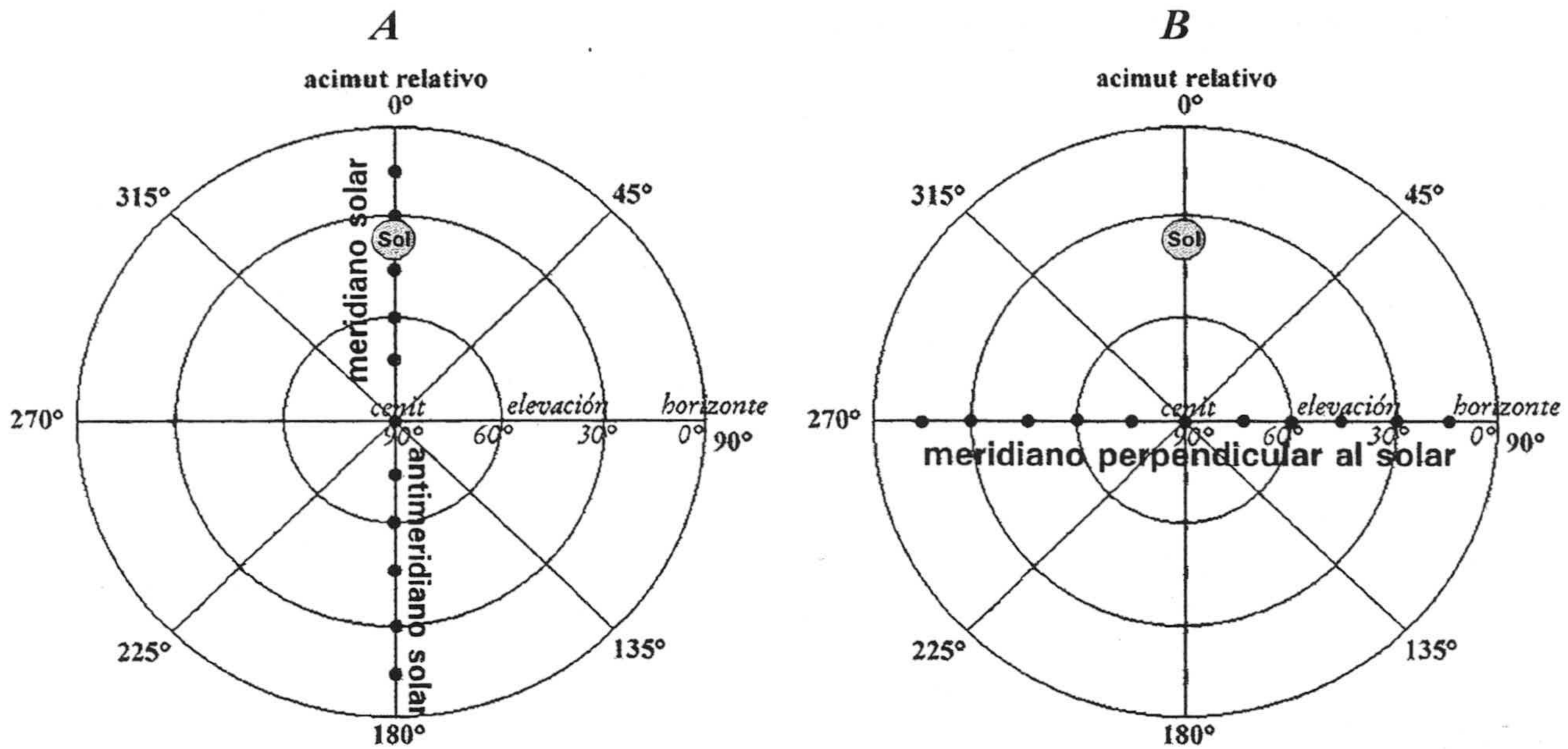


Figura 5. 5.- Puntos de la bóveda celeste en los que hemos realizado medidas espectrorradiométricas con el telescopio, con un campo de visión de 3°, pertenecientes a los barridos a lo largo del A) meridiano y antimeridiano solar; B) meridiano perpendicular al solar.

En estos diagramas cromáticos podemos apreciar, entre otras características, que en general la luz procedente de puntos cercanos al horizonte (bajas elevaciones en la bóveda celeste) es la que posee coordenadas de cromaticidad más acromáticas, o mejor dicho, menos azuladas. Esto sucede siempre que consideremos puntos sobre el meridiano perpendicular al solar (figuras 5.7, 5.9, 5.11 y 5.13); sin embargo para barridos en el meridiano solar y antisolar, no podemos concluir de forma tan tajante pues influye sustancialmente la propia elevación solar (figuras 5.6, 5.8, 5.10 y 5.12).

Al acercarnos al cenit (90°) la cromaticidad se torna más azul, incrementándose su pureza colorimétrica, no superando el valor del 15% (el estímulo acromático considerado está derivado de la irradiancia espectral fuera de la atmósfera terrestre suministrada en Thekaekara [1973]). Este valor de la máxima pureza colorimétrica encontrada en una atmósfera real como la de Granada está bastante alejado del valor máximo (40%), que tendría una atmósfera ideal libre de partículas (atmósfera de Rayleigh o atmósfera puramente molecular), apuntado por Bohren [1990] y Lee [1994a].

Con la intención de poder comparar entre todas estas figuras (5.6-5.13) hemos incluido en ellas todo el diagrama cromático completo, dibujando la región cromática representada en cada figura. Esto nos permite apuntar algunas conclusiones, entre las cuales destaca que una disminución de la elevación solar conlleva que la región cromática abarcada por el barrido en el meridiano y antimeridiano solar aumenta, incrementándose hacia la región de los amarillos-naranjas, resultado apuntado por Sekine [1991] en su trabajo teórico.

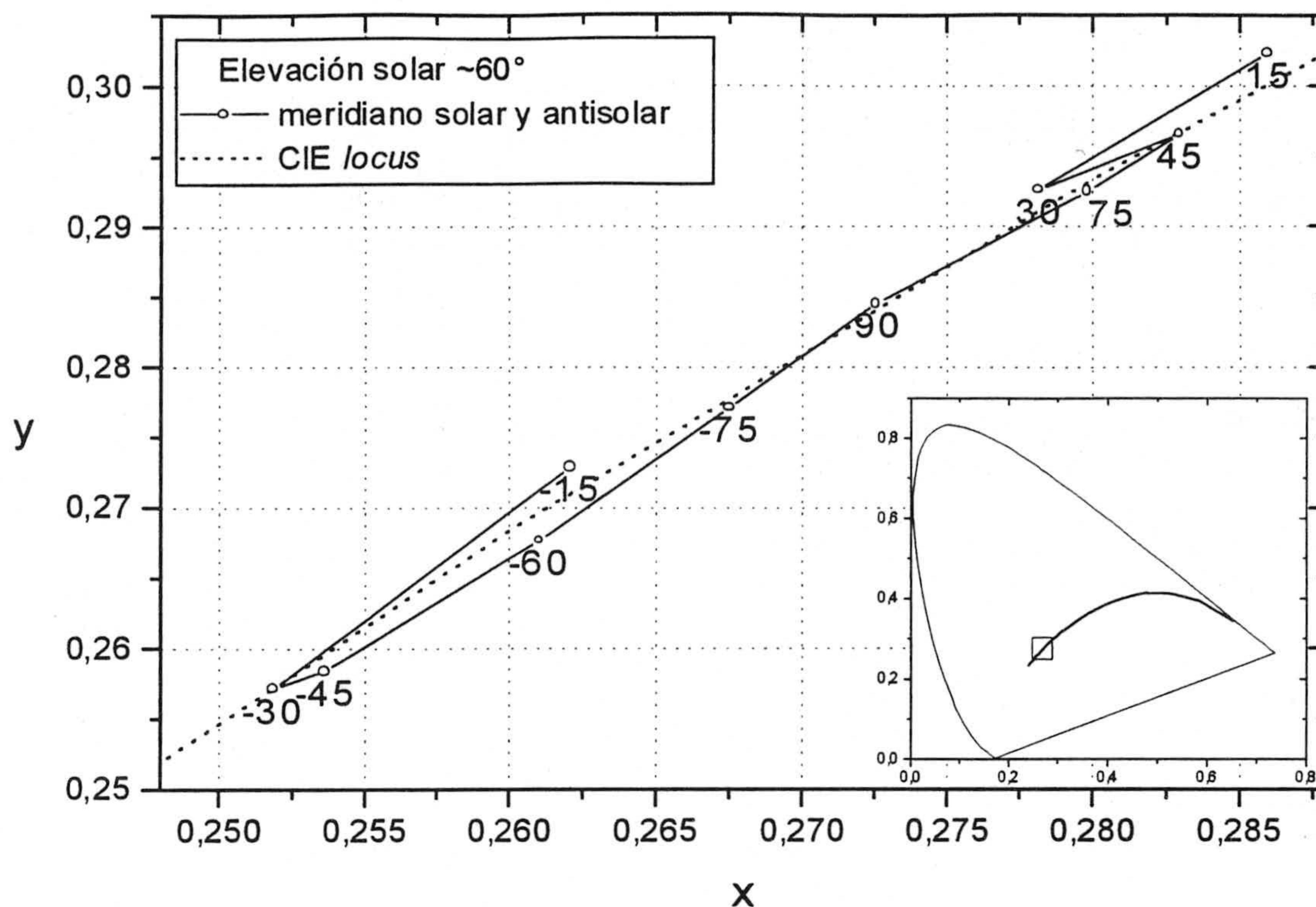


Figura 5. 6.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a un barrido en el meridiano solar y anti-meridiano solar realizado el 19/Ago/98. Los números indican elevación en la bóveda celeste (positivos: meridiano solar; negativos: antimeridiano solar). Dentro de esta figura hemos incluido el diagrama cromático CIE-1931 completo, donde hemos señalado mediante un recuadro la región cromática abarcada en la figura.

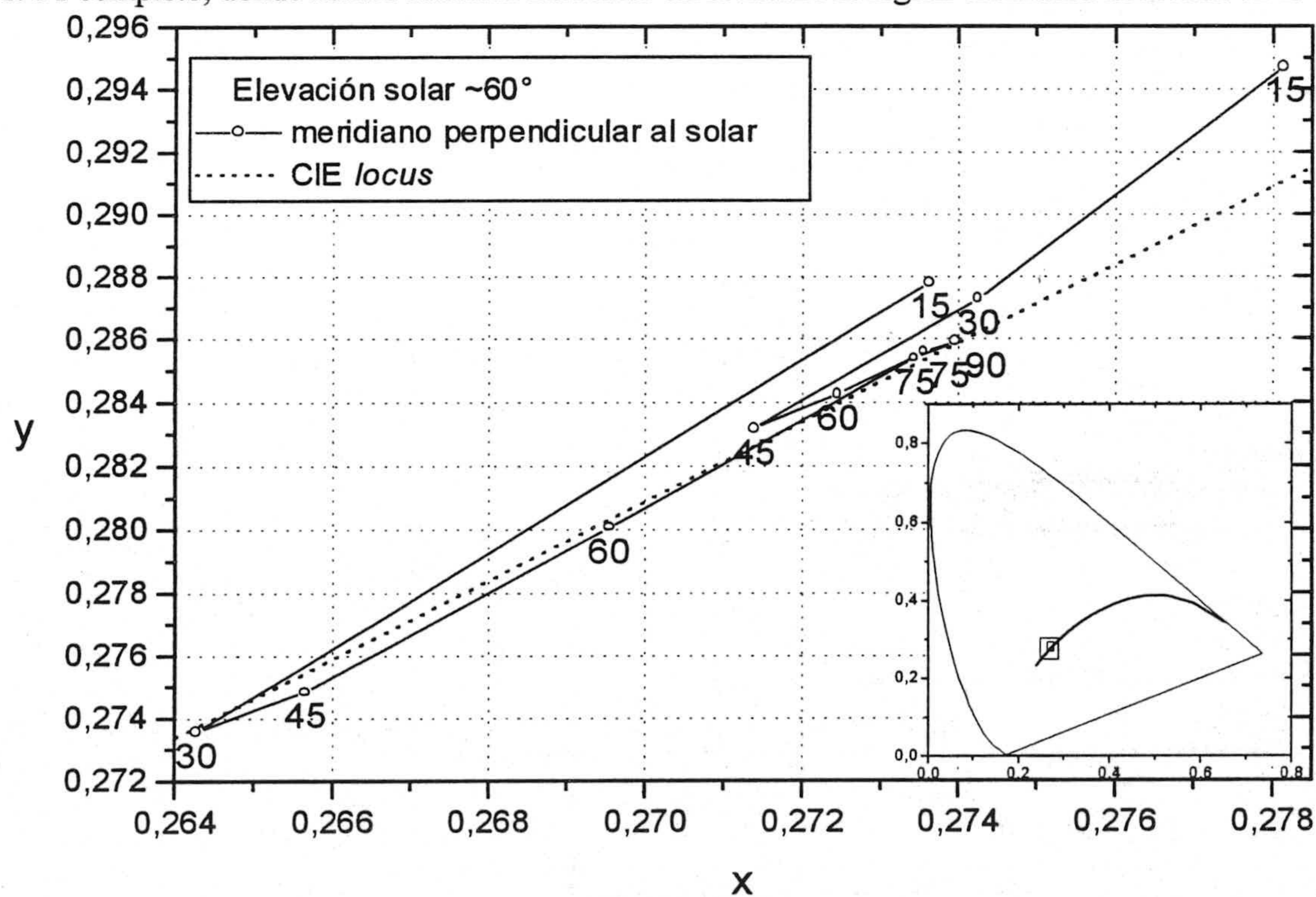


Figura 5. 7.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a un barrido en el meridiano perpendicular al solar realizado el 19/Ago/98. Los dos recuadros señalados en el diagrama cromático se corresponden respectivamente con las regiones cromáticas mostradas en la figura 5.6 (recuadro externo) y 5.7 (recuadro interno).

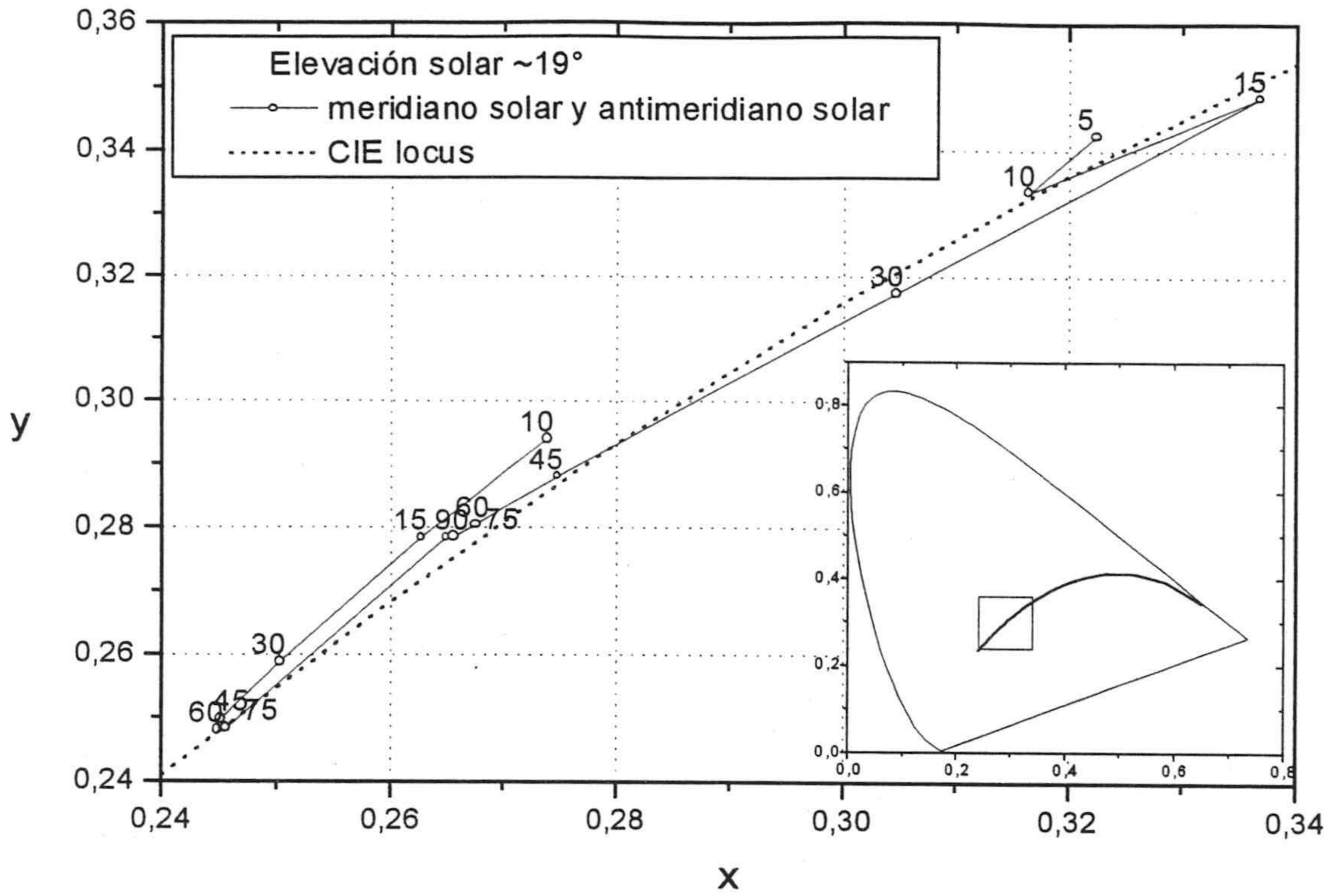


Figura 5. 8.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a un barrido en el meridiano solar y anti-meridiano solar realizado el 6/Ago/98.

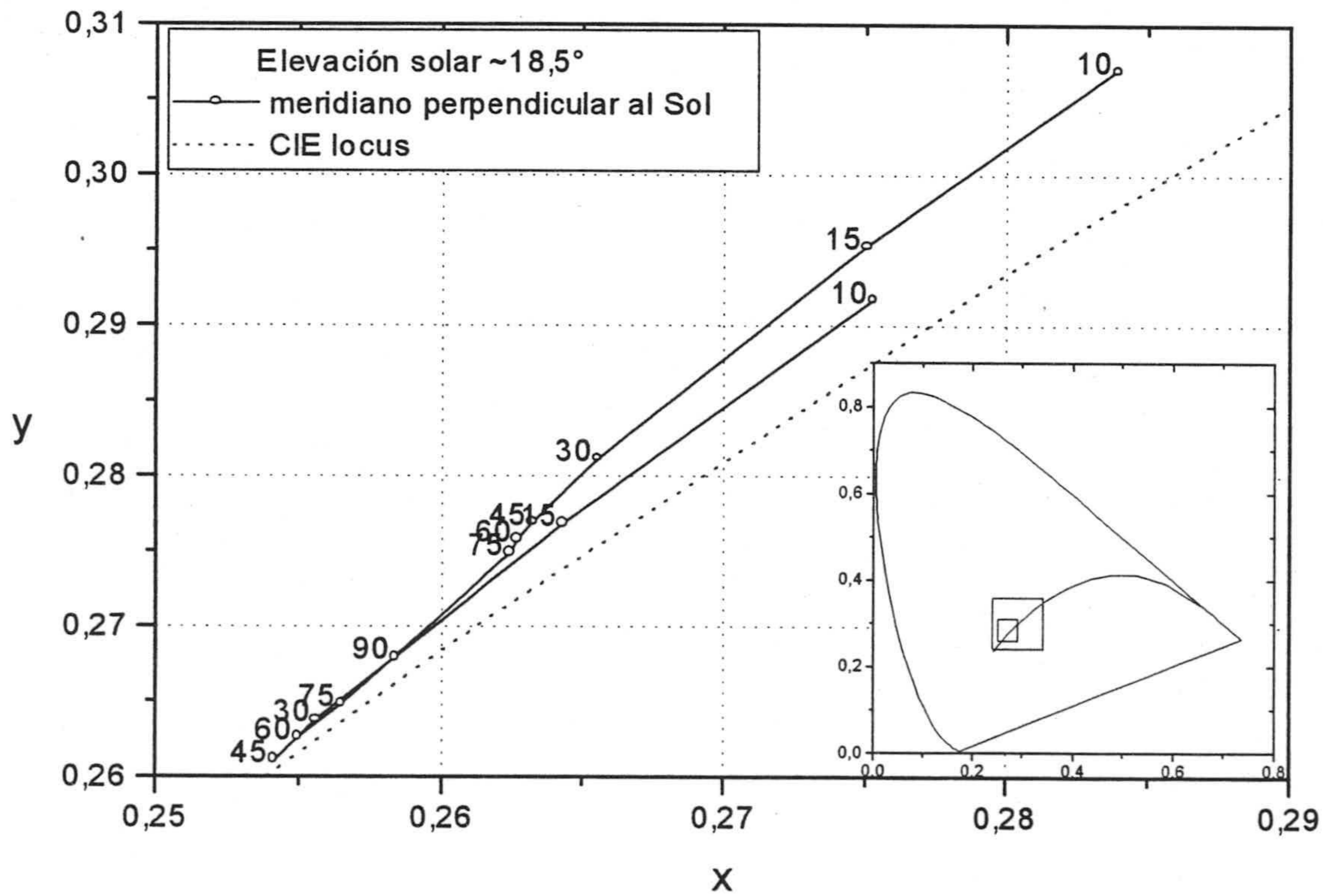


Figura 5. 9.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a un barrido en el meridiano perpendicular al solar realizado el 6/Ago/98. Los dos recuadros señalados en el diagrama cromático se corresponden respectivamente con las regiones cromáticas mostradas en la figura 5.8 (recuadro externo) y 5.9 (recuadro interno).

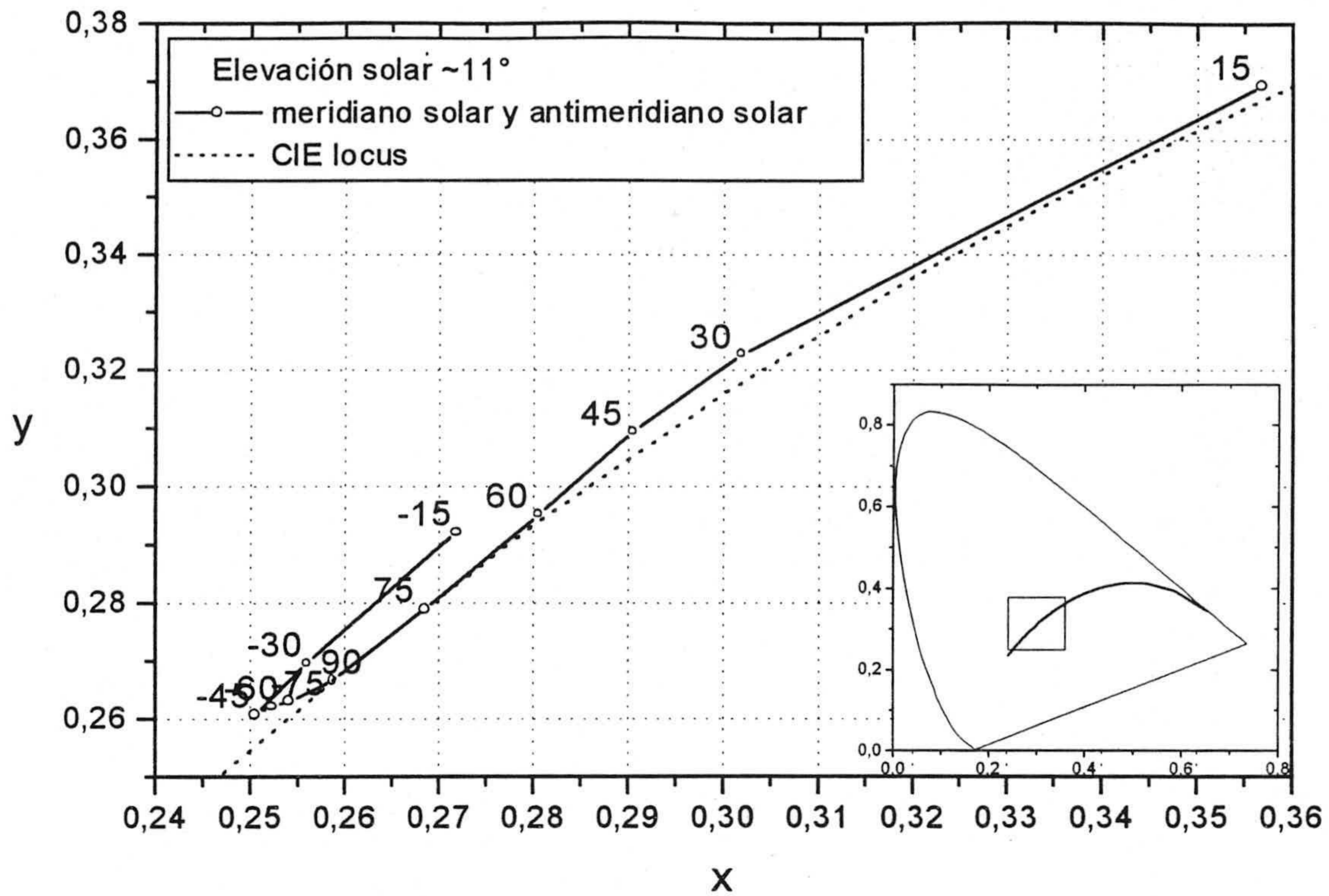


Figura 5. 10.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a un barrido en el meridiano solar y anti-meridiano solar realizado el 19/Ago/98.

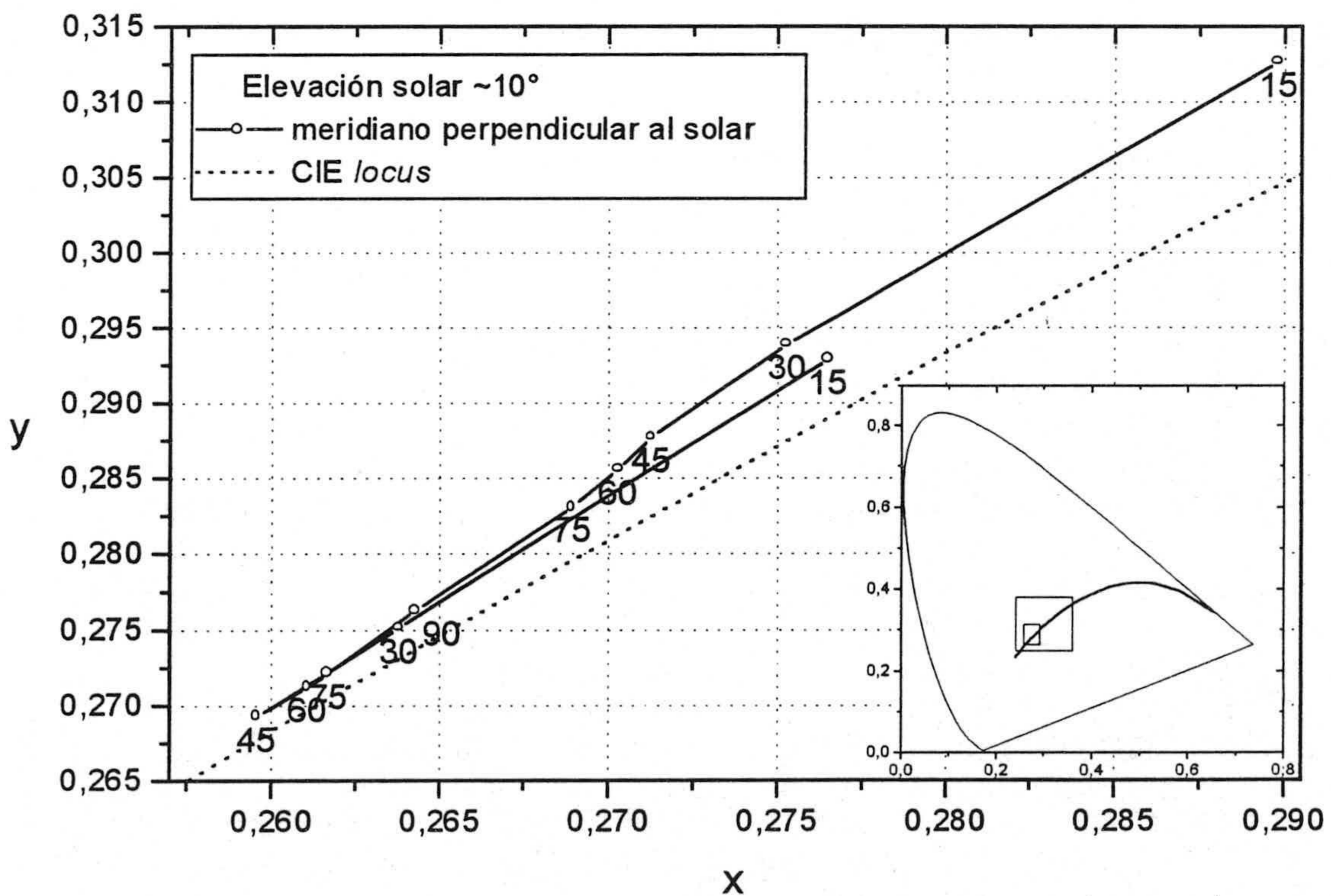


Figura 5. 11.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a un barrido en el meridiano perpendicular al solar realizado el 19/Ago/98. Los dos recuadros señalados en el diagrama cromático se corresponden respectivamente con las regiones cromáticas mostradas en la figura 5.10 (recuadro externo) y 5.11 (recuadro interno).

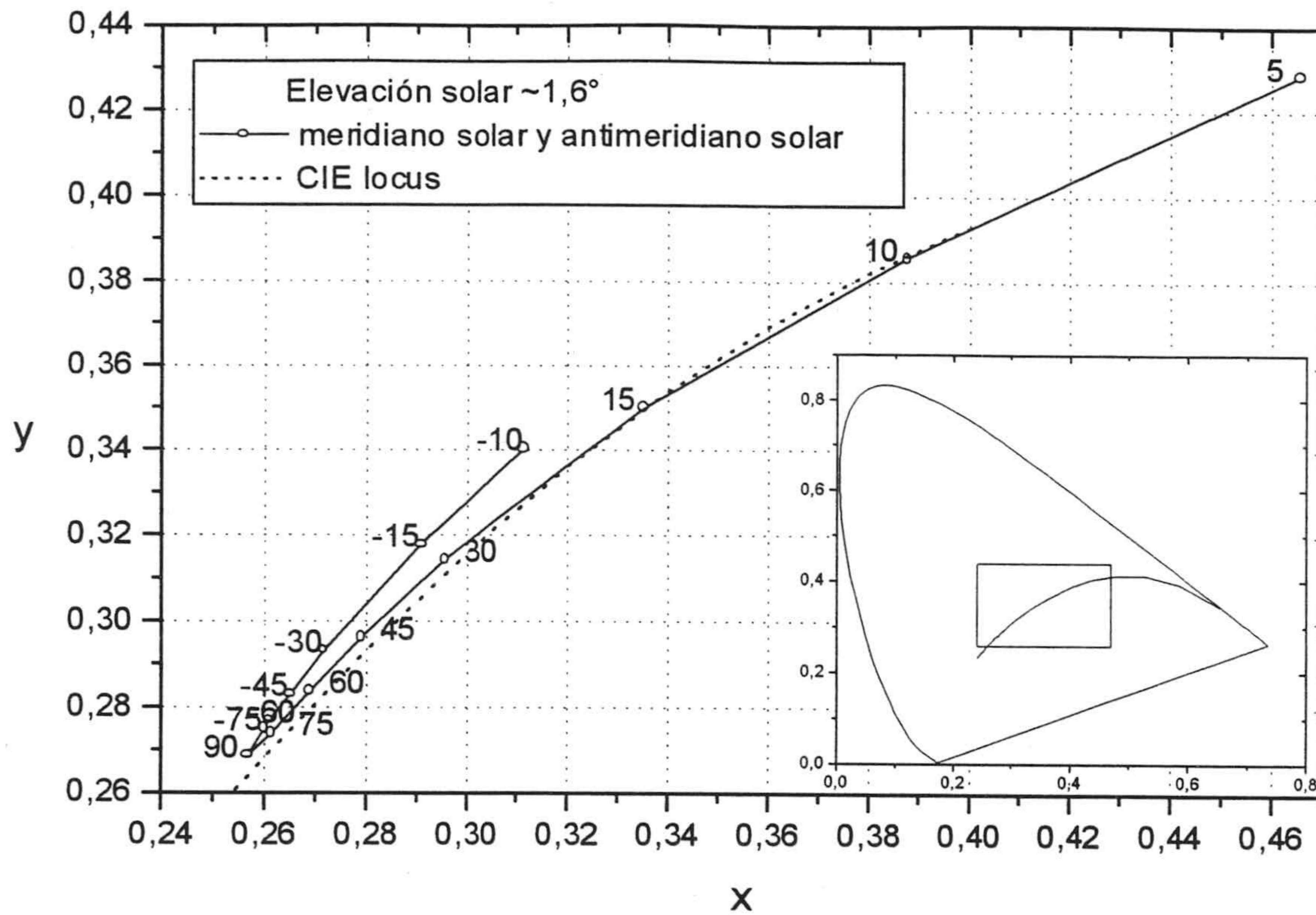


Figura 5. 12.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a un barrido en el meridiano solar y anti-meridiano solar realizado el 5/Ago/98.

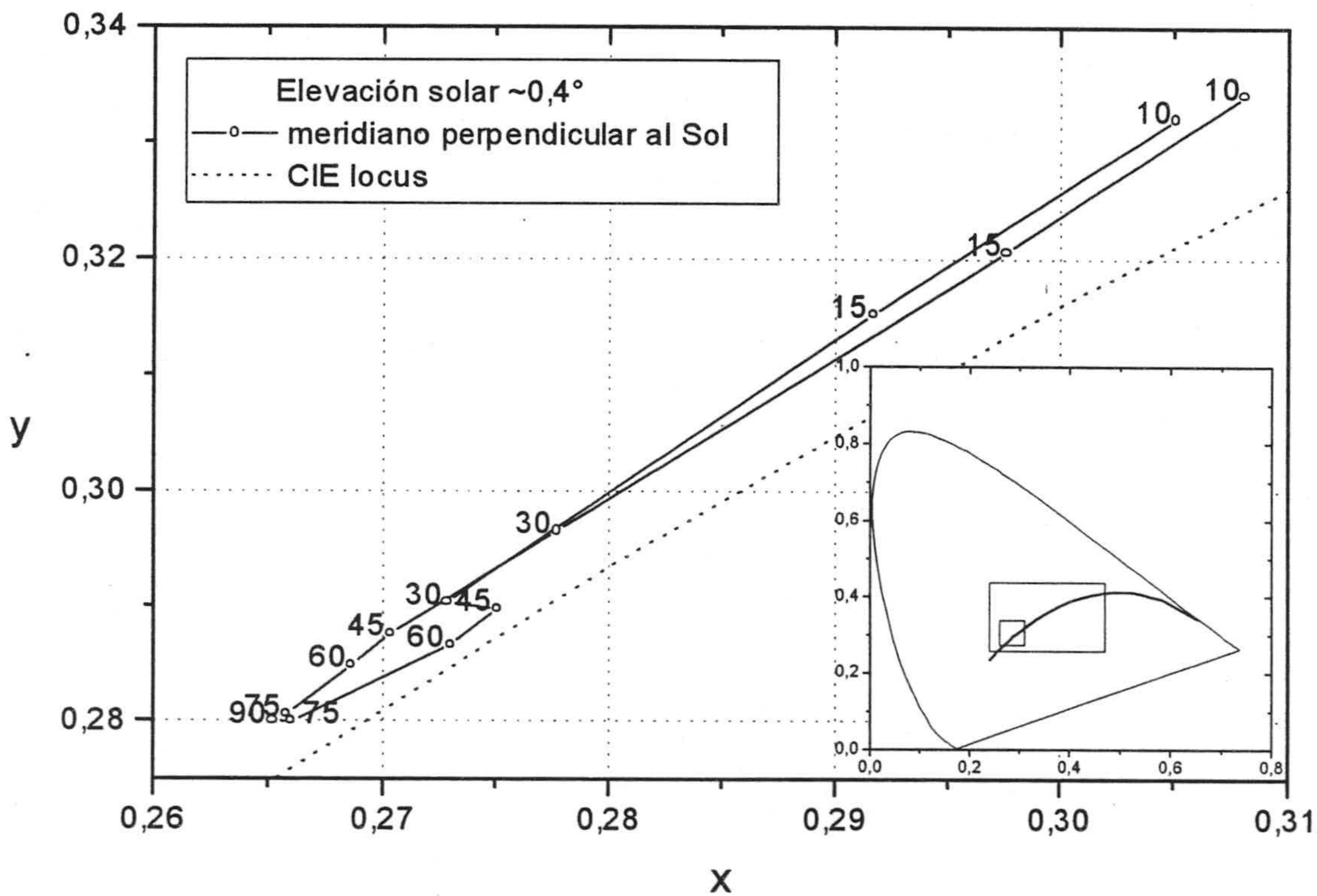


Figura 5. 13.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a un barrido en el meridiano perpendicular al solar realizado el 5/Ago/98. Los dos recuadros señalados en el diagrama cromático se corresponden respectivamente con las regiones cromáticas mostradas en la figura 5.12 (recuadro externo) y 5.13 (recuadro interno).

Tras el estudio de estas coordenadas de cromaticidad (y otras no incluidas en este capítulo, por razones de espacio) cabe destacar la superior variedad colorimétrica a lo largo del meridiano y antimeridiano solar en comparación con la encontrada en el meridiano perpendicular al solar.

Si alguna de las posiciones donde se ha realizado medidas coincide o está muy próxima a la posición solar, sus coordenadas de cromaticidad se sitúan muy cercanas a la región de los amarillos; este hecho se hará más ostensible a medida que la elevación solar disminuya, pues la aureola que circunda al Sol poseerá coordenadas de cromaticidad más anaranjadas, tal y como puede apreciarse en la figura 5.12.

Otro resultado destacable es la cercanía (casi concordancia) de las coordenadas de cromaticidad al CIE *locus* para barridos en el meridiano y antimeridiano solar, y el ostensible alejamiento para barridos en el meridiano perpendicular al solar, sobre todo para bajas TCC (<10.000 K). En estos barridos la máxima pureza colorimétrica se alcanza, casi siempre, para puntos cercanos al cenit, aunque veremos, más adelante, que la máxima TCC (correspondientes con máximas purezas colorimétricas) no se obtienen justamente en dicho punto.

Hay características comunes en las gráficas anteriores (5.6-13) que hay que destacar: en los barridos en el meridiano solar y antisolar la curva, en el diagrama cromático CIE-1931, que une cada uno de los puntos sobre la bóveda celeste en los que hemos realizado medidas posee un perfil similar independientemente de la elevación solar: el de una *U* torcida hacia la derecha y con su lado izquierdo menor. En el caso de barridos en el meridiano perpendicular al solar también existe una semejanza generalizada: el de una *U* torcida hacia la derecha.

Un hecho que nos llama la atención es que nuestras medidas físicas del color del cielo poseen unas coordenadas de cromaticidad que se sitúan todas ellas en la zona acromática del diagrama cromático, contrariamente a la apreciación visual que nos dice que el color del cielo en días despejados es azul.

A pesar de medir bajo condiciones supuestamente ideales (cielos completamente despejados) no se aprecia total simetría en los barridos realizados en el meridiano perpendicular al meridiano solar: las diferencias cromáticas entre puntos con la misma elevación se sitúan entre 4 (para elevaciones por encima de 60°) y 15 unidades MacAdam, lo cual nos indica que esta asimetría es perceptiblemente significativa. En dicho meridiano la geometría con respecto al Sol es la misma, y por tanto cabría esperar simetría en los resultados colorimétricos si nuestra atmósfera se comportara como una atmósfera ideal. Así por ejemplo, en el trabajo teórico de Sekine [1991] no se afirma nada acerca de esta posible asimetría pues todos los modelos teóricos parten de la suposición de un comportamiento simétrico en la atmósfera con respecto al Sol cuando se tratan cielos

totalmente despejados (entre otros Perez *et al.* [1992], Prasad *et al.* [1987], Hooper *et al.* [1987], Harrison y Coombes [1988], El Diasty [1989]).

5.4. Ángulo de esparcimiento (*scattering angle*)

Habiendo calculado el ángulo de esparcimiento (McCartney [1976]) para cada una de nuestras medidas de luz-cielo, podemos analizar la dependencia de las características colorimétricas con dicho ángulo, mostrada en la figura 5.14, en donde hemos incluido las 1.567 medidas realizadas.

Si agrupamos dichas medidas dependiendo del ángulo de esparcimiento, en intervalos de 5° , y calculamos los promedios y desviación estándar en cada intervalo, obtenemos la figura 5.15. La amplia dispersión existente para cada intervalo se debe a las distintas elevaciones solares medidas y a la diferencia en las condiciones atmosféricas de unos días a otros. A pesar de haberse realizado en días con cielos totalmente despejados la variación en la transmitancia espectral de la atmósfera (que depende básicamente de las concentraciones de moléculas y partículas en la atmósfera) nos proporciona medidas con diferentes características colorimétricas. A mayor concentración de aerosoles, la transmitancia atmosférica decrece, disminuyendo la pureza colorimétrica de la luz-cielo, volviéndose el *azul* del cielo más *blanco*.

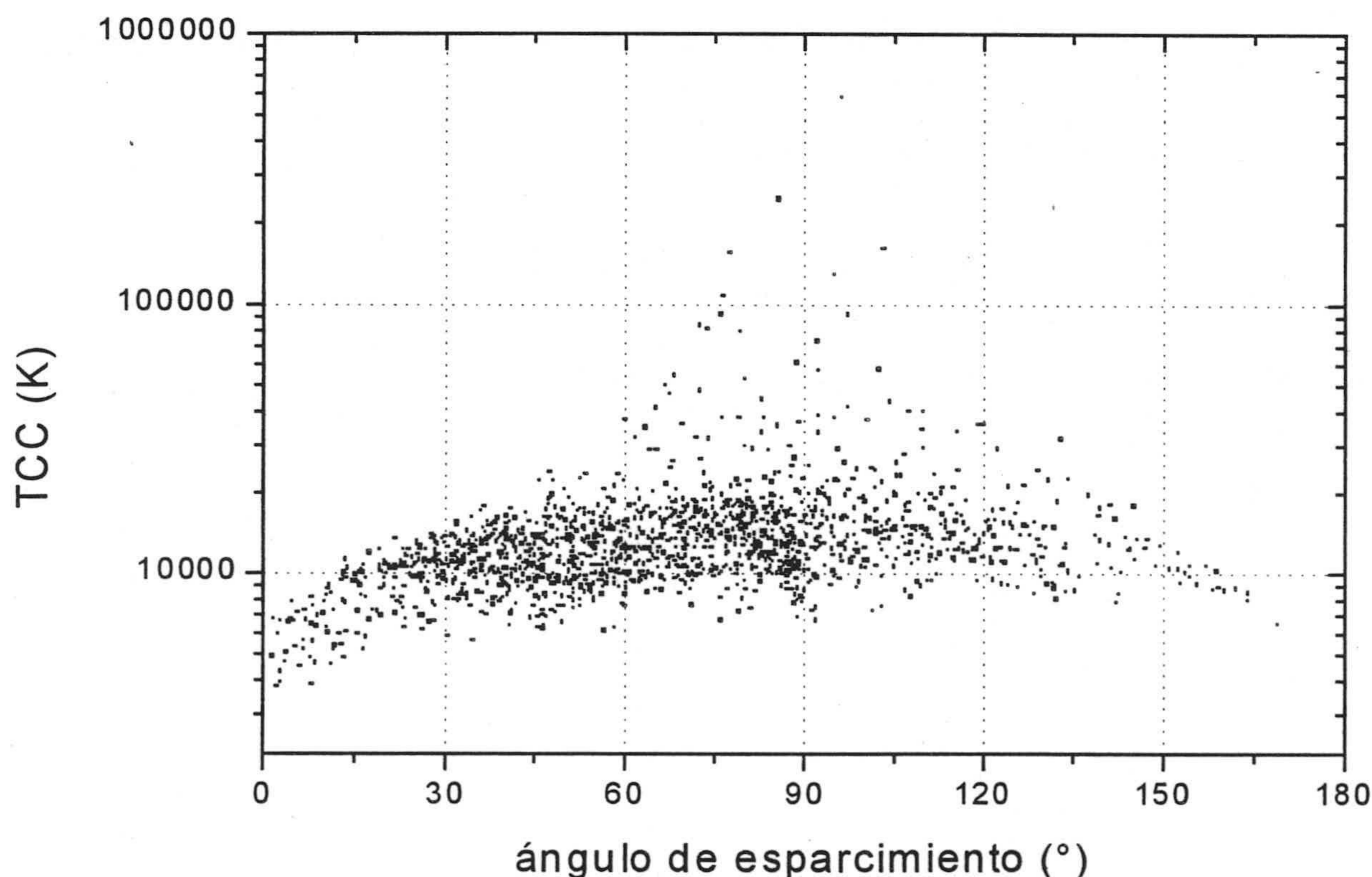


Figura 5. 14.- TCC correspondiente a las 1.567 medidas de luz-cielo, en función del ángulo de esparcimiento.

Asimismo es conocido que las características espectrales y angulares de la luz esparcida por las moléculas de aire y las partículas son bien distintas. La luz esparcida por moléculas (esparcimiento de Rayleigh) es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda (Young [1982], McCartney [1976]). Por el contrario la dependencia con la longitud de onda de la luz esparcida por los aerosoles, varía con el índice de refracción, tamaño y forma de éstos. Como ejemplo podemos considerar que una dependencia con λ^{-1} es bastante plausible para aerosoles urbanos (Gueymard [1994]). Consecuentemente cuanto mayor sea el contenido de aerosoles en la atmósfera, mayor será la *ratio* entre el contenido en las largas longitudes de onda y el contenido en las cortas longitudes de onda, disminuyendo, por lo tanto, la TCC de la luz-cielo.

En cuanto a las características angulares de la luz esparcida, la debida a las moléculas de aire posee las mismas propiedades hacia delante (*forward scattering*: ángulos de esparcimiento superiores a 90°) que hacia atrás (*backward scattering*: ángulos de esparcimiento inferiores a 90°). Por el contrario, la luz esparcida por aerosoles es mucho mayor hacia delante que hacia atrás. Ambas características angulares de esparcimiento se muestran en la figura 5.16.A y B respectivamente.

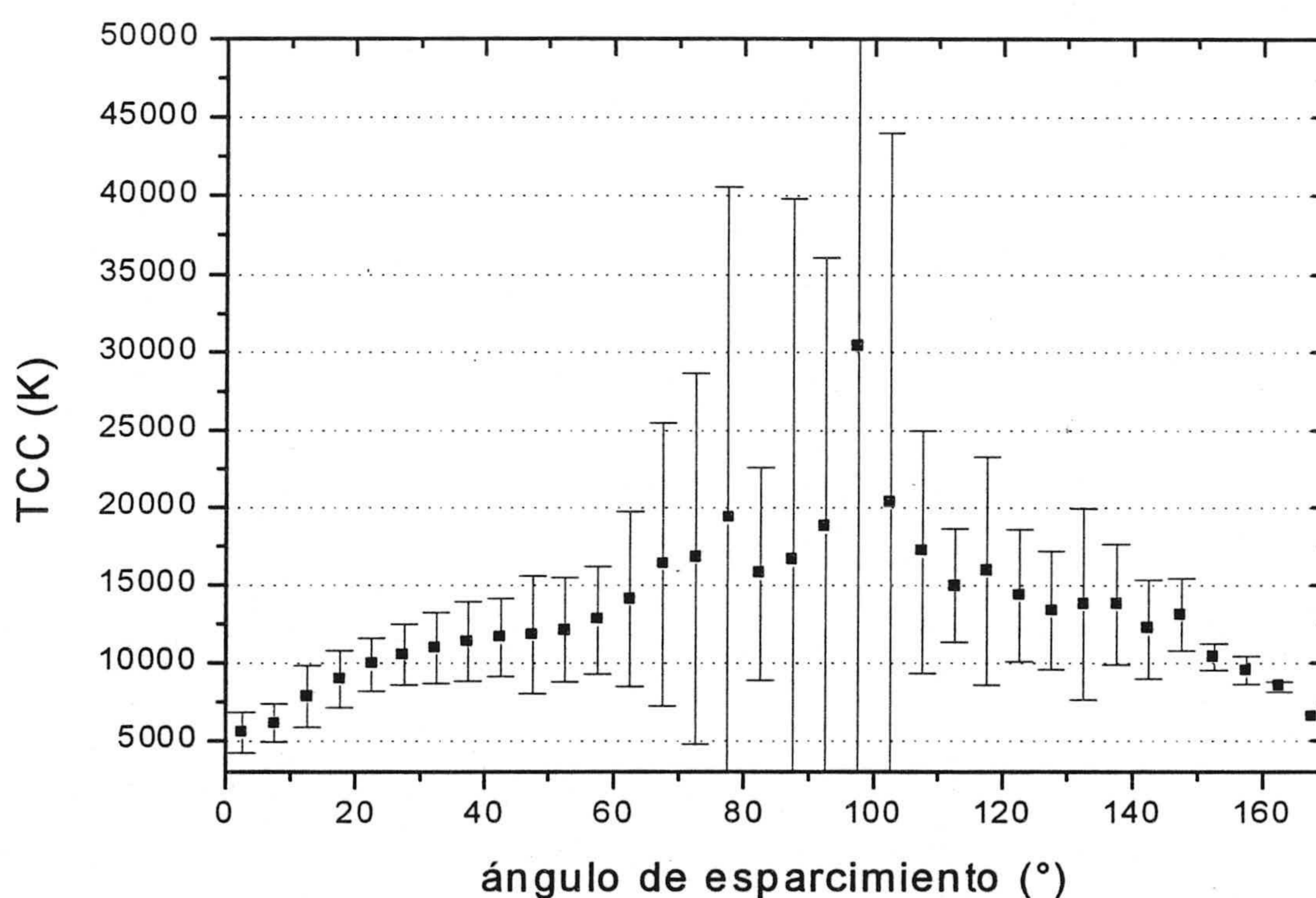


Figura 5. 15.- Evolución de la TCC con el ángulo de esparcimiento. Los cuadrados se corresponden con los promedios y las barras con desviaciones estándar.

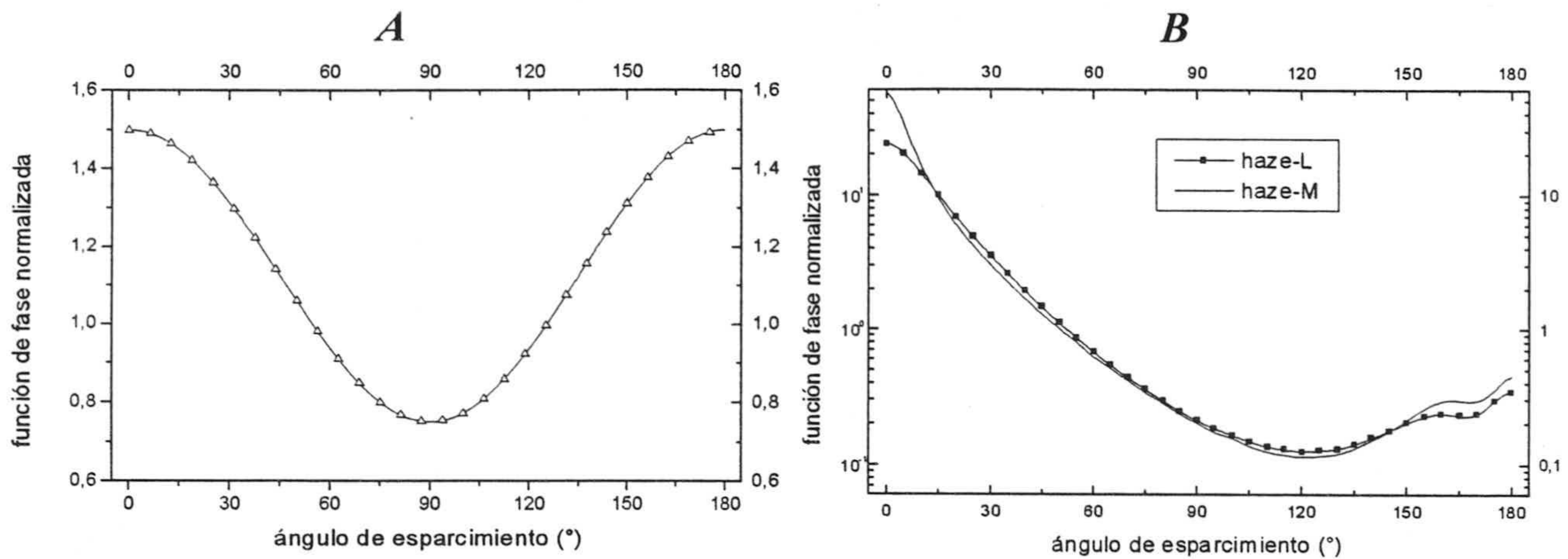


Figura 5. 16.- Características angulares del esparcimiento por A) moléculas de aire (esparcimiento de Rayleigh) y B) aerosoles tipo L (aerosoles continentales) y tipo M (aerosoles marítimos) (Deirmendjian [1969], McCartney [1976]).

Sekine [1991] apunta que la unión del comportamiento espectral y angular de la luz esparcida en la atmósfera (luz-cielo) provoca que en la región donde el ángulo de esparcimiento posee valores entre 90° y 120° la luz-cielo posea la mayor TCC. En dicha región se alcanzan los mínimos en las funciones de fase mostradas en la figura 5.16. Para ángulos inferiores a 90° la TCC disminuye a medida que decrece el ángulo de esparcimiento; y para ángulos superiores a 120° , la TCC disminuye a medida que crece el ángulo de esparcimiento, aunque de forma menor.

El conocimiento de la elevación solar y el ángulo de esparcimiento no determinan de forma unívoca el color de la luz-cielo en días despejados, pues también hemos de tener en cuenta la masa óptica de cada punto medido sobre la bóveda celeste así como el contenido de partículas en la atmósfera. Así un punto cercano al horizonte, aun poseyendo un ángulo de esparcimiento entre 90° y 120° , no tendrá una TCC máxima pues, al ser su masa óptica elevada, la atenuación en las cortas longitudes de onda será mayor que en otros puntos de la bóveda, que junto al esparcimiento múltiple causarán la pérdida de la tonalidad azul, adquiriendo TCC bajas.

Volviendo a las figuras 5.14 y 5.15, se aprecia cierta simetría, pero la evolución no es totalmente similar para ángulos menores y mayores de 90° . Incluso el máximo de TCC (azules más puros) no se alcanza para ángulos 90° , sino para ángulos comprendidos entre 95° y 100° , encontrándose, para este intervalo de ángulos de esparcimiento, la mayor dispersión en valores de TCC. Si utilizamos mireds para expresar la TCC, la figura obtenida es la 5.17, y de nuevo se aprecia que el intervalo del ángulo de esparcimiento para el que se obtienen azules más puros es el comprendido entre 95° y 100° .

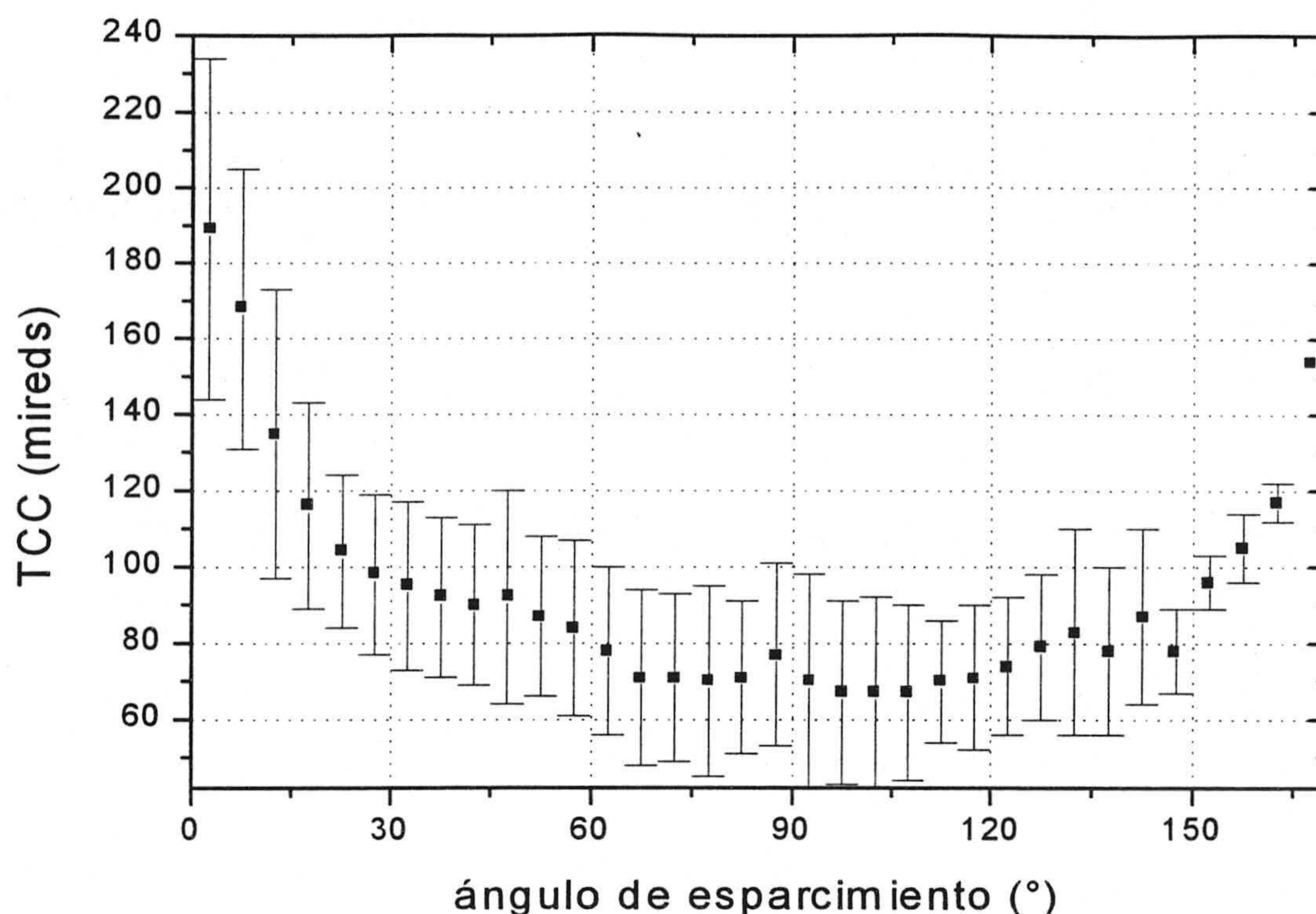


Figura 5. 17.- Evolución de la TCC, expresada en mireds, con el ángulo de esparcimiento. Los cuadrados se corresponden con los promedios y las barras con desviaciones estándar.

La figura 5.18 nos muestra la distribución de TCC al hacer un barrido a lo largo del meridiano y antimeridiano solar, para varias elevaciones solares. Aunque dichas medidas se correspondan con días distintos, podemos advertir un ligero aumento en los valores de TCC al disminuir la elevación solar, aunque no de forma generalizada. Asimismo se aprecia un mismo comportamiento en el meridiano solar: mínima TCC en el horizonte, incremento de su valor a medida que crece la elevación en el cielo, suave decrecimiento para posiciones próximas a la posición solar y crecimiento hasta posiciones en las que el ángulo de esparcimiento se sitúa entre 90° y 120° , donde se obtiene la máxima TCC en el meridiano solar. En el horizonte perteneciente al meridiano solar la TCC es menor que la encontrada en la misma posición del horizonte pero en el antimeridiano solar.

En el antimeridiano solar la dispersión en los valores de TCC es mayor. Aunque existe cierta coincidencia en la TCC cercana al horizonte, que apenas varía con la elevación solar, el punto donde se encuentra el máximo de TCC en el antimeridiano varía de posición con la elevación solar, formando un ángulo con el Sol entre 90° y 125° , de acuerdo con el estudio teórico de Sekine [1991]. Con nuestras medidas no podemos precisar mejor donde se halla dicho máximo, pues el intervalo entre posiciones consecutivas es de 15° . Una posible solución pasa por escoger más puntos de medidas sobre la bóveda celeste, a costa de incrementar enormemente el tiempo en realizar un barrido completo, durante el cual la posición del Sol puede variar de forma considerable. Nuestra elección es una solución de compromiso entre el tiempo de medida y el número de puntos medidos.

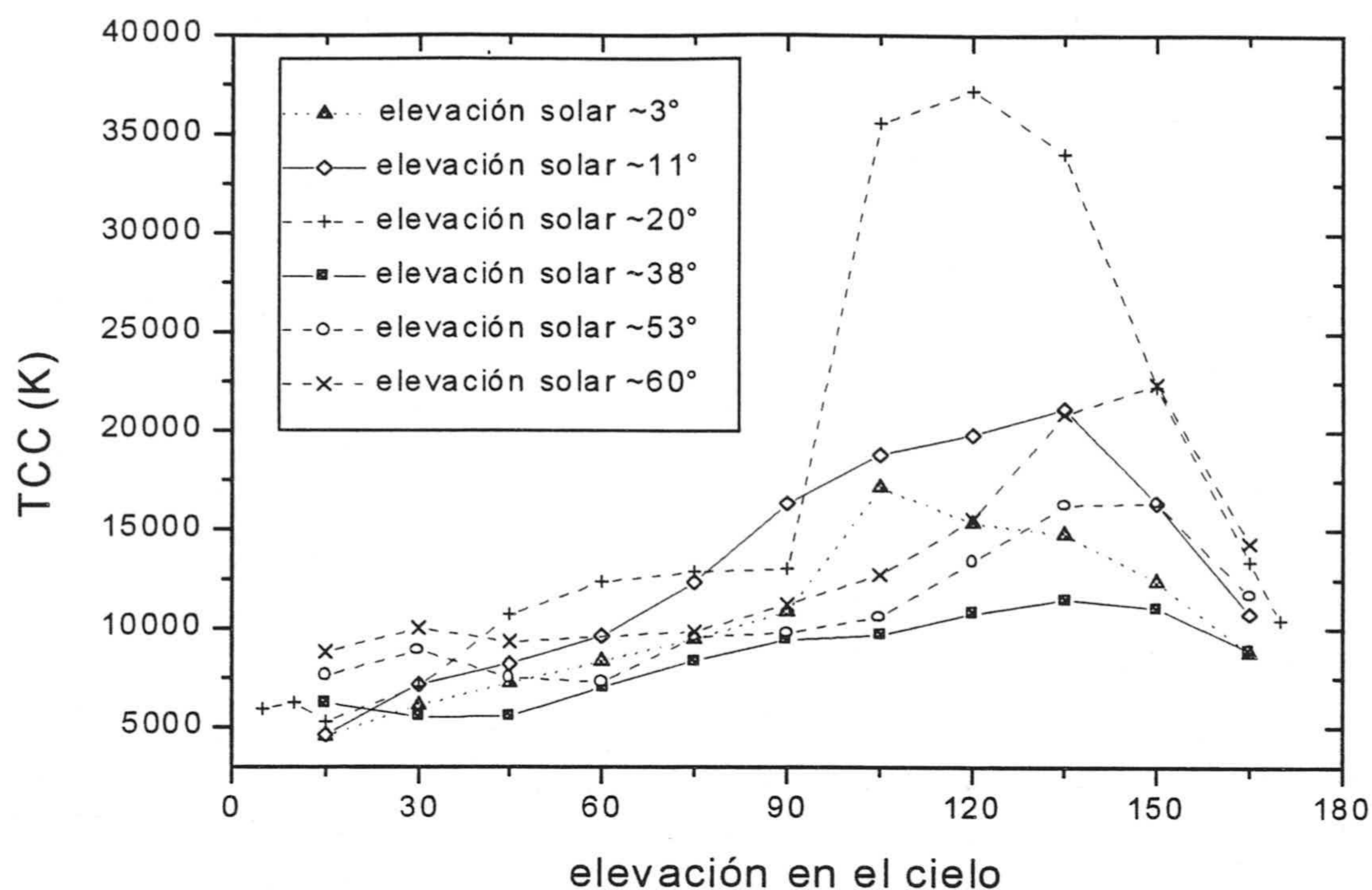


Figura 5. 18.- Distribución de TCC de la luz-cielo en el meridiano y antimeridiano solar para varias elevaciones solares correspondientes a distintos días de medida. (Las elevaciones superiores a 90° indican posiciones en el antimeridiano solar).

En la figura 5.19 mostramos la variación de la TCC a lo largo de los meridianos perpendiculares correspondientes a los presentados en la figura 5.18. Es llamativo asimismo la inversión que se produce en el valor de la TCC con la elevación solar en esta figura: a medida que aumenta la elevación solar aumenta el valor de la TCC máximo alcanzado para las tres elevaciones solares menores (2,5°, 10° y 18°). El proceso es inverso para las tres elevaciones solares mayores (39°, 54° y 61°): a medida que aumenta ésta la TCC máxima es mayor.

La misma asimetría apreciada en los diagramas cromáticos presentados anteriormente (figuras 5.7, 5.9, 5.11 y 5.13) es la que podemos observar ahora, reflejada en la TCC. Dicha asimetría es más sobresaliente para bajas elevaciones solares. De nuevo advertimos como la máxima TCC (azules con mayor pureza colorimétrica) no se obtiene en el cenit.

Parte de esta asimetría podría achacarse al tiempo empleado en adquirir las medidas sobre los meridianos. Sin embargo durante los cuatro minutos empleados en realizar dicho barrido, el Sol puede desplazarse entre 0,5° para elevaciones solares altas y sólo un 1° para bajas elevaciones solares. Este desplazamiento, comparable con la incertidumbre en la selección del acimut de observación del telescopio, es despreciable y por tanto no es el causante de la asimetría observada en las características colorimétricas de la luz-cielo en días despejados.

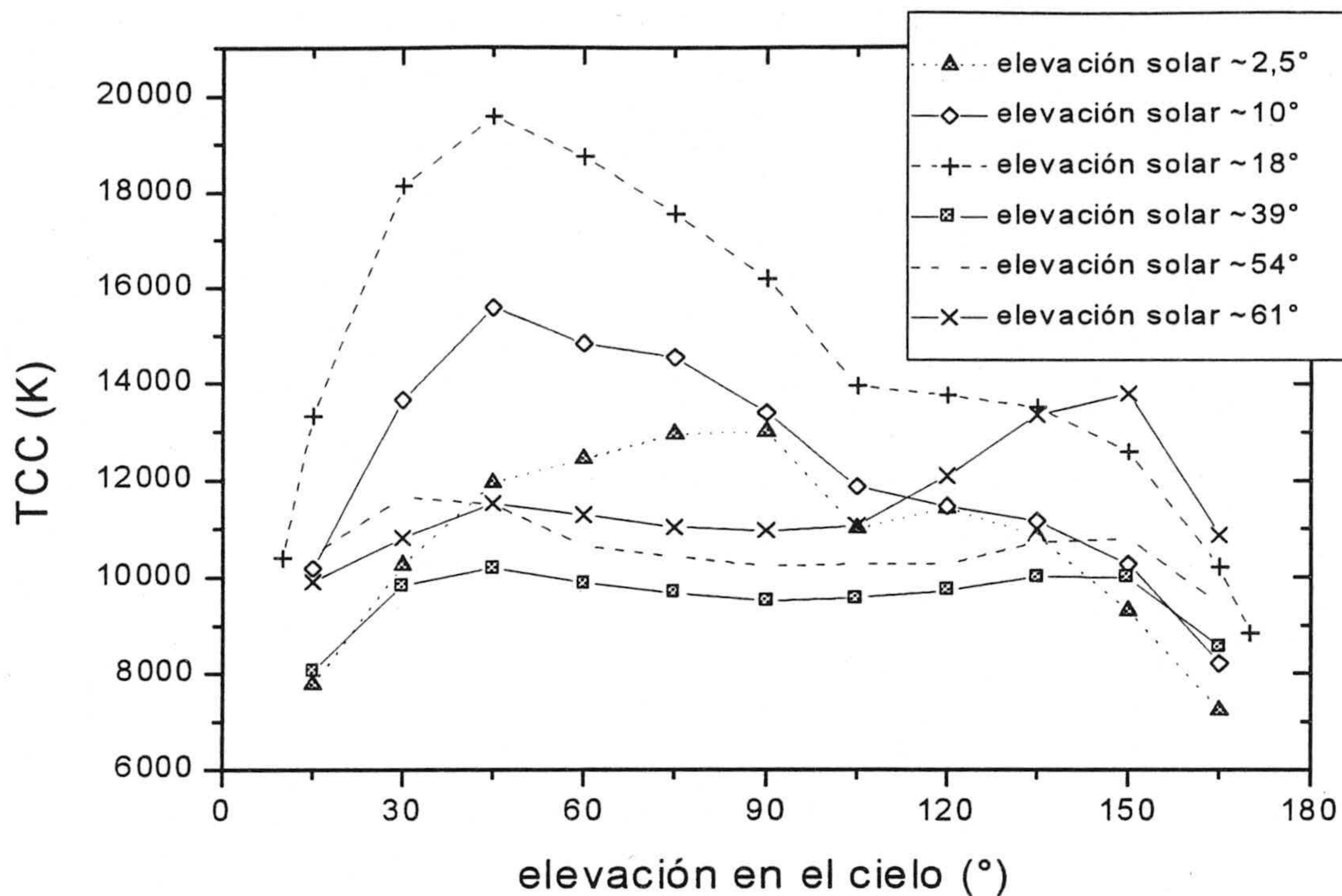


Figura 5. 19.- Distribución de TCC de la luz-cielo en el meridiano perpendicular al meridiano solar, para distintas elevaciones solares correspondientes a los mismos días de medida que la figura 5.18.

La única explicación plausible a esta incuestionable asimetría consiste considerar que el contenido de aerosoles no es idéntico en todos los puntos en los que hemos realizado las medidas. Sin embargo todos los modelos que intentan aproximar el comportamiento de la atmósfera utilizan esta supuesta simetría como elemento simplificador (entre otros Perez *et al.* [1992], Prasad *et al.* [1987], Hooper *et al.* [1987], Harrison y Coombes [1988], El Diasty [1989]). Nuestros resultados manifiestan que no podemos simplificar en extremo el comportamiento de la atmósfera, justificando este hecho, por sí sólo, cualquier trabajo experimental que se realice. Otros autores, en otros ámbitos, han puesto de manifiesto el poco parecido del comportamiento de la atmósfera a un comportamiento ideal: Lee [1998], estudiando el estado de polarización del cielo, ya revela el alejamiento de la atmósfera real con respecto a una atmósfera *idealizada*.

Por último hemos agrupado, en las figuras 5.20-21, el comportamiento de la TCC en el meridiano solar y en su perpendicular para 2 elevaciones solares distintas (~6° y ~49°) realizadas en dos días distintos (5/Ago/98 y 25/Ago/98 respectivamente), en donde quedan resumidas algunas de las características de la luz-cielo previamente analizadas. Hay que resaltar que en ambas figuras el único punto en común entre el meridiano solar y su perpendicular es precisamente el cenit. Debido al intervalo de tiempo existente entre la medida correspondiente al cenit en el meridiano solar y la del cenit en el meridiano perpendicular, estimado en unos 6-7 minutos, existe una ligera diferencia en el valor de la

TCC. Durante este tiempo, el Sol se ha movido más de $1,3^\circ$ en la primera figura y $0,9^\circ$ en la segunda provocando diferencias del orden de 1.000 K y 70 K respectivamente.

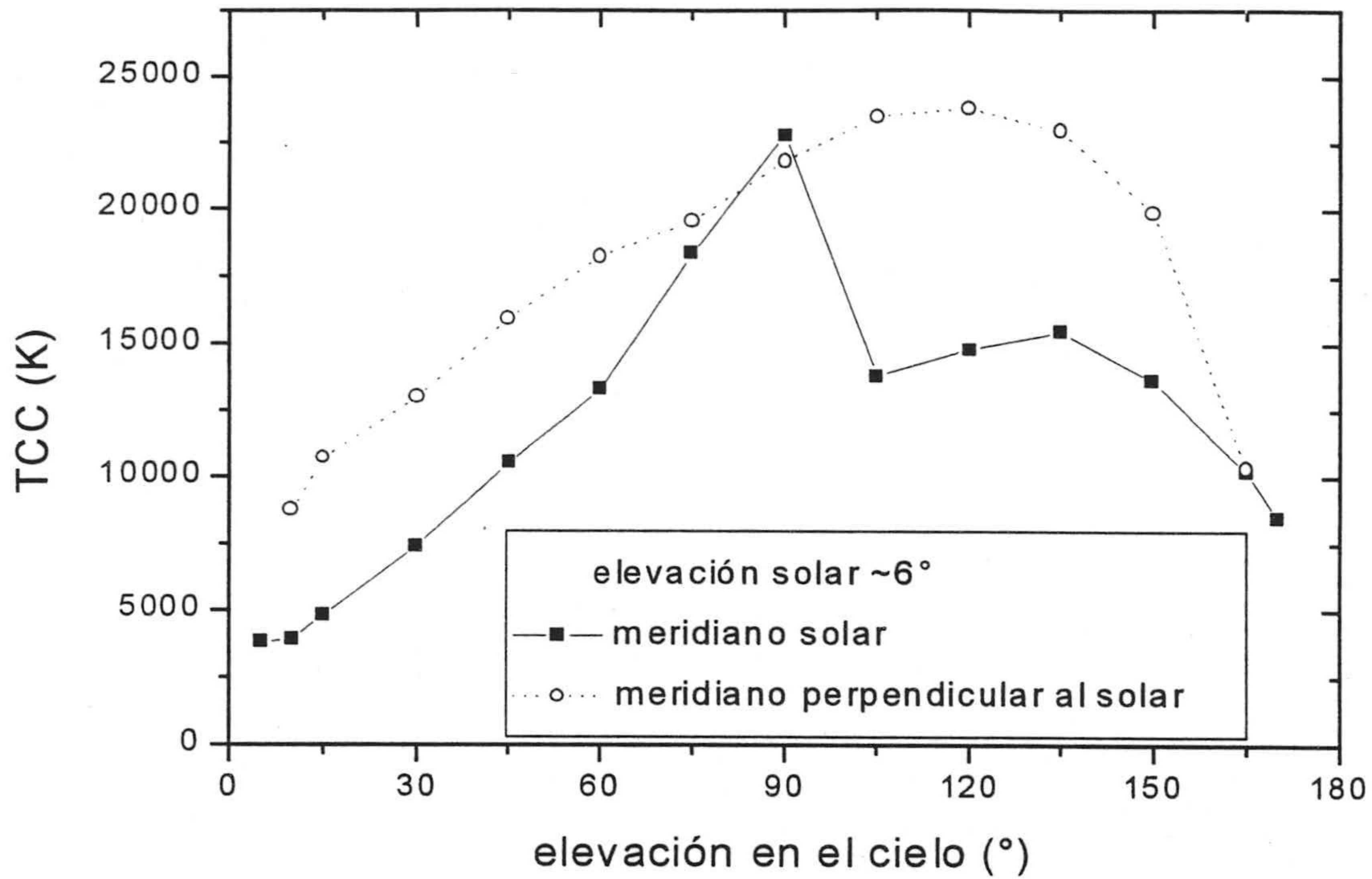


Figura 5.20.- Evolución de la TCC en un barrido en el meridiano solar y su perpendicular realizado el 5/Ago/98. (Las elevaciones superiores a 90° indican posiciones en el antimeridiano).

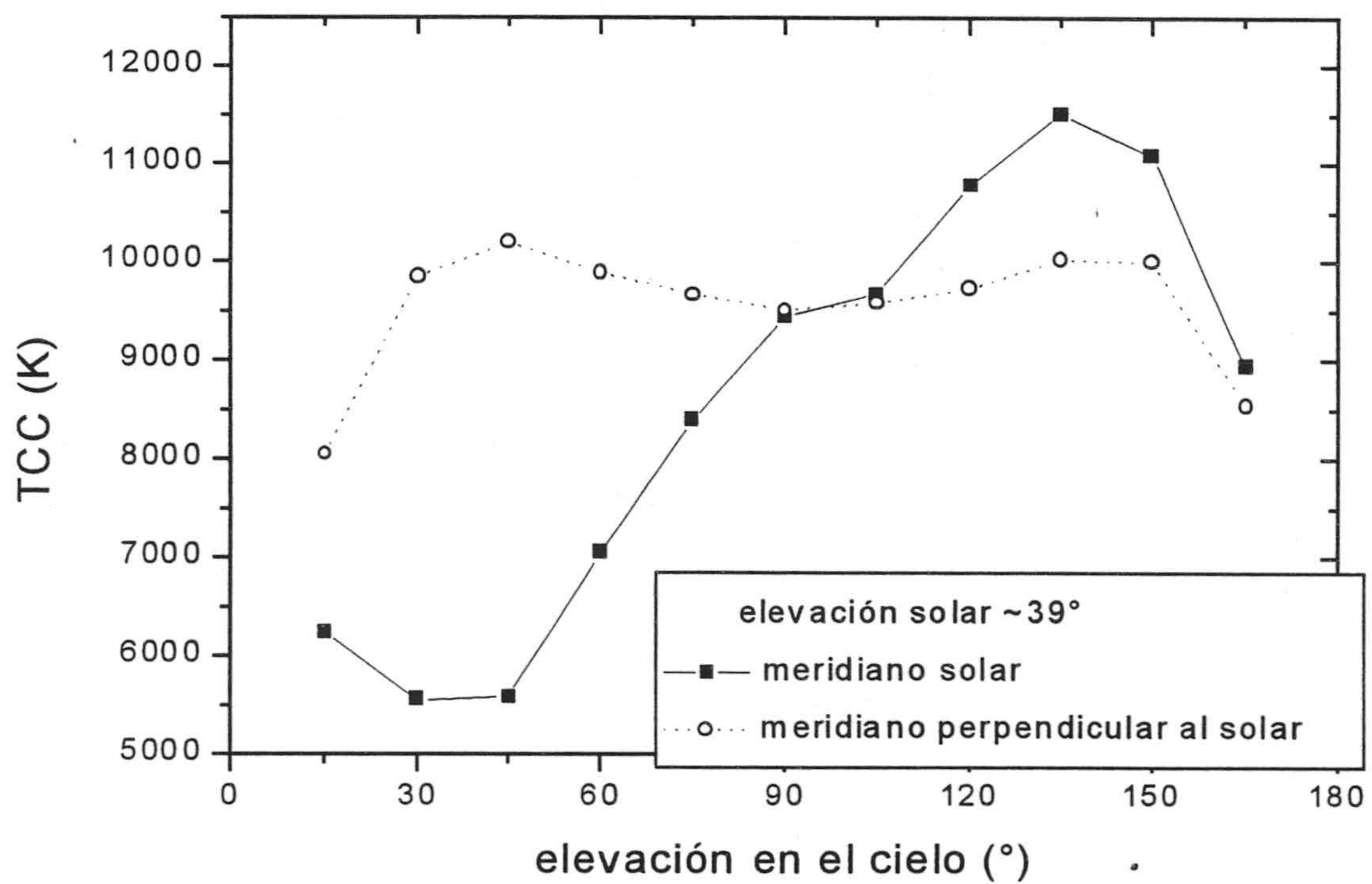


Figura 5. 21.- Evolución de la TCC en un barrido en el meridiano solar y su perpendicular realizado el 25/Ago/98.

5.5. Características fotométricas

La magnitud fotométrica asociada con la radiancia espectral $L_e(\lambda)$ es la luminancia L_v estando relacionadas ambas mediante una ecuación integral:

$$L_v = K_m \int_{380}^{780} L_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

De la misma forma que existía una relación lineal casi perfecta entre iluminancia y la irradiancia integrada en el conjunto de medidas de luz-día, existe una relación similar entre la luminancia y la radiancia integrada (en 380-780 nm) en el conjunto de medidas de luz-cielo en días despejados, tal y como se observa en la figura 5.22, en donde hemos utilizado la escala logarítmica en ambos ejes. La relación lineal, para nuestras medidas experimentales, que liga ambas magnitudes (la radiancia expresada en $W/(sr\ m^2)$ y la luminancia expresada en cd/m^2), con un coeficiente de correlación de 0,99957, es:

$$E_v = -281,06497 + 204,46124 \cdot \int_{380}^{780} E_e(\lambda) d\lambda$$

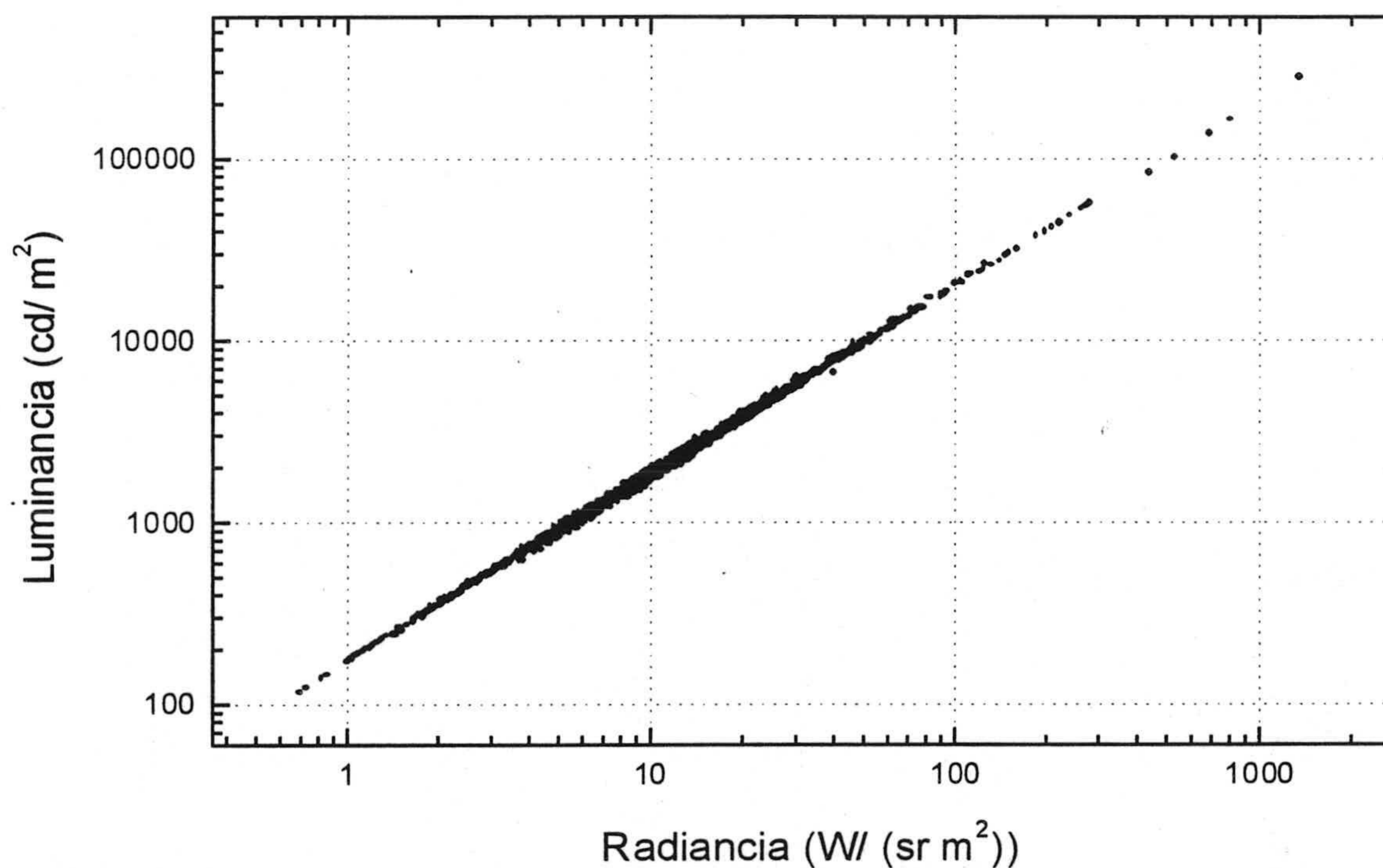


Figura 5. 22.- Relación entre luminancia y radiancia (integrada entre 380 y 780 nm) para las 1.567 medidas espectrales de luz-cielo en días despejados.

También hemos analizado la eficacia luminosa, en este caso su relación con el ángulo de esparcimiento, en la figura 5.23. A medida que nos alejamos de la posición solar la eficacia luminosa decrece, obteniéndose un mínimo en torno a los 90°. La gran variabilidad existente se debe a que hemos incluido todas las medidas con independencia del valor de la elevación solar.

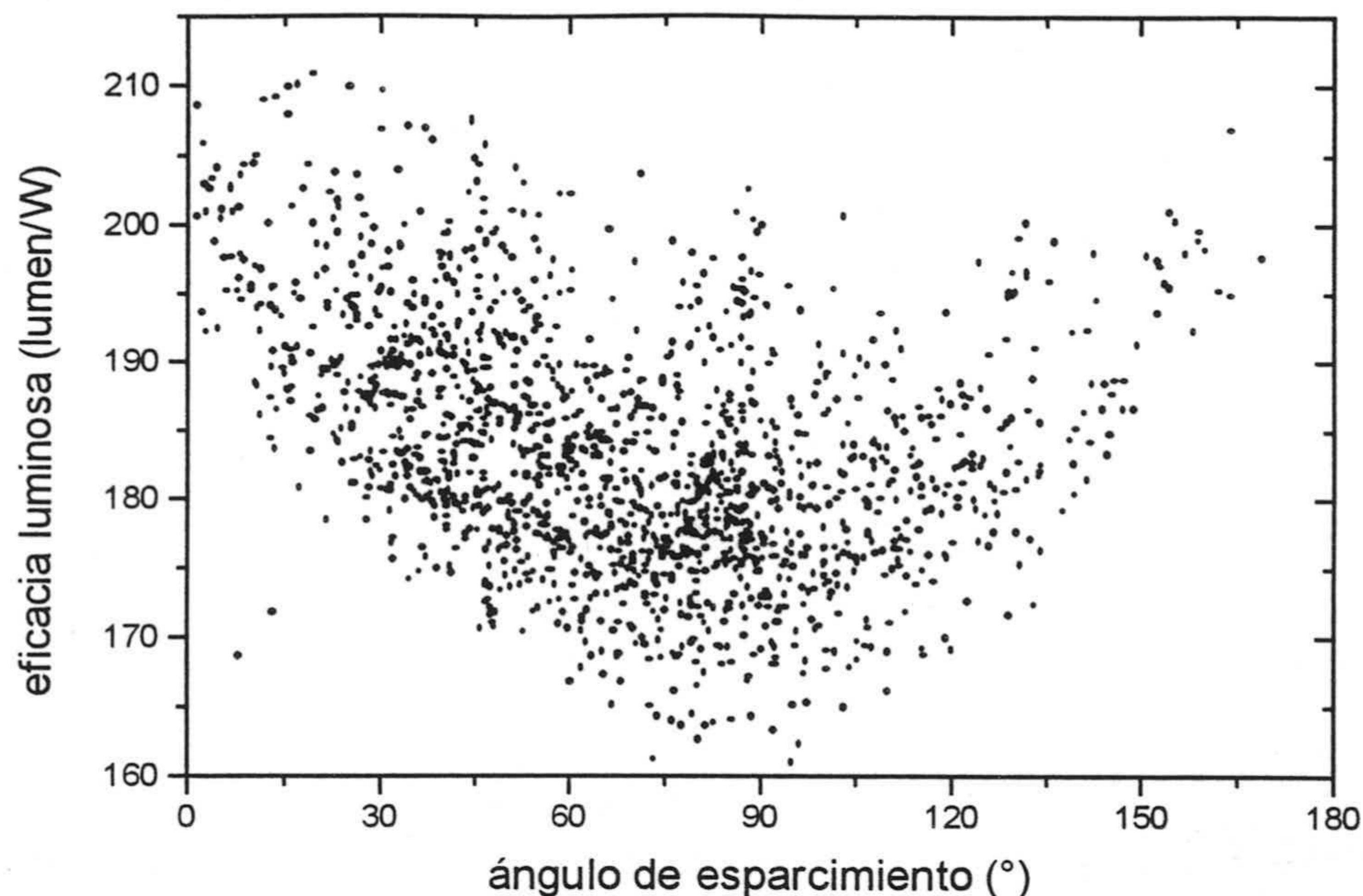


Figura 5. 23.- Eficacia luminosa (cociente entre luminancia y radiancia integrada en el rango espectral 380-780 nm) en función del ángulo de esparcimiento.

5.6. Análisis de autovectores

Teniendo en cuenta que el rango espectral, en nuestras medidas de luz-cielo, está limitado al visible (380-780 nm), únicamente podremos realizar el análisis de autovectores en esta región espectral. Con las 1.567 distribuciones de radiancia espectral obtenemos sus autovectores correspondientes con un intervalo espectral de 5 nm (similar al elegido en las medidas de luz-día), mostrados en la figura 5.24.

Como se puede observar en la figura 5.24 el segundo se corresponde con una variación amarillo-azul, resultado que confirma los obtenidos en el conjunto de curvas de luz-día. Sin embargo de nuevo no podemos afirmar que el perfil espectral del tercer autovector proporcione una variación verde-púrpura para esta campaña de medidas. Discutiremos más detalladamente esta variación en un capítulo posterior (capítulo 7).

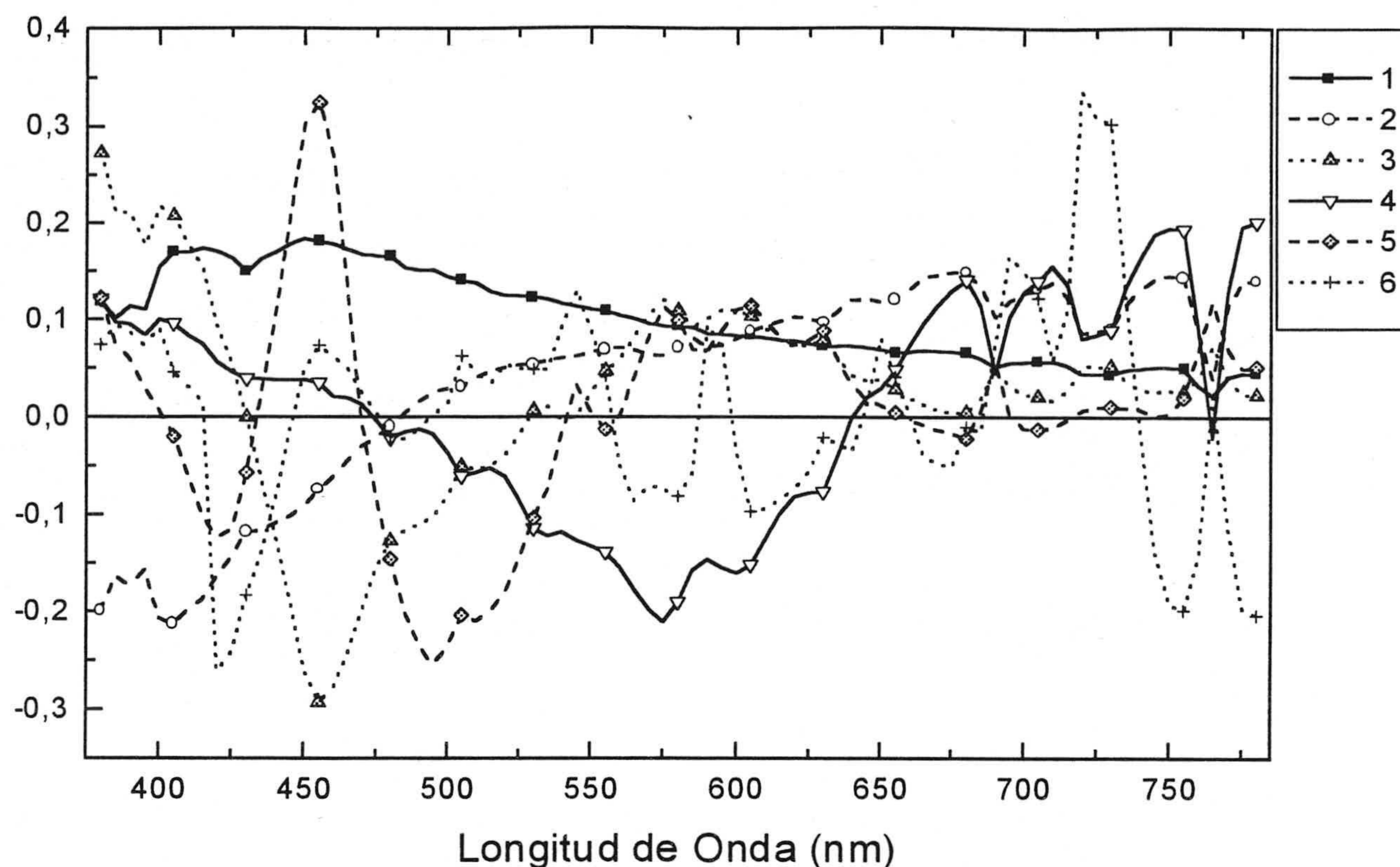


Figura 5. 24.- Seis primeros autovectores en el rango espectral 380-780 nm, correspondientes al conjunto formado por las 1.567 medidas de luz-cielo adquiridas en Granada.

Podemos realizar una comparación muy útil entre el perfil espectral del vector promedio correspondiente al conjunto de medidas de luz-cielo con el de nuestras medidas de luz-día y el de la CIE, mostrados en la figura 5.25. Se aprecia la patente diferencia entre el correspondiente a luz-día y a luz-cielo de Granada. Es obvio que en la mayoría de medidas de luz-día hemos medido la luz procedente del Sol que produce un *aplanamiento* del perfil espectral en la irradiancia global medida. Sin embargo en las medidas de luz-cielo sólo estamos recogiendo la luz esparcida por la atmósfera y por ello su contenido en las cortas longitudes de onda es superior. La figura analizada nos permite, de nuevo, observar el gran parecido espectral entre el vector de la CIE y el de luz-día de Granada.

La contribución de los autovalores a la traza de la matriz de correlación en el conjunto de medidas de luz-cielo se muestra en la tabla V.1. De nuevo encontramos el mismo resultado obtenido en el conjunto de medidas de luz-día: con un número pequeño de vectores se consigue una gran contribución. El valor de la contribución es bastante similar al encontrado en el conjunto de medidas de luz-día (tabla IV.6, rango espectral 380-780 nm) aunque ligeramente inferior. Para las medidas de luz-cielo se necesitan 6 vectores para conseguir una contribución superior al 99,99%; recordemos que en las medidas de luz-día se necesitaban 5 vectores. Esta ligera disminución en la contribución está relacionada con la variedad espectral encontrada en las medidas de luz-cielo: existe mayor extensión en el diagrama cromático y el rango de TCC abarcado es superior. Este resultado

nos manifiesta la mayor constancia en los perfiles espectrales de la luz-día que en los de luz-cielo en días despejados.

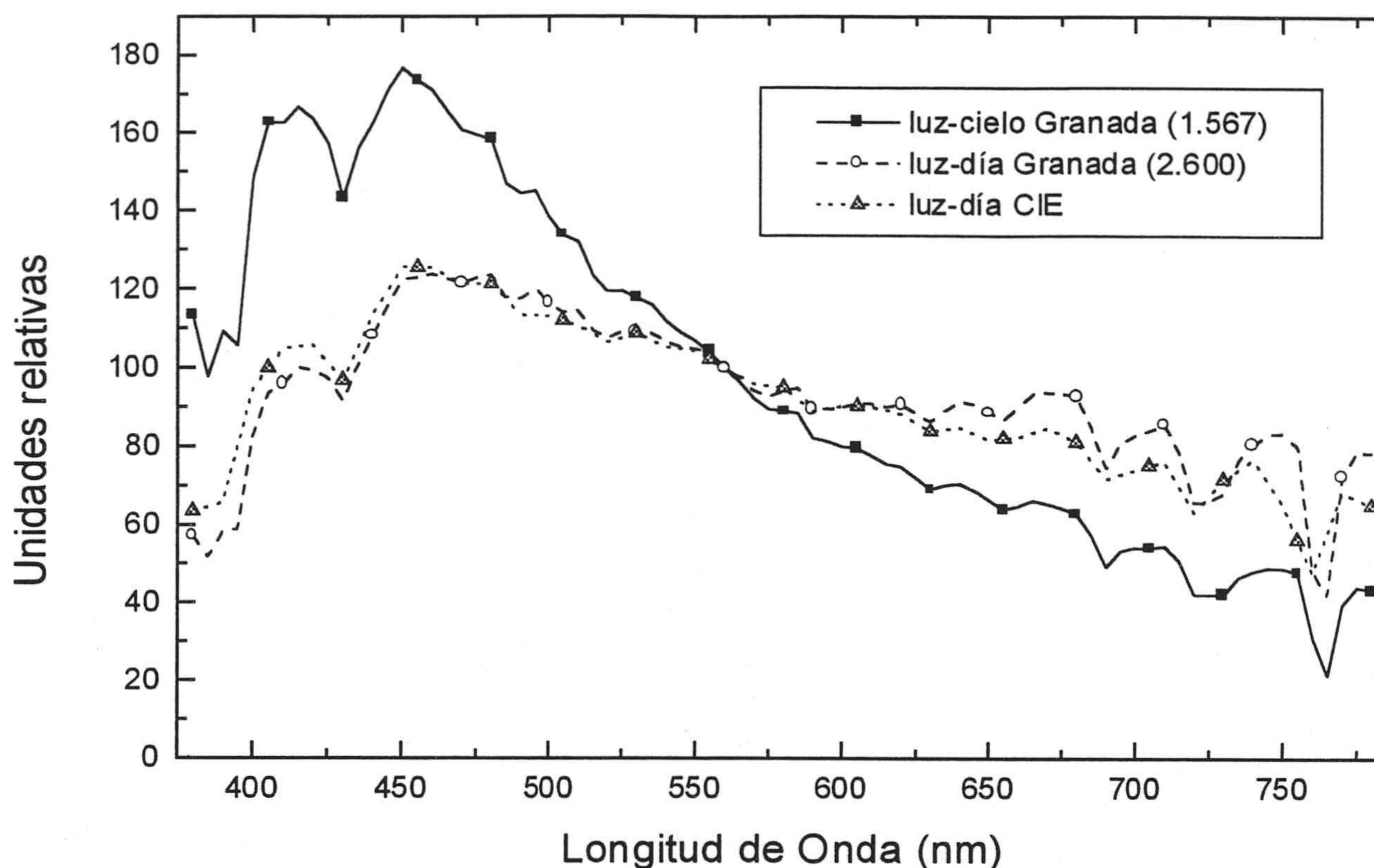


Figura 5. 25.- Distribución espectral de 3 vectores promedio: campaña de luz-cielo con cielos despejados en Granada, campaña de luz-día en Granada, luz-día CIE.

380-780 nm	
1	98,069
2	99,761
3	99,895
4	99,961
5	99,988
6	99,995

Tabla V. 1.- Contribución a la traza de los autovalores, en %, correspondientes al conjunto de medidas de luz-cielo en días despejados.

5.7. Curvas de luz-cielo estándar

Si evaluamos los valores triestímulo de los tres primeros autovectores obtenidos anteriormente y aplicamos el método de la CIE para reconstruir curvas espectrales a partir de coordenadas de cromaticidad, teniendo en cuenta la ecuación del *locus* de nuestras medidas (dibujado en la figura 5.1), obtenemos la ecuación que nos relaciona los escalares M_1 y M_2 con las coordenadas de cromaticidad x_C e y_C (subíndice C para denotar luz-Cielo):

$$M_1 = \frac{-0,4055 - 8,8906x_C + 9,8859y_C}{0,3319 + 2,5002x_C - 2,3968y_C}$$

$$M_2 = \frac{-0,2670 + 8,8312x_C - 7,4593y_C}{0,3319 + 2,5002x_C - 2,3968y_C}$$

Utilizando este método de reconstrucción (método CIE a partir de las coordenadas de cromaticidad de las curvas originales) se consigue un GFC promedio de 0,9900. Un 53,5% de las reconstrucciones alcanzan la calidad de aceptables, y sólo un 21,4% y un 1,91% poseen la calidad de buenas y excelentes respectivamente. Estos porcentajes obtenidos son inferiores a los mostrados en el capítulo anterior al estudiar las 2.600 medidas de luz-día. La justificación de esta menor calidad en las reconstrucciones, mediante el uso del método propuesto por la CIE, estriba en el metamerismo existente entre las curvas espectrales que conforman nuestro conjunto de medidas. Dado que a partir de una coordenadas de cromaticidad generamos una curva espectral que posee precisamente dichas coordenadas de cromaticidad, la existencia de cierto grado de metamerismo provoca que la curva reconstruida pueda no parecerse espectralmente a la curva original.

Si en lugar de reconstruir las curvas a partir de las coordenadas de cromaticidad lo hacemos utilizando como única información inicial la TCC, también podemos reconstruir las curvas usando el método CIE. En nuestro caso usaremos la ecuación que relaciona la TCC, expresada en K, con la coordenada de cromaticidad x , para las 1.567 medidas de luz-cielo:

$$x_C = 0,23543 + \frac{2,38677 \cdot 10^2}{TCC_C} + \frac{2,12093 \cdot 10^6}{TCC_C^2} - \frac{2,79230 \cdot 10^9}{TCC_C^3}$$

y la del *locus* de estas medidas en el diagrama cromático CIE-1931:

$$y_C = -0,2477 + 2,72203 x_C - 2,77935 x_C^2$$

Este método nos permite reconstruir curvas espectrales de luz-cielo en días despejados en el rango 380-780 nm con cualquier TCC. Así, por ejemplo, en la figura 5.26 mostramos los perfiles espectrales relativos de 7 curvas de luz-cielo en días despejados con TCC de 4.500, 5.500, 6.500, 7.500, 10.500, 20.000 y 100.000 K respectivamente. En un

capítulo posterior (*Capítulo 7*) compararemos los perfiles espectrales de estas curvas, obtenidas a partir del conjunto de medidas de luz-cielo, con las correspondientes al conjunto de medidas de luz-día y al conjunto de medidas de luz-día crepusculares.

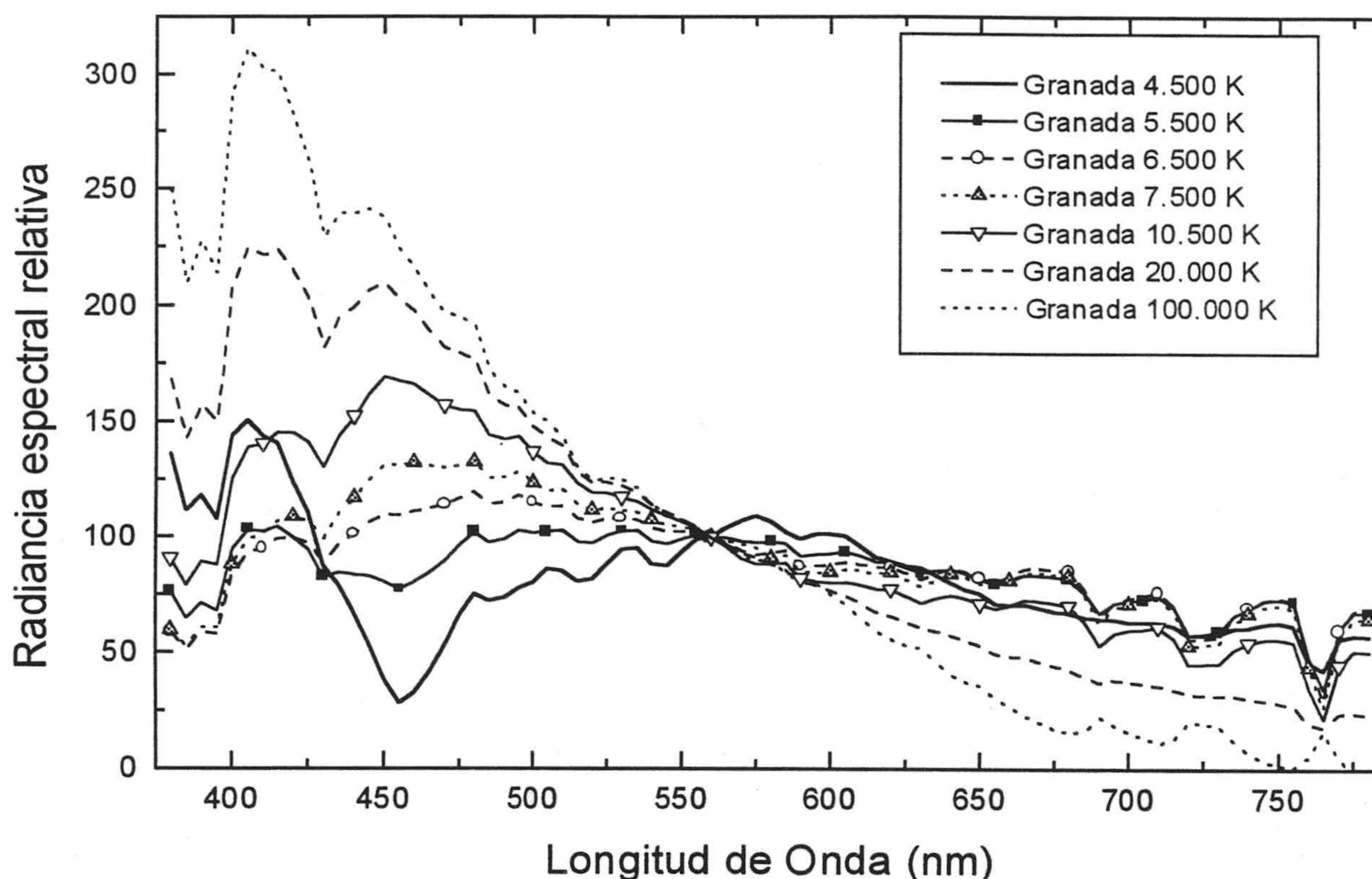


Figura 5. 26.- Distribución espectral de 7 curvas de luz-cielo con diferentes TCCs, haciendo uso de los vectores propios de Granada, en el rango espectral 380-780 nm, y normalizadas en 560 nm.

5.8. Calidad de las reconstrucciones

Usando la ecuación 4.5, que hace uso de la propiedad de ortogonalidad entre autovectores, hemos llevado a cabo la reconstrucción de las 1.567 curvas espectrales de luz-cielo con distinto número de vectores (de 1 a 10), obteniendo los valores de GFC promedio mostrados en la figura 5.27. Como era previsible la calidad media en las reconstrucciones aumenta a medida que incrementamos el número de vectores utilizados.

Para que la calidad promedio sea “buena” el número de vectores utilizados debe ser de al menos 3, y para que sea “excelente” hacen falta más de 5 vectores, resultado análogo al analizar la calidad de las reconstrucciones de las curvas de luz-día en el intervalo espectral 380-780 nm. En la tabla V.2 hemos incluido el porcentaje de reconstrucciones cuyo GFC supera los tres valores de GFC elegidos con un número variable de vectores utilizados entre 1 y 8.

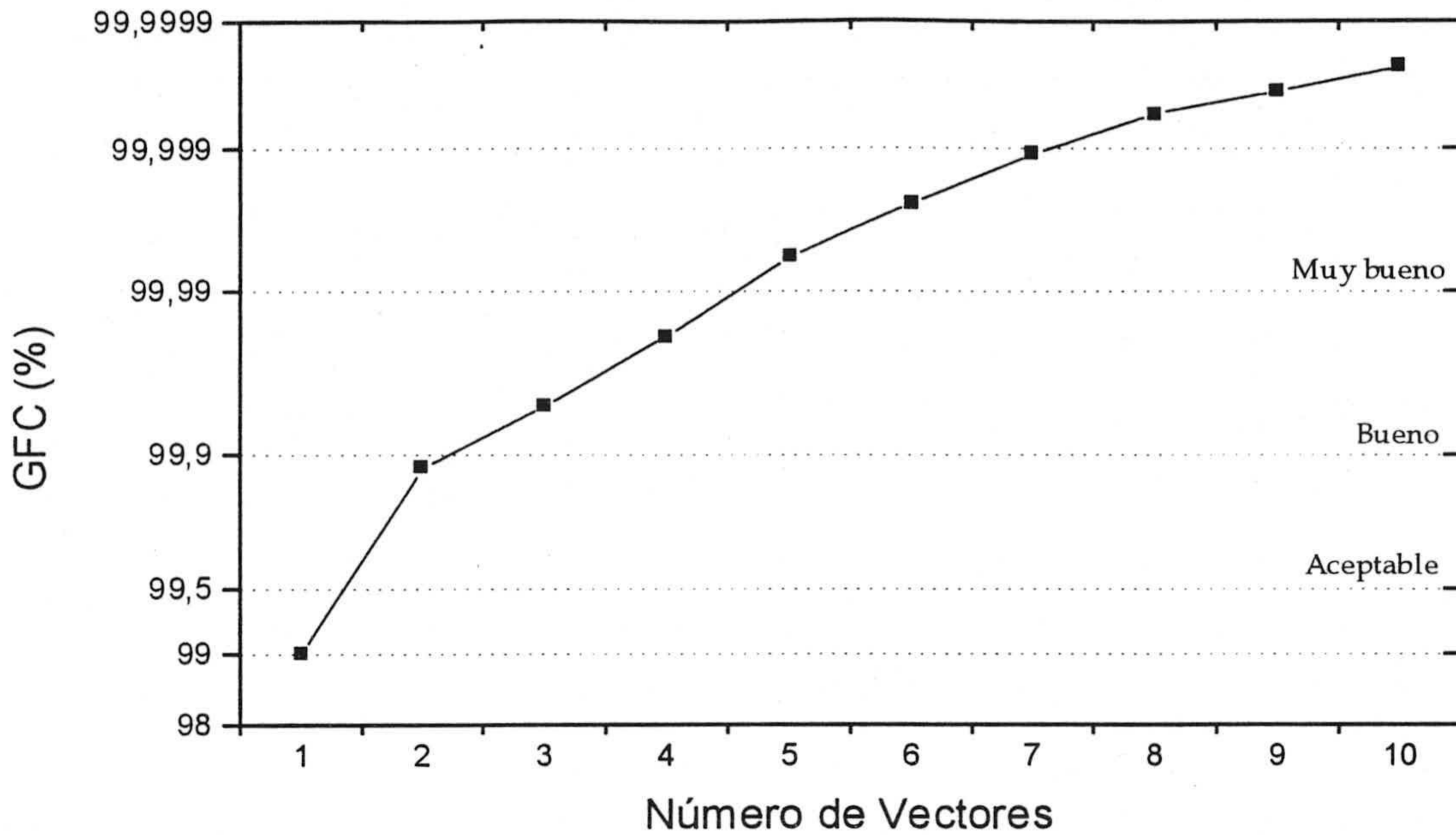


Figura 5. 27.- GFC promedio, utilizando en la reconstrucción un número de autovectores entre 1 y 10, para las 1567 medidas de luz-cielo en días despejados.

Rango espectral	Número de autovectores utilizados							
	1	2	3	4	5	6	7	8
380-780	55,5	98,1	99,5	100				
(81)	15,8	61,6	89,0	98,7	99,9	100		
	0	1,5	17,3	46,8	85,1	96,4	99,3	100

Tabla V. 2.- Porcentaje de reconstrucciones que superan los 3 valores de GFC elegidos en la tabla IV.4, con distinto número de vectores (1 a 8). Entre paréntesis se ha incluido el número de valores por curva.

Consultando los resultados mostrados en esta tabla comprobamos que el número de vectores necesario para que más de un 95% de las reconstrucciones superen la calidad “aceptable”, “buena” y “excelente” es de 2, 4 y 6 respectivamente, difiriendo este resultado, de nuevo, de las recomendaciones de la CIE (3 vectores). Si comparamos estos resultados con los referidos a las curvas de luz-día en el mismo intervalo espectral (380-780 nm) comprobamos que en ese conjunto la calidad era ligeramente superior a la encontrada en el conjunto de medidas de luz-cielo, debido precisamente a que la variedad colorimétrica (y por tanto espectral) en ese conjunto (luz-día) es ligeramente inferior y por tanto se necesitan menor número de vectores.

Hemos completado este análisis espectral con el estudio de la semejanza colorimétrica en este tipo de reconstrucciones espectrales y su relación con el GFC. Así hemos incluido en la figura 5.28 la relación entre ambas magnitudes: se requieren cinco vectores para que la distancia colorimétrica media sea inferior a 0,001, y ocho para ser inferior a 0,0001. Por comparación las elipses de MacAdam [1942, 1943] en

la región cromática abarcada por nuestras medidas poseen una longitud promedio del semieje mayor de 0,00293 y una longitud promedio del semieje menor de 0,00094.

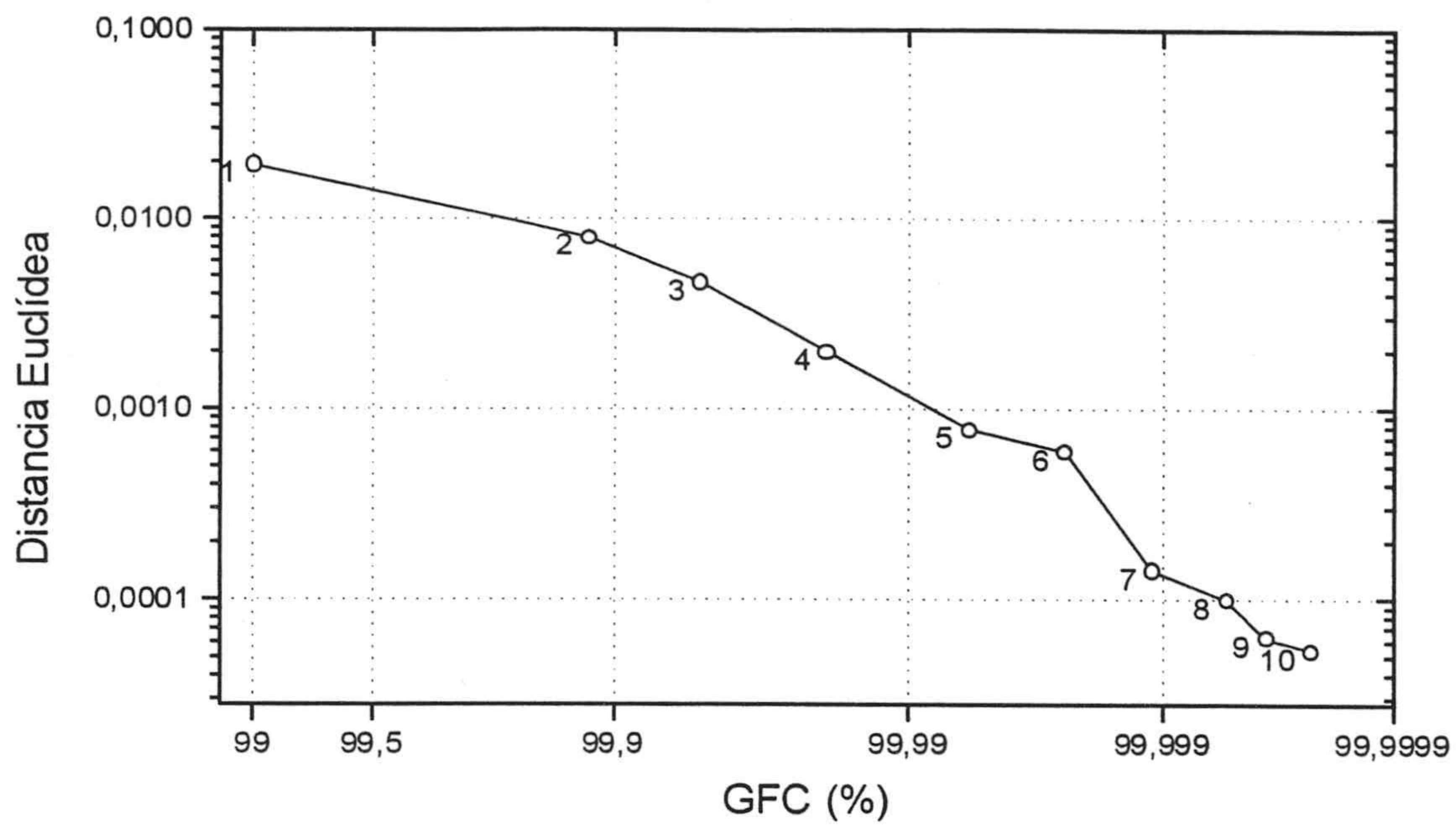


Figura 5. 28.- Distancia Euclídea promedio entre coordenadas de cromaticidad en función del GFC promedio.

Capítulo 6:

Medidas de luz-día en crepúsculos

“Cuando el sol se oculta las sierras de bruma y rosa,
y hay en el ambiente una colosal sinfonía de religioso recogimiento,
Granada se baña de oro y tules rosas y moradas”
Primeros escritos, Federico García Lorca

6.1. Coordenadas de Cromaticidad

A pesar de que las 1.485 medidas de luz-día durante crepúsculos hayan sido adquiridas bajo distintas condiciones atmosféricas para estudiar la evolución temporal de sus características colorimétricas, fotométricas y espectrales, es interesante observar la disposición de las coordenadas de cromaticidad de todas ellas. Así, en la figura 6.1, mostramos, en el diagrama cromático CIE 1931 dichas coordenadas y en la figura 6.2 en el diagrama cromático CIE 1976.

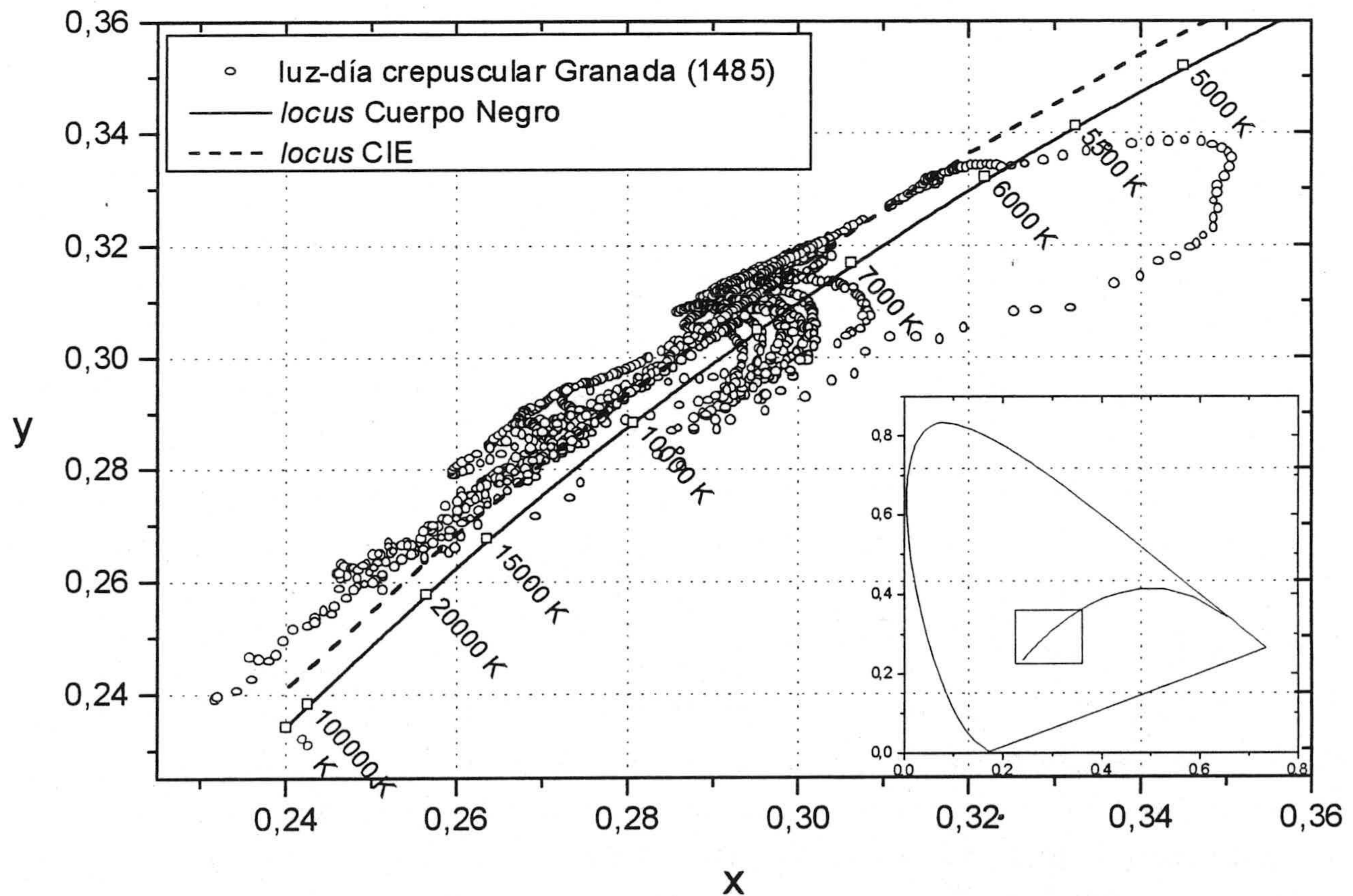


Figura 6. 1.- Coordenadas de cromaticidad, en el diagrama cromático CIE 1931, correspondientes a las 1.485 medidas de luz-día durante crepúsculos realizadas en Granada.

La región cromática abarcada por estas 1.485 medidas difiere sustancialmente de las de luz-día (figura 4.2) y luz-cielo (figura 5.1) mostradas en capítulos anteriores. Es interesante el hecho de que aunque el número de crepúsculos medidos haya sido solamente 16, (3 con cielos totalmente cubiertos, 9 con cielos totalmente despejados, y 4 en condiciones mixtas), con una extensión temporal de 7 meses, la variación púrpura-verde observada es mucho más amplia que en las otras dos campañas realizadas (luz-día y luz-cielo). Es precisamente durante los crepúsculos cuando la variación cromática en la luz-día recibida sobre una superficie horizontal es mayor pues la luz procedente del Sol atraviesa mayores cantidades de atmósfera (masas ópticas > 20), acentuándose los fenómenos de absorción y esparcimiento.

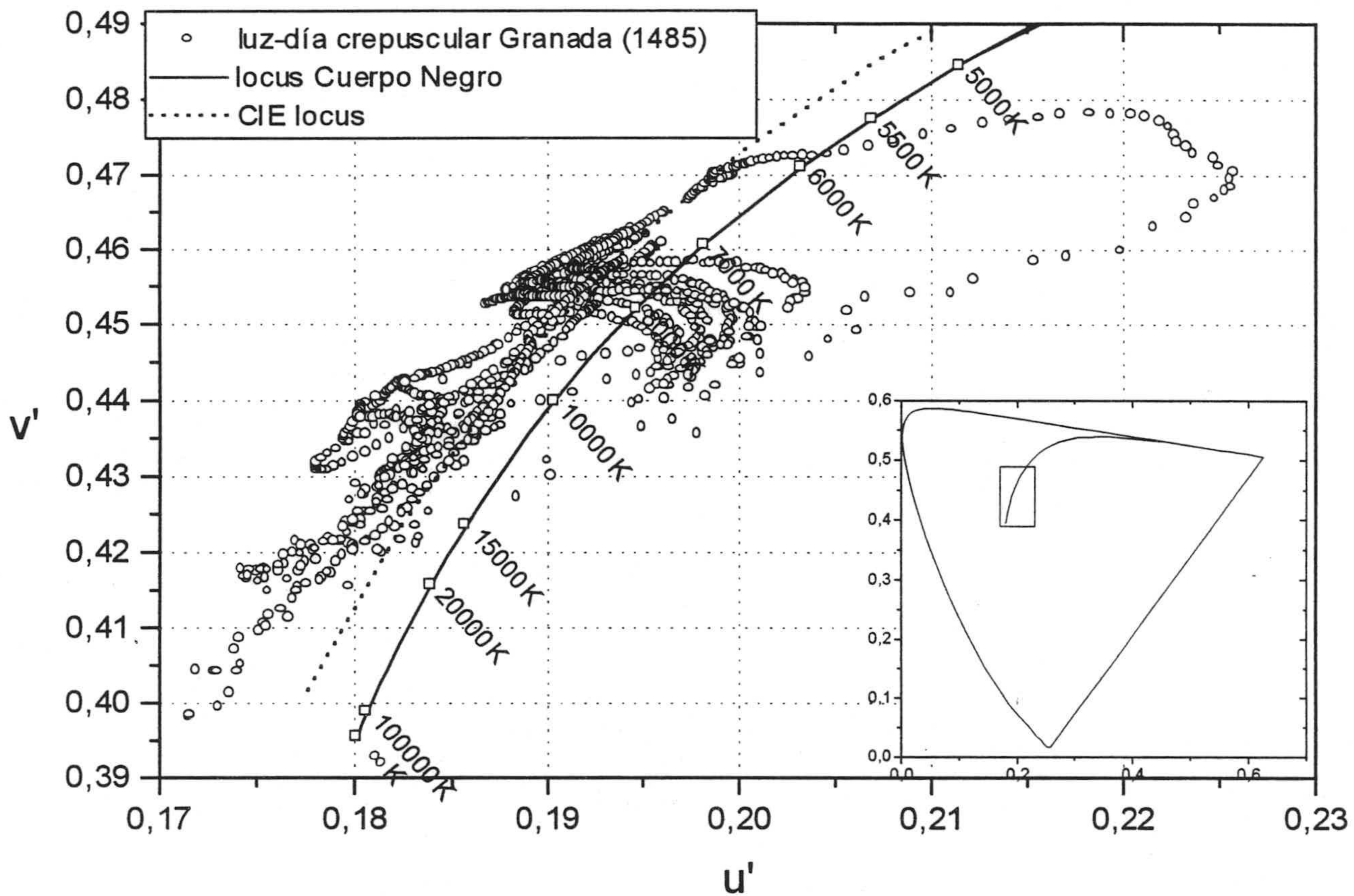


Figura 6. 2.- Coordenadas de cromaticidad de las 1.485 medidas de luz-día durante crepúsculos en el diagrama cromático CIE 1976.

Existe un gran número de medidas (~20%) cuyas coordenadas de cromaticidad se sitúan por debajo del locus del Cuerpo Negro, hacia la región de los púrpuras (frente al 1% en la campaña de luz-día y un 0% en la de luz-cielo). Este resultado es novedoso pues en ninguno de los trabajos existentes en la literatura se ha medido luz-día durante crepúsculos. Esta mayor variación púrpura-verde es la responsable de que no sea apropiado calcular un locus para nuestras medidas de luz-día durante crepúsculos. Si lo hiciésemos el coeficiente de correlación de dicho locus sería bastante pobre. Asimismo, la gran variación púrpura-verde va acompañada de una gran variación amarillo-azul: el valor mínimo en la coordenada x (0,2318) es el menor de las tres campañas realizadas. Sin embargo, su valor

máximo (0,3507) es ampliamente superado por los dos otros tipos de medidas realizadas en esta memoria de doctorado. En cuanto al alejamiento de nuestras medidas hacia los verdes con respecto al CIE locus para TCC superiores a 10.000 K, se aprecia el mismo comportamiento observado en las campañas de luz-día y luz-cielo.

La peculiar disposición de las coordenadas de cromaticidad en los dos diagramas cromáticos mostrados se debe únicamente a la forma de adquirir las medidas. En los capítulos 1 y 3 explicamos detalladamente que el interés de esta última campaña de medidas es analizar la evolución temporal de la luz-día durante crepúsculos, durante los cuales el Sol posee elevaciones entre 5° y -5° con respecto al horizonte astronómico. La variación temporal en los perfiles espectrales de la luz-día con estas elevaciones solares es enorme y por tanto es esencial, si queremos caracterizarlas, disminuir el tiempo transcurrido entre dos medidas consecutivas. Nosotros realizamos 2 medidas por minuto y por esta razón se observan en el diagrama cromático una serie de puntos que conforman la evolución temporal de la cromaticidad durante un crepúsculo. Posteriormente analizaremos de forma individual cada uno de los crepúsculos adquiridos.

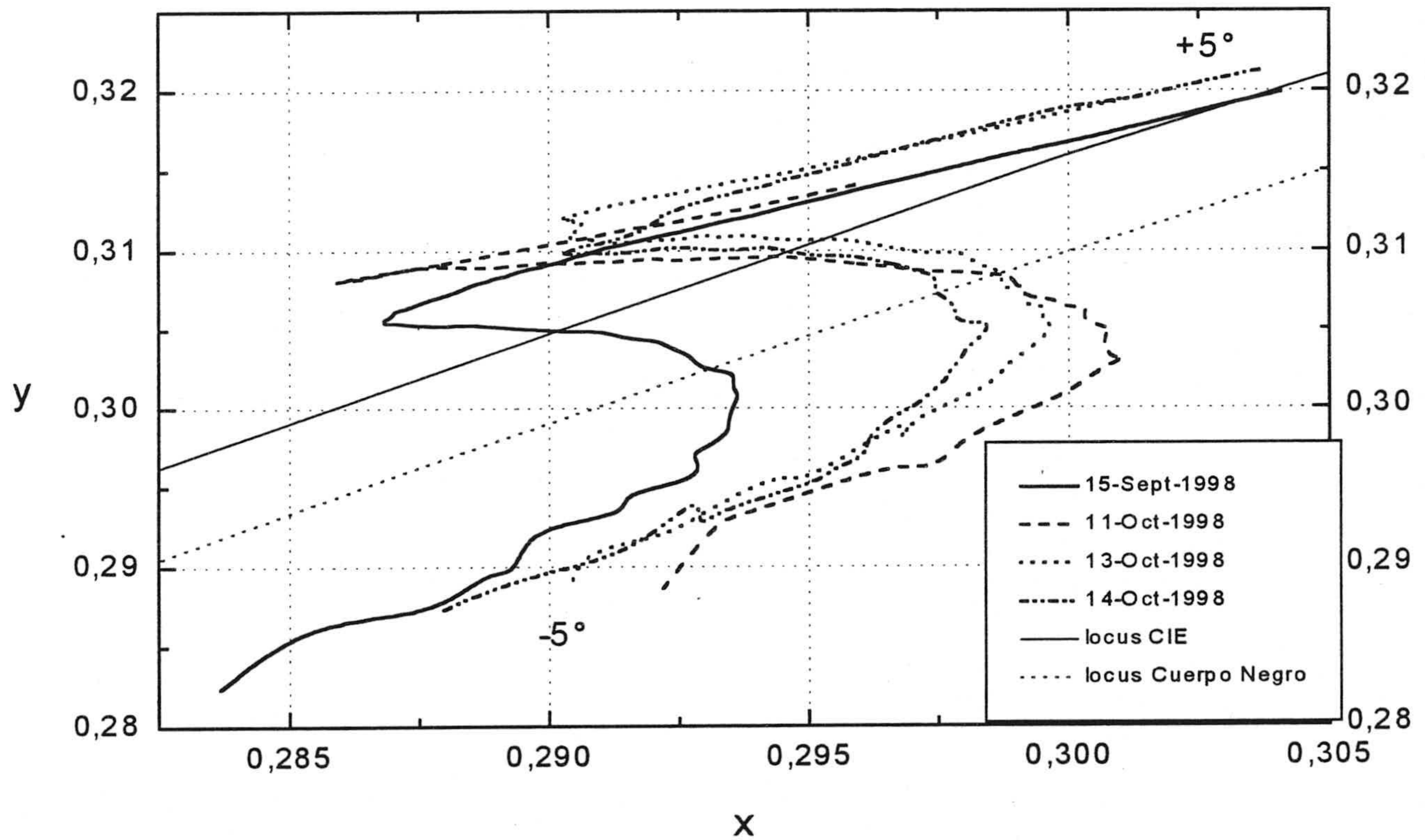


Figura 6. 3.- Evolución temporal de las coordenadas de cromaticidad durante crepúsculos en 4 días con cielos totalmente despejados.

Agrupando los crepúsculos por condiciones del cielo podemos apreciar cual es la evolución temporal de la luz-día recibida sobre la superficie terrestre en función de las condiciones atmosféricas. En las figuras 6.3-6.4 incluimos la evolución de las coordenadas de cromaticidad en el diagrama cromático CIE 1931 de los 9 crepúsculos medidos con cielos totalmente despejados. En estas dos figuras se observa una similitud en el perfil de

las curvas, correspondientes a algunos crepúsculos, parecido a una "S". Para estas curvas el punto de inicio de la curva (elevación solar $\sim 5^\circ$) es el que se corresponde con la mínima TCC. Posteriormente las coordenadas de cromaticidad comienzan a desplazarse hacia TCCs más altas, pero no de forma paralela al CIE locus, si no que a medida que la TCC crece el alejamiento al CIE locus es mayor (hacia los verdes). De forma abrupta la curva cambia en dirección, cruzando el CIE locus y el locus del Cuerpo Negro, y situándose por debajo de este último, en la región de los púrpuras. Finalmente la curva termina desplazándose de forma paralela y por debajo del locus del Cuerpo Negro alcanzando TCC cercanas a 10.000 K.

Este similar comportamiento (tipo "S") para crepúsculos con cielos totalmente despejados lo observamos en 7 de los 9 días medidos y nunca ha sido medido ni estudiado en la literatura. Sin embargo los perfiles de la evolución temporal de las coordenadas de cromaticidad correspondientes al 29 de Octubre de 1998 y al 29 de Marzo de 1999, difieren sustancialmente en extensión y en localización del resto, pues nunca llegan a situarse por debajo del CIE locus y alcanzan TCC muy elevadas (incluso superiores a ∞ K), tal y como puede observarse en la figura 6.4.

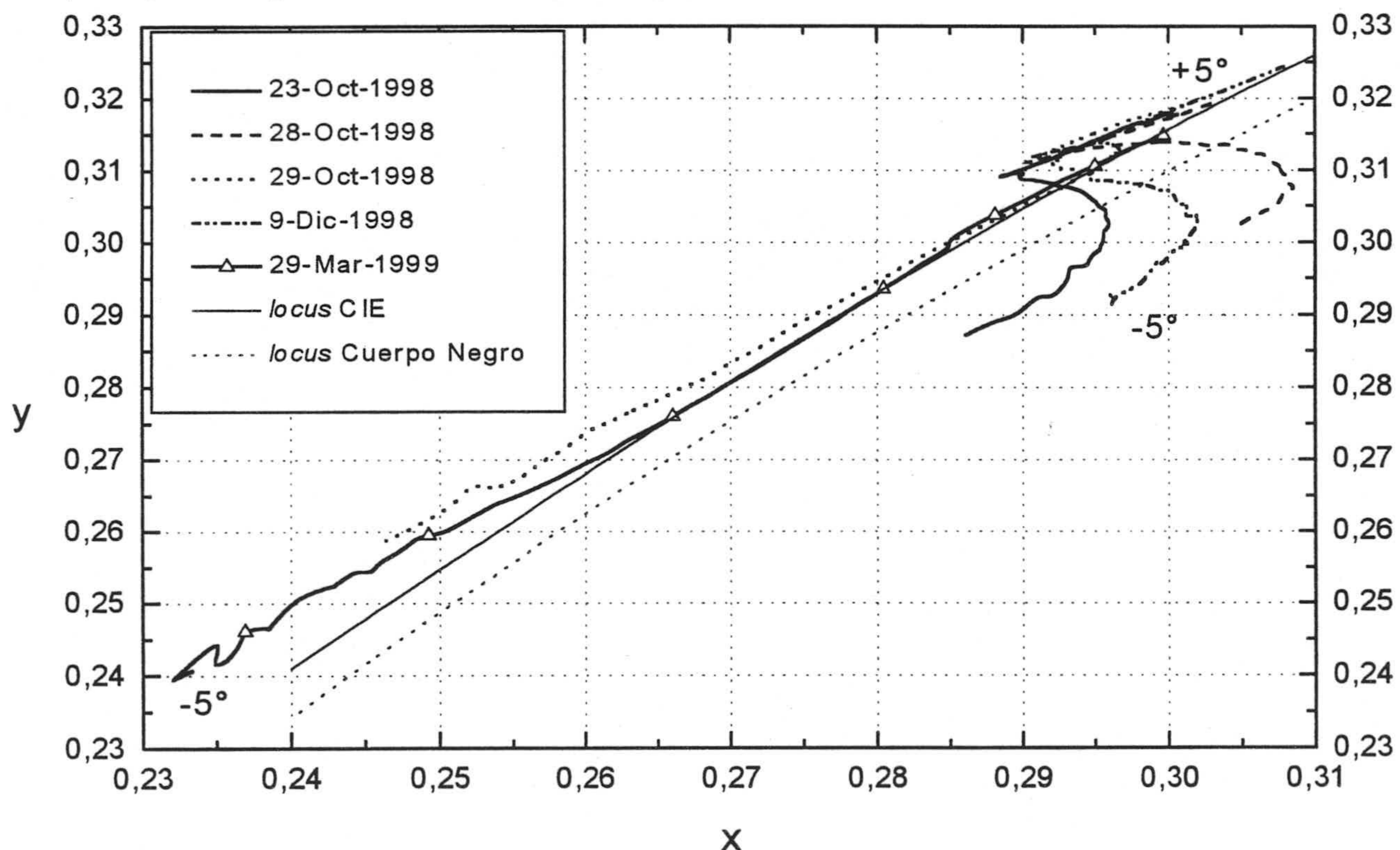


Figura 6. 4.- Evolución temporal de las coordenadas de cromaticidad durante crepúsculos en 5 días con cielos totalmente despejados.

Esta evidente y sorprendente discrepancia entre la evolución colorimétrica de la luz-día en crepúsculos con cielos totalmente despejados es notable y necesita una discusión más profunda. Así por ejemplo, dos crepúsculos medidos en días consecutivos (28 y 29-

Octubre-1998) y con condiciones atmosféricas aparentemente muy semejantes poseen evoluciones cromáticas bien diferentes, como se aprecia en la figura 6.4.

En los crepúsculos con cielos totalmente despejados cuyas evoluciones cromáticas poseen un perfil tipo “S” el primer punto de inflexión no coincide con una misma elevación solar, tal y como mostramos en la tabla VI.1. Sin embargo existe gran similitud en las elevaciones solares para las cuales se corta al CIE *locus*, al *locus* del Cuerpo Negro y se produce el 2º punto de inflexión en el perfil tipo “S”.

Fecha	1º punto de inflexión	Punto de corte con CIE <i>locus</i>	Punto de corte con <i>locus</i> del Cuerpo Negro	2º punto de inflexión
15-Sep-98	-0,2°	-1,2°	-2,0°	~ -3,1°
11-Oct-98	2,0°	-1,4°	-2,2°	~ -3,3°
13-Oct-98	~ 1,3 °	-1,5°	-2,3°	~ -3,1°
14-Oct-98	-0,4°	-1,4°	-2,2°	~ -3,5°
23-Oct-98	1,9°	-1,4°	-2,2°	~ -3,2°
28-Oct-98	2,2°	-1,4°	-2,2°	~ -3,6°
9-Dic-98	1,9°	-0,9°	-2,2°	~ -3,5°

Tabla VI. 1.- Elevaciones solares para las que se producen los dos puntos de inflexión en la evolución temporal de los crepúsculos, con cielos totalmente despejados, y para las que se corta al CIE *locus* y al *locus* del Cuerpo Negro.

A pesar de esta coincidencia en el valor de la elevación solar para los puntos de corte y el 2º punto de inflexión, tenemos que dejar claro que las coordenadas de cromaticidad son bien distintas, tal y como se puede apreciar en las figuras 6.3 y 6.4: existe una gran variabilidad en las características colorimétricas entre distintos crepúsculos, a pesar de que su evolución temporal posee un mismo perfil. La diferencia existente en las características colorimétricas de la luz-día correspondiente a días distintos, a veces imperceptibles para nuestro sistema visual, se acentúa de forma patente durante los crepúsculos.

En días con cielos despejados el punto de corte con el CIE *locus* ocurre, tabla VI.1, cuando el Sol posee una elevación de aproximadamente -1,4°. Observando en el cielo para esta elevación solar debe percibirse, en el este, la sombra terrestre con una tonalidad azulada y envolviéndola, el arco anti-crepuscular con una tonalidad rosácea; y por el oeste, se percibe el arco crepuscular, que consiste en una banda amarillenta en el horizonte (figura 6.5, Lynch y Livinstong [1995]). A medida que decrece la elevación solar aumentan en tamaño tanto el arco crepuscular como el arco anti-crepuscular, acentuándose el contraste entre estos dos arcos y el cenit, que empieza a oscurecerse. Posteriormente, para elevaciones solares en torno a -5°, empiezan a desvanecerse en el este el arco anti-

crepuscular y la sombra terrestre se difumina, mientras que en el oeste el arco crepuscular toma tonalidades amarillas, naranjas y púrpuras.

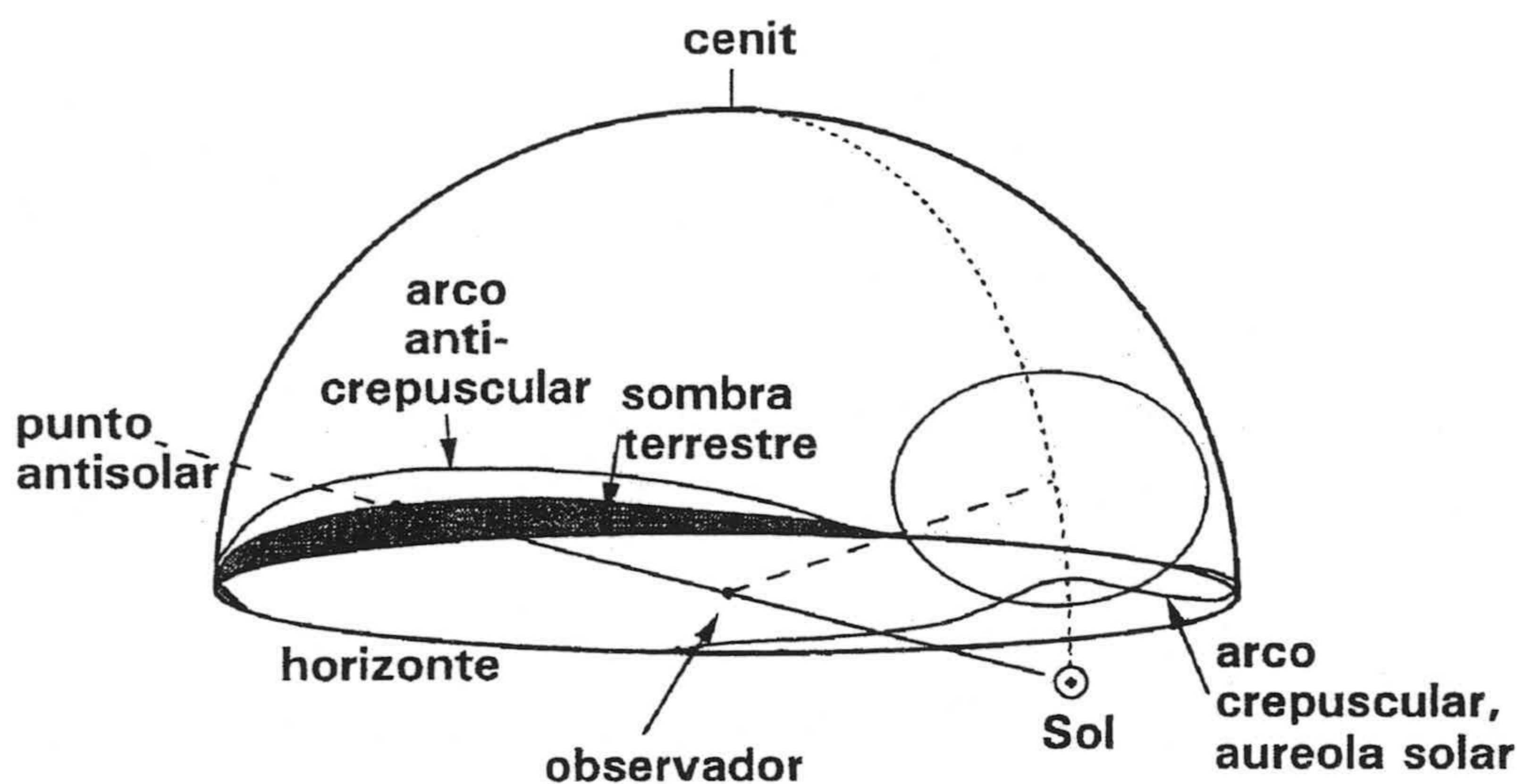


Figura 6. 5.- Descripción del fenómeno crepuscular sobre la bóveda celeste (adaptado de Lynch y Livinstong [1995]).

Dada la complejidad que presenta el estudio y análisis de la causa que produce la aparición o no del perfil tipo "S" en la evolución cromática durante crepúsculos con cielos despejados y teniendo en cuenta que este estudio no entraba dentro de los objetivos de esta Memoria de Doctorado hemos iniciado una investigación en colaboración con el Dr. Raymond Lee, Jr. de la Academia Naval de los EE.UU. Hemos creído interesante abordar este trabajo en colaboración con un investigador de otro país, entre otras razones, para comprobar si la aparición de este tipo de perfiles cromáticos tan singulares sólo es un hecho local o sucede en otros lugares. Esta colaboración está empezando a dar sus frutos aunque no podemos concluir todavía de forma definitiva.

Creemos, y estamos comprobando mediante modelos de transferencia radiativa tipo LOWTRAN, que la aparición de perfiles cromáticos tipo "S" se produce de la forma siguiente:

- 1) Para elevaciones solares entre 5° y $1-2^\circ$, la contribución de la luz-sol (cada vez más rojiza) en la irradiancia global sobre una superficie horizontal, es cada vez más débil debido no sólo a la ley coseno sino también al incremento de la extinción (mayores masas ópticas).
- 2) Para elevaciones solares en torno a $1-2^\circ$, la luz-sol que ilumina la atmósfera (y que dará lugar a la luz-cielo mediante esparcimiento) se va haciendo más rojiza y por tanto la luz-día o luz-cielo procedente del cenit se vuelve también rojiza (en el sentido de que se hace ligeramente más púrpuras). Y esto puede ocurrir de forma repentina si la luz-sol atraviesa (de forma casi rasante) una capa de neblina.

3) Dado que la luz-sol se hace cada vez más debil, en torno a 0° de elevación solar, deja de ser la fuente de radiación en el esparcimiento que produce la luz-cielo, quedando dominada esta última por el esparcimiento múltiple.

Estamos especulando asimismo la posibilidad de que sea la cantidad de ozono la que determine la aparición o no del perfil tipo "S" puesto que la presencia de ozono en la atmósfera es la responsable de que durante los crepúsculos la luz procedente del cenit posea purezas colorimétricas elevadas.

La similitud existente en el perfil (no en la localización) de la evolución temporal de las características colorimétricas de la luz-día durante crepúsculos con cielos despejados no se advierte con cielos totalmente cubiertos, tal y como observamos en la figura 6.6, en donde hemos mostrado las curvas pertenecientes a tres crepúsculos distintos: las curvas de cromaticidad en crepúsculos con cielos cubiertos difieren significativamente de las correspondientes a cielos despejados. No podemos apreciar una evolución patrón, pues el parecido entre dichas curvas es casi nulo.

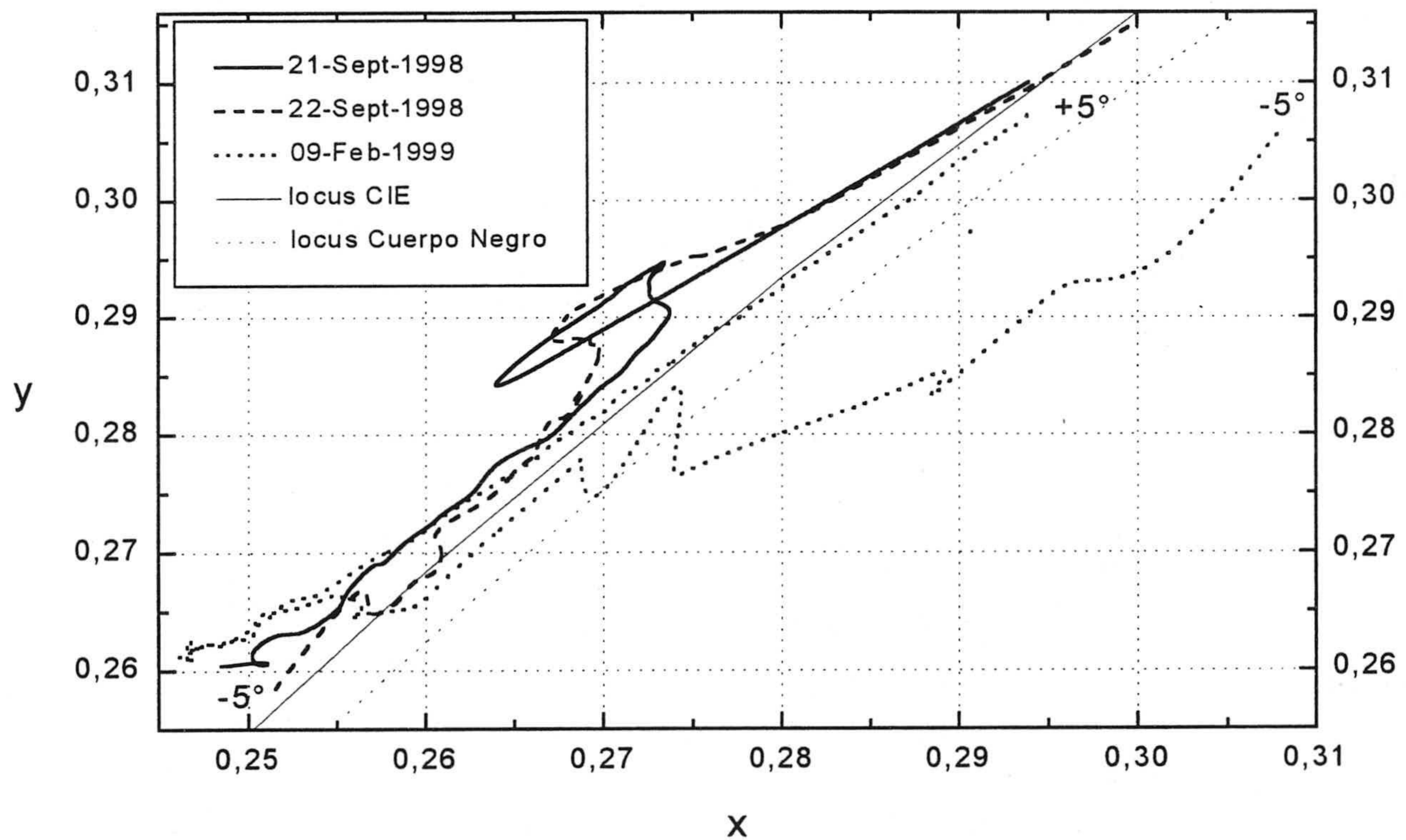


Figura 6. 6.- Evolución temporal de las coordenadas de cromaticidad durante crepúsculos en 3 días con cielos totalmente cubiertos.

El hecho de que no haya una semejanza tan espectacular como la encontrada en crepúsculos con cielos despejados lo podemos achacar precisamente a la propia definición de cielo totalmente cubierto. Los criterios que nosotros hemos seguido para catalogar un conjunto de medidas bajo el nombre de crepúsculos con cielos cubiertos, y que deben

cumplirse simultáneamente, son los siguientes: 1) no puede haber claros en el cielo salvo que estos sean pequeños y no duren más de 4 o 5 minutos; 2) pueden existir distintas capas y tipos de nubes siempre y cuando éstas cubran por completo el cielo; y 3) se permiten variaciones espaciales y temporales en la claridad del cielo.

Bajo estos criterios sobre el cubrimiento de nubes tienen cabida distintos tipos de condiciones atmosféricas cuyas características colorimétricas pueden ser, y son, bien distintas.

Por último, en la figura 6.7 mostramos las coordenadas de cromaticidad correspondientes a los 4 crepúsculos medidos bajo condiciones atmosféricas mixtas. En este caso la variabilidad cromática es mucho más acentuada, pues bajo estas condiciones mixtas se suelen producir los colores más vivos, dependiendo enormemente de la disposición (y tipo) sobre la bóveda celeste de las nubes y claros. Así por ejemplo, el crepúsculo medido el 27 de Octubre de 1998, es el que posee las cromaticidades más púrpuras de todas las medidas en esta campaña.

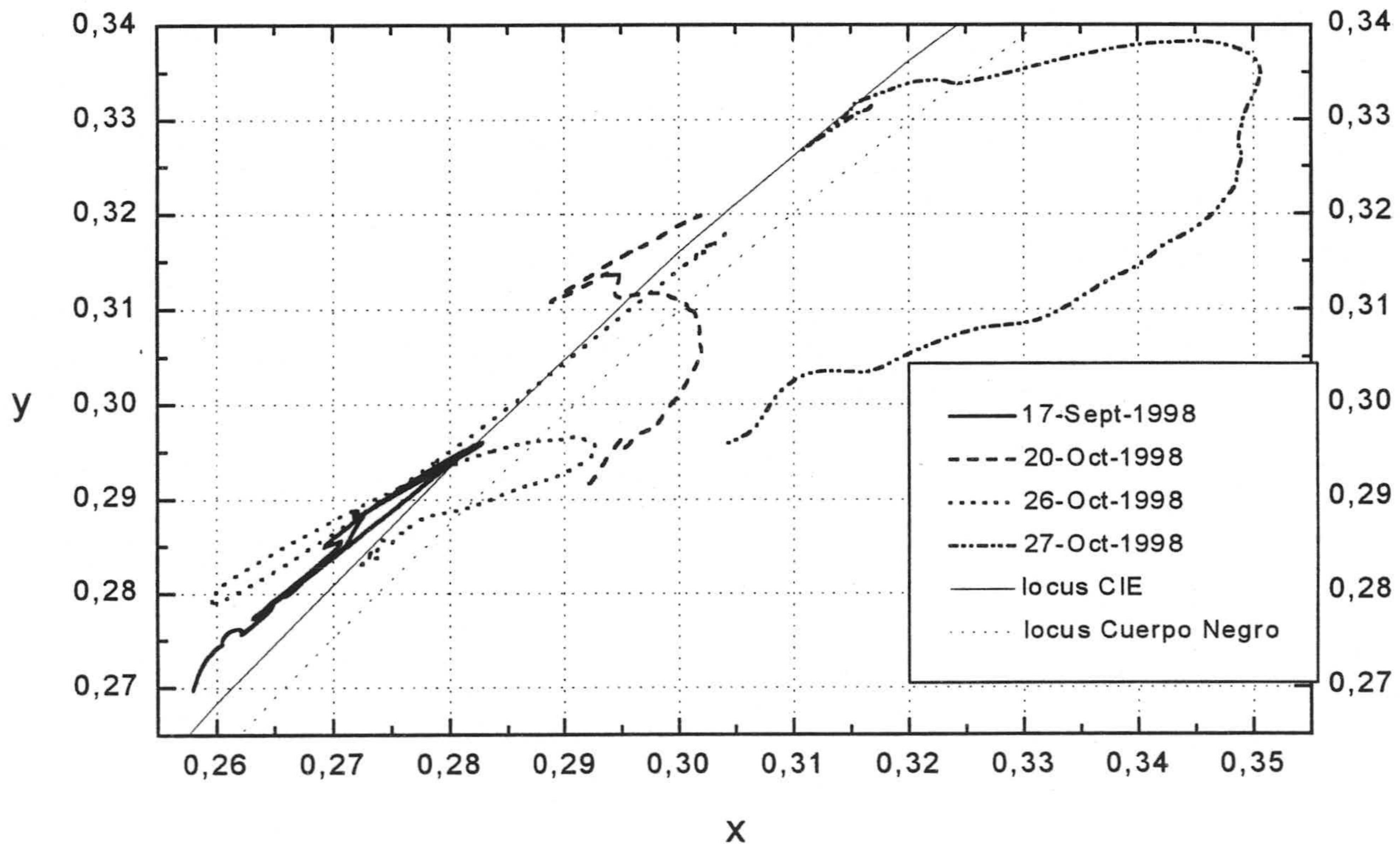


Figura 6. 7.- Evolución temporal de las coordenadas de cromaticidad durante crepúsculos en 4 días con condiciones mixtas.

6.2. Temperatura de color correlacionada (TCC)

Dadas las limitaciones del algoritmo usado por nuestro espectrorradiómetro a la hora de calcular TCC (apuntado en el capítulo anterior), tuvimos que completar la información que nos suministraba, de forma análoga a como hicimos con algunas de las medidas correspondientes a la campaña de luz-cielo.

Dentro de nuestro conjunto de medidas (compuesto por un total de 1.485 curvas espectrales) dos de ellas poseen TCC por encima de 100.000 K y otras dos poseen coordenadas de cromaticidad que se sitúan fuera de la región donde se les puede asociar una TCC. Así, sin contar con estas dos medidas, el rango de TCC abarcado por nuestro conjunto de medidas está comprendido entre 4.701 K y 241.358 K. En la figura 6.8 presentamos el histograma parcial de TCC. Los dos intervalos más frecuentes son los comprendidos entre 7.500 y 8.000 K y 8.000 y 8.500 K respectivamente. A pesar de la gran variedad espectral (y cromática) en este tipo de medidas, entre ambos intervalos (7.500-8.500 K) se sitúan casi el 50% de todas las medidas.

Al expresar el valor de la TCC en mireds, el histograma obtenido es el de la figura 6.9. Con esta representación el intervalo más frecuente se sitúa entre 120 y 125 mireds (8000 y 8.333 K); resultado que concuerda con el trabajo de Ando *et al.* (ver Henderson [1970]), aunque este en dicho trabajo no se medía luz-día durante crepúsculos sino luz-cielo norte con cielos despejados.

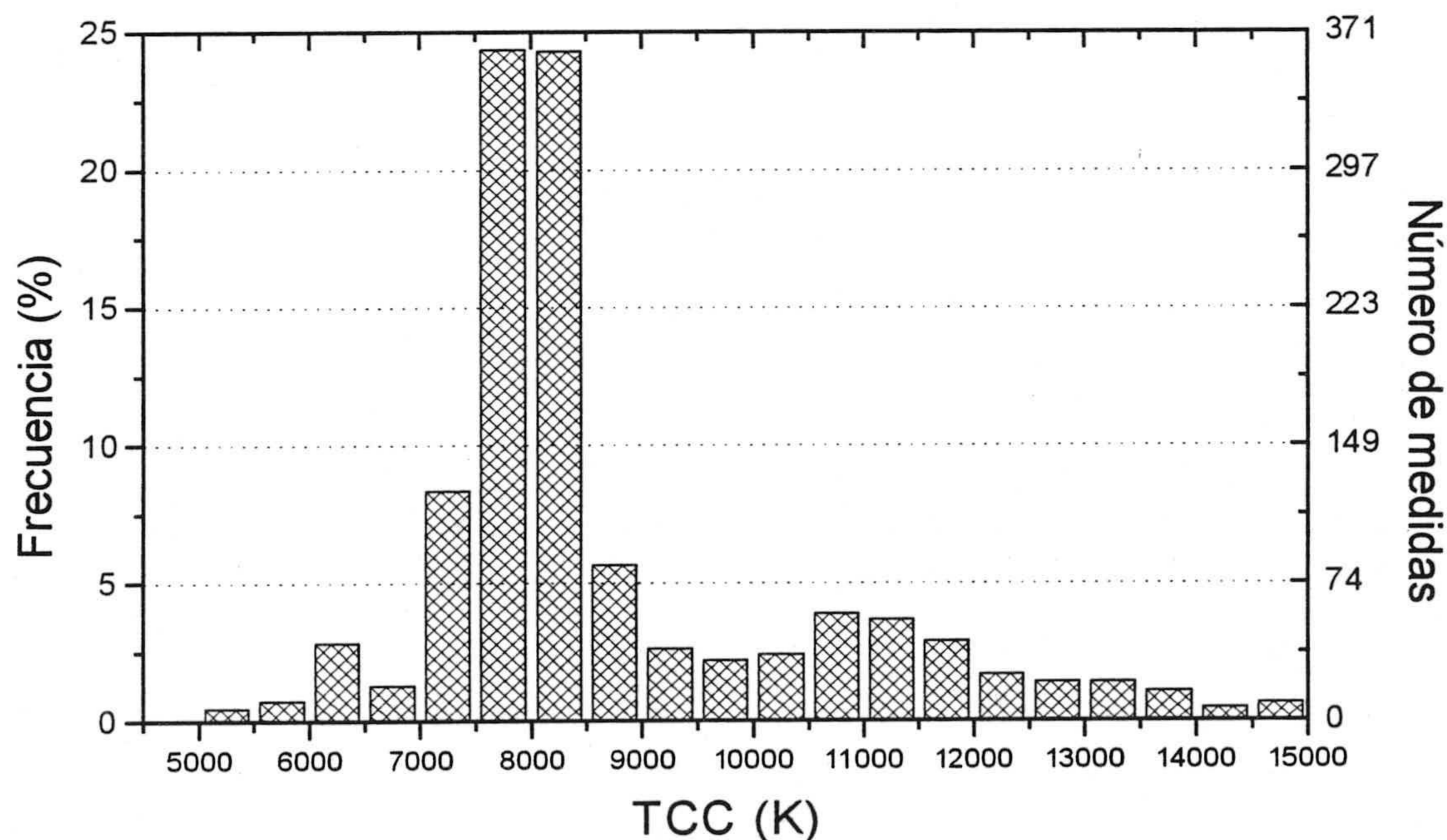


Figura 6. 8.- Histograma (parcial) de TCC correspondiente a las 1.485 medidas de luz-día durante crepúsculos.

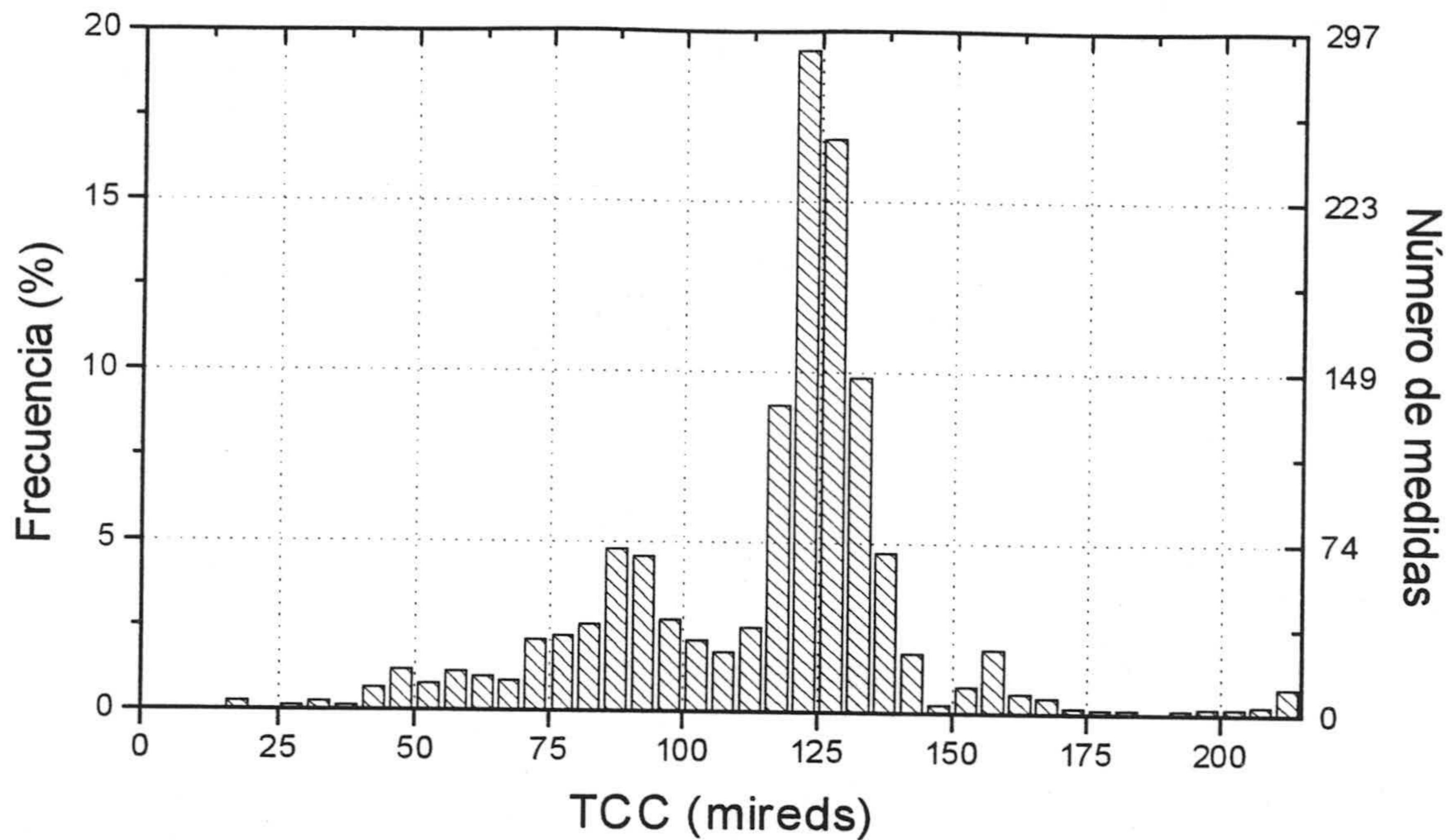


Figura 6. 9.- Histograma de TCC, expresado en mireds, de las medidas de luz-día durante crepúsculos.

Al haber medido durante diferentes tipos de crepúsculos la evolución temporal de la cromaticidad de la luz-día, es interesante analizar la evolución temporal de la TCC. Así, en la figura 6.10-6.11 mostramos la variación de la TCC en función de la elevación solar durante los 9 crepúsculos con cielos totalmente despejados mientras que en la figura 6.12 y 6.13 lo hacemos para cielos totalmente cubiertos y condiciones mixtas respectivamente.

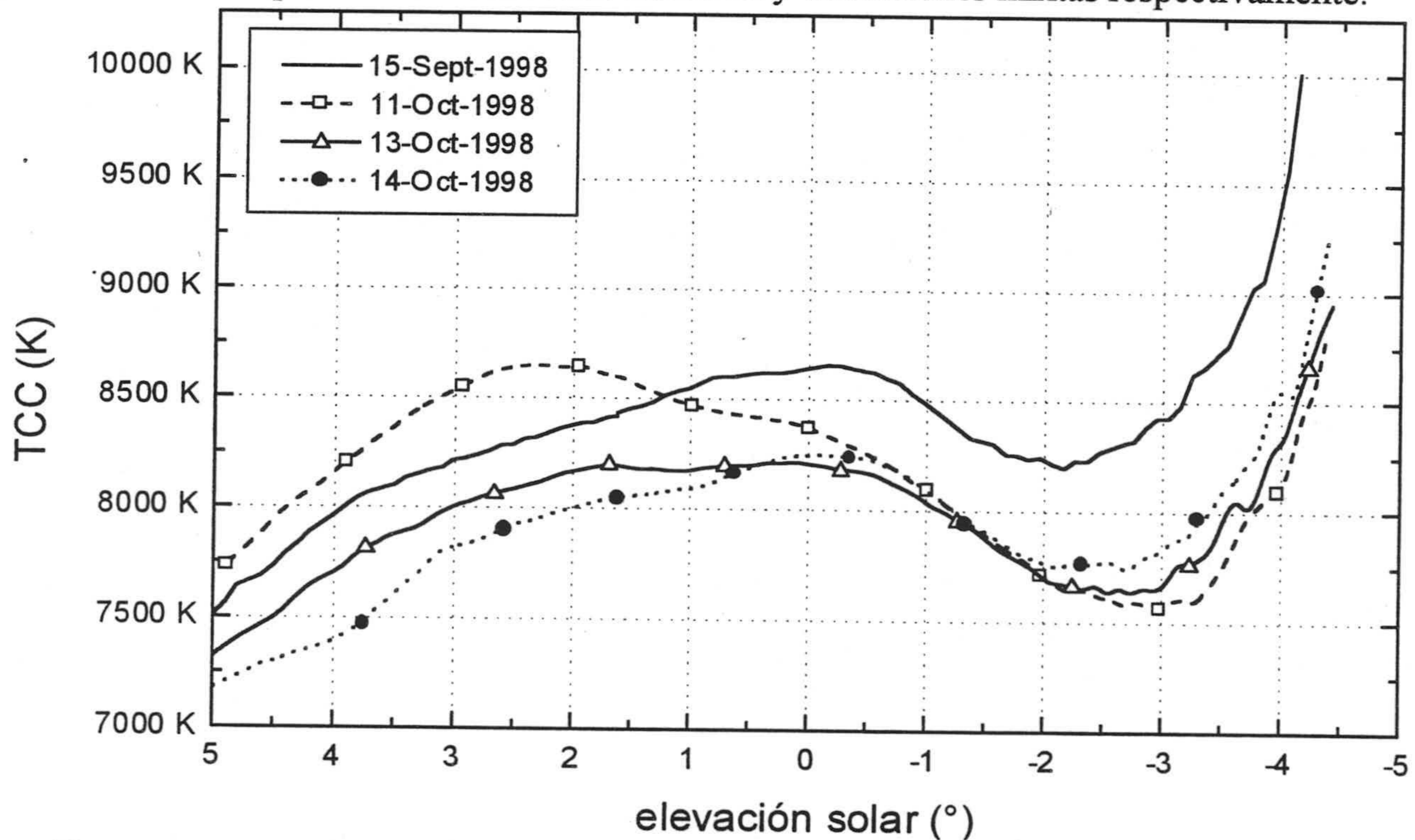


Figura 6. 10.- Evolución de la TCC en función de la elevación solar durante 4 crepúsculos con cielos totalmente despejados.

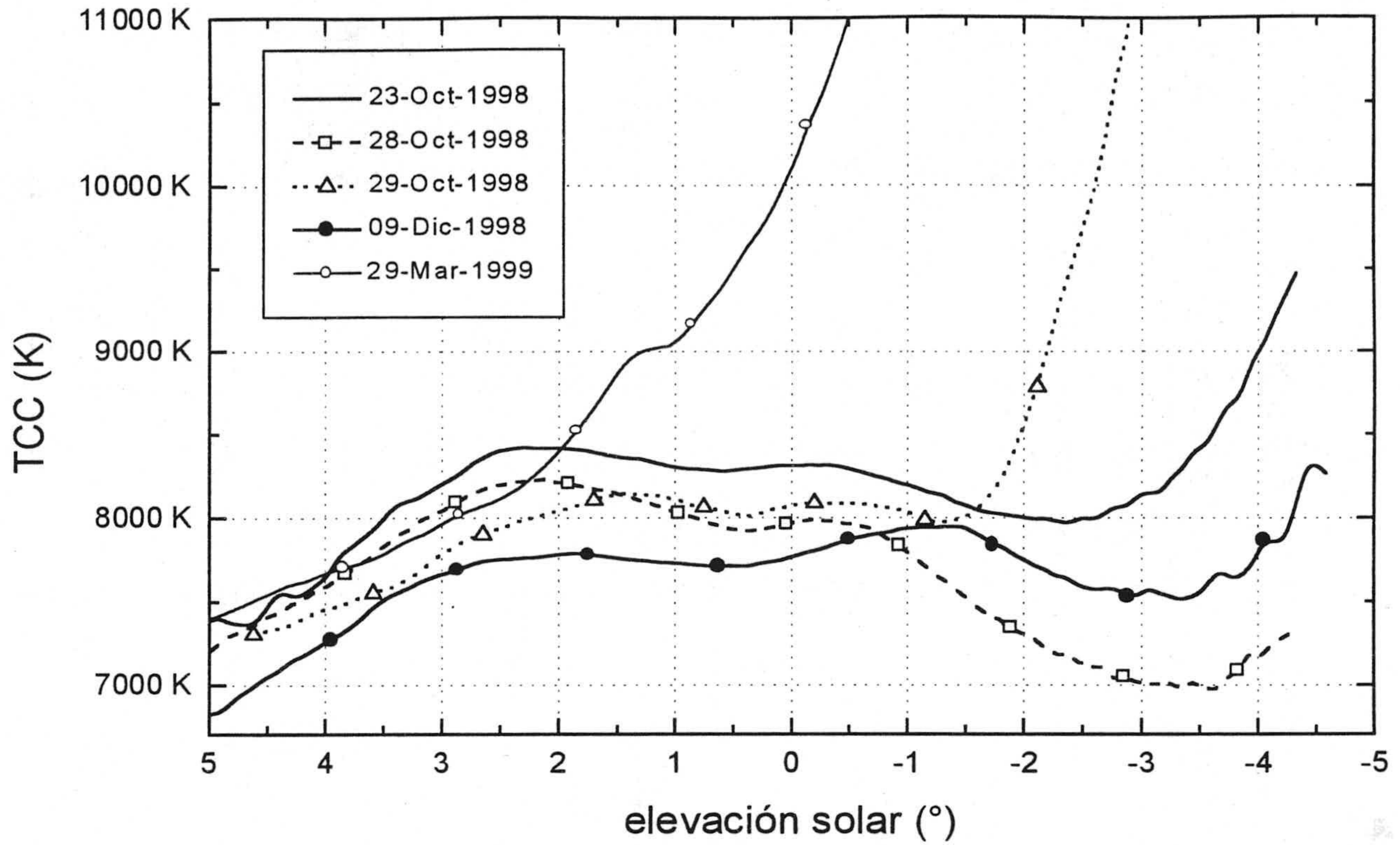


Figura 6. 11.- Evolución de la TCC en función de la elevación solar durante 4 crepúsculos con cielos totalmente despejados.

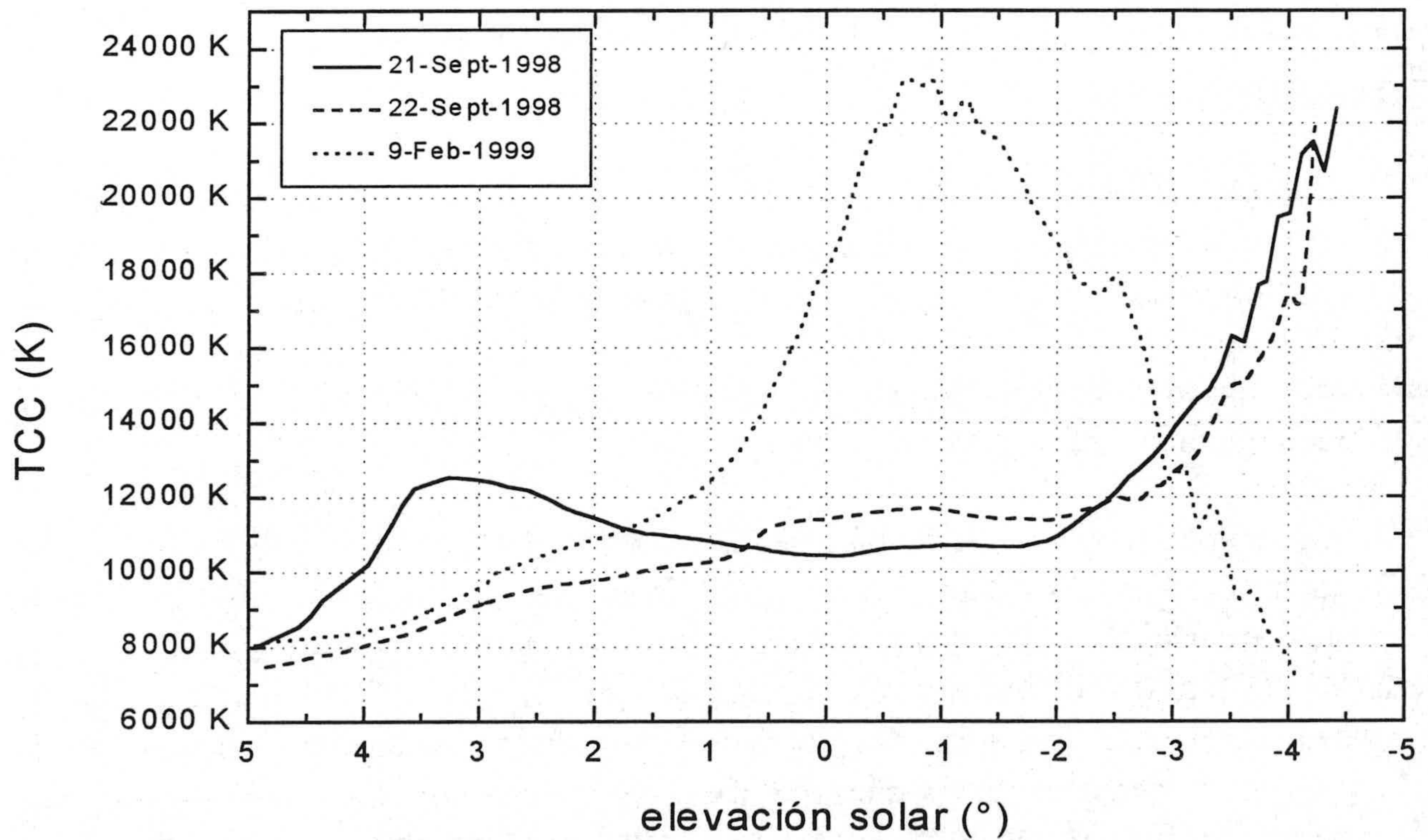


Figura 6. 12.- Evolución de la TCC en función de la elevación solar durante 3 crepúsculos con cielos totalmente cubiertos.

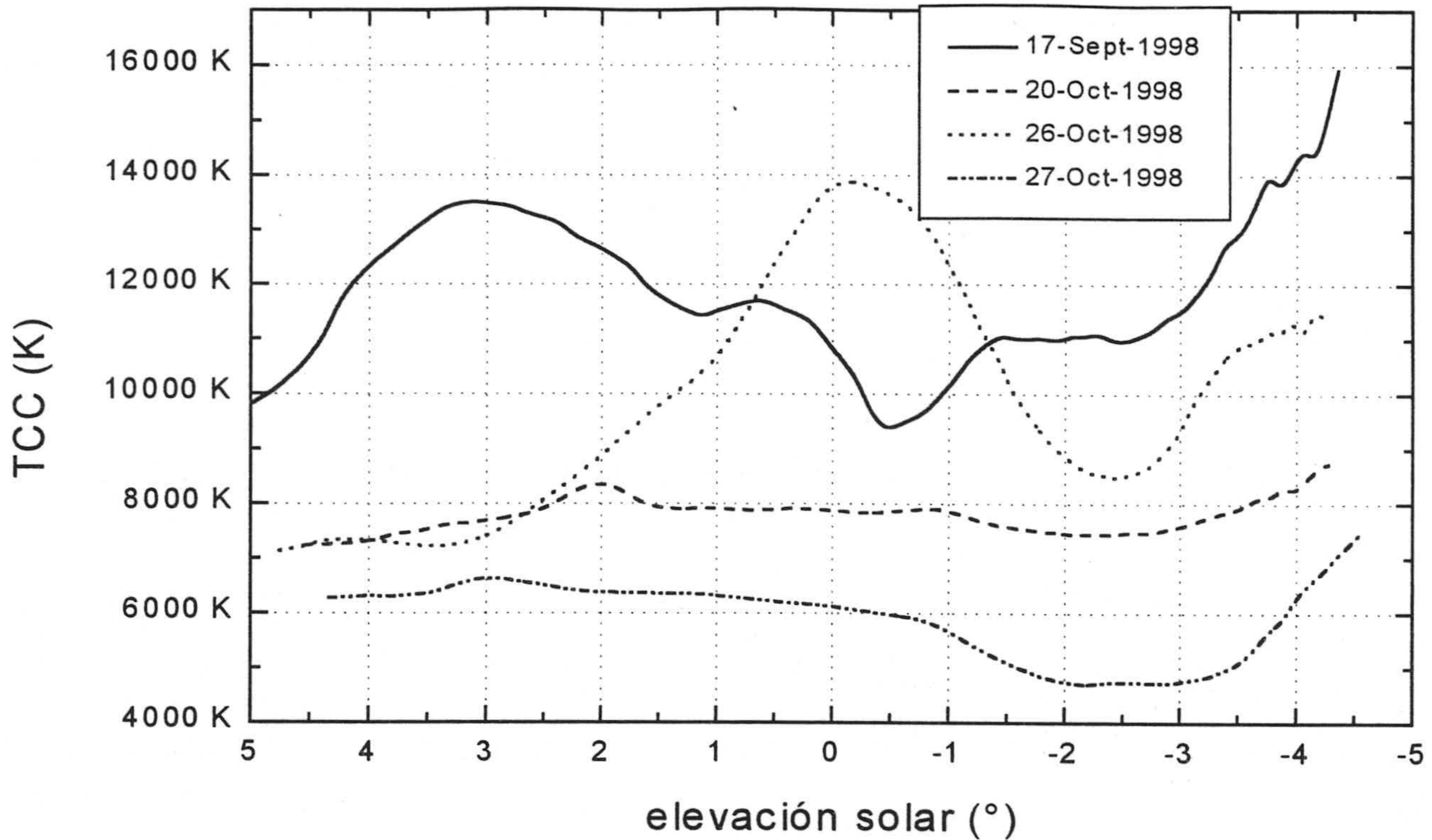


Figura 6. 13.- Evolución de la TCC en función de la elevación solar durante 4 crepúsculos bajo condiciones mixtas.

Particularizando para cielos totalmente despejados advertimos como el rango de TCC abarcado en los crepúsculos cuya evolución colorimétrica es en forma de “S” (en 7 de los 9 medidos) es pequeña: yendo desde los 7.000 K hasta los 10.000 K.

Únicamente en los dos casos *especiales* (29-Oct-1998 y 29-Mar-1999), en los que la evolución colorimétrica no tiene forma de “S”, la variación en TCC es enorme, yendo en un caso (29-Oct-1998) desde los 7.000 K hasta los 24.500 K y en el otro caso (29-Mar-1999) desde los 7.000 K hasta los 241.000 K. Sin embargo el parecido entre estos dos es meramente anecdótico pues aunque la evolución tenga el mismo perfil los valores alcanzados son bien distintos (ver figura 6.11).

En crepúsculos con cielos totalmente cubiertos el límite inferior de la región de TCC abarcada es también 7.000 K. Por el contrario el límite superior sube hasta los 23.000 K. Existe cierta similitud entre los correspondientes a los días 22-Sept-1998 y 9-Feb-1999. Destaca asimismo la diferencia entre estos dos días y el 21-Sept-1998. Tenemos por tanto dos días consecutivos con parecidas condiciones de cielo (totalmente cubiertos) y sin embargo sus evoluciones temporales de TCC (y por tanto colorimétricas) difieren sustancialmente. Este resultado de nuevo nos indica que durante los crepúsculos (bajo cualquier tipo de cielo) las diferencias colorimétricas en la luz-día recibida sobre una superficie horizontal se acentúan considerablemente y se hacen perceptiblemente distintas.

Por último en crepúsculos bajo cielos con condiciones mixtas las evoluciones no presentan ningún parecido entre sí pues, como es razonable, el tipo de cubrimiento de nubes, la cantidad de estas, su localización sobre la bóveda celeste y la variación de estas características con el tiempo provocan la aparición de una gran variedad de posibles situaciones, como se refleja en la figura 6.13.

6.3. Evolución fotométrica

Hemos indicado en el capítulo 1 la importancia de conocer con detalle la evolución fotométrica durante crepúsculos. En las figuras 6.14-6.18 mostramos la variación de la iluminancia correspondiente a la irradiancia recibida sobre una superficie horizontal con la elevación solar para los tres tipos de condiciones atmosféricas considerados (cielos totalmente despejados: figuras 6.14-16, cielos totalmente cubiertos: figura 6.17, y condiciones mixtas: 6.18).

Durante los crepúsculos la única fuente de luz es la luz-cielo. Incluso para elevaciones solares entre 0° y 5° (también consideradas en el conjunto de medidas analizado en este capítulo) la topografía provoca que los objetos considerados estén principalmente iluminados por luz-cielo. Durante los crepúsculos (posteriores al atardecer) los objetos que nos rodean se oscurecen a medida que decrece la elevación solar. La iluminancia recibida sobre una superficie horizontal no sólo depende de la elevación solar, sino también de la topografía del lugar de medida, y de las condiciones atmosféricas. En nuestro caso, al haber medido desde un único lugar de medidas, únicamente podremos analizar la evolución de la iluminancia con la elevación solar y con las condiciones atmosféricas. El rango de iluminancia entre el inicio del crepúsculo (aquí considerado para una elevación solar de 5°) y el final de éste (elevación solar -5°) es enorme y puede exceder cuatro ordenes de magnitud, tal y como se puede apreciar en las figuras 6.14-6.18.

La evolución de la iluminancia en cielos despejados sigue un mismo patrón y puede describirse por un sencillo polinomio de grado 3 (MacInnis [1996], Seidelmann [1992]):

$$\log E_v = a + b_1\theta_s + b_2\theta_s^2 + b_3\theta_s^3$$

donde θ_s representa la elevación solar expresada en grados.

Sin embargo podemos observar ligeras diferencias en los valores de la iluminancia en distintos días (figuras 6.14 y 6.15). A pesar de corresponderse todos ellos con las

mismas condiciones atmosféricas, la variación de la transmitancia atmosférica, debida al contenido de partículas en la atmósfera, es la que provoca estas diferencias.

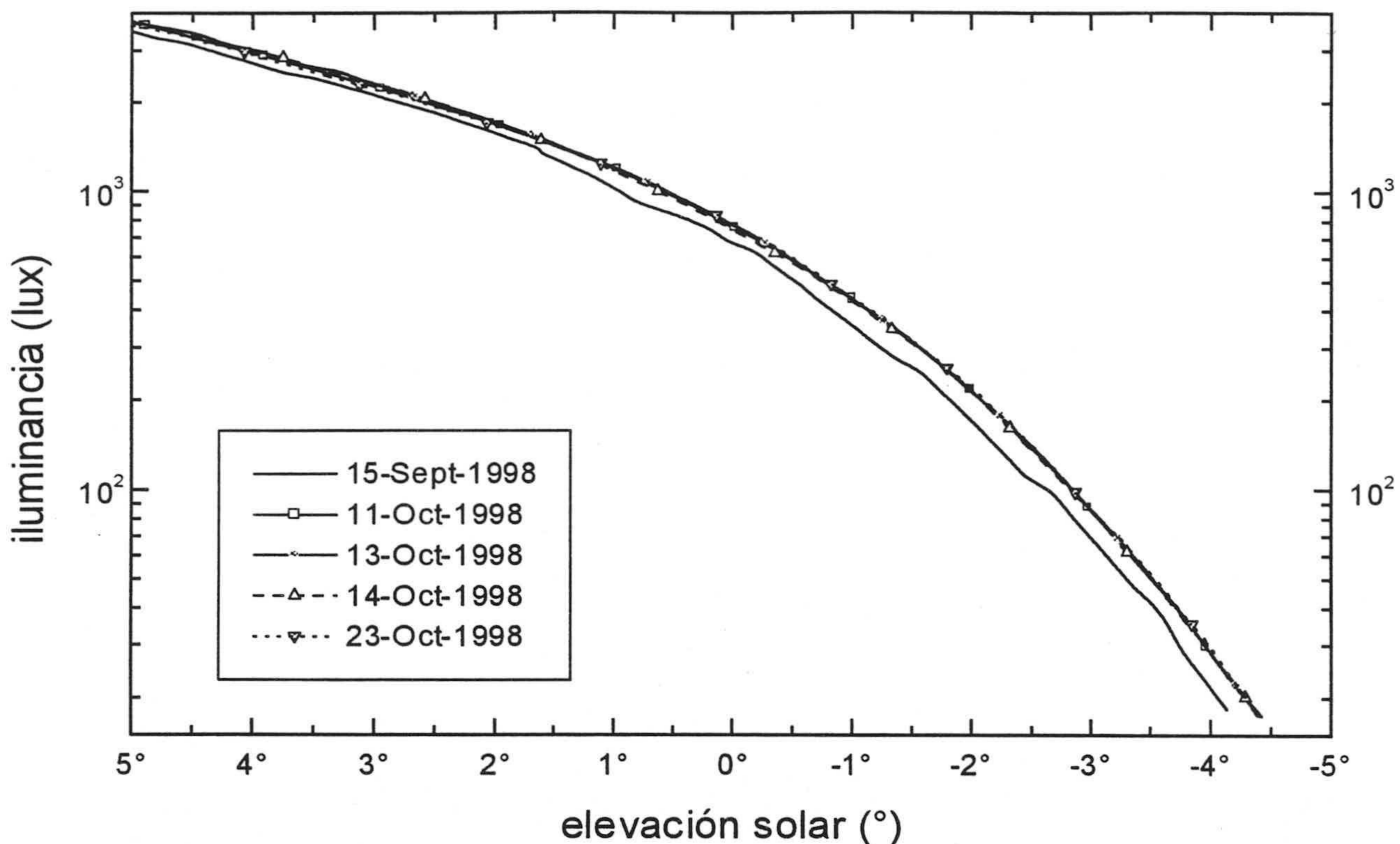


Figura 6. 14.- Evolución de la iluminancia sobre una superficie horizontal, durante 5 (de los 9) crepúsculos con cielos totalmente despejados, en función de la elevación solar.

Si nos centramos en los crepúsculos con cielos totalmente cubiertos advertimos que sus curvas de iluminancia son mucho más complejas que las correspondientes a cielos despejados, no sólo en cuanto a los valores numéricos sino también en cuanto al perfil de la evolución. Este resultado nos obliga a concluir que la suposición realizada por Brown [1952], que asume que las curvas de iluminancia durante crepúsculos con cielos cubiertos son simples versiones más “oscuras” de las correspondientes a cielos despejados, no es del todo cierta. De hecho las curvas de iluminancia de crepúsculos con cielos cubiertos son mucho más complejas (figura 6.17) que las correspondientes a cielos despejados.

Al tratar con condiciones mixtas, y dada la dificultad en poder modelizar todos y cada una de las variables que intervienen, nos damos cuenta que no es posible generalizar ni estandarizar el comportamiento de las curvas bajo este tipo de condiciones, tal y como percibimos en la figura 6.18.

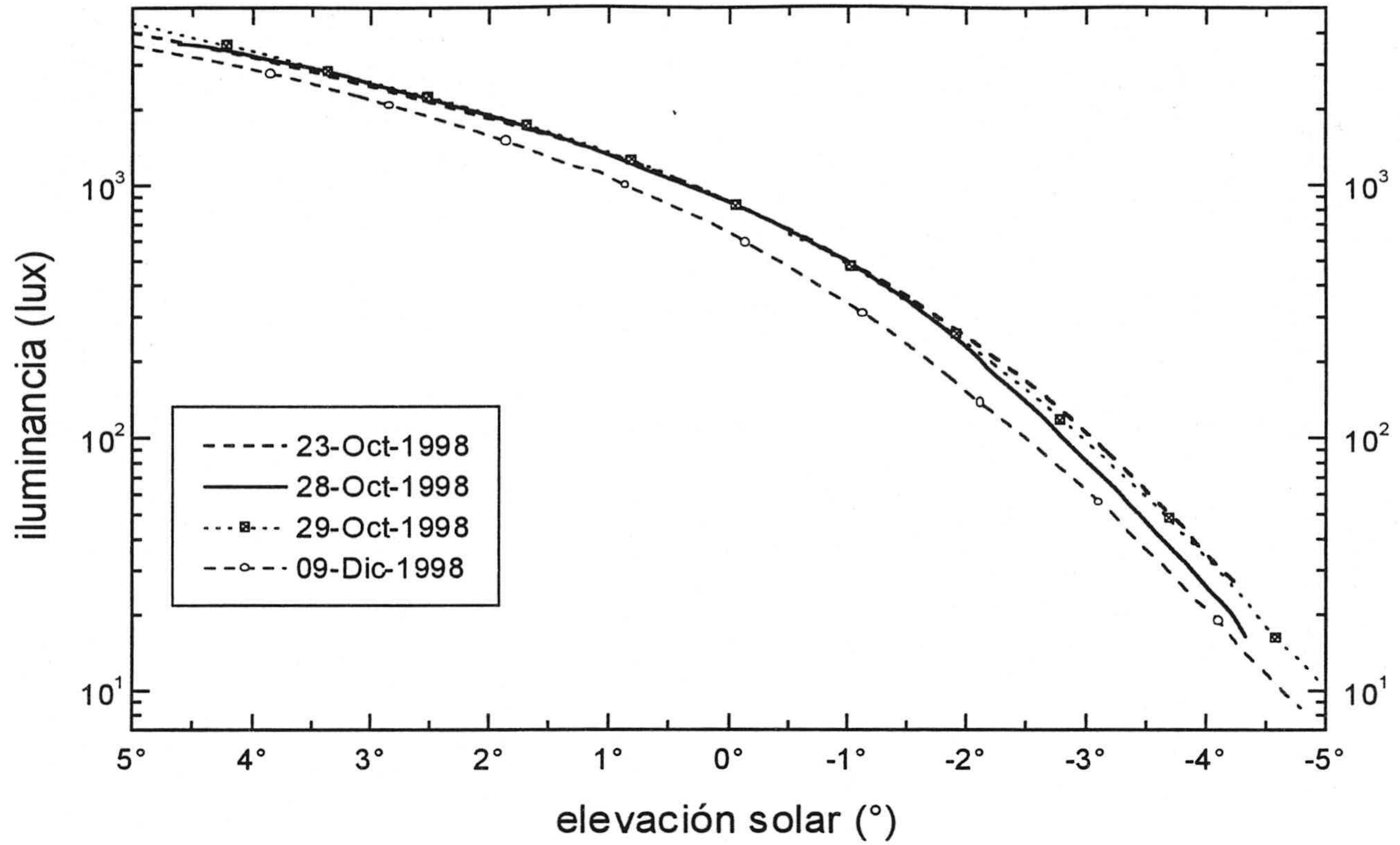


Figura 6. 15.- Evolución de la iluminancia sobre una superficie horizontal, durante 4 (de los 9) crepúsculos con cielos totalmente despejados, en función de la elevación solar.

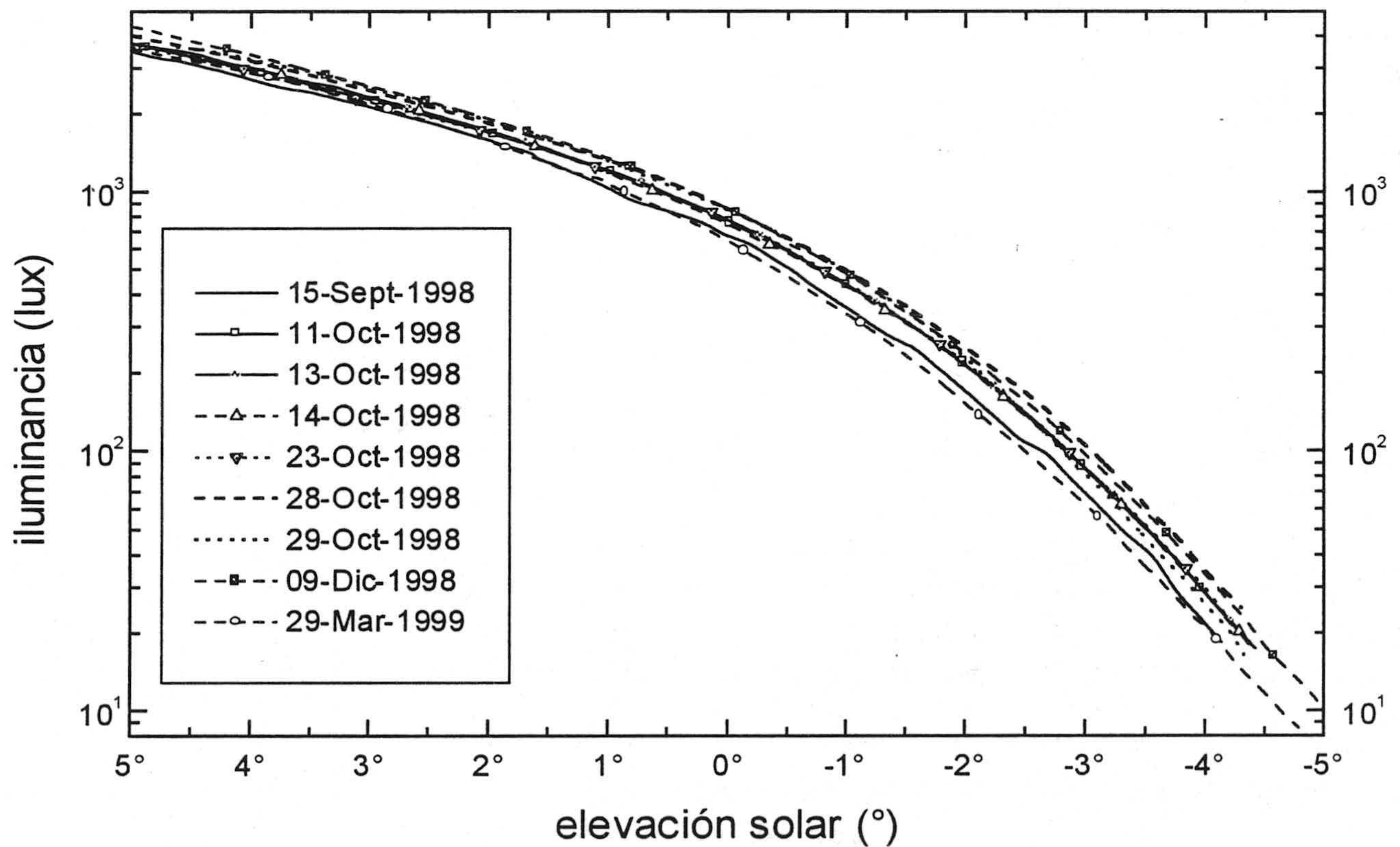


Figura 6. 16.- Evolución de la iluminancia sobre una superficie horizontal, durante los 9 crepúsculos con cielos totalmente despejados, en función de la elevación solar.

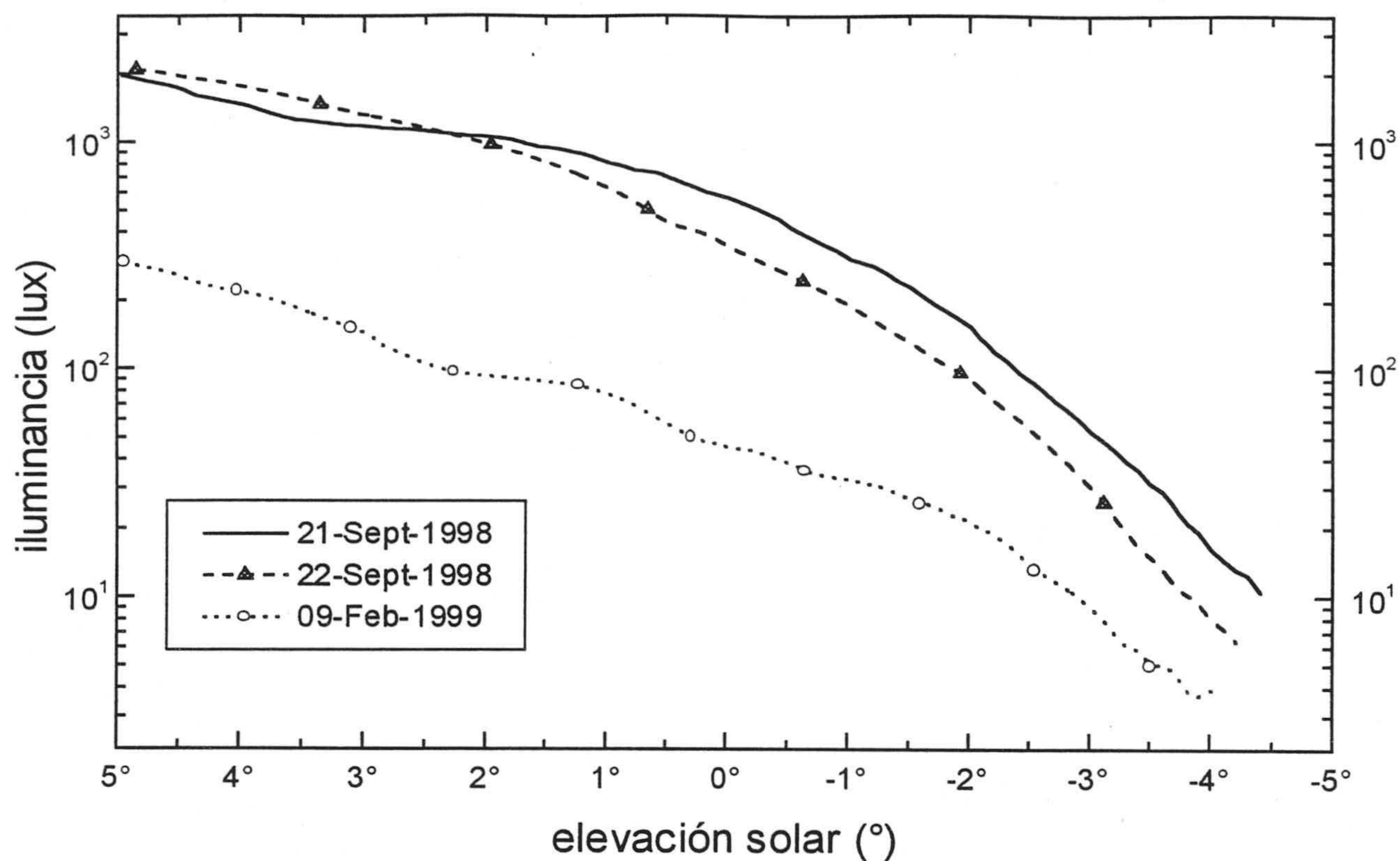


Figura 6. 17.- Evolución de la iluminancia sobre una superficie horizontal, durante los 3 crepúsculos con cielos totalmente cubiertos, en función de la elevación solar.

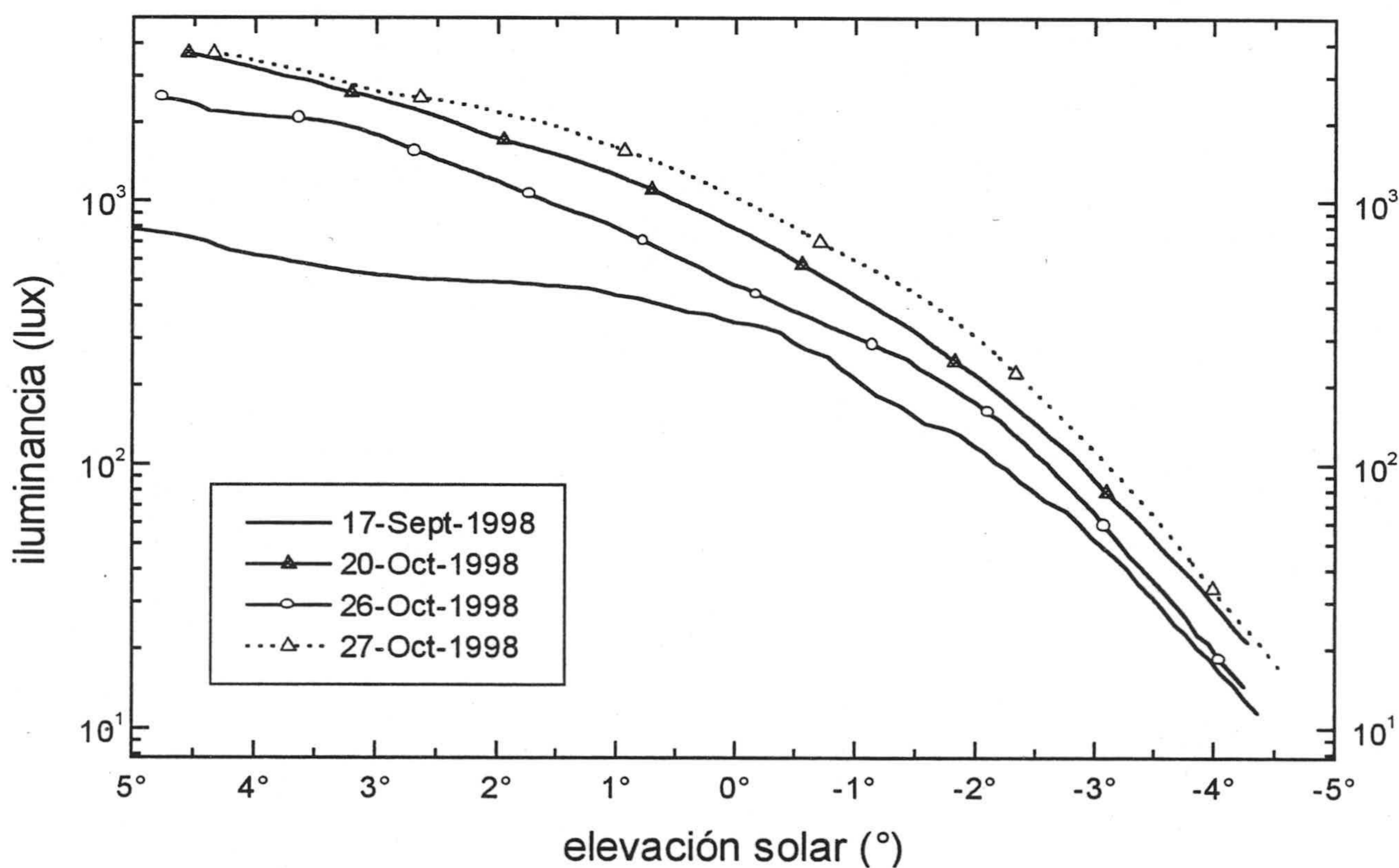


Figura 6. 18.- Evolución de la iluminancia sobre una superficie horizontal, durante los 4 crepúsculos con condiciones de cielos mixtas, en función de la elevación solar.

También existe una relación lineal entre iluminancia y la irradiancia (integrada entre 380 y 780 nm) para el tipo de medidas descrito en este capítulo, tal y como se muestra en la figura 6.19. La ecuación que liga ambas magnitudes (la irradiancia expresada en W/m^2 y la iluminancia expresada en luxes), con un coeficiente de correlación de 0,99955, es:

$$E_v = -30,11333 + 189,27787 \cdot \int_{380}^{780} E_e(\lambda) d\lambda$$

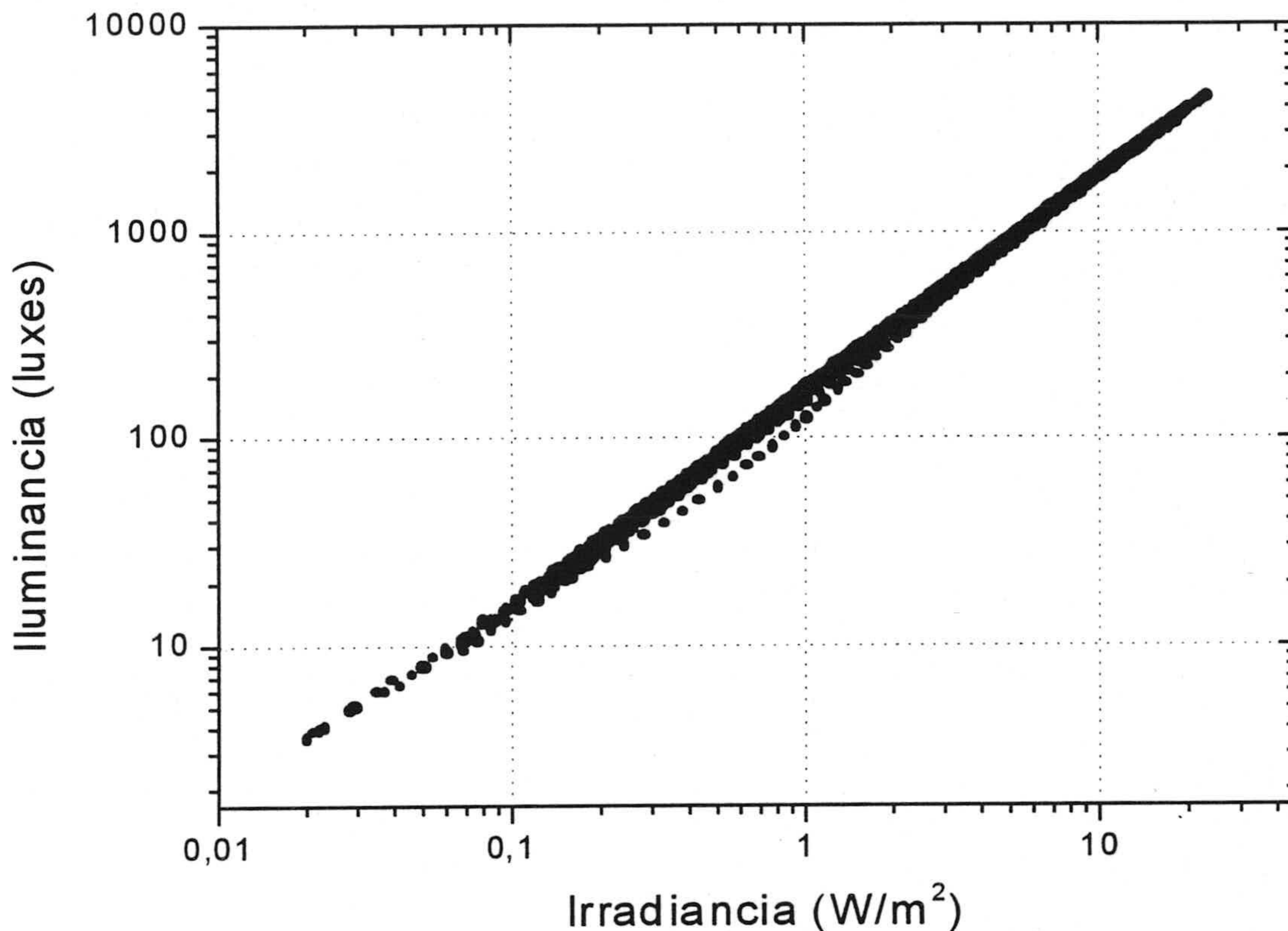


Figura 6. 19.- Relación entre iluminancia e irradiancia (integrada entre 380 y 780 nm) para las 1.485 medidas espectrales de luz-día durante crepúsculos.

Analizando el valor de la eficiencia luminosa (cociente entre la iluminancia y la irradiancia integrada) en función de la posición del Sol para los días con cielos totalmente despejados, figura 6.20, observamos una misma evolución, a pesar de que los valores absolutos difieren unos de otros. De hecho se observan diferencias que alcanzan hasta los 30 lumen/W. Es muy patente la diferencia entre una de las curvas (29-Marz-1999) y el resto: precisamente esta curva pertenece a uno de los dos días en los que no se observa una evolución cromática tipo “S”. Sin embargo el otro día con evolución tipo “S” (29-Oct-1998) no posee una evolución de la eficacia luminosa tan distinto del resto.

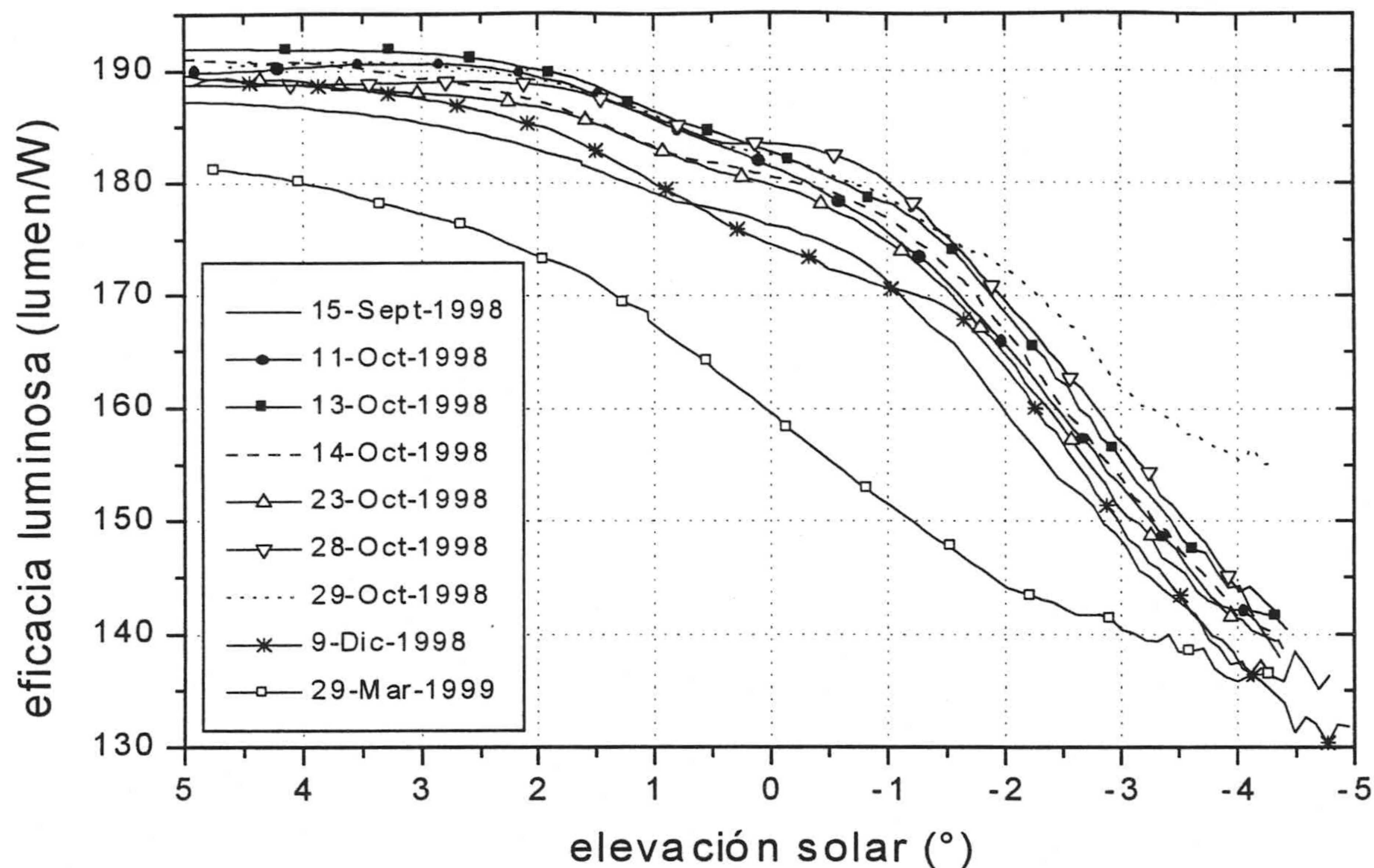


Figura 6.20.- Eficacia luminosa en función de la elevación solar para los 9 crepúsculos con cielos totalmente despejados.

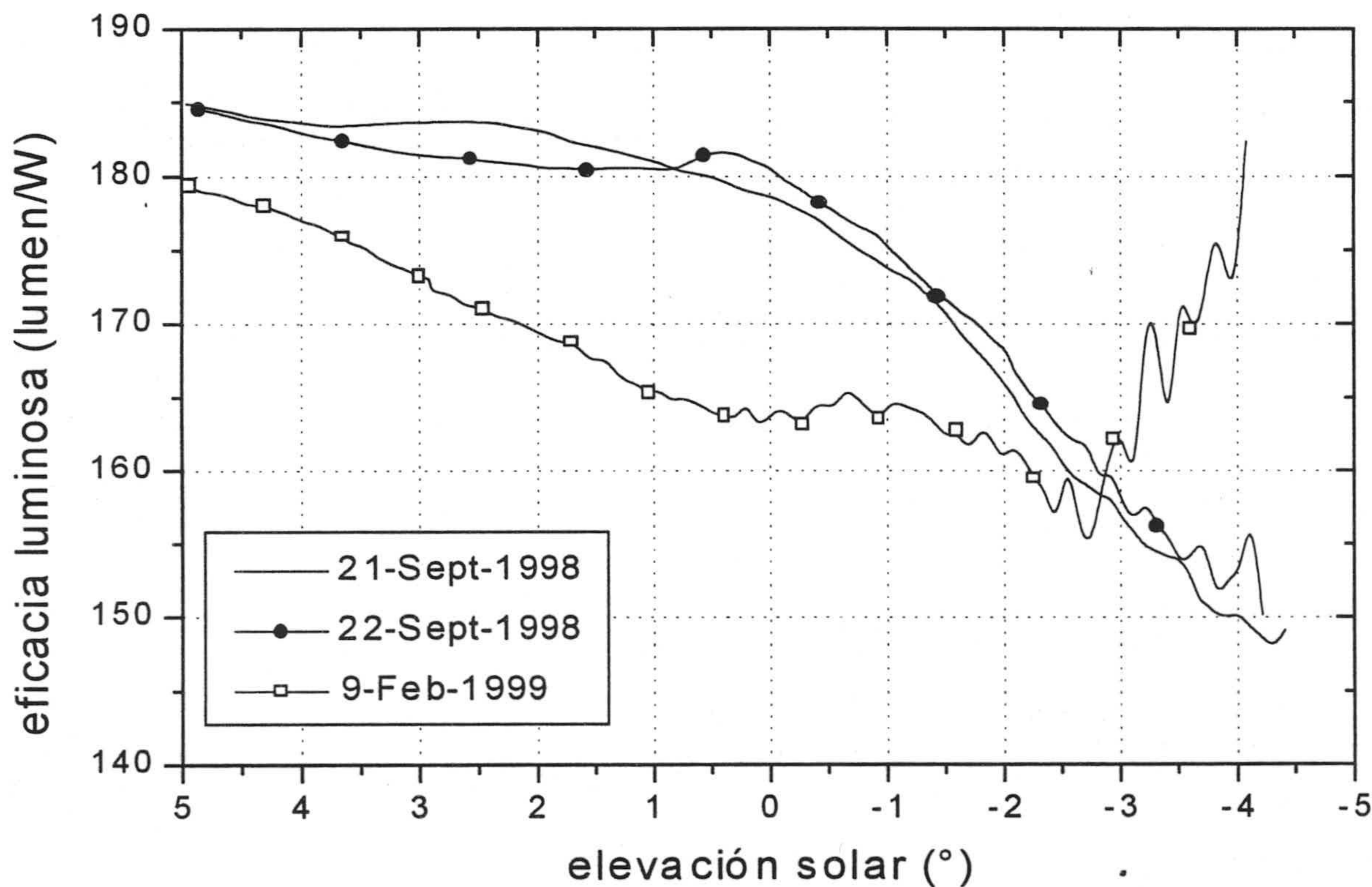


Figura 6.21.- Eficacia luminosa en función de la elevación solar para los 3 crepúsculos con cielos totalmente cubiertos.

En cuanto a los 3 días con cielos totalmente cubiertos existen dos de ellos (21-Sept-1998 y 22-Sept-1998) cuyas eficacias luminosas disminuyen a medida que decrece la elevación solar (de forma idéntica a días con cielos despejados). Sin embargo en el tercero (9-Feb-1999) la eficacia luminosa alcanza un mínimo en torno a $-2,5^\circ$ y posteriormente decrece aunque su curva posee evidentes pequeñas oscilaciones. Estas pequeñas oscilaciones distribuidas a lo largo de la curva (también observadas en las curvas de iluminancia en función de la elevación solar) se presentan en crepúsculos con cielos cubiertos y en condiciones mixtas (figura 6.22) y están causadas por pequeñas pero continuas variaciones en los espesores ópticos de la atmósfera.

En los 4 crepúsculos con condiciones de cielo mixtas hemos hallado la eficacia luminosa mínima de todas las medidas adquiridas en esta campaña: ~ 110 lumen/W, alcanzada para una elevación solar en torno $-3,5^\circ$ el 27-Oct-1998. Bajo condiciones mixtas la evolución con la elevación solar de la eficacia luminosa no presenta un comportamiento estándar pues a pesar de que en general se observa una disminución de su valor a medida que decrece la elevación solar, existen dos crepúsculos en los que el valor mínimo no se alcanza para la mínima elevación solar (26-Oct y 27-Oct de 1998). En estos dos casos, además, la elevación solar para la que se obtiene la mínima eficacia luminosa difiere en casi 1° .

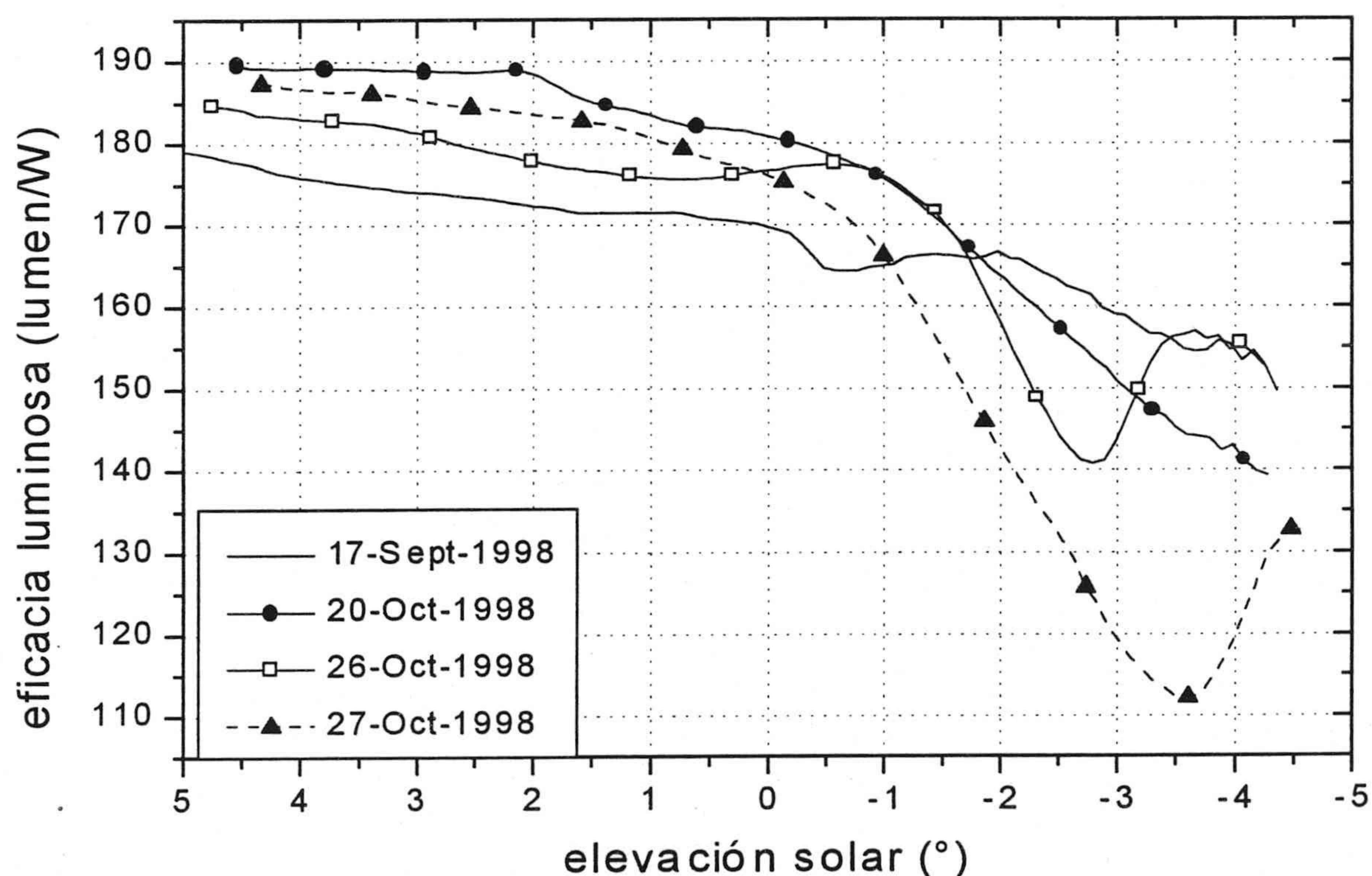


Figura 6.22.- Eficacia luminosa en función de la elevación solar para los 3 crepúsculos con cielos totalmente cubiertos.

6.4. Análisis de autovectores

Con las 1.485 curvas espectrales de luz-día durante crepúsculos calculamos la matriz de correlación que diagonalizamos para obtener los autovectores y autovalores en el único rango espectral (380-780 nm) en el que podemos determinarlos. Los seis primeros autovectores se muestran en la figura 6.23.

Nuestro segundo autovector se corresponde, análogamente a como ocurría con las otras dos campañas de medidas con una variación amarillo-azul. Por el contrario, y a diferencia de lo obtenido en los dos capítulos anteriores, el tercer autovector correspondiente a la campaña de luz-día crepuscular si que se corresponde con una variación verde-púrpura. Recordamos que en las otras dos campañas no se observada este hecho (que detallamos en el capítulo 7) descrito, entre otros, por Judd *et al.* [1964].

La contribución de los autovalores a la traza de la matriz de correlación en el conjunto de medidas de luz-día durante crepúsculos se muestra en la tabla VI.2. De nuevo encontramos el mismo resultado obtenido en los conjuntos de medidas de luz-día y luz-cielo: con un número pequeño de vectores se consigue una gran contribución. Sin embargo los resultados son bastante distintos: el crecimiento de la contribución con el número de vectores usados es mucho más lento que en los otros dos conjuntos de medidas. Este hecho era previsible pues la variedad colorimétrica es muy superior en el conjunto de medidas analizados en este capítulo, y por tanto su variedad espectral: esta mayor variabilidad provoca que se necesiten más vectores para alcanzar un mismo valor de contribución. Para las medidas de luz-día crepusculares se necesitan 18 vectores para conseguir una contribución superior al 99,99%, mientras que para las medidas de luz-día y luz-cielo se 5 y 6 vectores respectivamente.

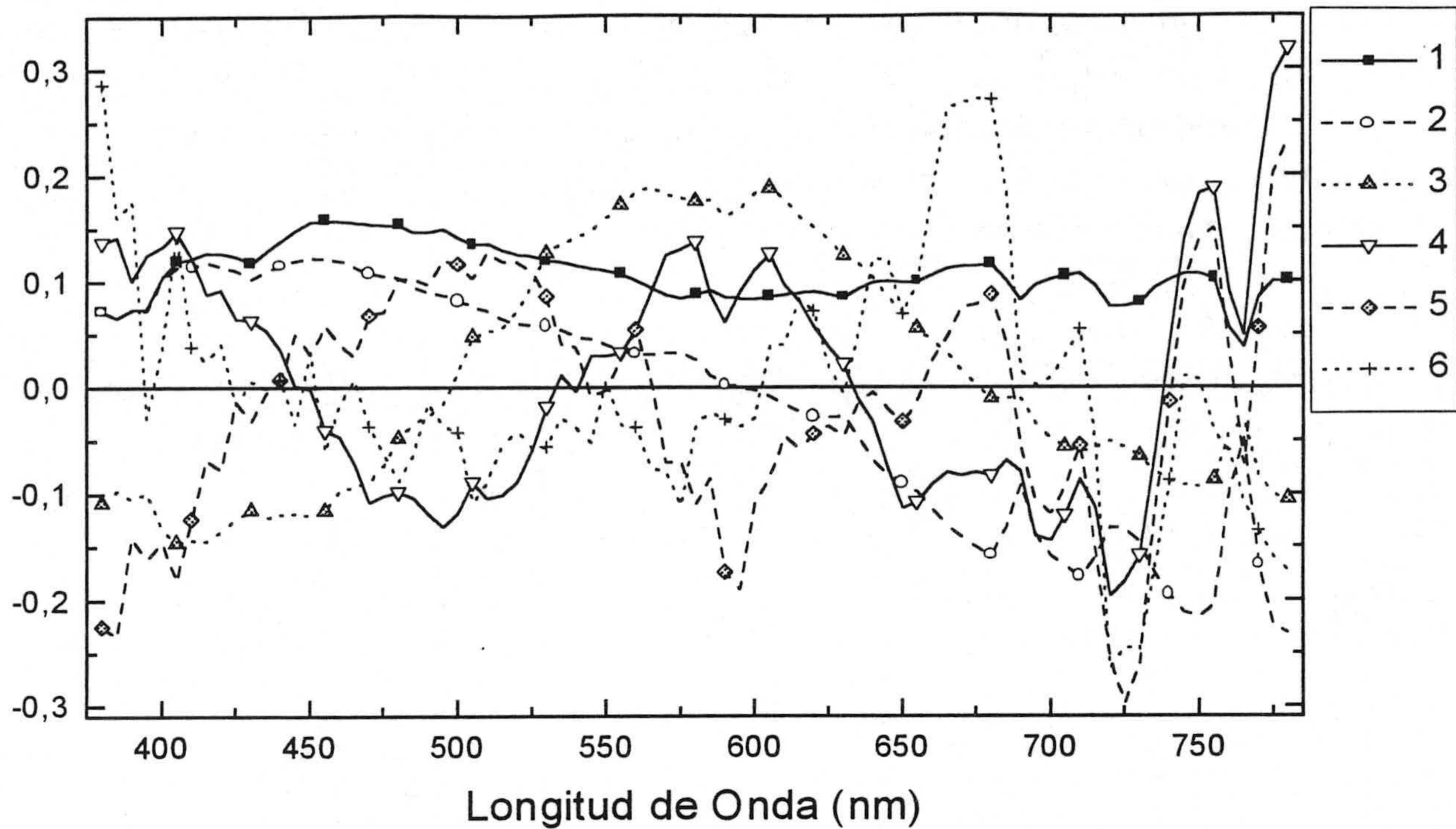


Figura 6. 23.- Seis primeros autovectores en el rango espectral 380-780 nm, correspondientes al conjunto formado por las 1.485 medidas de luz-día durante crepúsculos adquiridas en Granada.

380-780 nm	
1	97,900
2	99,528
3	99,894
4	99,931
5	99,951
6	99,959
7	99,964
8	99,969
9	99,973
10	99,976
15	99,987
18	99,990

Tabla VI. 2.- Contribución a la traza de los autovalores, en %, correspondientes al conjunto de medidas de luz-día durante crepúsculos.

6.5. Curvas de luz-día crepuscular estándar

Por razones apuntadas en el primer apartado de este capítulo en esta campaña de medidas no tiene sentido aplicar el método de la CIE para reconstruir curvas espectrales a partir de una TCC, pues en dicho método hay que tener en cuenta la ecuación del *locus*.

Anteriormente señalabamos que la gran variación púrpura-verde en el diagrama cromático de nuestras medidas hace inviable el cálculo de un *locus*. Sin embargo para poner de manifiesto esta inviabilidad hemos calculado el *locus* y hemos aplicado el método de la CIE para evidenciar su limitación cuando la variabilidad colorimétrica (y por tanto espectral) en el conjunto de medidas es grande.

“Calculando” el “*locus*” en el diagrama cromático CIE-1931, y dibujado en la figura 6.24, obtenemos la siguiente ecuación, con un coeficiente de correlación de tan sólo 0,8653:

$$y = -0,49936 + 4,71883x - 6,69900x^2$$

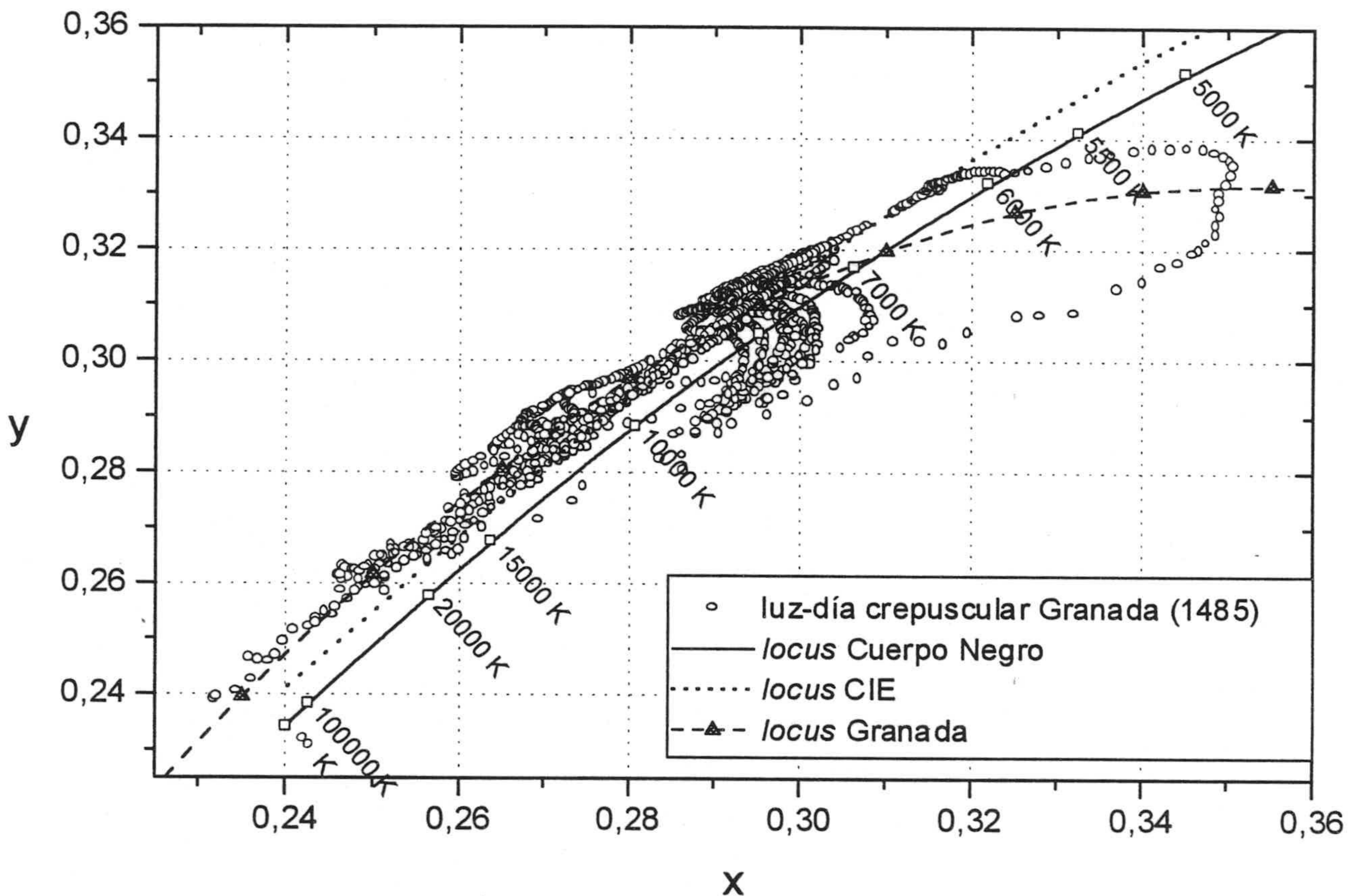


Figura 6. 24.- Coordenadas de cromaticidad del conjunto de medidas de luz-día durante crepúsculos y su “*locus*” correspondiente.

Como se observa en dicha figura la semejanza entre nuestro “*locus*” y el de la CIE difiere muy notablemente para TCCs inferiores a 7.000 K.

Si hubiésemos calculado la ecuación del “*locus*” en el diagrama cromático CIE-1976 hubiéramos obtenido, con un coeficiente de correlación, aún menor, de 0,698:

$$v' = -1,20701 + 15,84424u' - 37,47322u'^2$$

Con estas ecuaciones ya podemos obtener curvas estándar de luz-día en crepúsculos para distintas coordenadas de cromaticidad, pues la ecuación que relaciona los escalares M_1 y M_2 con las coordenadas de cromaticidad x_T e y_T (subíndice T para denotar crepúsculos (*Twilights*)) es:

$$M_1 = \frac{0,7470 - 14,0394x_T + 10,8902y_T}{0,6282 + 7,3614x_T - 6,8455y_T}$$

$$M_2 = \frac{-0,6795 - 2,6855x_T + 4,8039y_T}{0,6282 + 7,3614x_T - 6,8455y_T}$$

Si utilizamos este método de reconstrucción utilizando como dato de partida las coordenadas de cromaticidad de las curvas espectrales se consigue un GFC promedio de 0,998. Un 96,2% de las reconstrucciones alcanzan la calidad de aceptables, y sólo un 58,8% y un 3,7% poseen la calidad de buenas y excelentes respectivamente. Estos porcentajes obtenidos son mayores que los obtenidos en los dos capítulos anteriores. Dado que este método de reconstrucción genera curvas metámeras a la original (idénticas coordenadas de cromaticidad pero distinta distribución espectral), al analizar estos porcentajes estamos evaluando, en cierta forma, la existencia de metamerismo entre las 1.485 curvas que forman parte del conjunto de medidas analizadas en este capítulo. Por tanto podemos afirmar que el metamerismo existente entre las curvas que conforman el conjunto de luz-día durante crepúsculos es menor que el existente en el conjunto de medidas de luz-día y aun menor que el existente en el conjunto de medidas de luz-cielo.

También hemos reconstruido las curvas a partir de las coordenadas de cromaticidad utilizando como única información inicial la TCC, siguiendo el método CIE. En nuestro caso usaremos la ecuación que relaciona la TCC, expresada en K, con la coordenada de cromaticidad x , para las 1.485 medidas de luz-día durante crepúsculos:

$$x_T = 0,2347 + \frac{1,80285 \cdot 10^2}{TCC_T} + \frac{3,25279 \cdot 10^6}{TCC_T^2} - \frac{7.23674 \cdot 10^9}{TCC_T^3}$$

y la del "locus" de estas medidas en el diagrama cromático CIE-1931:

$$y_T = -0,49936 + 4,71883x_T - 6,69900x_T^2$$

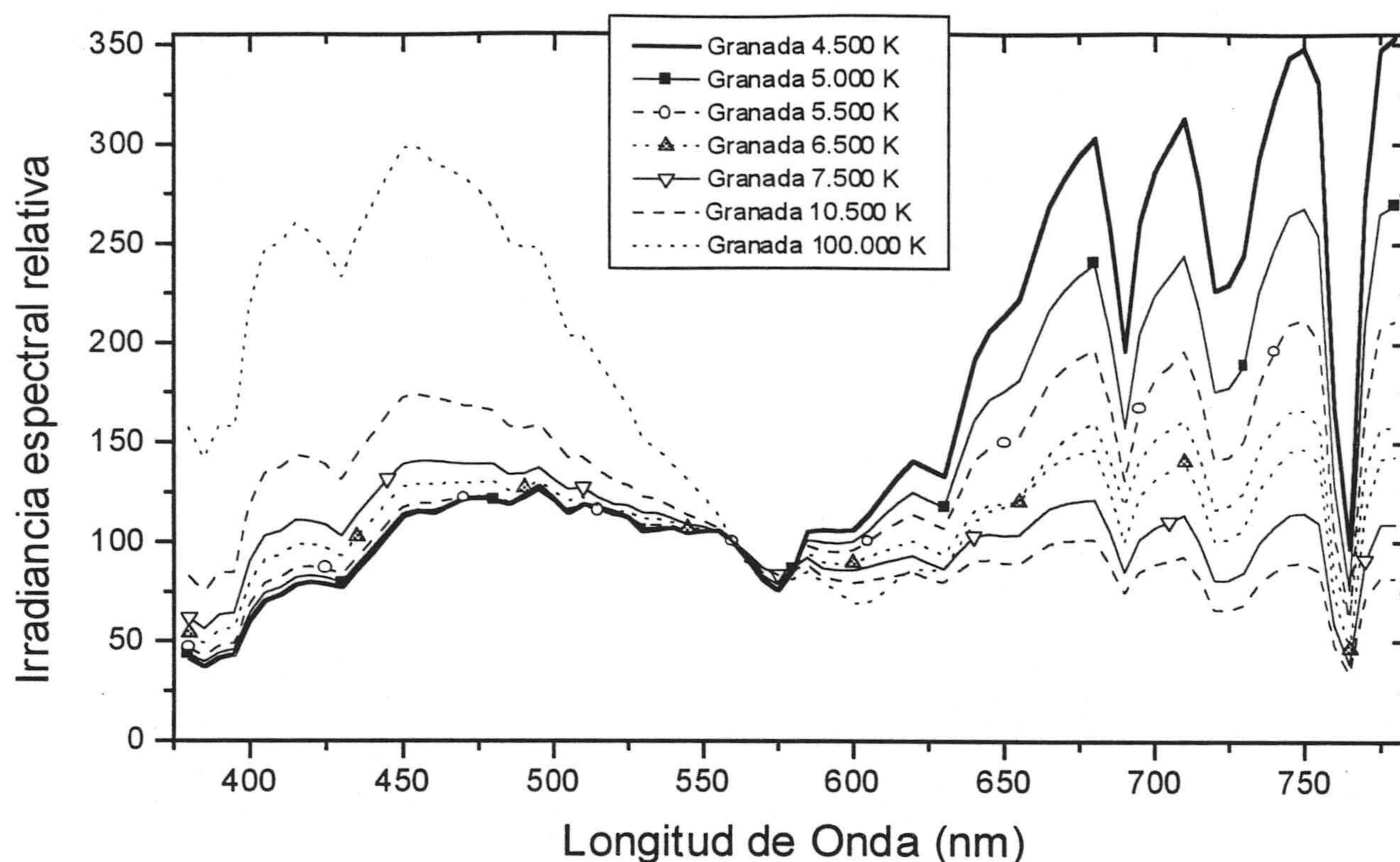


Figura 6. 25.- Distribución espectral de 7 curvas de luz-día crepusculares con diferentes TCC, haciendo uso de los vectores propios de Granada, en el rango espectral 380-780 nm, y normalizadas en 560 nm.

En la figura 6.25 mostramos los perfiles espectrales relativos de 7 curvas de luz-día durante crepúsculos con TCC de 4.500, 5.000, 5.500, 6.500, 7.500, 10.500, y 100.000 K respectivamente. Hay que resaltar que aplicando este método, en el cual generamos curvas espectrales para distintas TCC, las coordenadas de cromaticidad de las curvas generadas están situadas justo en el *locus* calculado; este hecho hay que tenerlo bien en cuenta pues en este conjunto de medidas existen muchas curvas cuyas coordenadas de cromaticidad se hallan muy alejadas del *locus* que las “representa”.

6.6. Calidad de las reconstrucciones

Hemos llevado a cabo la reconstrucción de las 1.485 curvas espectrales de luz-día durante crepúsculos con distinto número de vectores (de 1 a 10), usando la ecuación 4.5 y obteniendo los valores de GFC promedio mostrados en la figura 6.26.

Para que la calidad promedio sea “buena” el número de vectores utilizados debe ser de al menos 3. Sin embargo, aunque usemos hasta 10 vectores, nunca se alcanza una calidad media de “excelente”. En la tabla VI.3 hemos incluido el porcentaje de

reconstrucciones cuyo GFC supera los tres valores de GFC elegidos con un número variable de vectores utilizados entre 1 y 8.

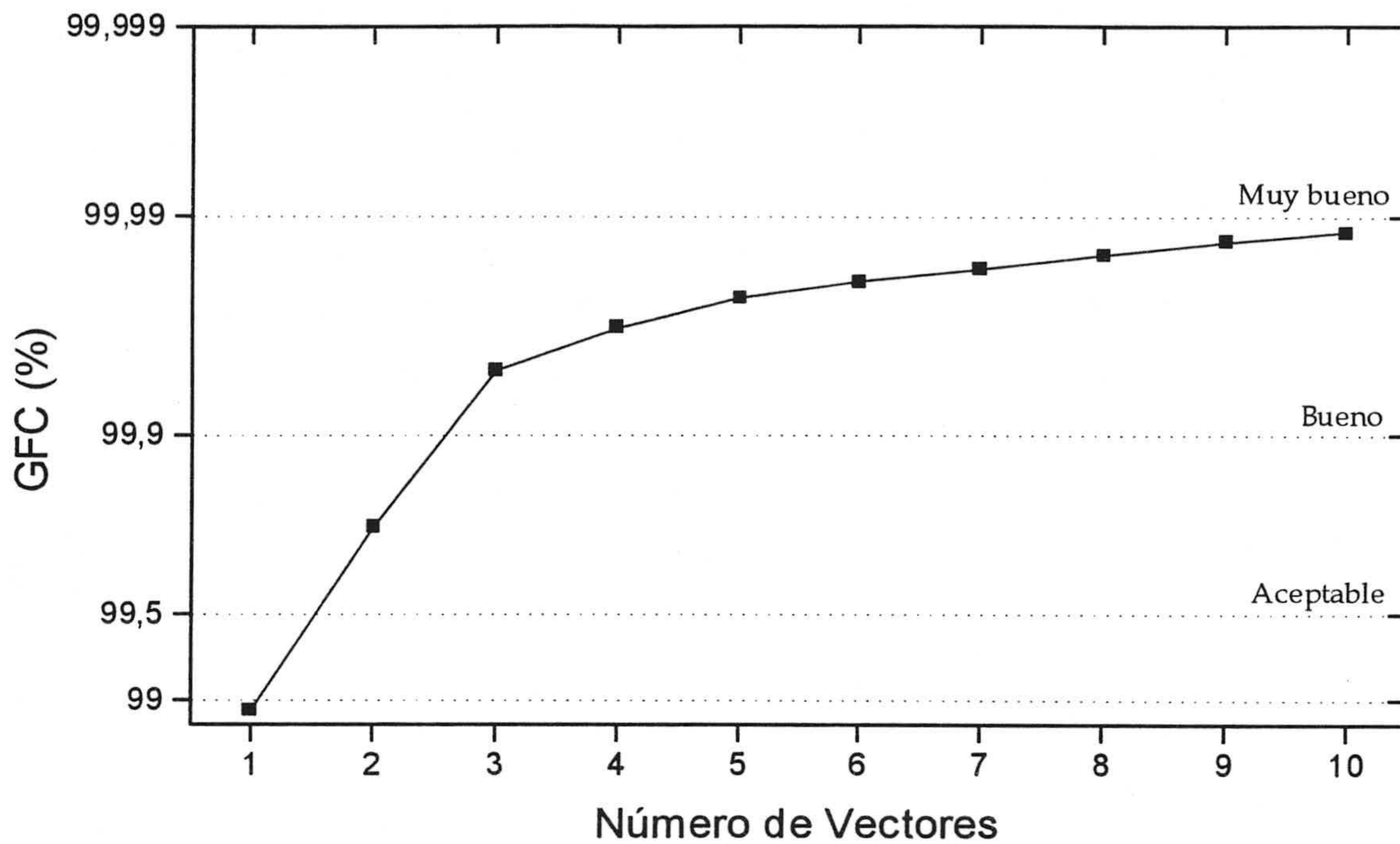
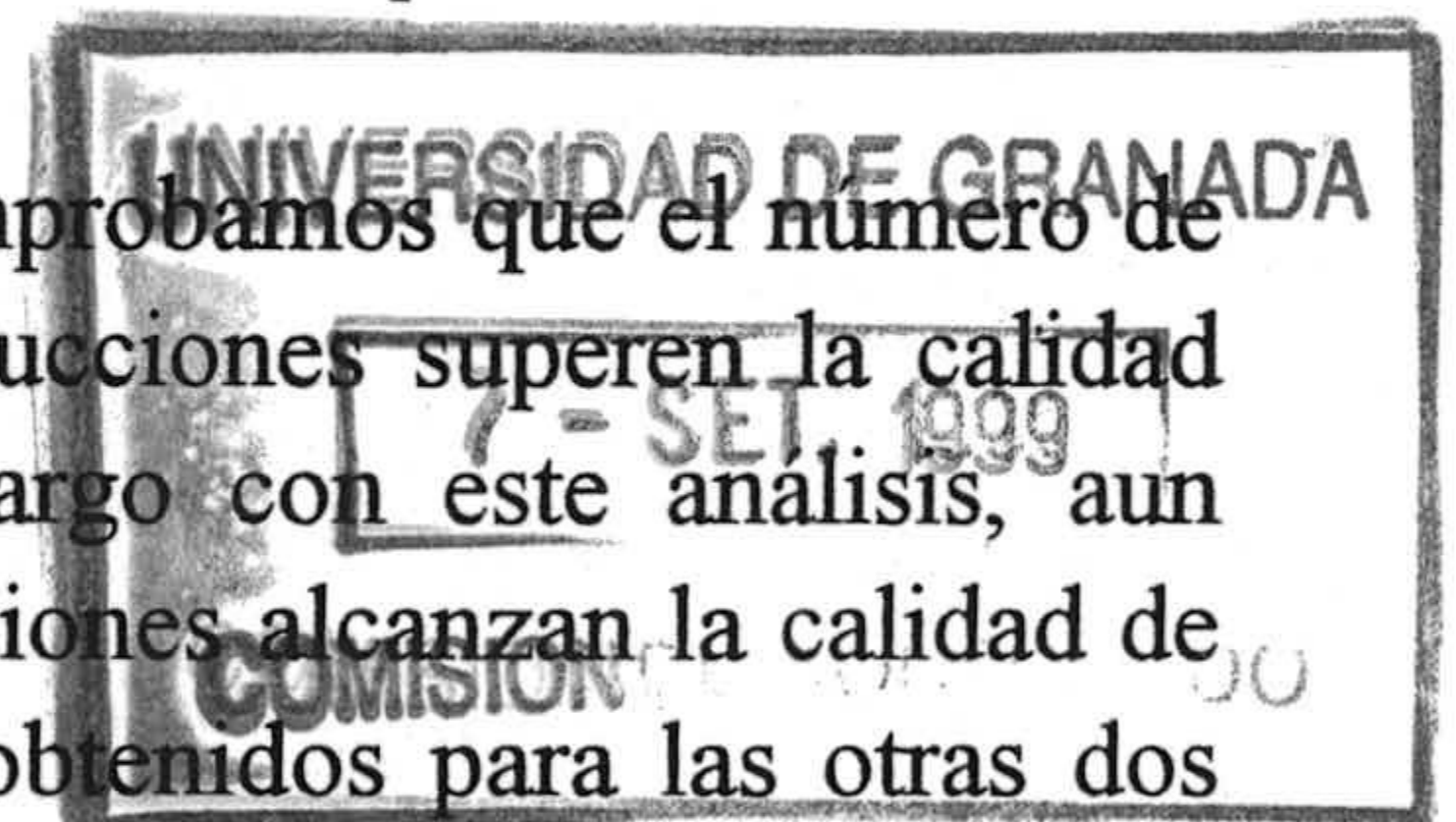


Figura 6. 26.- GFC promedio, utilizando la reconstrucción con distinto número de autovectores obtenidos, para las 1.485 medidas de luz-día durante crepúsculos.

Rango espectral	Número de autovectores utilizados							
	1	2	3	4	5	6	7	8
380-780	55,3	89,3	99,0	99,3	99,3	99,3	99,3	99,3
(81)	8,7	38,6	93,3	96,2	97,3	97,4	97,6	97,6
	0	0	20,4	46,6	69,8	81,7	82,8	84,6

Tabla VI. 3.- Porcentaje de reconstrucciones que superan los 3 valores de GFC elegidos en la tabla IV.4, con distinto número de vectores (1 a 8) para el conjunto formado por las 1.485 curvas espectrales de luz-día durante crepúsculos. Entre paréntesis se ha incluido el número de valores por curva.

Consultando los resultados mostrados en esta tabla comprobamos que el número de vectores necesario para que más de un 95% de las reconstrucciones superen la calidad "aceptable", "buena" es de 3, 4 respectivamente. Sin embargo con este análisis, aun utilizando 8 vectores nunca más de un 95% de las reconstrucciones alcanzan la calidad de excelente. Este resultado difiere de forma evidente con los obtenidos para las otras dos campañas de medidas. La gran gama cromática abarcada por estas medidas justifica este resultado: al haber mayor variación espectral en el conjunto de medidas se requiere un número de autovectores superior para poder reconstruir las curvas con cierta calidad.



Los porcentajes mostrados en la tabla VI.3 nos vuelven a confirmar un hecho ya apuntado en los dos capítulos anteriores: las recomendaciones de la CIE en cuanto a utilizar únicamente tres vectores a la hora de reconstruir curvas espectrales se manifiesta insuficiente, pues con este número tan pequeño de vectores no se consiguen las calidades adecuadas.

Analizando la semejanza colorimétrica entre la curva original y la reconstruida para un número de vectores variable (entre 1 y 10), mediante la distancia Euclídea media entre coordenadas de cromaticidad (figura 6.27), comprobamos que son necesarios cinco vectores para que esta sea inferior a 0,001. A diferencia de lo que ocurría en los otros dos conjuntos de medidas analizados nunca se consigue una distancia Euclídea media inferior a 0,0001, aun utilizando 10 vectores. La correspondencia no lineal, y nada simple, entre calidad espectral y calidad colorimétrica queda bien reflejada en esta figura.

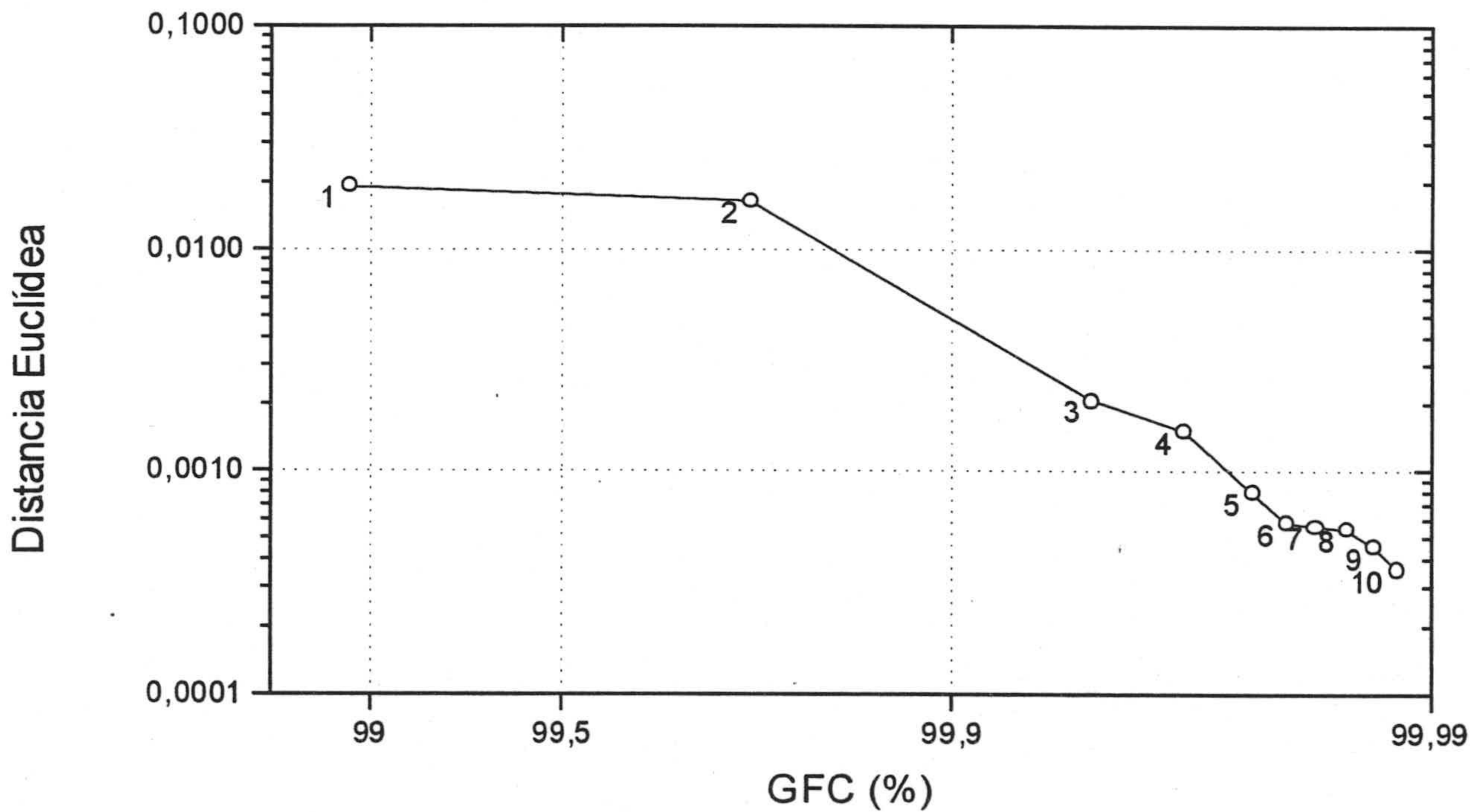


Figura 6. 27.- Distancia Euclídea promedio entre coordenadas de cromaticidad en función del GFC promedio para las 1.485 curvas de luz-día en crepúsculos.

Capítulo 7: Discusión de resultados

“¡Qué hermosas son las noches de Granada!
¡Cuánto placer la atmósfera respira!
Es una noche azul de primavera.
millares de lucientes luminaires
dan tibia luz a la terrestre esfera,
de flores aromáticas millares
alfombran a la tierra y la ligera
brisa en la regia estancia de Comares,
a través de los áureos miradores”
Poema a la Alhambra, José de Zorrilla

En este capítulo vamos a analizar colorimétrica y espectralmente el conjunto compuesto por 5.652 medidas de luz natural sin tener en cuenta su procedencia. Así mismo intercompararemos los resultados correspondientes a cada una de las tres campañas llevadas a cabo en esta Memoria de Doctorado. Finalizaremos este capítulo proponiendo una ecuación para el cálculo de la TCC a partir de las coordenadas de cromaticidad x e y .

7.1. Coordenadas de cromaticidad

Agrupando los tres conjuntos de medidas anteriormente descritos, tendremos el mayor conjunto de medidas experimentales de luz natural existente hasta la fecha en la literatura. En este apartado analizaremos las características colorimétricas de dicho conjunto, de forma análoga a como hicieron muchos investigadores en sus trabajos citados en el capítulo 2 de esta memoria de doctorado; es decir, sin tener en cuenta el tipo de medidas que habían adquirido, tratándolas todas bajo el nombre de luz-día.

En primer lugar, mostramos en la figura 7.1 la distribución de las coordenadas de cromaticidad del conjunto total compuesto por 5.652 medidas (2.600 de luz-día, 1.567 de luz-cielo y 1.485 de luz-día en crepúsculos) y calculamos su *locus* correspondiente (con un coeficiente de correlación de 0,9666):

$$y = -0,24031 + 2,77302 x - 3,06481 x^2$$

En el diagrama cromático CIE 1976, las coordenadas de cromaticidad son las mostradas en la figura 7.2 y su *locus* asociado (coeficiente de correlación: 0,89309):

$$v' = -1,11627 + 14,40792 u' - 32,40475 u'^2$$

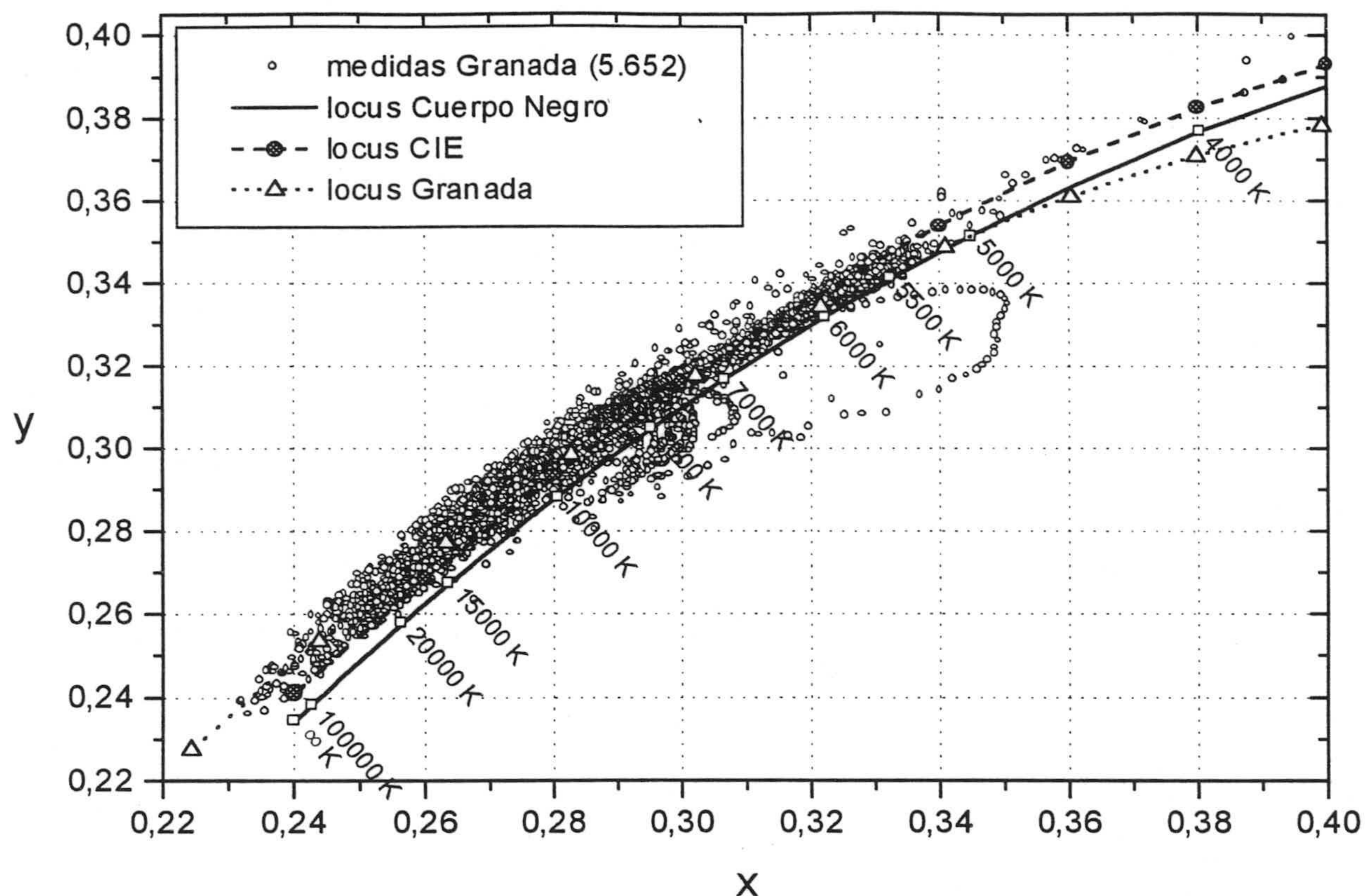


Figura 7.1.- Coordenadas de cromaticidad, en el diagrama cromático CIE 1931, de las 5.652 medidas de luz natural realizadas en Granada, y su *locus* asociado.

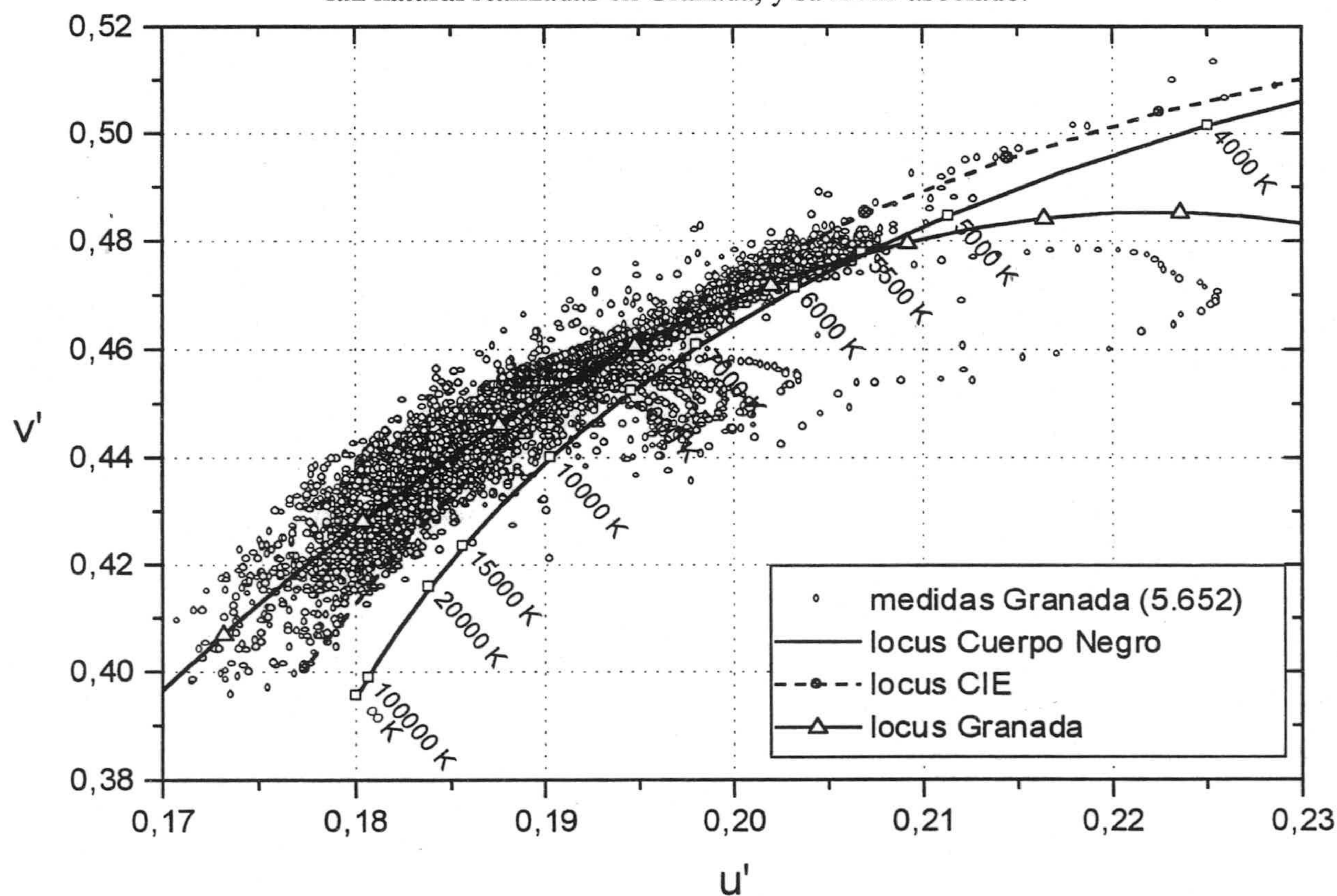


Figura 7. 2.- Coordenadas de cromaticidad de las 5.652 medidas de luz natural realizadas en Granada, en el diagrama cromático CIE 1976, y su *locus* asociado.

Como ya apuntamos en el capítulo dedicado a las medidas de luz-cielo es sorprendente el hecho de que todas estas coordenadas de cromaticidad, obtenidas físicamente, caigan dentro de la región denominada *acromática* en el diagrama cromático CIE-1931 o en el CIE-1976. Mucho más sorprendente cuando tenemos en cuenta que dentro de estas medidas están incluidas aquellas correspondientes a luz-cielo; cielo que durante días despejados ningún ser humano negará que posee color azul.

La extensión cromática azul-rojo abarcada por cada una de las tres campañas está reflejada en la tabla VII.1, donde se muestran los valores máximos y mínimos en la coordenada de cromaticidad x . En la dirección verde-púrpura es más difícil evaluar la extensión de nuestras medidas, a menos que se haga de forma visual.

Tipo de medidas	x mínimo	x máximo
luz-día	0,2397	0,3936
luz-cielo	0,2329	0,3948
luz-día en crepúsculos	0,2319	0,3507

Tabla VII.1.- Rango cromático abarcado por las tres campañas, analizado mediante los valores máximos y mínimos de la coordenada de cromaticidad x .

Es obvio, a partir de los valores mostrados, que las medidas con mayor variación cromática en la dirección azul-rojo son las correspondientes a la campaña de luz-cielo. Sin embargo, a pesar de su extensión, los azules más puros (más saturados) se obtuvieron en la campaña de luz-día durante crepúsculos. En cuanto a la variación verde-púrpura, es esta última campaña de medidas (luz-día durante crepúsculos) la que posee mayor extensión en dicha dirección.

Si dibujamos en la figura 7.3 los *loci* obtenidos, correspondientes a cada una de las tres campañas llevadas a cabo y al conjunto total, cuyas ecuaciones han sido incluidas en los capítulos 4, 5, 6 y 7, y lo comparamos con el CIE *locus*, observamos como para TCCs por debajo de ~ 9.000 K el *locus* de la CIE representa razonablemente bien la variación colorimétrica de la luz-día y luz-cielo.

Tras observar la disposición del *locus* de la campaña de luz-día crepuscular, muy por debajo del CIE *locus* para bajas TCCs, podríamos concluir, de forma precipitada, que el CIE *locus* es claramente inadecuado para representar las características colorimétricas de nuestra tercera campaña de medidas. Debemos recordar, por tanto, como hemos calculado el *locus* para esta campaña; advertimos en el capítulo anterior como la gran variación púrpura-verde encontrada en estas medidas, para bajas TCCs, es la responsable de que sea inviable el cálculo de un *locus* que las represente (el coeficiente de correlación al calcularlo en el diagrama CIE 1931 era de

tan sólo 0,8653). Análogamente podríamos decir lo mismo para el *locus* del conjunto total cuyo coeficiente es muy pobre para bajas TCCs.

Otra característica que hay que destacar es que para altas TCCs (por encima de ~ 9.000 K), el CIE locus se sitúa por debajo del resto de los *loci* calculados para las tres campañas de medidas llevadas a cabo en esta Memoria de Doctorado. Es decir todas nuestras medidas con TCCs superiores a ~ 9.000 K son más *verdes* que las propuestas por la CIE.

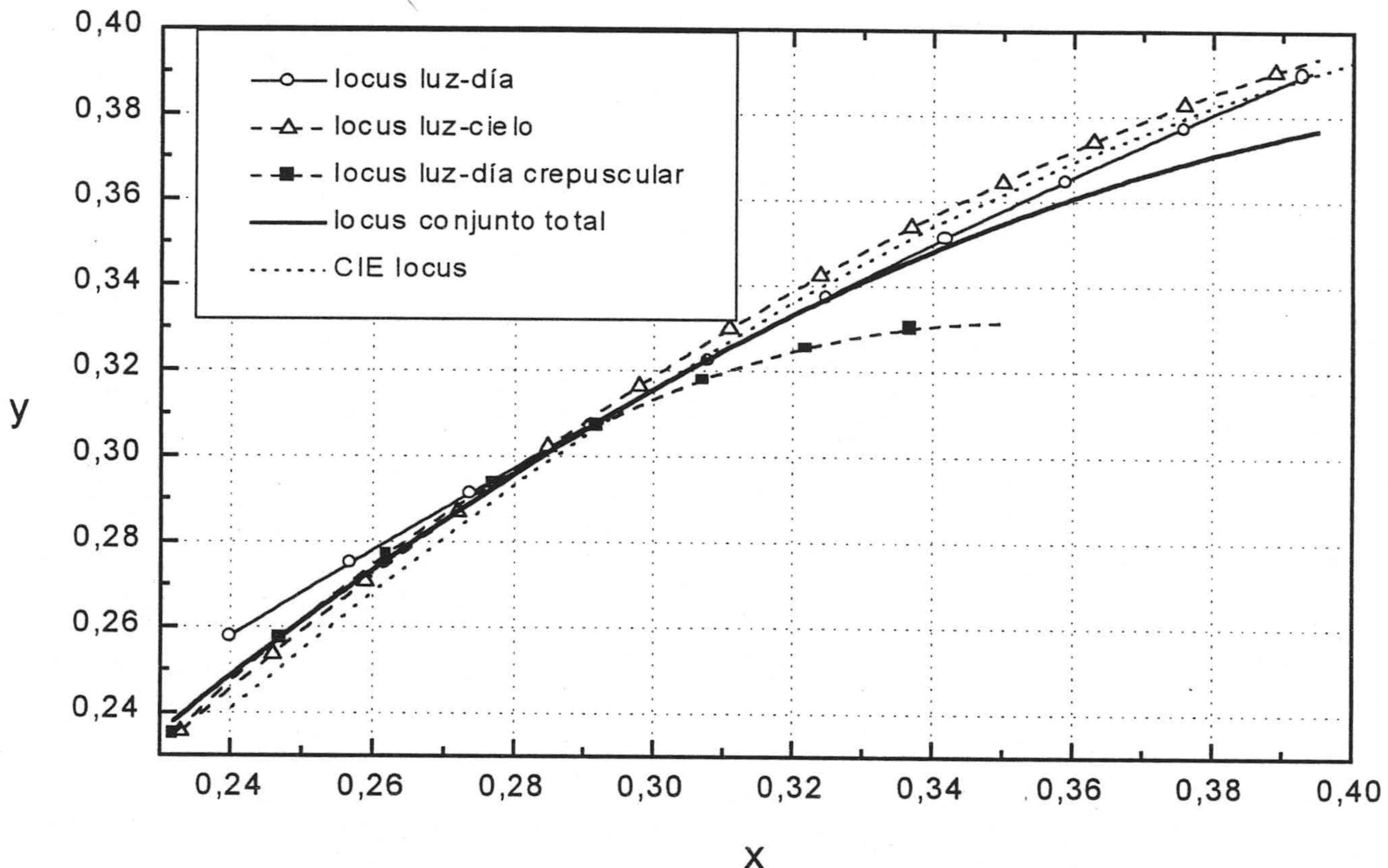


Figura 7. 3.- Comparación de los *loci* correspondientes a cada una de las campañas de medidas analizadas y al conjunto total.

También es importante la comparación entre el *locus* correspondiente a las medidas de luz-día y el correspondiente a las medidas de luz-cielo. Este último se sitúa por encima del anterior para bajas TCCs (valores menores de ~ 9.000 K). Sin embargo por encima de este valor, el comportamiento se invierte. Además para altas TCCs es el *locus* correspondiente a las medidas de luz-día el que más localizado se encuentra en la región de los verdes de los tres *loci*.

Las diferencias entre los distintos *loci* mostrados en la figura 7.3 varían entre las 8 unidades de MacAdam para altas TCCs entre el *locus* de luz-día y el de la CIE, las 9 unidades para TCC medias entre el *locus* de luz-cielo y el de luz-día crepuscular y las 7 unidades MacAdam entre el *locus* de luz-cielo y el correspondiente al conjunto total de medidas.

7.2. Temperatura de color correlacionada (TCC)

Analizando las TCC de estos tres tipos de medidas, y compendiando lo mostrado anteriormente, presentamos la figura 7.4, donde se muestran las frecuencias relativas (normalizada al 100%) de TCC en el intervalo 3.000 K-25.000 K.

Percibimos claramente que la campaña de luz-día presenta una característica más definida en cuanto al valor de la TCC. No existe, pues, ninguna duda de qué valor de TCC es el más representativo para esta campaña: $5.600 \text{ K} \pm 100 \text{ K}$, con un 24,3% de las medidas. Algo similar, aunque menos acentuado, ocurre con las medidas de luz-día crepusculares cuyo intervalo más frecuente está situado en $8.100 \pm 100 \text{ K}$. Por el contrario es difícil proporcionar una TCC característica de las medidas de luz-cielo pues su distribución es bastante más homogénea. Estos resultados se han resumido en la tabla VII.2, en donde se muestra el intervalo de TCC más frecuente y el porcentaje de medidas en dicho intervalo para las 3 campañas de medidas.

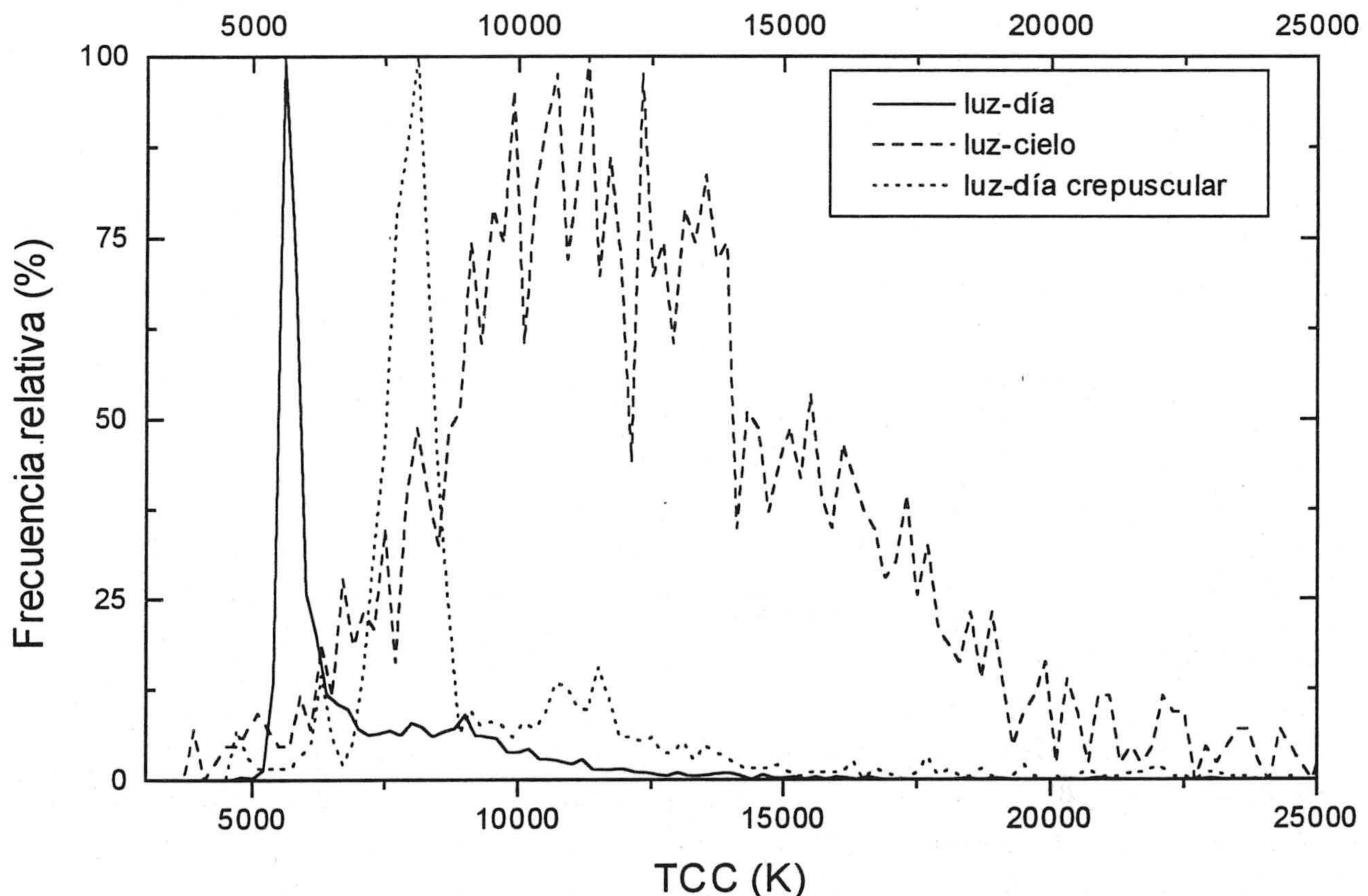


Figura 7. 4.- Frecuencias relativas de la TCC para cada una de las tres campañas de medidas espectrorradiométricas realizadas.

En la figura 7.5 hemos incluido el histograma parcial de TCC correspondiente al conjunto total de medidas (5.652) con un intervalo de ancho 500 K. En este caso la TCC más frecuente, con un 21,2% de las medidas, es la situada entre 5.500 K y 6.000 K. El segundo intervalo más frecuente es el comprendido entre 8.000 y 8.500 K con un 9,1%.

Campaña	intervalo de TCC más frecuente	Porcentaje de medidas en este intervalo (%)
luz-día	5.600 K ± 100 K	24,3 %
luz-cielo	11.300 ± 100 K	2,8 %
luz-día en crepúsculos	8.100 ± 100 K	12,5 %

Tabla VII.2.- Intervalo de TCC más frecuente (con un ancho de 200 K) y porcentaje de medidas en dicho intervalo, para cada una de las tres campañas de medidas realizadas en esta Memoria de Doctorado.

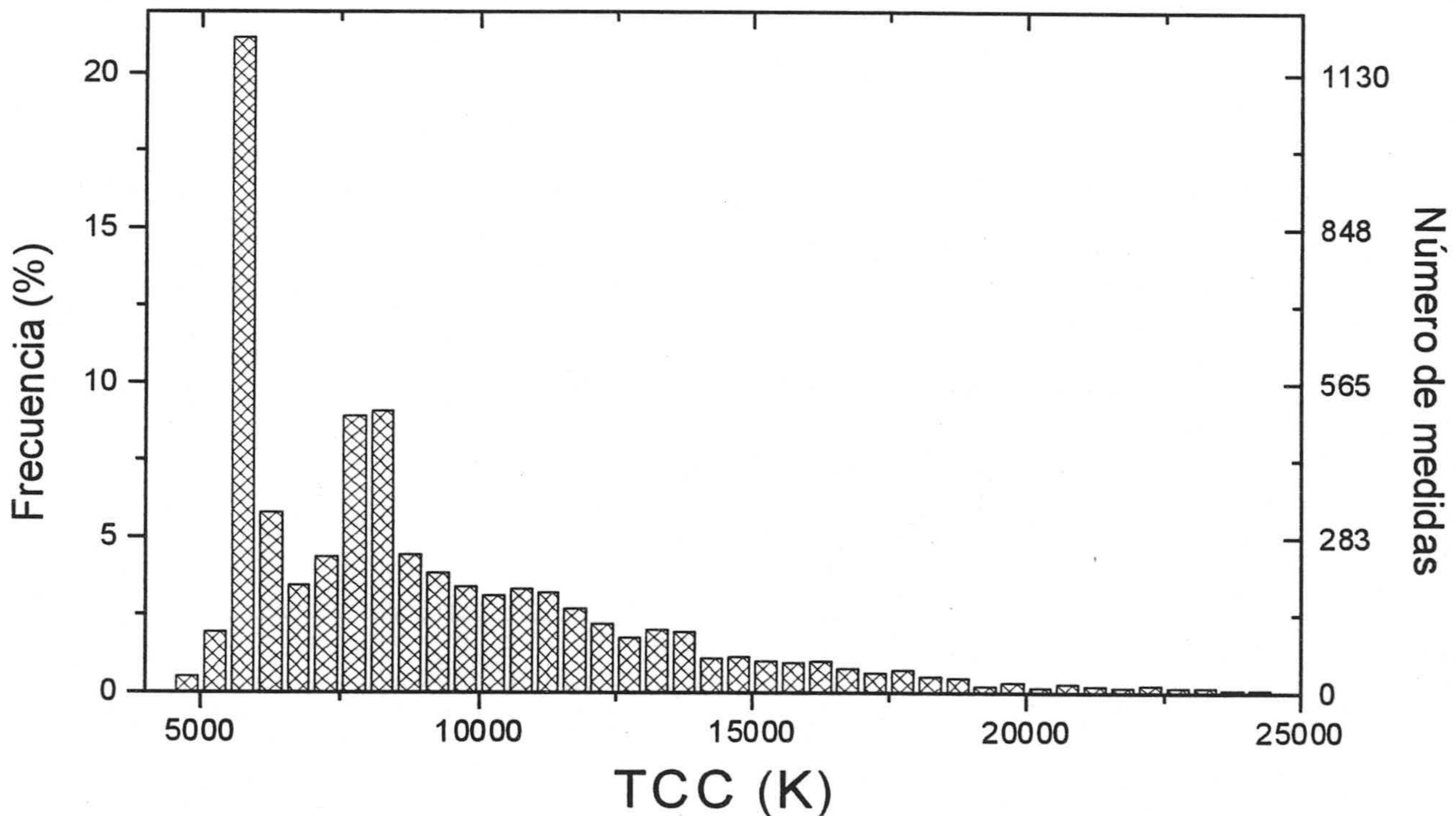


Figura 7. 5.- Histograma (parcial) de TCC correspondiente a las 5.652 medidas totales.

Si expresamos la TCC en mireds el histograma es el mostrado en la figura 7.6. En este caso el ancho de los intervalos es de 5 mireds y el intervalo más frecuente el comprendido entre 175 y 180 mireds (5.555 K – 5.714 K). Este resultado, obtenido sobre el conjunto formado por las tres campañas de medidas concuerda con el Henderson y Hodgkiss [1963], Winch *et al.* [1966] y Dixon [1978].

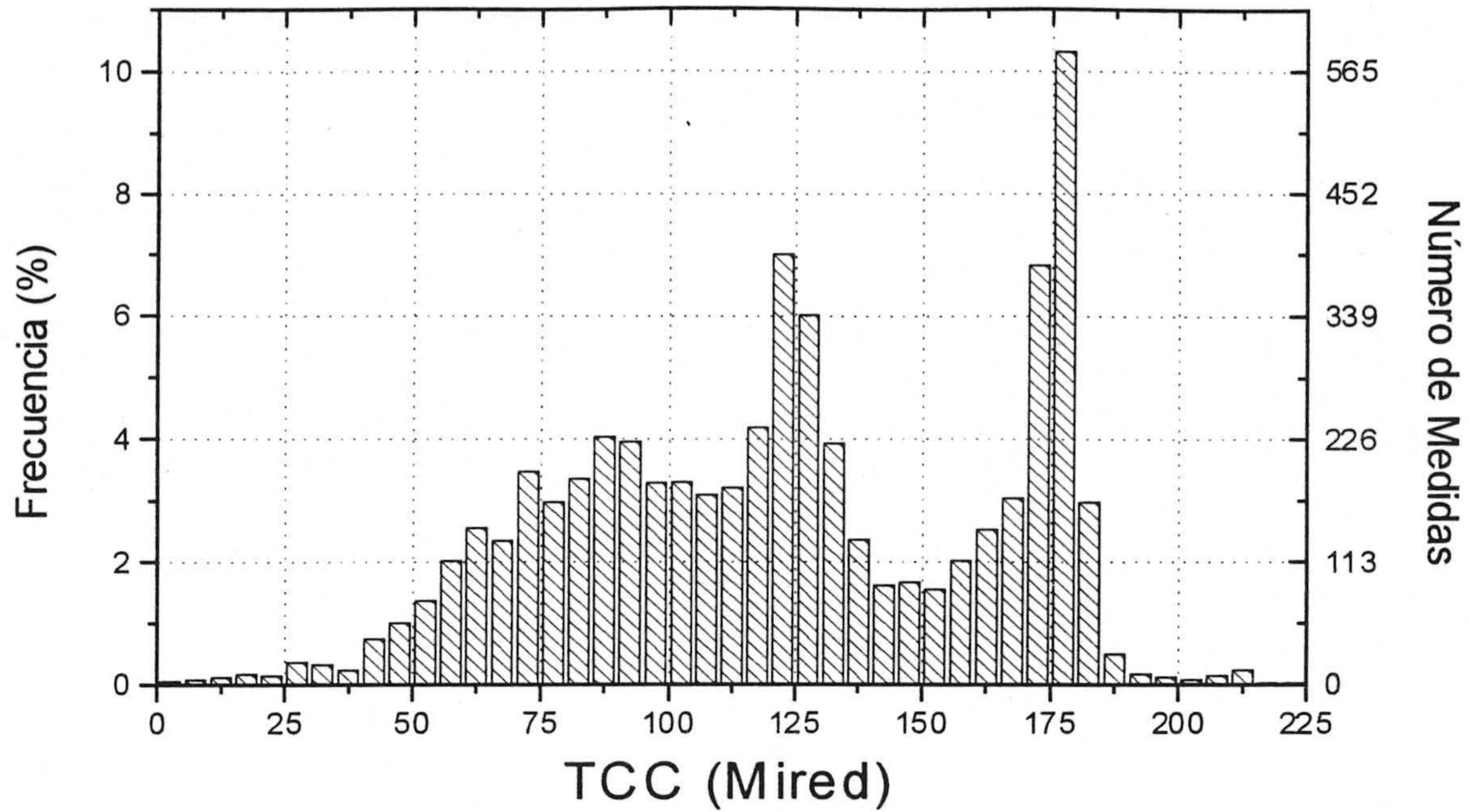


Figura 7. 6.- Histograma de TCC, expresado en mireds, correspondiente al conjunto total de 5.652 medidas.

7.3. Análisis de autovectores

Dado que las medidas realizadas en las 3 campañas no coinciden en cuanto a intervalo espectral, el análisis que presentamos en este apartado y siguientes ha sido realizado considerando las medidas de luz-día en el intervalo espectral similar al de las medidas de luz-cielo y medidas de luz-día crepusculares: 380-780 nm. Por idénticas razones la resolución espectral ha sido limitada a 5 nm.

Con el conjunto formado por las 5.652 medidas espectrales en el intervalo 380-780 nm hemos obtenido sus autovectores correspondientes, mostrados en la figura 7.7.

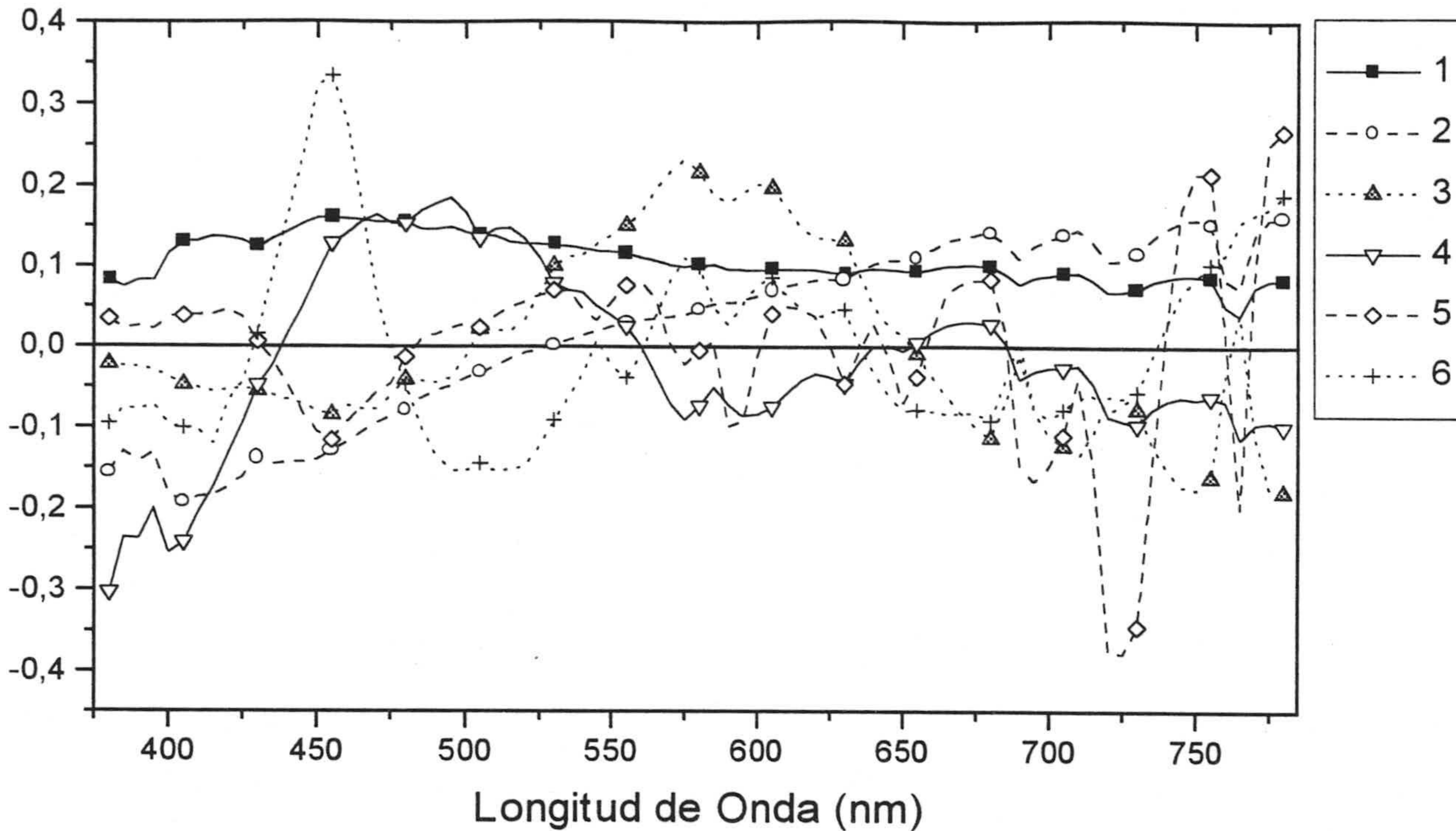


Figura 7. 7.- Seis primeros autovectores en el rango espectral 380-780 nm, correspondientes al conjunto de 5.652 medidas.

De nuevo puede observarse en la figura 7.7 como el segundo y tercer autovector se corresponden con una variación amarillo-azul y verde-púrpura, resultado similar al obtenido en cada una de las tres campañas de medidas.

Es interesante comparar los perfiles espectrales de los primeros autovectores correspondientes a cada una de nuestras campañas. Así en la figura 7.8 se muestra el primer autovector (vector promedio). De las tres campañas el correspondiente a la campaña de luz-cielo posee una cromaticidad razonablemente más azul que los otros dos, figura 7.9, mientras que el más acromático es el de la campaña de luz-día. El de la campaña de luz-día crepuscular se haya entre los otros dos. Cabe resaltar que todos ellos se sitúan cerca del CIE *locus* y que sus TCC son para luz-día, luz-cielo y luz-día crepuscular 6.670, 11.701 y 8.692 K respectivamente; las TCC de los vectores promedios no coinciden (aunque se asemejan) con las TCC más frecuentes de cada campaña (tabla VII.2) como sería razonable pensar. Sin embargo si realizamos el promedio de las coordenadas de cromaticidad de las medidas de cada campaña, y su TCC asociada, obtenemos valores muy similares a los observados en los vectores promedio, tal y como se observa en la tabla VII.3.

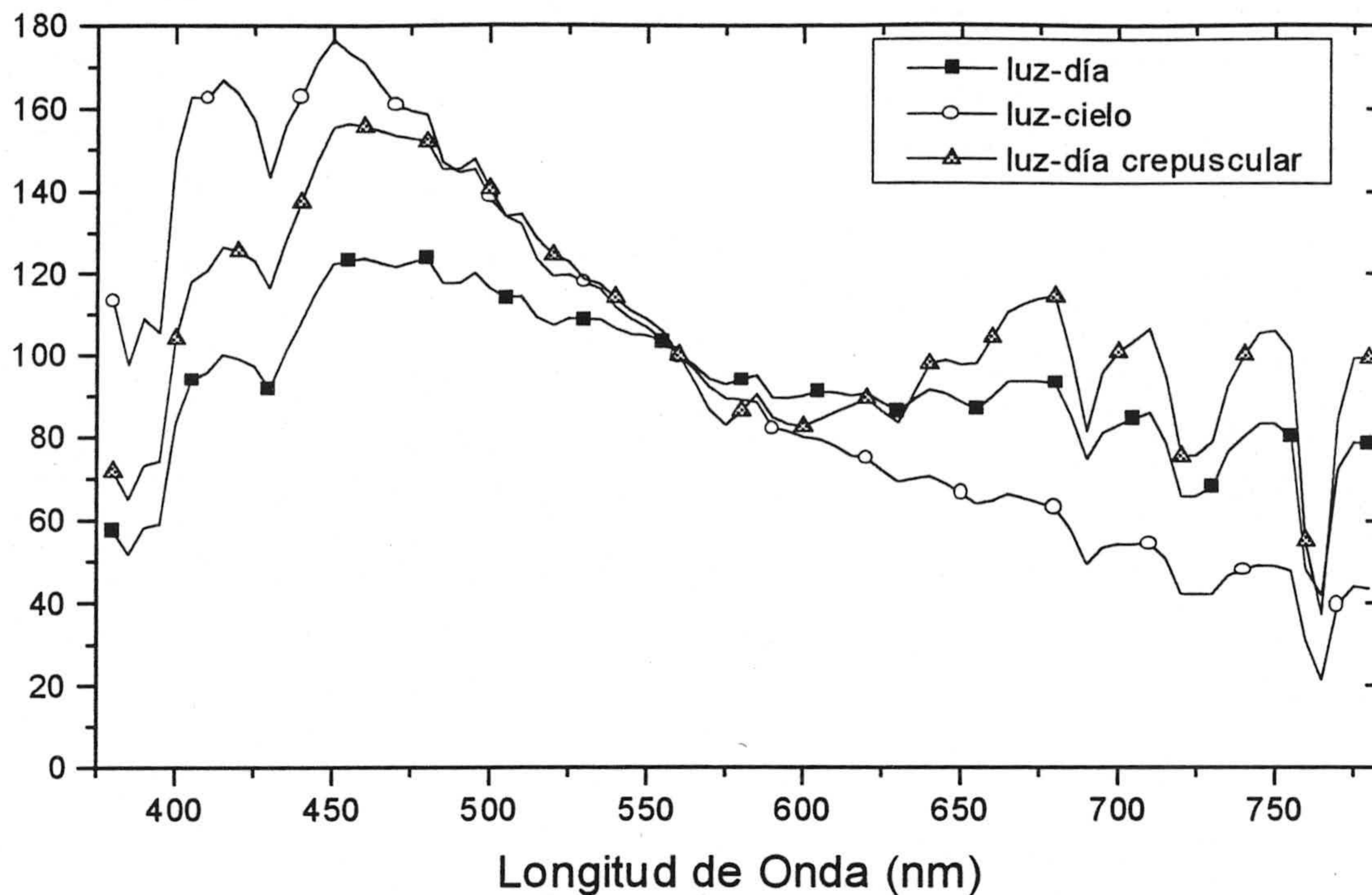


Figura 7. 8.- Perfil espectral de los primeros autovectores (vectores promedio) obtenidos en las tres campañas de medidas, normalizados en 560 nm.

Campana	Coordenadas de cromaticidad (x,y) (y TCC asociada) del vector promedio	Coordenadas de cromaticidad promedio (x,y) (y TCC asociada)
Luz-día	$x= 0,3104, y= 0,3245$ TCC= 6.670 K	$x= 0,3105, y= 0,3245$ TCC= 6.667 K
Luz-cielo	$x= 0,2699, y= 0,2837$ TCC= 11.701 K	$x= 0,2701, y= 0,2839$ TCC= 11.647 K
Luz-día crepuscular	$x= 0,2877, y= 0,3023$ TCC= 8.692 K	$x= 0,2882, y= 0,3022$ TCC= 8.646 K

Tabla VII.3.- Comparación entre el análisis de autovectores (coordenadas de cromaticidad de los vectores promedio, mostrados en la figura 7.8) y el promedio realizado en las coordenadas de cromaticidad en las tres campañas de medidas llevadas a cabo.

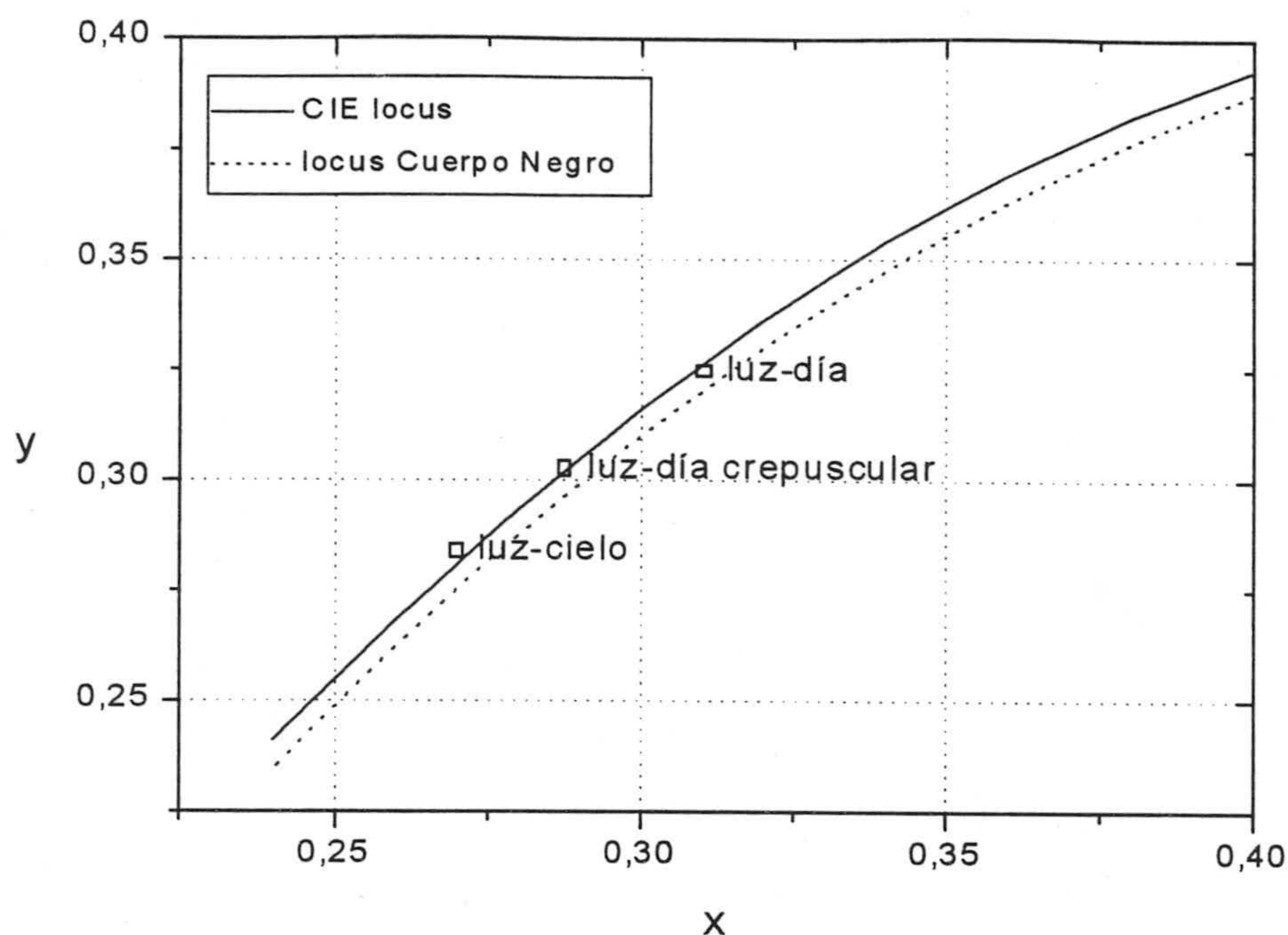


Figura 7.9.- Coordenadas de cromaticidad de los vectores promedio mostrados en la figura 7.8.

Una comparación similar se ha realizado en las figuras 7.10 y 7.11, esta vez con el autovector 2 y 3, donde se aprecian las bandas de absorción debidas a O_2 y H_2O en las largas longitudes de onda.

En las figuras 7.12 y 7.13 hemos expresado estas variaciones en términos de coordenadas de cromaticidad: cada una de estas figuras muestra la línea de variación cromática que introduce cada autovector en el diagrama CIE 1931. En la figura 7.12, por ejemplo, se observa que la variación amarillo-azul del segundo autovector correspondiente a la campaña de luz-día crepuscular es más acusada que en las otras dos campañas.

En la figura 7.12 hemos dibujado las líneas de confusión correspondientes a un observador de color anómalo tipo dicrómata tritanope puesto que dichas líneas de confusión parecen estar orientadas precisamente en la dirección de variación de nuestras medidas de luz natural. Por similares argumentos en la figura 7.13 hemos incluido las líneas de confusión correspondientes a un dicrómata tritanope y a un dicrómata deuteranope, puesto que la correspondencia entre estas últimas y la variación introducida por el tercer autovector de la campaña de luz-día crepuscular es mayor.

Como se observa en el caso de las variaciones a lo largo en la direcciones amarillo-azul no hay una coincidencia exacta con las líneas de confusión tritán. Esto podría indicarnos que la evolución en la especie humana no ha seguido exactamente la variabilidad que muestra la luz-día. Recordemos que las líneas de confusión tritán indican las variaciones en el mecanismo oponente amarillo-azul en la visión del color.

Curiosamente si existe una cierta concordancia entre las variaciones verde-púrpura y las líneas de confusión deután (rojo-verde) que se muestran durante crepúsculos. Un análisis más profundo de estos hechos habría de llevarnos también al estudio de la variabilidad amarillo-azul rojo-verde que presentan los objetos coloreados naturales.

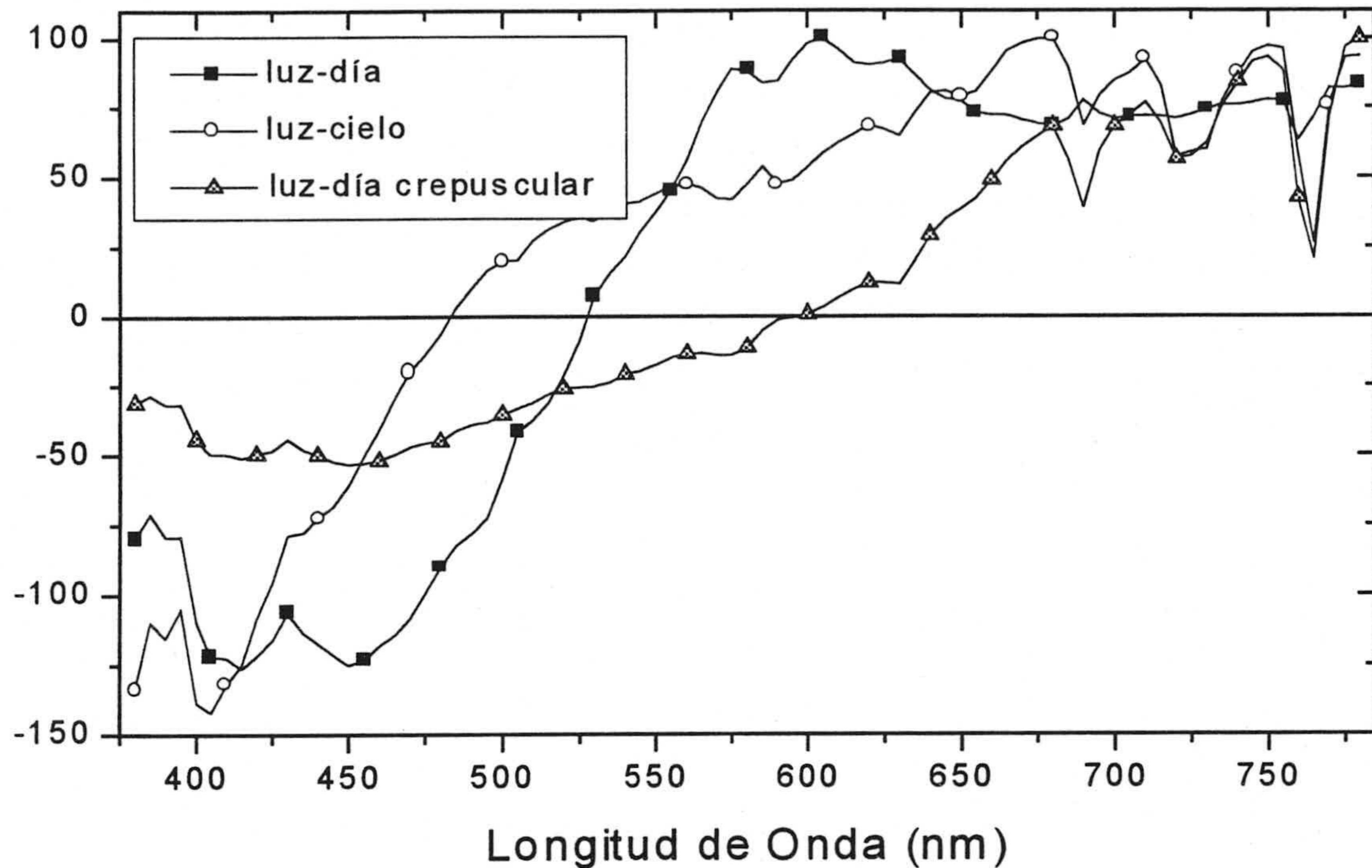


Figura 7. 10.- Perfil espectral de los segundos autovectores obtenidos en las tres campañas de medidas.

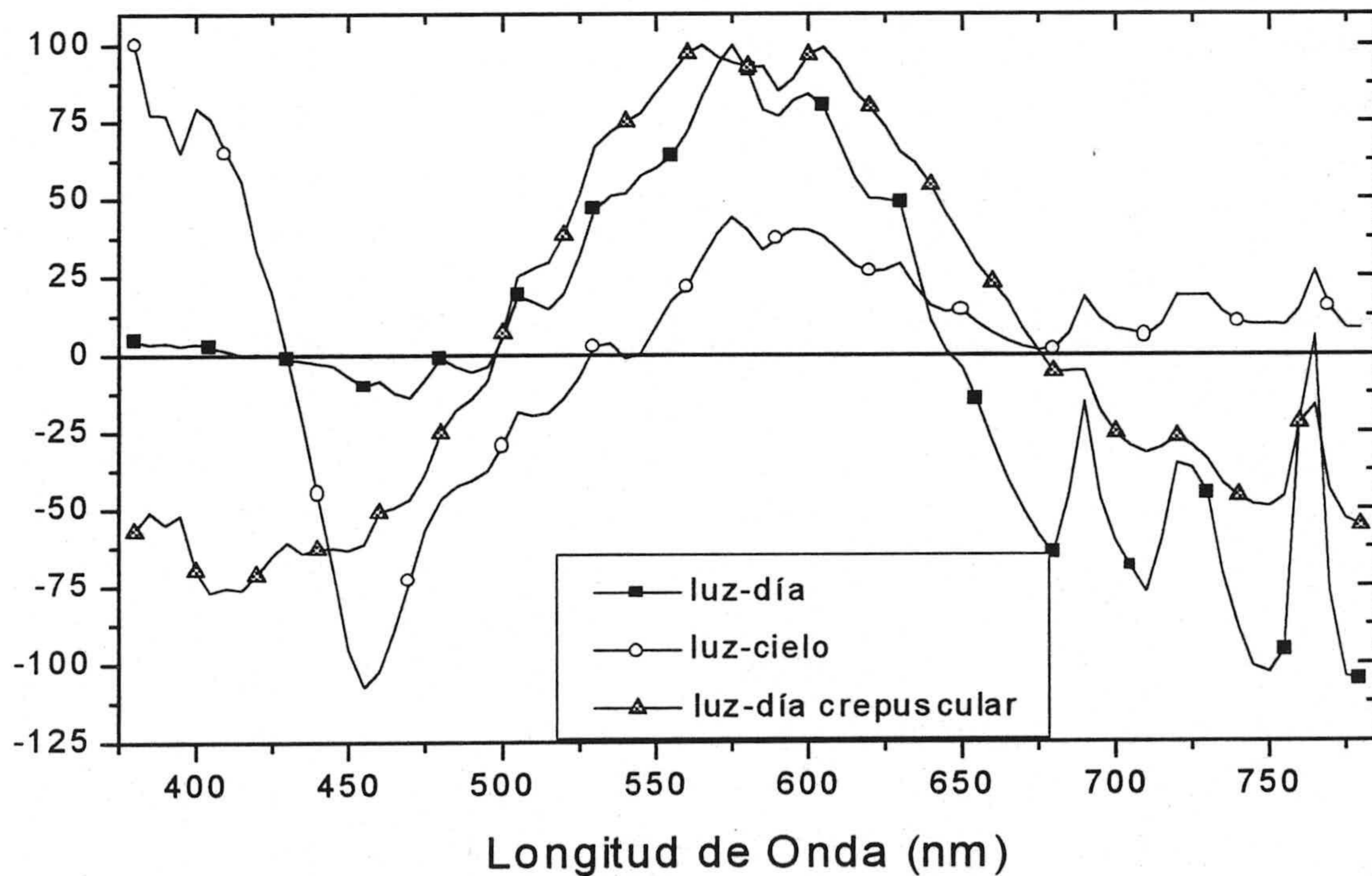


Figura 7. 11.- Perfil espectral de los terceros autovectores obtenidos en las tres campañas de medidas.

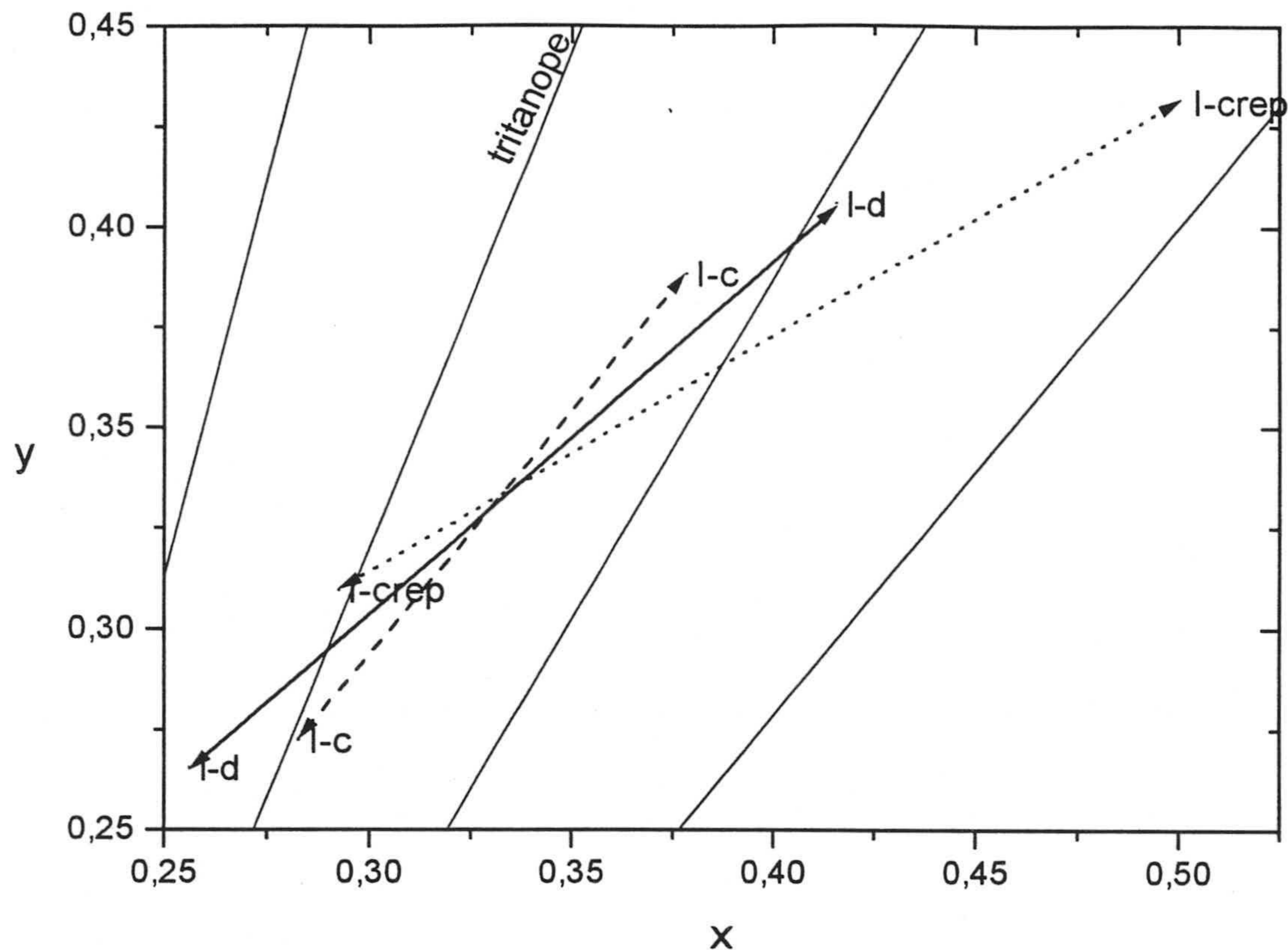


Figura 7. 12.- Variación cromática producida por el segundo autovector de cada una de las tres campañas de medidas (l-d: luz-día, l-c: luz-cielo, l-crep: luz-día crepuscular). Hemos incluido las líneas de confusión en un observador con visión cromática anómala (dicrómata tritanope).

Asimismo, figura 7.13, su variación verde-púrpura es patente, mientras que en la campaña de luz-día y luz-cielo esta variación es prácticamente imperceptible, pues las variaciones introducidas por el tercer autovector en ambas campañas sigue estando situadas en la dirección amarillo-azul. Este resultado es totalmente razonable tras observar la gama de cromaticidades abarcada por las tres campañas: en las dos primeras (luz-día y luz-cielo) la única variación cromática en las medidas es amarillo-azul. Sin embargo en la campaña de luz-día crepuscular la variación verde-púrpura es bastante ostentosa.

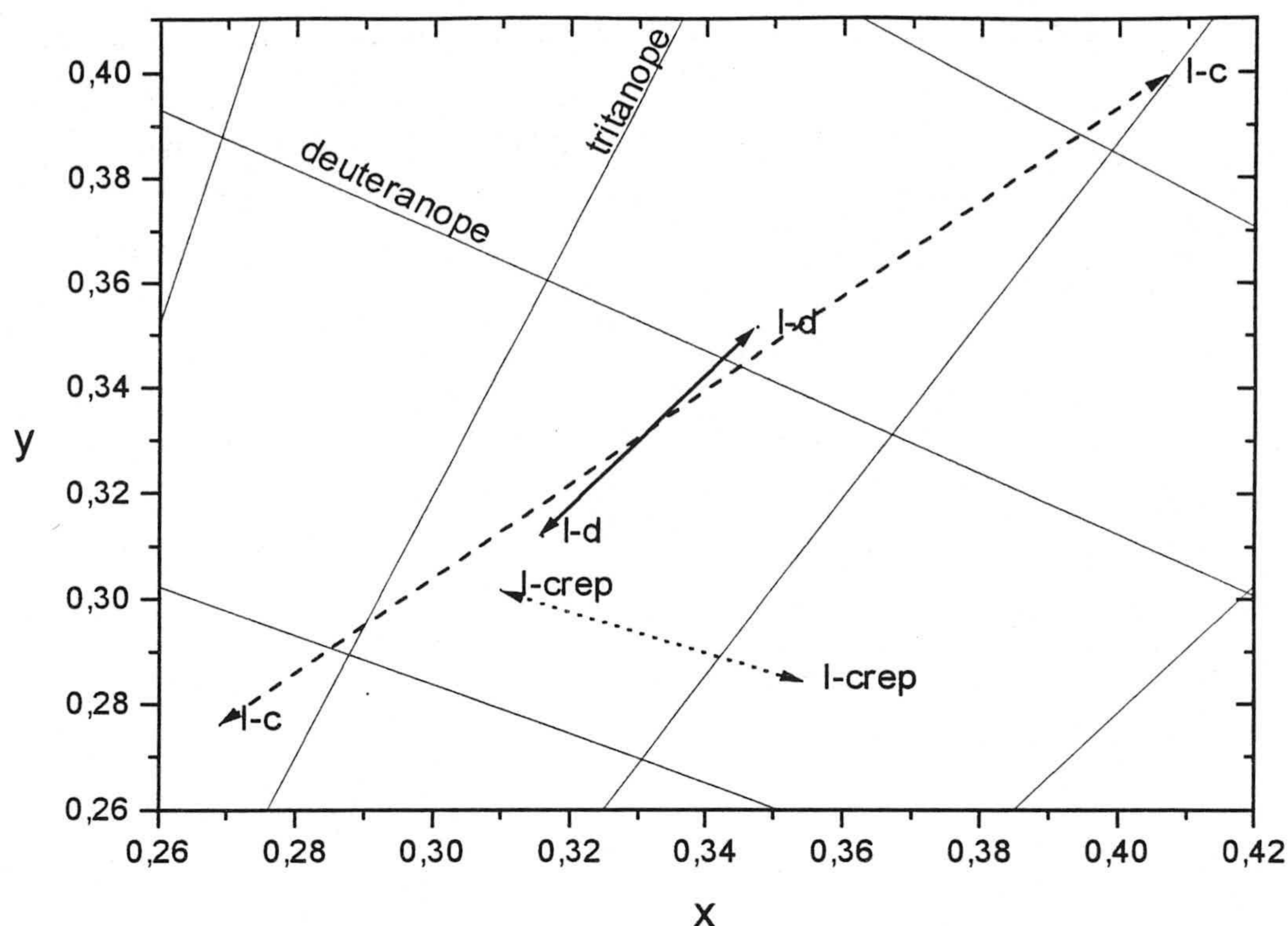


Figura 7. 13.- Variación cromática producida por el tercer autovector de cada una de las tres campañas de medidas (l-d: luz-día, l-c: luz-cielo, l-crep: luz-día crepuscular). Hemos incluido las líneas de confusión en dos observadores con visión cromática anómala (detrómata tritanope y detrómata deuteranope).

Luz-día (2.600)	luz-cielo (1.567)	luz-día crepuscular (1.485)	Todas (5.652)
380-780 nm	380-780 nm	380-780 nm	380-780 nm
1 – 98,476	1 – 98,069	1 – 97,900	1 – 96,359
2 – 99,720	2 – 99,761	2 – 99,528	2 – 99,382
3 – 99,946	3 – 99,895	3 – 99,894	3 – 99,826
4 – 99,973	4 – 99,961	4 – 99,931	4 – 99,943
5 – 99,991	5 – 99,988	5 – 99,951	5 – 99,961
	6 – 99,995	6 – 99,959	6 – 99,976
		7 – 99,964	7 – 99,982
		8 – 99,969	8 – 99,986
		9 – 99,973	9 – 99,988
		10 – 99,976	10 – 99,990
		15 – 99,987	
		18 – 99,990	

Tabla VII.4.- Contribución a la traza de los autovalores, en %, correspondientes a los tres conjuntos analizados y al total.

La contribución de los autovalores a la traza de la matriz de correlación en cada una de las tres campañas y en el conjunto total se muestra en la tabla VII.4. Observamos

como la variación cromática esta íntimamente ligada con el número de vectores necesario para conseguir un determinado valor de la contribución. Así en la campaña con menor variación cromática, la de luz-día, se necesitan únicamente 5 vectores para conseguir una contribución superior al 99,99%. En el extremo opuesto se encuentra la campaña de luz-día crepuscular, pues el número necesario de vectores se incrementa hasta 18. Juntando todas las medidas en un único conjunto (con un total de 5.652 curvas) el número de vectores requerido es de 10.

7.4. Curvas de luz natural estándar

Operando de forma análoga a como lo hemos hecho en los tres capítulos anteriores, evaluamos los valores triestímulo de los tres primeros autovectores correspondientes al conjunto formado por las 5.652 medidas espectrales (y mostrados en la figura 7.7) y aplicamos el método de la CIE para reconstruir curvas espectrales a partir de coordenadas de cromaticidad, teniendo en cuenta la ecuación del *locus* de nuestras medidas (dibujado en la figura 7.1), obtenemos la ecuación que nos relaciona los escalares M_1 y M_2 con las coordenadas de cromaticidad x e y :

$$M_1 = \frac{0,1859 - 11,6509x + 10,5089y}{-0,2539 - 5,8291x + 5,7568y}$$

$$M_2 = \frac{0,1904 + 7,8090x_c - 8,0681y_c}{-0,2539 - 5,8291x + 5,7568y}$$

Utilizando este método de reconstrucción (método CIE a partir de las coordenadas de cromaticidad de las curvas originales) se consigue un GFC promedio de 0,9871. Un 47,3% de las reconstrucciones alcanzan la calidad de aceptables ($GFC > 0,995$), y sólo un 24,1% y un 1,65% poseen la calidad de buenas y excelentes respectivamente. En la tabla VII.5 mostramos estos porcentajes y los obtenidos en las tres campañas realizadas.

Hemos recalado en varias ocasiones que la campaña con mayor gama cromática es la de luz-día crepuscular. Cabría pensar que este hecho conllevaría que los porcentajes mostrados en la tabla VII.5 deberían ser menores para esta campaña puesto que su variedad cromática debería traducirse en una peor calidad espectral en las reconstrucciones. Sin embargo esto no es así. Al ser un método de reconstrucción, el de la CIE, en el que se parte de las coordenadas de cromaticidad, y al ser el GFC un coeficiente que evalúa el parecido espectral entre curvas, en cierto modo, los porcentajes mostrados en la tabla VII.5 nos indican el grado de metamerismo existente en el conjunto de curvas: a mayores porcentajes menor metamerismo.

Campaña	Calidad de las reconstrucciones 380-780 nm			
	GFC promedio	Aceptable GFC>0,995	Buena GFC>0,999	Excelente GFC>0,9999
luz-día (2.600)	0,9954	74,4 %	33,0 %	4,6 %
luz-cielo (1.567)	0,9900	53,5 %	21,4 %	1,9 %
Luz-día crepuscular (1.485)	0,9980	96,2 %	58,8 %	3,7 %
Conjunto total (5.652)	0,9871	47,3 %	24,1 %	1,7 %

Tabla VII.5.- Porcentajes de reconstrucciones, utilizando el método de la CIE, que superan una determinada calidad. Hemos incluido el GFC promedio obtenido en cada campaña.

Si en lugar de reconstruir las curvas a partir de las coordenadas de cromaticidad lo hacemos utilizando como única información inicial la TCC, también podemos reconstruir las curvas usando el método CIE. La ecuación que relaciona la TCC, expresada en K, con la coordenada de cromaticidad x , para las 5.652 medidas, es (con un coeficiente de correlación de 0,9977):

$$x = 0,23526 + \frac{2,06084 \cdot 10^2}{TCC} + \frac{2,67645 \cdot 10^6}{TCC^2} - \frac{4,77583 \cdot 10^9}{TCC^3}$$

y la del *locus* de estas 5.652 medidas en el diagrama cromático CIE-1931:

$$y = -0,24031 + 2,77302 x - 3,06481 x^2$$

En la figura 7.14 mostramos los perfiles espectrales relativos de 7 con TCC 5.500, 6.000, 6.500, 7.500, 10.500, 20.000 y 1.000.000 K respectivamente.

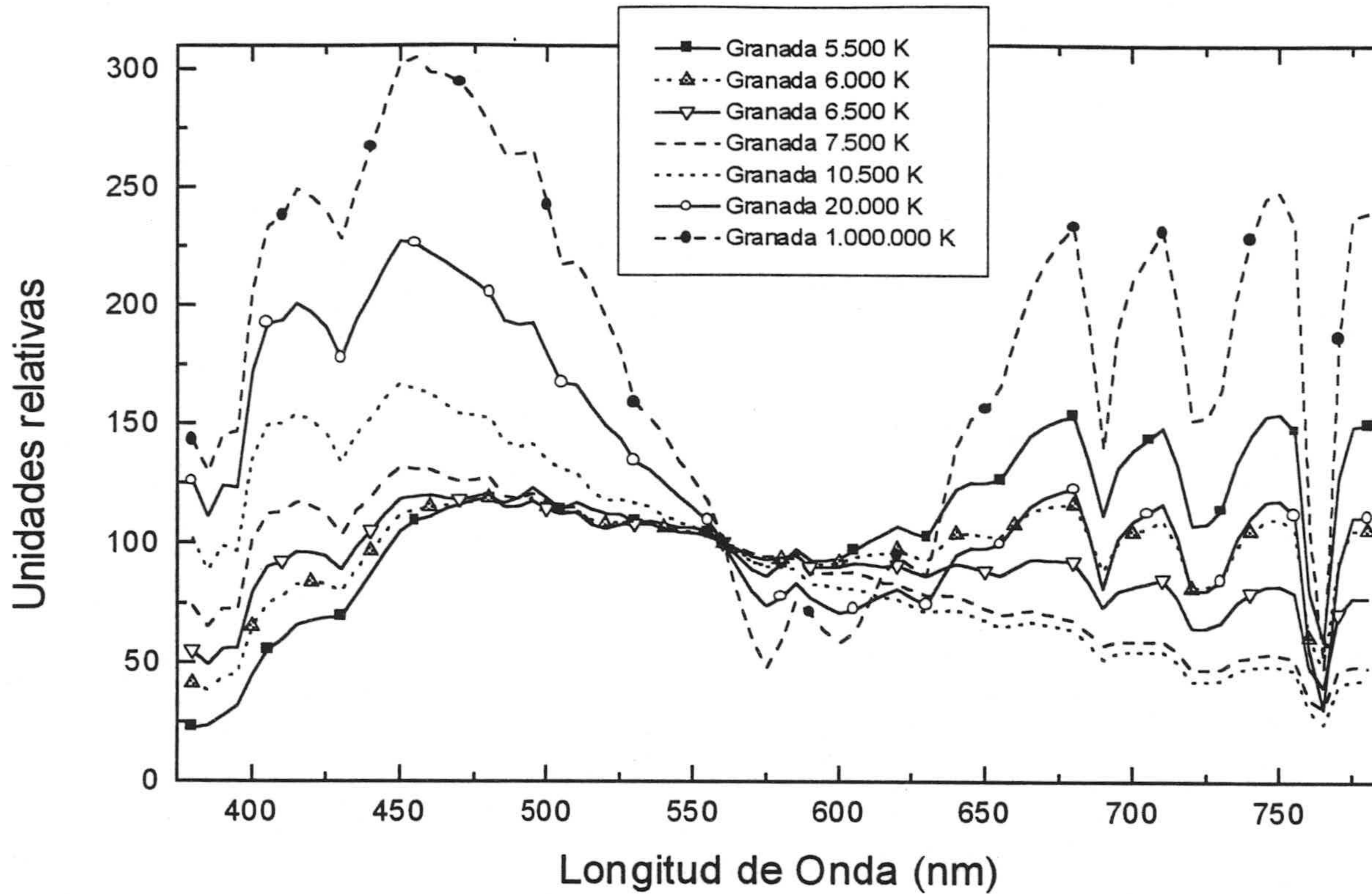


Figura 7. 14.- Reconstrucción, mediante el método de la CIE, de siete curvas con diferentes TCC, con los vectores obtenidos a partir de las 5.652 medidas, en el rango espectral 380-780 nm, todas ellas normalizadas en 560 nm.

En las figuras 7.15-7.18 realizamos una comparación espectral entre las curvas estándar de cada campaña con cuatro TCC determinadas (5.500, 6.500, 7.500 y 10.500 K respectivamente) y la correspondiente al conjunto total. En la tabla VII.6 se han incluido las coordenadas de cromaticidad de cada una de las curvas mostradas en dichas gráficas.

Campaña	Temperatura de Color Correlacionada			
	5.500 K	6.500 K	7.500 K	10.500 K
luz-día	x= 0,3325	0,3129	0,2989	0,2743
	y= 0,3438	0,3272	0,3148	0,2920
luz-cielo	x= 0,3322	0,3122	0,2983	0,2750
	y= 0,3498	0,3312	0,3170	0,2907
luz-día crepuscular	x= 0,3315	0,3131	0,2994	0,2751
	y= 0,3288	0,3214	0,3130	0,2918
Conjunto total	x= 0,3325	0,3129	0,2990	0,2750
	y= 0,3429	0,3273	0,3148	0,2905

Tabla VII.6.- Coordenadas de cromaticidad correspondientes a las curvas estándar mostradas en las figuras 7.15-7.18.

Cabe destacar entre estos resultados la casi concordancia en los valores de la coordenada de cromaticidad x . Y es razonable que sea así pues la coordenada x posee

una relación con la TCC casi unívoca, que no depende de la localización de las coordenadas de cromaticidad sobre el diagrama cromático. Esto no ocurre con la coordenada y , y las diferencias encontradas en la tabla VII.6 se deben principalmente a la disposición de los *loci* sobre el diagrama cromático.

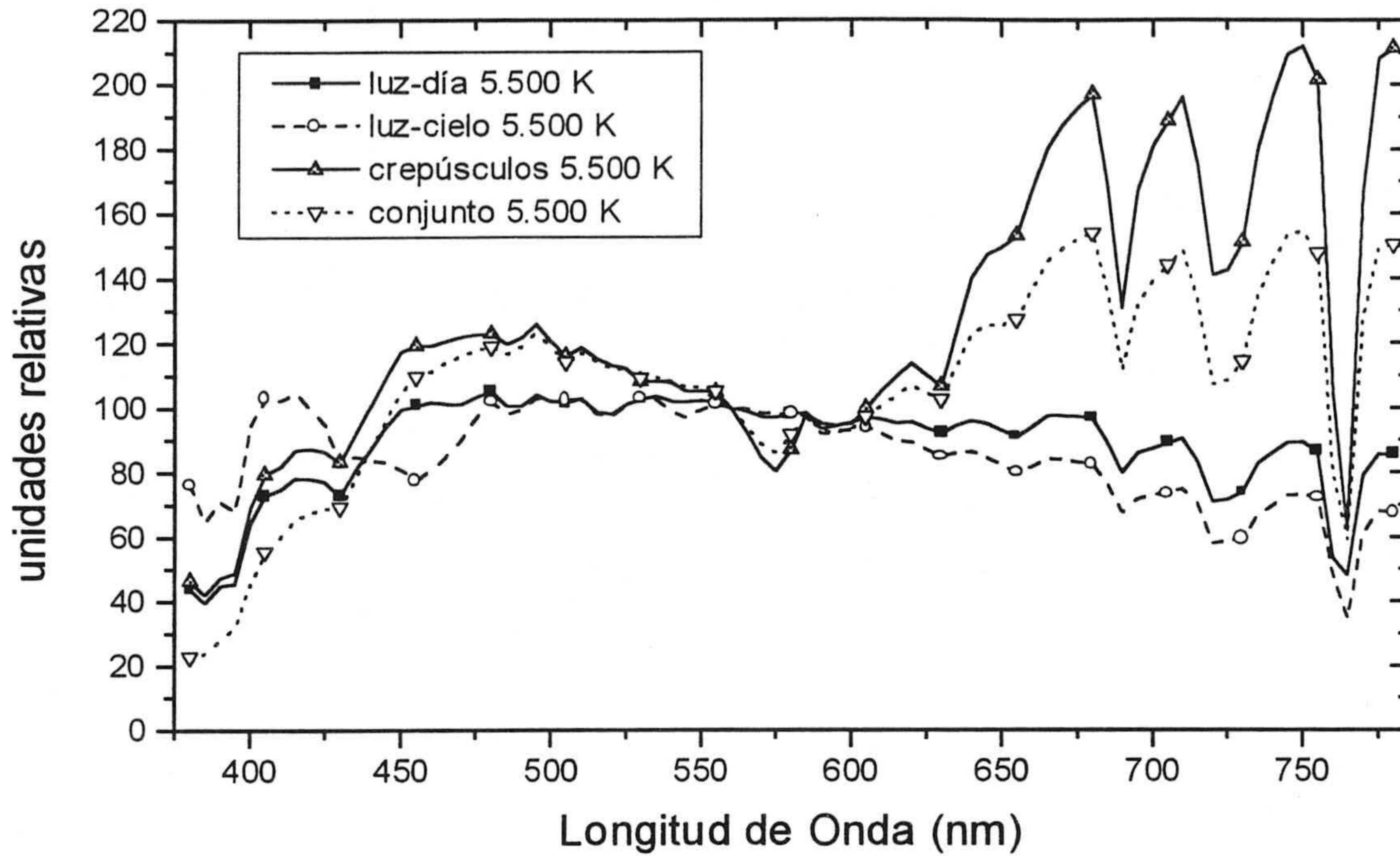


Figura 7. 15.- Comparación espectral de las curvas estándar correspondientes a las tres campañas de medidas y al conjunto total, con una TCC de 5.500 K.

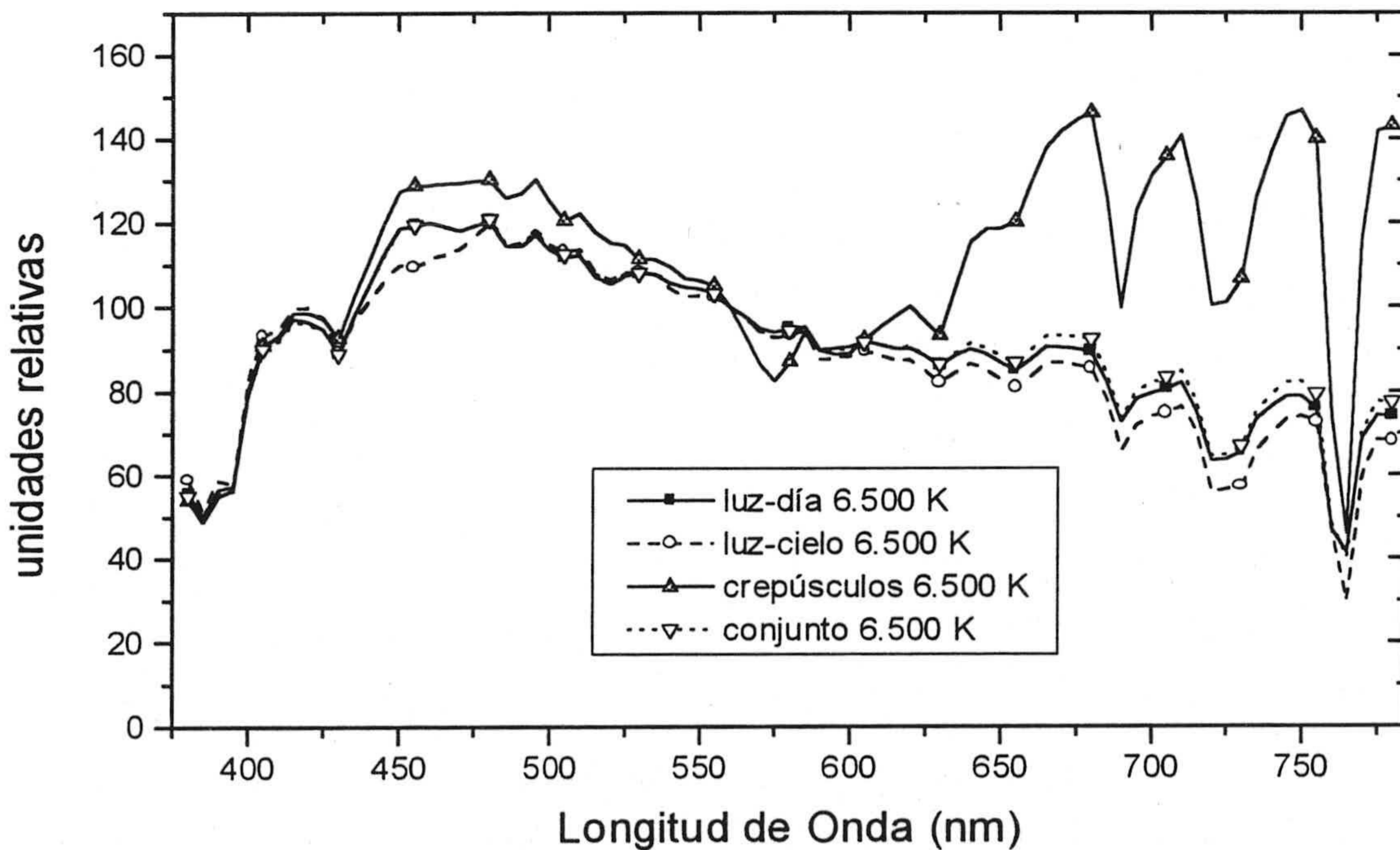


Figura 7. 16.- Comparación espectral de las curvas estándar correspondientes a las tres campañas de medidas y al conjunto total, con una TCC de 6.500 K.

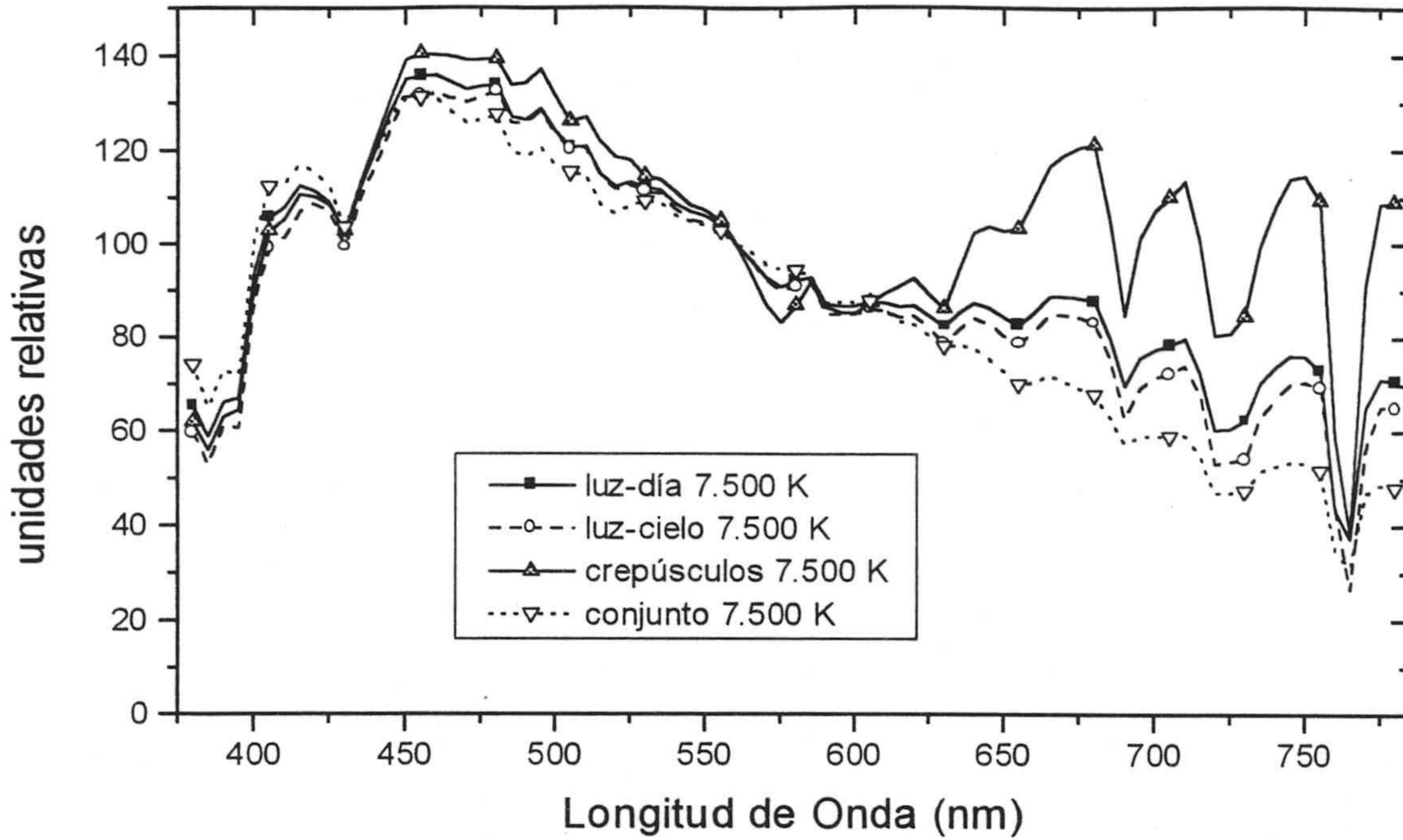


Figura 7.17.- Comparación espectral de las curvas estándar correspondientes a las tres campañas de medidas y al conjunto total, con una TCC de 7.500 K.

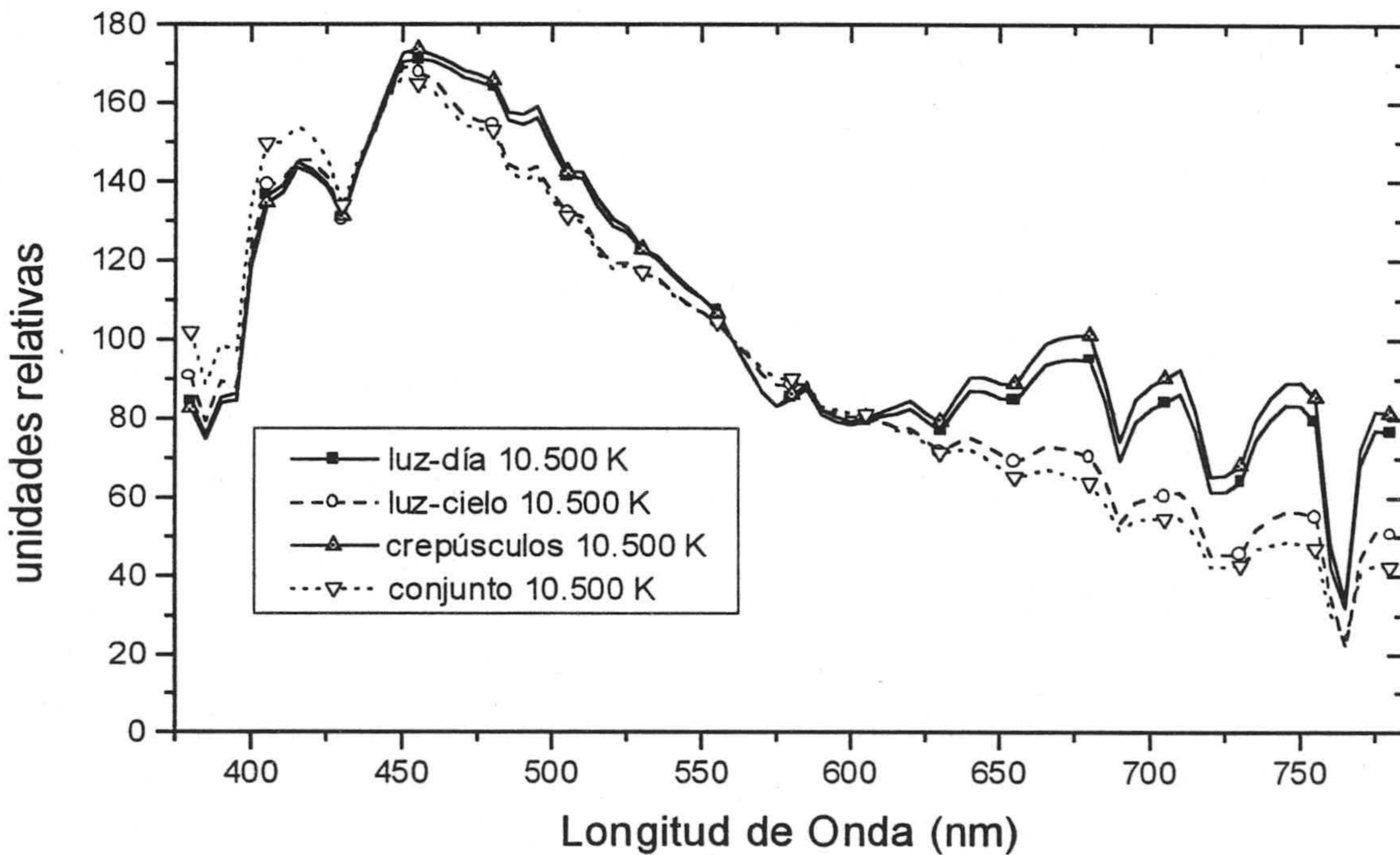


Figura 7.18.- Comparación espectral de las curvas estándar correspondientes a las tres campañas de medidas y al conjunto total, con una TCC de 10.500 K.

También hemos comparado espectralmente (figuras 7.19-7.21) nuestras curvas estándar, obtenidas a partir del conjunto total de medidas, con algunas publicadas en la literatura. La figura 7.19 muestra estas curvas con una TCC de 5.500 K, existiendo poco parecido entre la curva de Granada y el resto, sobre todo para altas longitudes de onda. Esta distancia está cimentada en la disposición del *locus* de Granada con

respecto al de la CIE y al de otros autores para bajas TCC, pues nuestro *locus* es más púrpura que el resto; de ahí que el perfil espectral de nuestra curva estándar para 5.500 K difiera del resto. No ocurre lo mismo para las curvas estándar a 6.500 K (figura 7.20) y 7.500 K (figura 7.21): en ambos casos el parecido espectral es destacable, aunque hay que mencionar el mayor contenido en el UV de las curvas obtenidas por Winch *et al.* [1966].

Por tanto hemos de ser muy cautos al realizar este tipo de comparaciones espectrales (muy frecuentes en la literatura descrita en el capítulo 2). Todo el proceso previo utilizado para obtener las curvas estándar (método CIE de reconstrucción de curvas a partir de las coordenadas de cromaticidad, relación empírica entre TCC y coordenada x y sobre todo la localización del *locus* cromático) está afectada de muchas variables cuya influencia puede ser determinante en el perfil espectral de las curvas estándar. Pensamos, a la vista de estas comparaciones, que éste no es el método apropiado para proponer curvas estándar. Mucho más eficiente y representativo sería, por ejemplo, obtener un promedio espectral de un número de curvas elevado cuyas TCC estuvieran dentro de un rango de TCC determinado, tal y como han realizado algunos autores (Henderson y Hodgkiss [1963], Winch *et al.* [1966], Tarrant [1968]).

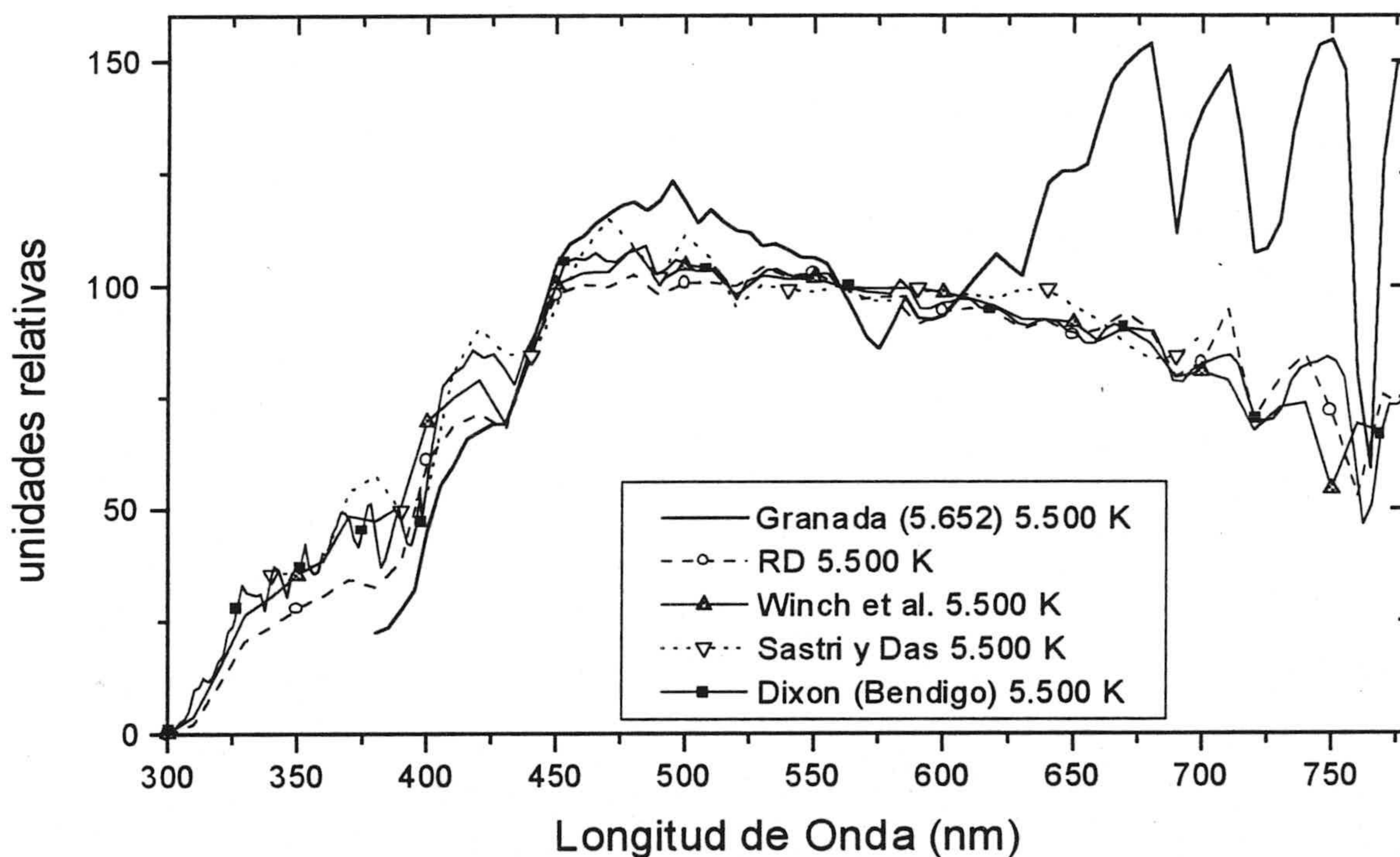


Figura 7. 19.- Comparación de nuestra curva patrón para 5.500 K (obtenida a partir de las 5.652 medidas totales) con las curvas de otros autores a esa misma temperatura, en el intervalo 300-780 nm.

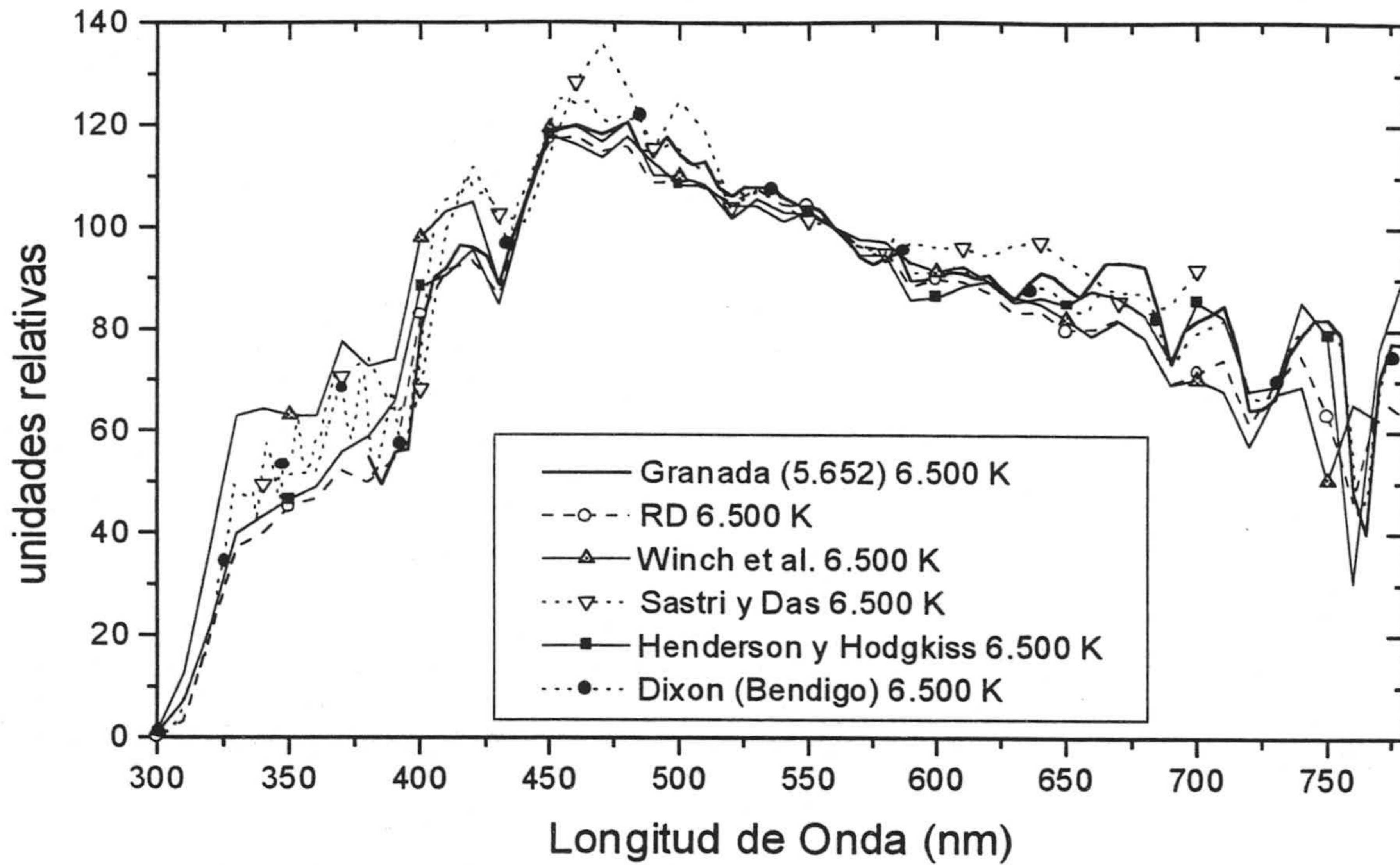


Figura 7. 20.- Comparación de nuestra curva patrón para 6.500 K (obtenida a partir de las 5.652 medidas totales) con las curvas de otros autores a esa misma temperatura, en el intervalo 300-780 nm.

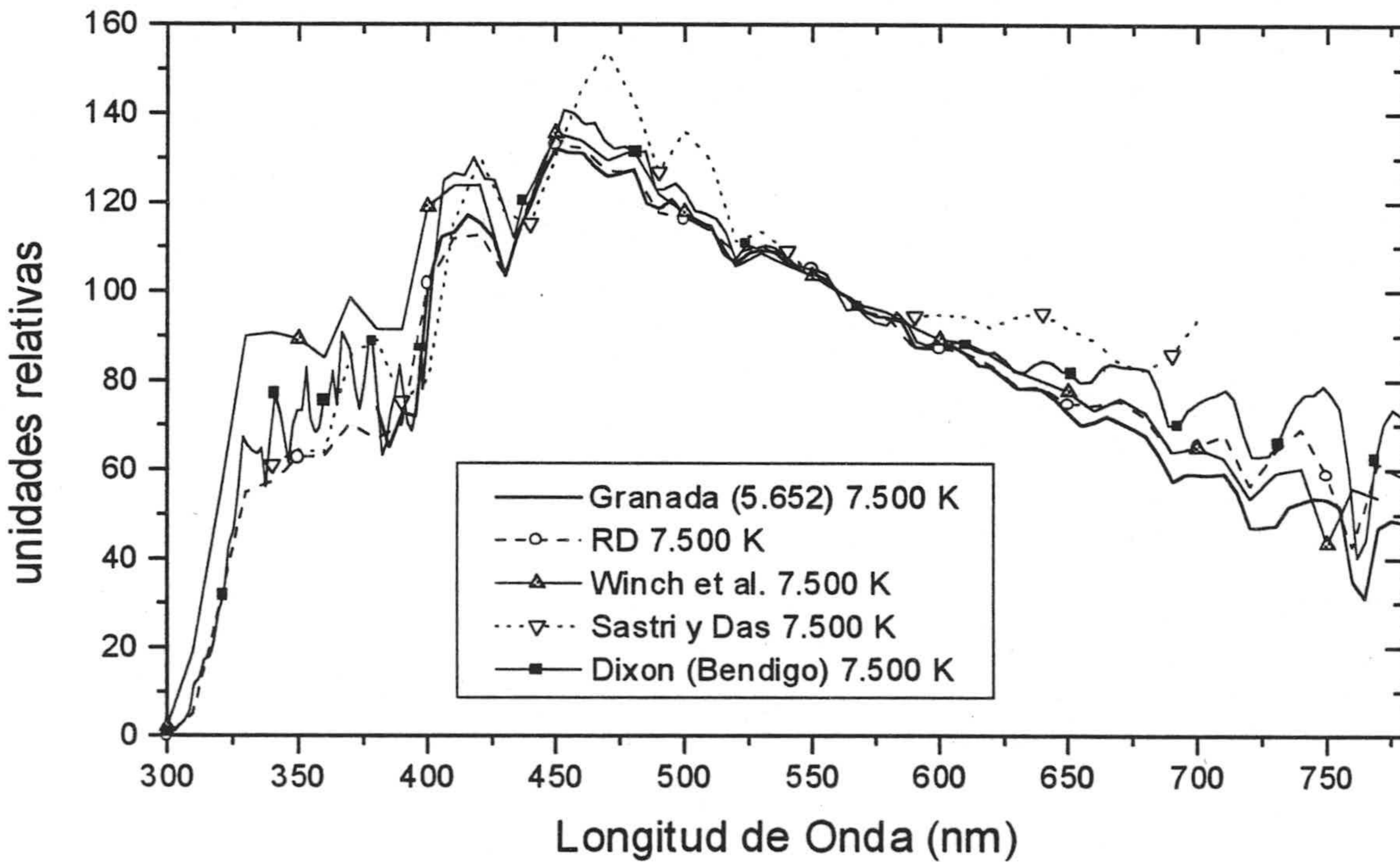


Figura 7. 21.- Comparación de nuestra curva patrón para 7.500 K (obtenida a partir de las 5.652 medidas totales) con las curvas de otros autores a esa misma temperatura, en el intervalo 300-780 nm.

7.5. Calidad de las reconstrucciones

Hemos llevado a cabo la reconstrucción de las 5.652 curvas espectrales de luz natural que forman parte del conjunto total, usando la ecuación 4.5 y obteniendo los valores de GFC promedio mostrados en la figura 7.22. Observamos como los valores más pequeños en el GFC promedio se alcanzan en la campaña de luz-día crepuscular y también en el conjunto total, haciéndose esta diferencia patente a partir del 4 autovector. Este resultado vuelve a confirmar la estrecha relación entre gama cromática y el valor del GFC: a mayor variedad colorimétrica en las medidas, menor calidad espectral promedio en las reconstrucciones.

En el conjunto total de medidas hacen falta 7 autovectores para que la calidad espectral promedio en las reconstrucciones alcance la calidad de *excelente*, frente a los 5 que hacen falta en la campaña de luz-día y en la de luz-cielo. En ambos casos este resultado difiere enormemente de las recomendaciones de la CIE en las cuales sólo se usan 3 autovectores.

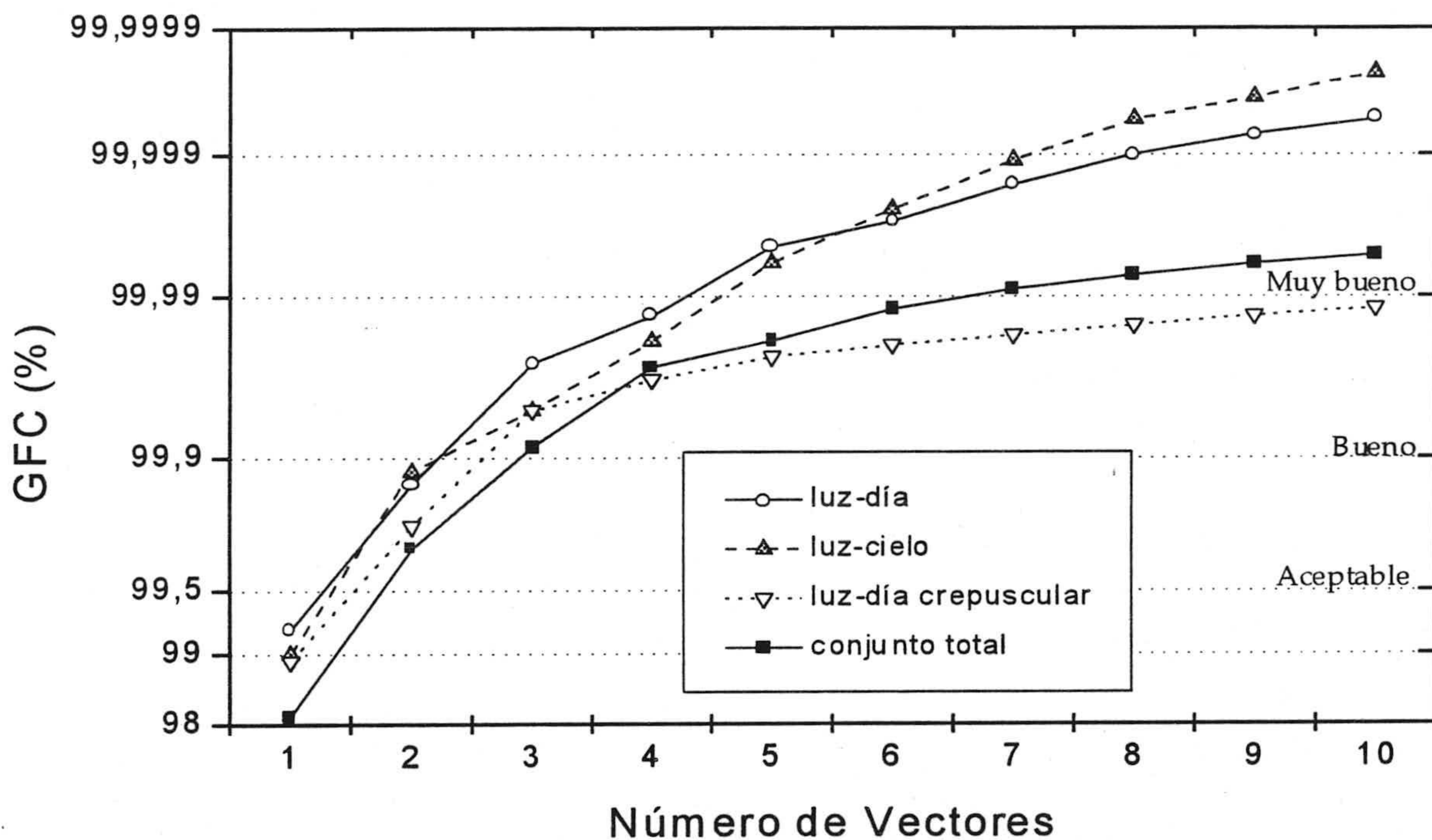


Figura 7. 22.- GFC promedio, utilizando en la reconstrucción un número de autovectores entre 1 y 10, para las tres campañas y el conjunto total.

En la tabla VII.7 hemos incluido el porcentaje de reconstrucciones cuyo GFC supera los tres valores de GFC elegidos con un número variable de vectores utilizados entre 1 y 8 para las tres campañas de medidas y el conjunto total. El número de vectores requerido para que más del 95% de las reconstrucciones superen los tres valores de GFC (0,995, 0,999 y 0,9999) se muestra en la tabla VII.8.

Campaña	Número de autovectores utilizados							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Luz-día (2.600)	64,0	95,2	99,8	100				
	9,1	78,0	97,4	99,5	99,9	100		
	0,1	3,8	29,3	61,5	91,5	97,2	99,1	99,4
Luz-cielo (1.567)	55,5	98,1	99,5	100				
	15,8	61,6	89,0	98,7	99,9	100		
	0	1,5	17,3	46,8	85,1	96,4	99,3	100
Luz-día crepuscular (1.485)	55,3	89,3	99,0	99,3	99,3	99,3	99,3	99,3
	8,7	38,6	93,3	96,2	97,3	97,4	97,6	97,6
	0	0	20,4	46,6	69,8	81,7	82,8	84,6
Conjunto total (5.652)	25,9	89,0	98,5	99,7	99,8	99,8	99,8	99,8
	3,7	25,7	74,5	96,2	97,5	99,0	99,2	99,3
	0	1,0	8,3	35,8	61,8	78,9	90,3	93,5

Tabla VII. 7.- Porcentaje de reconstrucciones que superan los 3 valores de GFC elegidos en la tabla IV.4, con distinto número de vectores (1 a 8), en las tres campañas de medidas realizadas y en el conjunto total, en el rango espectral 380-780 nm. Entre paréntesis se ha incluido el número de medidas por campaña.

Campaña	Calidad de las reconstrucciones 380-780 nm		
	Aceptable	Buena	Excelente
luz-día (2.600)	2	3	6
luz-cielo (1.567)	2	4	6
Luz-día crepuscular (1.485)	3	4	más de 10
Conjunto total (5.652)	3	4	9

Tabla VII. 8.- Número de vectores requerido para que más del 95% de las reconstrucciones superen los tres valores de GFC (0,995, 0,999 y 0,9999) para las tres campañas de medidas realizadas y el conjunto total. Entre paréntesis se incluye el número de medidas por campaña.

Los resultados mostrados en la tabla VII.8 nos vuelven a confirmar un hecho ya apuntado en los tres capítulos anteriores: las recomendaciones de la CIE en cuanto a utilizar únicamente tres vectores a la hora de reconstruir curvas espectrales se manifiesta insuficiente, pues con este número tan pequeño de vectores no se consiguen las calidades adecuadas.

En la figura 7.23 analizamos la semejanza colorimétrica entre la curva original y la reconstruida para un número de vectores variable (entre 1 y 10), mediante la distancia Euclídea media entre coordenadas de cromaticidad para las tres campañas de medidas y el conjunto total. Se comprueba que son necesarios cinco o seis vectores (dependiendo de la campaña) para que esta distancia Euclídea promedio sea inferior a 0,001. Únicamente esta distancia se hace menor que 0,0001 en la campaña de luz-cielo utilizando un número de vectores superior a 8.

Se aprecia que la relación existente entre el valor del GFC promedio y la distancia Euclídea promedio no es sencilla pues dependiendo de la campaña analizada el comportamiento simultáneo de ambas magnitudes es bien distinto. Si nos fijamos, por ejemplo, en las campañas de luz-día y luz-día crepuscular observamos distancias Euclídeas parecidas; sin embargo el GFC promedio es muy superior en la campaña de luz-día. Esta aparente discordancia tiene su base en la mayor variedad espectral observada durante los crepúsculos.

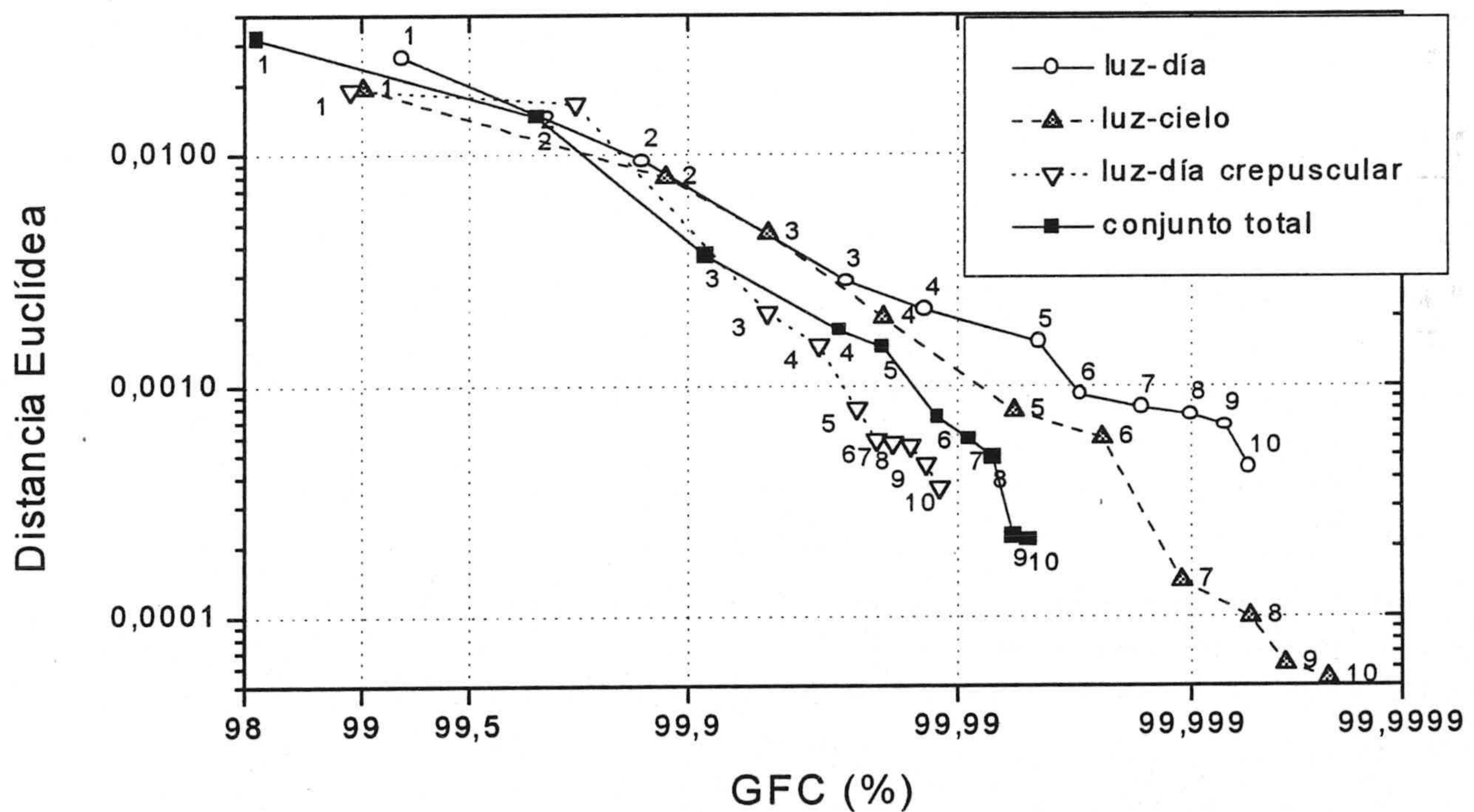


Figura 7. 23.- Distancia euclídea promedio entre coordenadas de cromaticidad en función del GFC promedio, para las tres campañas de medidas y el conjunto total.

7.6. Cálculo de la TCC a partir de las coordenadas x e y

En este capítulo hemos advertido que la luz natural recibida sobre la superficie terrestre experimenta grandes cambios en su temperatura de color correlacionada (TCC). Sin embargo las ecuaciones existentes en la literatura que permiten obtener la TCC a partir de las coordenadas de cromaticidad sólo son válidas en una pequeña parte del rango de TCC abarcado por nuestras medidas experimentales (3.000 - ∞ K).

Para mejorar la validez y precisión de estas fórmulas, nosotros utilizamos nuestras 5.652 medidas experimentales de luz natural para proponer una fórmula muy simple que, de forma precisa, transforma las coordenadas de cromaticidad x e y (CIE 1931) en TCC.

Por definición la temperatura de color correlacionada de una fuente es la temperatura del Cuerpo Negro cuya cromaticidad está más cercana a la de la fuente en el diagrama cromático CIE 1960 UCS. Obviamente cuanto mayor sea la distancia de la fuente al *locus* del Cuerpo Negro, con menor precisión la TCC podrá describir el color de la fuente.

Durante las últimas cuatro décadas se han propuesto una variedad de algoritmos y ecuaciones para calcular la TCC en distintos rangos de temperaturas de color. Originalmente la TCC era calculada obteniendo las coordenadas de cromaticidad x e y (CIE 1931) de la fuente y consultando el diagrama desarrollado por Kelly [1963]. En dicho diagrama la TCC se obtenía interpolando entre las dos líneas de isotemperatura (líneas de TCC constante) que flanqueaban a las coordenadas de cromaticidad de la fuente. Hoy en día, dichas interpolaciones gráficas se realizan de forma numérica, incrementándose su velocidad y precisión. En 1968, Robertson [1968] propuso un algoritmo que ha sido ampliamente adoptado desde entonces. Dicho algoritmo usa una técnica bastante simple para realizar interpolaciones numéricas entre líneas de isotemperatura como Kelly. En su trabajo Robertson eligió un conjunto finito compuesto por 31 líneas de isotemperatura y comprobó la precisión de su algoritmo utilizando un conjunto de 1.800 cromaticidades cuyas TCCs eran conocidas. Los errores encontrados eran muy pequeños, alcanzando un mínimo de 5,4 K en el rango 2.000 – 14.000 K y 450 K en el rango 50.000 – 100,000 K.

Desde Kelly y Robertson, distintos investigadores han desarrollado numerosos métodos para calcular la TCC; aquí nosotros citamos algunos de los más relevantes. En 1978 Schanda *et al.* [1978] utilizó un algoritmo de búsqueda binaria para generar dos ecuaciones polinomiales de orden siete que relacionaba la temperatura del Cuerpo Negro con sus correspondientes coordenadas de cromaticidad (x , y) en el rango 2.000 K-50.000 K. En un trabajo previo, Schanda *et al.* [1977] utilizó un algoritmo similar para calcular TCC a partir de cromaticidades de luz-día.

Krystek [1985] en 1985 sugirió un algoritmo basado en una aproximación de Chebyshev del *locus* del Cuerpo Negro. Sus errores en la determinación de la TCC eran menores del 0,03% para 1.000 K y del 0,48% para 15.000 K. Como Krystek advierte, estos errores no son muy significativos, dado que la incertidumbre en el cálculo de coordenadas de cromaticidad normalmente es 10 veces mayor, alcanzando un 5% para 15.000 K.

Dos años después, Xingzhong [1987] desarrolló fórmulas empíricas para calcular la TCC a partir de las coordenadas de cromaticidad u, v CIE-1960 en el rango 1.666 K-25.000 K, obteniendo errores comparables a los de Robertson. Los polinomios de quinto orden, propuestos por Xingzhong, son función de dos variables. La primera de ellas es el ángulo formado por tres cromaticidades:

- 1) las cromaticidades u, v de la fuente.
- 2) las cromaticidades u, v correspondientes a un punto situado por debajo del *locus* del Cuerpo Negro donde las líneas de isoterperatura “convergen” en un rango de TCC. (McCamy [1992] llama a dicho punto de convergencia “epicentro de convergencia”).
- 3) un tercer punto situado a la derecha del punto descrito en 2) que posee la misma v .

La segunda variable utilizada en los polinomios propuestos por Xingzhong es la distancia Euclídea entre el epicentro y las coordenadas de cromaticidad de la fuente. Aunque el algoritmo de Xingzhong es más simple que el de Robertson, cubre un rango de TCCs mucho más pequeño y es más complicado que el que nosotros proponemos en esta Memoria de Doctorado.

Recientemente McCamy [1992, 1993] ha propuesto una fórmula con un polinomio de tercer orden para determinar la TCC a partir de las coordenadas x, y CIE-1931. Como sus predecesores McCamy hace uso de que “*las líneas de isoterperatura correspondientes a las TCC de interés casi convergen en un punto en el diagrama cromático CIE-1931*” y añade la dependencia de su fórmula con la “*inversa de la pendiente de la línea que une el epicentro y las cromaticidades (x, y) de la fuente*”. Debido a que no hay un solo punto de convergencia (epicentro) para un amplio rango de TCCs, McCamy utiliza la intersección de 16 pares de líneas de isoterperatura entre 2.222 K-12.500 K para calcular el epicentro que produce los menores errores en la TCC, obteniendo $x_e = 0,3320$, $y_e = 0,1858$. La formula polinomial de McCamy es:

$$TCC = a n^3 + b n^2 + c n + d \quad (1)$$

Siendo n la inversa de la pendiente dada por:

$$n = (x - x_e)/(y - y_e)$$

Tal y como muestran nuestras 5.652 medidas experimentales, el rango de TCCs donde la ecuación de McCamy proporciona buenos resultados (2.000 K-12.500 K) es mucho más pequeño que el cubierto por la luz natural (3.000 K- ~1.000.000 K).

No es sorprendente que los numerosos algoritmos descritos anteriormente frecuentemente proporcionen distintos resultados (de TCC) para las mismas coordenadas de cromaticidad. Aunque todos estos algoritmos parten de la misma definición de TCC, sus resultados difieren puesto que las suposiciones realizadas y los métodos computacionales usados son distintos. Dependiendo de su realización, incluso el mismo algoritmo puede proporcionar distintas TCC.

Para evitar estas discrepancias debemos calcular lo que nosotros denominaremos “TCC de referencia” de la forma más precisa posible. Para llevar a cabo dicho cálculo comenzaremos por la definición de TCC: la TCC de cualquier fuente cuyas coordenadas de cromaticidad CIE 1960 sean u_l, v_l es la temperatura de color que proporciona la mínima distancia Euclídea entre u_l, v_l y las coordenadas de cromaticidad del Cuerpo Negro u_c, v_c a esa temperatura de color. Llamemos a esa distancia $\Delta(u,v)$. Nuestro algoritmo para calcular las TCC de referencia utiliza una búsqueda binaria simple de la temperatura de color que minimiza dicha distancia $\Delta(u,v)$. Como la TCC de referencia hace únicamente uso de la propia definición de TCC, su cálculo es el más cercano a la TCC “verdadera”; dicho de otro modo, la TCC de referencia es la TCC más exacta que podemos calcular.

Los pasos seguidos en la búsqueda binaria fueron los siguientes:

- 1) Las coordenadas de cromaticidad CIE 1931 de la fuente x_l, y_l son transformadas al diagrama CIE 1960 u_l, v_l .
- 2) Elegimos 10^2 K y 10^{10} K como valores iniciales en la búsqueda, así como su media logarítmica: 10^6 K.
- 3) Para cada una de las tres TCC elegidas en cada tentativa se calculan las distribuciones espectrales de potencia del Cuerpo Negro E_λ en intervalos de 4 nm, entre 380 y 780 nm.
- 4) Siguiendo los convenios colorimétricos, utilizamos las sumas de Riemann para aproximar las integrales colorimétricas al calcular las coordenadas de cromaticidad de las tres distribuciones espectrales del Cuerpo Negro u_p, v_p obtenidas en el paso (3).
- 5) Se calcula $\Delta(u,v)$ para cada una de las tres u_p, v_p identificándose la mínima (la menor de las tres). La TCC que produce esa $\Delta(u,v)_{\min}$ es el centro para la próxima tentativa en la búsqueda.

- 6) Cuando las TCCs máxima y mínima, utilizadas en cada tentativa, difieren en menos de 0,1 K, la búsqueda finaliza.

Aunque este tipo de algoritmos basados en búsquedas binarias son fáciles de escribir en cualquier lenguaje de programación, tienen el defecto de ser muy lentos. Nuestra experiencia nos indica que pueden llegar a ser casi 10^4 veces más lentos que la ecuación que nosotros proponemos. Esta lentitud puede que no sea un impedimento cuando trabajamos con potentes ordenadores, pero pueden convertirse en un engorro cuando la velocidad de computación no es tan grande (por ejemplo en espectrorradiómetros portátiles). Asimismo el razonamiento de Guillermo de Ockham (“Frustra fit per plura, quod fieri potest per pauciora”: *Es vano hacer con más lo que se puede hacer con menos*) nos indica que merece al menos la pena estudiar e investigar las posibles soluciones que sean simples y rápidas a cualquier problema complicado que se nos plantee.

Debemos reseñar que si modificamos algún parámetro de nuestro algoritmo de búsqueda binaria (por ejemplo el rango inicial de TCC escogido, el tipo de integración colorimétrica usada, la precisión en el manejo de cifras utilizada por el lenguaje de programación) los resultados en el cálculo de la TCC pueden variar. Por tanto el cálculo de la TCC es, en última instancia, un ejercicio indeterminado. En otras palabras, dependiendo de los factores computacionales apuntados anteriormente incluso un algoritmo de búsqueda binaria puede proporcionarnos TCCs ligeramente diferentes para unas mismas coordenadas deromaticidad de una fuente. Existe por tanto una ambigüedad insuperable en el cálculo de la TCC. Afortunadamente esta inevitable ambigüedad es irrelevante desde un punto de vista colorimétrico: raramente las diferencias encontradas son superiores a la mínima diferencia perceptible (*JND* o *just-noticeable-difference* en la literatura anglosajona).

Si comparamos los resultados obtenidos mediante el algoritmo de búsqueda binaria anteriormente descrito y la TCC suministrada por nuestro espectrorradiómetro utilizado se observan ciertas discrepancias, mostradas en la figura 7.24, que no superan en el rango mostrado el valor de 2,5%. Ya apuntamos, en el capítulo 5, que los resultados del espectrorradiómetro son incorrectos para TCC superiores a 100.000 K.

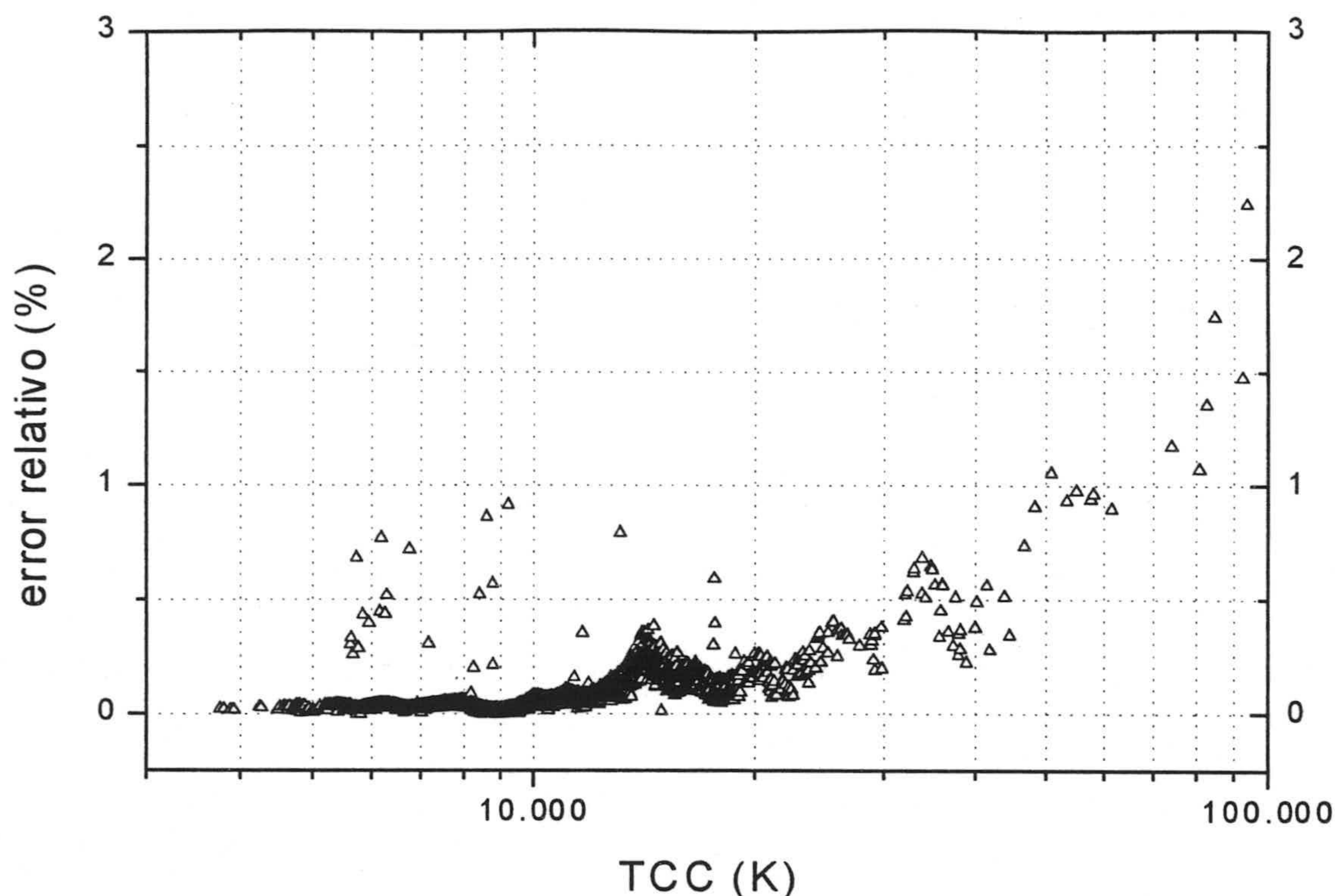


Figura 7. 24.- Error relativo entre el algoritmo de Roberston que utiliza nuestro espectrorradiómetro para calcular la TCC y la TCC de referencia calculada a partir del algoritmo de búsqueda binaria.

Para proponer nuestra fórmula, utilizaremos nuestro conjunto compuesto de 5.652 medidas espectrorradiométricas (2.600 de luz-día, 1.567 de luz-cielo y 1.485 de luz-día durante crepúsculos) cuyas TCC van desde los 3.758 K a los 577.624 K. Únicamente teniendo esta amplia variedad deromaticidades de luz natural podemos estar seguros de la generalidad y precisión de nuestra fórmula. Debido a que casi un 20% de nuestros datos se sitúan fuera del rango de TCCs en el que la ecuación de McCamy es adecuada, ésta proporciona errores relativos que superan el 5% para TCCs cercanas a 14.000 K y se incrementa hasta un 70% para altas TCCs.

Aunque la fórmula de McCamy posee gran aplicación, necesitamos extender el rango de TCCs donde es útil. Utilizando el mismo parámetro n que McCamy, ofrecemos una alternativa a su polinomio de tercer orden con la siguiente fórmula:

$$TCC = A_0 + A_1 \exp(-n/t_1) + A_2 \exp(-n/t_2) + A_3 \exp(-n/t_3)$$

siendo A_i y t_i constantes.

Comenzamos utilizando un solo epicentro en esta ecuación. Sin embargo, esta simplicidad lleva implícita la obtención de grandes errores para altas TCCs. Aunque los errores son tolerablemente pequeños para TCCs por debajo de 70.000 K (<5%) éstos crecen hasta un 53% para TCCs cercanas a 100.000 K. Como la precisión en la determinación depende, críticamente, en la elección del epicentro, nosotros añadimos un segundo epicentro para altas TCCs. Añadir un epicentro más a nuestra ecuación requiere cambiar los valores de las constantes A_i y t_i , mostradas en la tabla VII.9.

Rango TCC	A0	A1	t1	A2	t2	A3	t3
<50,000K	-949,86315	6253,80338	0,92159	28,70599	0,20039	0,00004	0,07125
>50,000K	36284,48953	0,00228	0,07861	5,4535x10 ⁻³⁶	0,01543		

Tabla VII. 9.- Constantes de la ecuación propuesta para determinar TCC a partir de las coordenadas de cromaticidad x,y.

Con este cambio, utilizaremos un epicentro en $x_1 = 0,3366$, $y_1 = 0,1735$ para TCCs por debajo de 50.000 K, y otro en $x_2 = 0,3356$, $y_2 = 0,1691$ para TCCs superiores a 50.000 K. Para elegir entre una u otra fórmula, se asume uno de los dos rangos aplicando su correspondiente ecuación; si la TCC calculada no está en el rango asumido tendremos que cambiar a la otra fórmula.

Con esta fórmula y dos epicentros se obtienen resultados similares a los obtenidos con otros algoritmos más complejos y lentos, tal y como se muestra en las tablas VII.10 y VII.11. El máximo error relativo que se alcanza con nuestra fórmula, en todo el rango de TCCs abarcado por nuestro conjunto de medidas experimentales (3.758 K - 577.624 K), es de sólo 1,74 % y el error relativo medio es de 0,077 %. En la tabla VII.11 mostramos el máximo error relativo y el error relativo medio en varios rangos de TCCs, así como la máxima distancia Euclídea (CIE-1931) entre la TCC calculada mediante nuestra fórmula propuesta y su TCC de referencia.

Error relativo	Número de medidas	Porcentaje
< 0,1%	4.564	80,8 %
< 0,2%	5.412	95,8 %
< 0,5%	5.600	99,2 %
< 1,0%	5.626	99,6 %
< 2,0%	5.648	100 %

Tabla VII. 10.- Distribución de porcentajes de los errores relativos obtenidos mediante el uso de nuestra ecuación propuesta, en comparación con la TCC de referencia, para el conjunto de 5.648 medidas.

Rango TCC	Error relativo		Distancia Euclídea CIE 1931	
	Máximo	Medio	Máximo	Medio
3.000 K – 5.000 K	1,74%	0,74%	0,00318	0,00137
5.000 K – 9.000 K	1,53%	0,06%	0,00268	0,00008
9.000 K – 17.000 K	0,65%	0,08%	0,00041	0,00005
17.000 K – 50.000 K	0,61%	0,13%	0,00011	0,00004
50.000 K – 100.000 K	1,33%	0,64%	0,00010	0,00005
>100.000 K	1,03%	0,65%	0,00003	0,00002

Tabla VII. 11.- Errores relativos (máximos y medios) en la determinación de las TCC mediante la fórmula propuesta y distancias Euclídeas (máximas y medias) entre las TCC calculadas y las TCC de referencia.

Lógicamente los mayores errores colorimétricos se producen para bajas TCC, en donde una pequeña variación en TCC provoca grandes cambios en las coordenadas de cromaticidad. El máximo error relativo obtenido mediante nuestra ecuación es 1,74% para una TCC de 4.793 K. Aunque este error relativo se corresponde con un error absoluto de sólo 83 K, produce un error colorimétrico (distancia Euclídea) de 0,00318, distancia análoga a la incertidumbre en la determinación de coordenadas de cromaticidad por cualquier espectrorradiómetro. De forma análoga, para altas TCC una pequeña variación en cromaticidad, aunque sea por debajo del umbral, puede producir un gran cambio en la TCC. Estos resultados no son contradictorios si recordamos la naturaleza de la TCC: traza una función de transferencia espectral que depende exponencialmente con la inversa de la temperatura (la función de Planck) en un espacio de color en donde usualmente sólo utilizamos funciones de transferencia aditivas o multiplicativas (por ejemplo, la convolución de la irradiancia espectral con la reflectancia espectral). Por tanto la relación entre TCC y distancias colorimétricas no es ni directa, ni lineal, ni *familiar*.

Si las coordenadas de cromaticidad de una fuente se sitúan lejos del *locus* correspondiente a las medidas de luz natural adquiridas para obtener nuestra fórmula propuesta, los errores en el cálculo de la TCC deben ser mayores. Para comprobar la utilidad de nuestra ecuación hemos utilizado 138 curvas de emisión del Cuerpo Negro con temperaturas de color (TC) entre 3.000 K y 800.000 K, obteniendo aceptables resultados (errores relativos por debajo del 5%) en un rango muy amplio de TCs (3.000 K - 300.000 K), mostrados en la figura 7.25. Para 500.000 K el error crece hasta un 10%. Cuantitativamente cuando la distancia colorimétrica entre las coordenadas de cromaticidad x,y de una fuente y el *locus* de luz natural sea considerable ($\sim 0,01$, como ocurre para las cromaticidades del Cuerpo Negro para muy altas TCs) los errores obtenidos mediante el uso de nuestra fórmula pueden ser más grandes de los esperados. Este resultado sucede ya que la precisión para altas TCCs es

muy sensible a la elección del epicentro y de las constantes de la fórmula. Desde un punto de vista perceptivo la tabla VII.11 nos sugiere que los errores colorimétricos asociados son menores que la diferencia umbral para altas TCCs. Obviamente si las cromaticidades de una fuente se sitúan muy alejadas del Planckian *locus* el concepto de TCC carece de sentido por sí mismo.

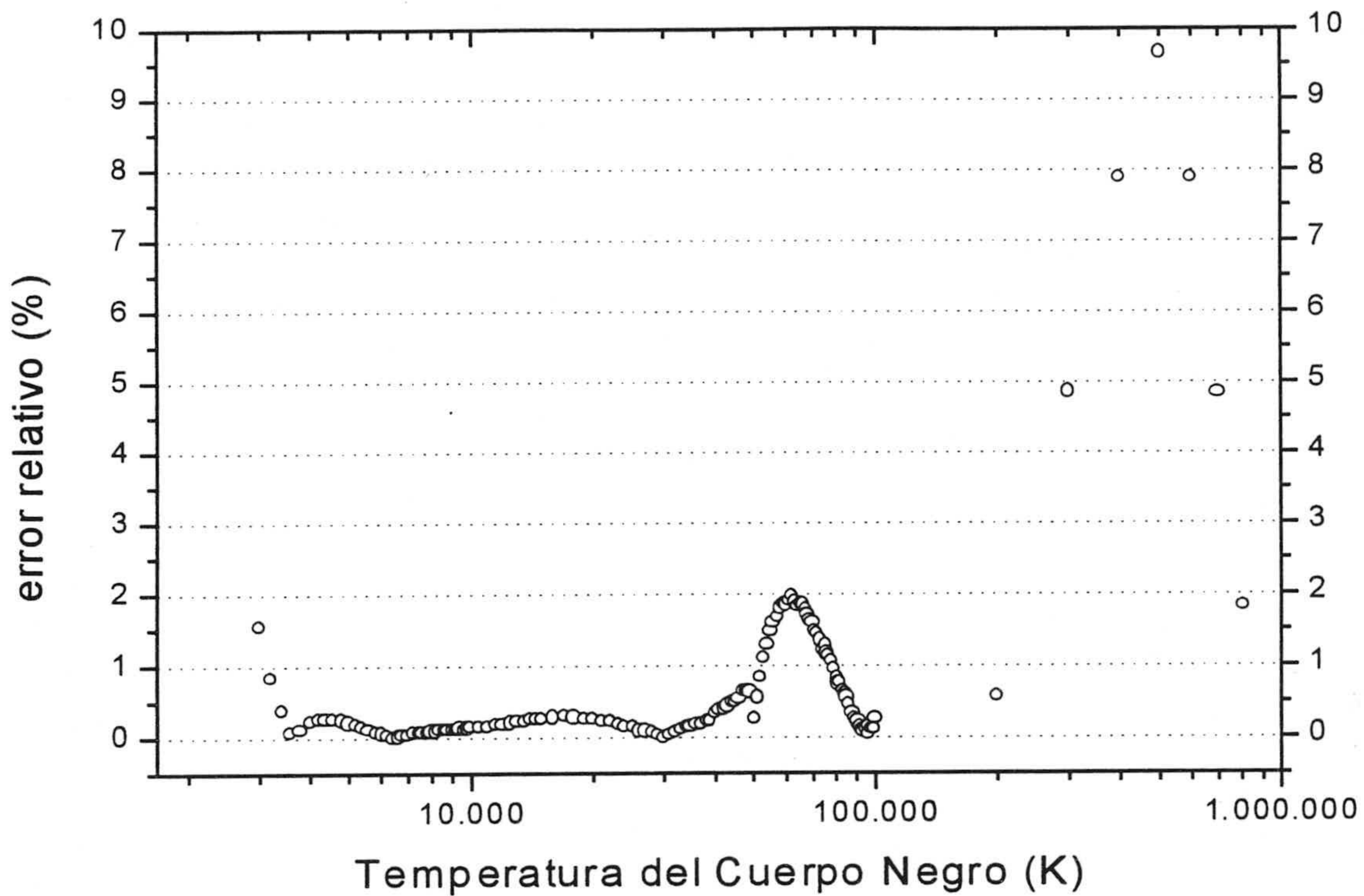


Figura 7. 25.- Errores relativos obtenidos con nuestra ecuación propuesta para 138 cromaticidades del Cuerpo Negro. Nótese que para altas temperaturas las cromaticidades del Cuerpo Negro se alejan considerablemente del *locus* de luz natural utilizado para desarrollar la ecuación propuesta.

Haciendo un sumario de este último apartado de esta Memoria de Doctorado, podemos afirmar que hemos propuesto una ecuación simple que proporciona grandes resultados en el cálculo de TCC en la práctica, en comparación con complicados algoritmos propuestos en los últimos cuarenta años.

Aportaciones y Conclusiones

“¡Con qué trabajo tan grande
deja la luz a Granada!
se enreda entre los cipreses
o se esconde bajo el agua”

Mariana Pineda, Federico García Lorca

Las principales aportaciones de carácter experimental que se han llevado a cabo en esta Memoria de Doctorado se pueden compendiar en:

1. Desde 1996 hemos llevado a cabo tres extensas campañas de medidas espectrorradiométricas de distintos tipos de luz natural recibida en Granada. Tanto las curvas espectrales que hemos medido como los resultados presentados y analizados en esta Memoria de Doctorado constituyen una utilísima base de datos con aplicaciones en distintas áreas de la Ciencia, Industria y Técnica.
2. En la primera campaña de medidas, desarrollada durante dos años completos, se midieron irradiancias espectrales de luz-día recibida sobre una superficie horizontal y procedente de toda la bóveda celeste, en el espectro comprendido entre 300 y 1100 nm. Esta campaña fue diseñada como respuesta a las deficiencias presentadas por otras campañas publicadas en la literatura y llevadas a cabo principalmente en los años 60. Con un total de 2.600 medidas esta campaña se ha convertido en la más extensa temporalmente y en la que posee un mayor número curvas espectrales, de todas las existentes en la literatura.
3. El principal propósito de la segunda campaña, llevada a cabo durante seis meses, fue medir distribuciones espectrales de radiancia (con campos de visión de 3°), procedente de un número extenso y bien repartido de puntos sobre la bóveda celeste, en días con cielos despejados para distintas elevaciones solares y analizar la dependencia de las características colorimétricas de la luz-cielo con ciertas variables (elevación solar, posición sobre la bóveda y ángulo de esparcimiento).
4. En la tercera y última campaña hemos medido irradiancias espectrales sobre una superficie horizontal en intervalos de 30 segundos durante crepúsculos con cielos despejados y cielos cubiertos, con la intención de actualizar y mejorar el conocimiento

científico sobre la evolución temporal tanto de la cromaticidad como la iluminancia durante los crepúsculos, dado que los últimos datos existentes en la literatura fueron publicados hace más de cuarenta años.

A partir de las medidas realizadas las principales conclusiones que queremos destacar de nuestro trabajo son:

1. La extensión de las medidas de luz-día en el eje x es la mayor encontrada en la literatura. El 99% de estas medidas se sitúan por encima del *locus* del Cuerpo Negro y extraordinariamente agrupadas en torno al *locus* que las representa, que posee menor pendiente que el CIE *locus*. Asimismo no hemos apreciado diferencias cromáticas entre estaciones en estas medidas.
2. La TCC más representativa para la campaña de luz-día es 5.600 K, siendo el intervalo más frecuente el situado entre 5.500 y 6.000 K, con un 45%. Recordemos que la CIE recomienda 6.500 K. Analizando el intervalo de TCC más probable en función de las condiciones atmosféricas observamos que en días con cielos totalmente despejados se sitúa entre 5.555 y 5.715 K, modificándose a 5.880-6.060 K para cielos totalmente cubiertos.
3. En días con cielos despejados la TCC de la luz-día alcanza un mínimo (~ 5.500 K) en el intervalo comprendido entre 20° y 35° de elevación solar, incrementándose para elevaciones superiores hasta estabilizarse en torno a 5.700 K. La presencia de luz-sol disminuye en ~ 550 K la TCC de la luz-día para elevaciones solares entre 10° y 50° , y en ~ 250 K para elevaciones solares superiores a 55° .
4. En el espectro visible es donde mayor correlación se observa entre curvas espectrales. Dicha correlación disminuye sustancialmente al considerar tanto el UV como el IR, ya que en estas regiones las medidas de luz-día presentan mayor variabilidad espectral que en el visible.
5. Nuestras medidas espectrales de luz-día presentan menor cociente UV/VIS que el encontrado por otros autores. Este cociente posee menor correlación con la TCC y con la elevación solar que el cociente IR/VIS.
6. La campaña cuyas medidas poseen mayor variación cromática en la dirección amarillo-azul es la de luz-cielo. Esta gran extensión contrasta con el acentuado agrupamiento de las medidas en torno a su *locus*, que se traduce en la ausencia de variación cromática en la dirección verde-púrpura. Asimismo ni una sola medida de esta campaña posee coordenadas de cromaticidad por debajo del *locus* del Cuerpo Negro.

7. Dado que la distribución de TCC en las medidas de luz-cielo no presenta un pico acusado no es razonable recomendar un valor representativo; el intervalo más frecuente se encuentra entre 11.000 y 11.500 K con tan sólo un 6%.
8. La pureza colorimétrica de la luz-cielo en días despejados no supera el valor del 15%, frente a un 40% que tendría una atmósfera ideal libre de partículas (atmósfera de Rayleigh). Una disminución de la elevación solar conlleva que la región cromática abarcada en el meridiano y antimeridiano solar aumente, desplazándose hacia la región de los amarillos-naranjas. Existe mayor variación cromática a lo largo del meridiano y antimeridiano solar en comparación con la encontrada en el meridiano perpendicular al solar.
9. La concordancia de las coordenadas de cromaticidad con el CIE *locus* para barridos en el meridiano y antimeridiano solar es casi total, existiendo un ostensible alejamiento para barridos en el meridiano perpendicular al solar, sobre todo para bajas TCCs.
10. En el cenit no se obtienen las máximas purezas colorimétricas puesto que el intervalo del ángulo de esparcimiento donde los azules del cielo son más puros es el comprendido entre 90° y 120° . Cuando las medidas se realizan en el meridiano perpendicular al solar la mínima TCC siempre se produce en el horizonte.
11. A pesar de medir bajo condiciones supuestamente ideales (cielos completamente despejados) no se aprecia total simetría en los barridos realizados en el meridiano perpendicular al meridiano solar, siendo esta asimetría más sobresaliente para bajas elevaciones solares.
12. La campaña de medidas de luz-día durante crepúsculos es la que abarca mayor variedad cromática de las tres realizadas, puesto que es la única que presenta variación en la dirección verde-púrpura. De hecho un gran número de ellas (~20%) poseen coordenadas de cromaticidad por debajo del *locus* del Cuerpo Negro, hacia la región de los púrpuras.
13. Recomendamos una TCC de 8.100 K como la más representativa para la campaña de luz-día durante crepúsculos, siendo el intervalo más frecuente el situado entre 7.500 y 8.500 K, con un 47%.
14. Durante crepúsculos los colores e iluminancias de la luz-día poseen mayor variabilidad que la hasta ahora asumida. Hemos observado que en algunos crepúsculos con cielos totalmente despejados una evolución cromática en forma de "S" hasta ahora no advertida en la literatura. Con cielos totalmente cubiertos la evolución cromática de la luz-día no posee una característica común. La iluminancia durante un crepúsculo

puede variar hasta cuatro ordenes de magnitud, pasando el nivel de iluminación del fotópico al mesópico.

15. El *locus* de la CIE no es capaz de representar la cromaticidad de la luz-día de Granada para altas TCCs (valores superiores a 9.000 K), debido a la distancia entre dicho *locus* y nuestras medidas. Cuando la gama cromática es enorme, como sucede en las medidas de luz-día durante crepúsculos, hemos puesto de manifiesto que no es apropiado obtener un *locus* que las represente.
16. Hemos comprobado que reconstruyendo curvas espectrales utilizando el método recomendado por la CIE sólo se consiguen calidades aceptables y no buenas o excelentes conforme al criterio utilizado. Dos factores limitan la ventaja de su uso: la utilización de únicamente 3 vectores propios y el metamerismo existente entre las medidas
17. En las tres campañas de medidas llevadas a cabo con un número pequeño de vectores se consigue una gran contribución, en contraste con lo publicado por otros autores. A pesar de este resultado hemos comprobado que el número de vectores necesario para reconstruir curvas espectrales con una calidad espectral más que aceptable se sitúa en torno a 5. En el caso de poseer un amplio conjunto compuesto por distintos tipos de medidas, el número de vectores se incrementa hasta más de 7, contrastando con las recomendaciones de la CIE. Los algoritmos que permiten la identificación y reconocimiento de color en el ámbito de la Visión Artificial hacen uso de las reconstrucciones de curvas espectrales mediante modelos lineales; por tanto es primordial fijar la dimensión más idónea de la base de vectores utilizada.
18. Hemos propuesto una ecuación simple que proporciona mejores resultados en el cálculo de TCC a partir de las coordenadas de cromaticidad CIE-1931 x e y , en comparación con los complicados algoritmos propuestos en los últimos cuarenta años.

Glosario

“La vega, ya en los trigales marchitos,
se duerme en un sopor amarillento y plateado,
mientras los cielos de la lejanía tienen hogueras
de púrpura apasionada y ocre dulzón”
Federico García Lorca

Glosario

Dado que a lo largo de esta Memoria de Doctorado hemos ido utilizando una serie de términos, magnitudes y acrónimos comunes en distintas disciplinas de la ciencia, creemos conveniente reunirlos en este glosario para facilitar la lectura y comprensión de los capítulos de que consta este trabajo.

Alguno de los términos que a continuación presentamos va acompañado por su traducción en inglés, puesto que a veces estamos muy acostumbrados, desgraciadamente, a usar el término utilizado en la literatura anglosajona en lugar del que se nos ofrece en nuestra rica lengua. Ésta es nuestra intención: ahuyentar semejante tentación.

- **acimut:** medida de la distancia angular sobre el horizonte entre las verticales que atraviesan dos puntos. Constituye una de las dos variables utilizadas para especificar la posición de un objeto en la bóveda celeste (la otra es elevación o altitud). Ver figura 1.
- **almucantar:** círculo sobre la bóveda celeste, con centro en el cenit, que conecta puntos con un mismo ángulo de elevación.
- **ángulo de esparcimiento** (*scattering angle*): ángulo (ψ) formado entre la dirección de incidencia de la luz y la dirección considerada de la luz esparcida.
- **BSI** (acrónimo de *British Standard Institution*): Instituto de Normas Británico.
- **camino óptico** (*optical path*): trayectoria que sigue el haz (no necesariamente rectilínea) desde el límite superior de la atmósfera hasta alcanzar la superficie de la Tierra.
- **campo de visión** (*field of view – FOV*): extensión angular del cono de luz que penetra en un instrumento óptico.

- **cenit** (*zenith*): punto de la esfera celeste situado en la vertical del observador. Ver figura 1.
- **CIE** (acrónimo de *Commission Internationale de l'Eclairage*): Comisión Internacional de la Iluminación.
- **crepúsculo** (*twilight*): periodo de tiempo en el que el Sol está por debajo del horizonte pero todavía ilumina el cielo. Se distinguen varios tipos de crepúsculos: crepúsculo civil (elevaciones solares entre 0° y -6°), crepúsculo náutico (elevaciones solares entre 0° y -12°) y crepúsculo astronómico (elevaciones solares entre -12° y -18°).

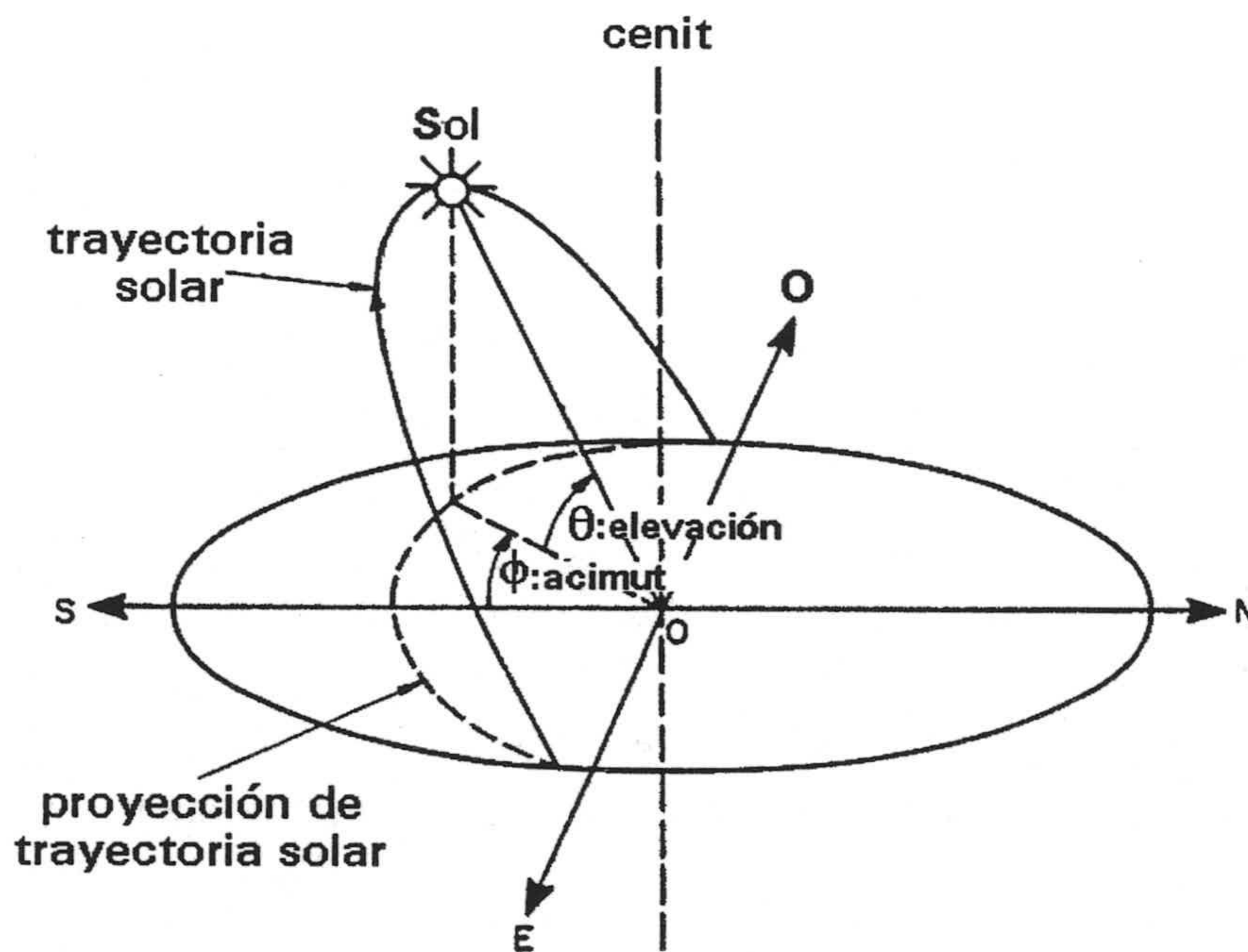


Figura 1.- Definición gráfica de cenit, elevación y acimut.

- **distribuciones RD** (*reconstituted daylight*): distribuciones espectrales estándar de luz-día con una TCC dada o, equivalentemente, con unas coordenadas de cromaticidad dadas.
- **eficacia luminosa** (*luminous efficacy*): se define como el cociente entre el valor de la magnitud fotométrica y el valor de su magnitud radiométrica, ambas integradas sobre todo el espectro solar. A lo largo de esta Memoria de Doctorado hemos hecho uso de una definición modificada de la eficacia luminosa pues hemos restringido la integración al espectro visible (380-780 nm). Así por ejemplo: el cociente entre la iluminancia y la irradiancia integrada de la que se deriva, integrada en el espectro visible, nos da como resultado la eficacia luminosa que se mide en lumen/W.
- **elevación** (o altitud): distancia angular sobre la bóveda celeste de un punto, medida desde el horizonte astronómico (elevación: 0°). El cenit posee una

elevación de 90°. Constituye una de las dos variables utilizadas para especificar la posición de un objeto en la bóveda celeste (la otra es acimut). Ver figura 1.

- **esparcimiento** (*scattering*): proceso mediante el cual toda molécula o partícula que intercepta el camino de una onda electromagnética extrae energía de la onda incidente y la reemite en todas las direcciones
- **espectro visible**: región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 380 y 780 nm.
- **espesor óptico** (*optical depth* o *optical thickness*): magnitud que expresa la opacidad o atenuación que se produce en la atmósfera por sus distintos componentes.
- **función de fase** (*phase function*): función que describe la distribución angular de la energía esparcida y que depende de las propiedades de esparcimiento de las moléculas y partículas presentes en la atmósfera. Cuando la longitud de onda de la luz incidente es mucho mayor que el tamaño de la partícula, como ocurre para las moléculas gaseosas (esparcimiento de Rayleigh), la función de fase para luz incidente no polarizada viene dada por:

$$P(\cos \psi) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \psi)$$

- **GFC** (acrónimo de *Goodness-Fitting Coefficient*): Coeficiente que evalúa la similitud espectral entre dos curvas espectrales haciendo uso de la desigualdad de Schwartz. El *GFC* es el coeficiente de correlación múltiple *R*, y coincide con la raíz cuadrada del *VAF* (*variance accounted for*), tomando valores entre 0 y 1, donde 1 indica una reconstrucción exacta. Su cálculo se realiza mediante:

$$GFC = \frac{\left| \sum_j E_E(\lambda_j) E_R(\lambda_j) \right|}{\left| \sum_j [E_E(\lambda_j)]^2 \right|^{1/2} \left| \sum_j [E_R(\lambda_j)]^2 \right|^{1/2}}$$

- **iluminancia** (*illuminance*): magnitud fotométrica asociada a la irradiancia.
- **iluminante A de la CIE**: Representa la luz procedente de un Cuerpo Negro con una temperatura de 2.856 K.
- **iluminante B de la CIE**: Representa la luz solar directa con una TCC de aproximadamente 4.874 K.
- **iluminante C de la CIE**: Representa una fase de luz-día con una TCC de aproximadamente 6.774 K.
- **iluminante D₅₅ de la CIE**: Representa una fase de luz-día con una TCC de aproximadamente 5.504 K.
- **iluminante D₆₅ de la CIE**: Representa una fase de luz-día con una TCC de aproximadamente 6.504 K.

- **infrarrojo:** región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 780 nm y 1 mm. Esta región se divide en tres subregiones: IRA, IRB e IRC.
- **irradiancia** (*irradiance*): cociente del flujo radiante recibido por unidad de área.
- **IRA:** región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 780 nm y 1400 nm.
- **IRB:** región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 1400 nm y 3000 nm.
- **IRC:** región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 3000 nm y 1 mm.
- **ISO** (acrónimo de *International Standard Organization*): Organización Internacional de Normalización.
- **líneas de isotemperatura** (*isotemperature lines*): líneas dibujadas en el diagrama cromático CIE-1931 que marcan las coordenadas de cromaticidad que poseen una misma temperatura de color correlacionada. En el diagrama cromático CIE-1976 estas líneas son perpendiculares al *locus* del Cuerpo Negro.
- **locus del Cuerpo Negro** (*Blackbody locus* o *Planckian locus*): curva generada con las coordenadas de cromaticidad correspondientes a la energía espectral emitida por el Cuerpo Negro a distintas temperaturas, que se sitúa prácticamente en la región de los acromáticos para la mayor parte de las temperaturas, iniciándose en la zona de los rojos para temperaturas bajas, pasando por los naranjas y amarillos y acercándose a los azules para temperaturas altas.
- **locus CIE:** curva adoptada por la CIE (cuya expresión analítica viene dada por un polinomio de grado 2) que intenta representar las coordenadas de cromaticidad de distintas fases de luz-día. Esta curva, cuya ecuación viene dada por $y = -3,000x^2 + 2,870x - 0,275$ en el diagrama cromático CIE-1931 fue elegida de forma visual y se sitúa por encima del *locus* del Cuerpo Negro, aproximadamente paralelo a él.
- **longitud de onda dominante** (*dominant wavelength*): es la longitud de onda de un estímulo espectral (monocromático) que iguala el color de una fuente considerada cuando se combina con una proporción adecuada del estímulo acromático. Para definir la longitud de onda dominante de un estímulo de color (C), uniremos el punto que representa éste en el diagrama cromático con el que representa a un estímulo acromático (E) mediante una línea recta: esta línea cortará al lugar espectral en un punto: a la longitud de onda de dicho punto la llamaremos longitud de onda dominante del estímulo (C).
- **luminancia** (*luminance*): magnitud fotométrica asociada a la radiancia.
- **luz-cielo** (*skylight*): término utilizado en esta Memoria de Doctorado para referirnos a la luz esparcida por la atmósfera.

- **luz-día** (*daylight*): término utilizado en esta Memoria de Doctorado para referirnos a la luz compuesta por luz-sol y luz-cielo.
- **luz-sol** (*sunlight*): término utilizado en esta Memoria de Doctorado para referirnos a la luz del Sol que llega sin cambio en su dirección de propagación.
- **masa óptica** (*air mass*): medida de la cantidad de atmósfera que la luz debe atravesar hasta llegar al observador.
- **metamerismo**: fenómeno por el cual dos señales de color con distintos perfiles espectrales poseen los mismos valores triestímulo. Este término se ha generalizado en esta Memoria de Doctorado, de acuerdo con otros autores, a distintas distribuciones espectrales con igual TCC.
- **meridiano solar**: círculo vertical que pasa por el cenit y la posición solar.
- **mired**: Unidad de temperaturas de color definida como: $1 \text{ mired} = \frac{10^6}{TCC (K)}$.
- **NBS** (acrónimo de *U.S. National Bureau of Standards*): Oficina Nacional de Pesos y Medidas.
- **neblina** (*haze*): vapor de agua condensado sobre pequeñas partículas contenidas en la atmósfera.
- **pureza colorimétrica o saturación**: es el cociente de la distancia entre las coordenadas de cromaticidad de un estímulo de color y el estímulo acromático y la distancia entre las coordenadas de cromaticidad del estímulo acromático y las coordenadas de cromaticidad de la longitud de onda dominante. La pureza colorimétrica suele expresarse en tantos por ciento: el estímulo acromático tiene pureza 0%, y los estímulos espectrales (monocromáticos) poseen una pureza del 100%.
- **radiador de Cuerpo Negro** (*Blackbody radiator*): Fuente de radiación que emite conforme a la ley de Planck.
- **radiancia** (*radiance*): flujo radiante, que emerge de un elemento de superficie de la fuente, y se propaga dentro de un cono elemental que contiene a la dirección dada, por unidad de ángulo sólido y de área en la proyección ortogonal de dicho elemento de superficie sobre un plano perpendicular a la dirección considerada.
- **SPD** (acrónimo de *Spectral Power Distribution*): Distribución espectral de potencia.
- **temperatura de color – TC** (*Color Temperature - CT*): término que se aplica a una fuente cuya curva de emisión espectral posee coordenadas de cromaticidad similares (o muy parecidas) a las del Cuerpo Negro a una determinada temperatura T ; diremos que dicha fuente presenta una temperatura de color T .
- **temperatura de color correlacionada - TCC** (*Correlated Color Temperature - CCT*): La temperatura de color correlacionada de una fuente es la temperatura del

Cuerpo Negro cuya cromaticidad está más cercana a la de la fuente en el diagrama cromático CIE 1960 UCS.

- **ultravioleta:** región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 100 nm y 380 nm. Esta región se divide en tres subregiones: UVA, UVB y UVC.
- **UVA:** región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 315 y 380 nm.
- **UVB:** región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 280 y 315 nm.
- **UVC:** región del espectro electromagnético cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 100 y 280 nm.
- **visión fotópica:** visión humana que se da cuando las luminancias de las luces u objetos observados son superiores a 10 cd/m^2
- **visión escotópica:** visión humana que se da cuando las luminancias de las luces u objetos observados son inferiores a 10^{-3} cd/m^2
- **visión mesópica:** visión humana que se da cuando las luminancias de las luces u objetos observados son superiores a 10^{-3} cd/m^2 e inferiores a 10 cd/m^2
- **WMO** (acrónimo de *World Meteorological Organization*): Organización Meteorológica Mundial

Bibliografía

“La luz solar ¡cómo barre la Vega de Granada!” exclamó Federico
“y en efecto –me contó Dámaso Alonso en 1980- es que veía que,
en una hora de la tarde, estaba la luz toda recogida en un sitio muy pequeño,
como si hubiera sido barrida allí por una escoba”
La Granada de Lorca, Ian Gibson

- Bohren C.F. [1987]: *Multiple scattering of light and some of its observable consequences*, American Journal of Physics, **55**, 524-533.
- Bohren C.F. [1990]: *Understanding colors in nature*, Earth and Mineral Sciences, **59**, 25-30.
- Bohren C.F., Dugney C.E. [1992]: *Colors of the sky: can big particles make the sky bluer?*, Beitr. Phys. Atmosph., **64**, 329-324.
- Bohren C.F., Fraser A.B. [1985]: *Colors of the sky*, The Physics Teacher, **23**, 267-272.
- Brown D.R.E. [1952]: *Natural illumination charts*, U. S. Navy Bureau of Ships, Report # 374-1.
- CIE [1951]: *Proceedings 1951*, CIE Central Bureau, Paris.
- CIE [1964]: *Proceedings 1963 (Vienna Session)*, CIE Central Bureau, Paris.
- CIE [1968]: *Proceedings 1967 (Washington Session)*, CIE Central Bureau, Paris.
- CIE [1986]: *Colorimetry*, CIE Publication No. 15.2, 2nd ed., Central Bureau of the CIE, Vienna.
- CIE [1989]: *Solar spectral irradiance*, CIE Technical Report, Publ. No. CIE 85, 1st ed., Central Bureau of the CIE, Vienna.
- CIE [1994]: *Guide to recommended practice of daylight measurement*, CIE Technical Report, Publ. No. CIE 108, 1st ed., Central Bureau of the CIE, Vienna.
- Collins J.F. [1965]: *The colour temperature of daylight*, British Journal of Applied Physics, **16**, 527-532.

-
- Condit H.R., Grum F. [1964]: *Spectral energy distribution of daylight*, Journal of the Optical Society of America, **54**, 937-944.
- Coulson K.L. [1988]: *Polarization and intensity of light in the atmosphere*, Ed. A. Deepak Publishing, Virginia.
- Chamberlin G.J., Lawrence A., Belbin A.A. [1963]: *Observations on the related colour temperature of north daylight in southern England*, Light and Lighting, **56**, 70-72.
- Das S.R., Sastri V.D.P. [1965]: *Spectral distribution and color of tropical daylight*, Journal of the Optical Society of America, **55**, 319-323.
- Deirmendjian D. [1969]: *Electromagnetic scattering on spherical polydispersions*, Ed. American Elsevier, New York.
- Dixon E.R. [1978]: *Spectral distribution of Australian daylight*, Journal of the Optical Society of America, **68**, 437-450.
- Draper N., Smith H. [1981]: *Applied Regression Analysis*, Ed. John Wiley & Sons, New York.
- El Diasty R., Shapiro M.M., Fazio P. [1989]: *A time-dependent concept for daylight calculation; part I: the direct component*, Journal of the Illuminating Engineering Society, **18**, 52-64.
- García-Beltrán A., Nieves J.L., Hernández-Andrés J., Romero J. [1998]: *Linear basis for spectral reflectance of acrylic paints*, Color Research and Application, **23**, 39-45.
- Gates D.M. [1966]: *Spectral distribution of solar radiation at the earth's surface*, Science, **151**, 523-537.
- Gueymard C. [1994]: *Updated transmittance functions for use in fast spectral direct beam irradiance models*, Solar '94, Proceedings of the 23rd ASES Annual Conference, S. Burley et al. (Eds), 355-360.
- Hall F.F. Jr. [1979]: *Twilight sky colors: Observations and the status of modeling*, Journal of the Optical Society of America, **69**, 1179-1180.
- Harrison A.W., Coombes C.A. [1988]: *Angular distribution of clear sky short wavelength radiance*, Solar Energy, **40**, 57-63.
- Henderson S.T [1970]: *Daylight and its spectrum*, Ed. American Elsevier, New York.
-

-
- Henderson S.T., Hodgkiss D. [1963]: *The spectral energy distribution of daylight*, British Journal of Applied Physics, **14**, 125-131.
- Henderson S.T., Hodgkiss D. [1964]: *The spectral energy distribution of daylight*, British Journal of Applied Physics, **15**, 947-952.
- Hernández-Andrés J., Romero J., García-Beltrán A., Nieves J.L. [1998]: *Testing linear models on spectral daylight measurements*, Applied Optics, **37**, 971-977.
- Hooper F.C., Brunger A.P., Chan C.S. [1987]: *A clear sky model of diffuse sky radiance*, Journal of Solar Energy Engineering, **109**, 9-14.
- International Standard ISO/CIE 10526 [1991]: *CIE standard colorimetric illuminants*, International Organization for Standardization/CIE, Geneva.
- Iqbal M. [1983]: *An introduction to solar radiation*, Ed. Academic Press, New York.
- Janiczek P.M., DeYoung J.A. [1987]: *Computer programs for sun and moon illuminance with contingent tables and diagrams*, U. S. Naval Observatory Circular # 171, Washington DC.
- Judd D.B., MacAdam D.L., Wyszecki G. [1964]: *Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature*, Journal of the Optical Society of America, **54**, 1031-1040.
- Kelly K.L. [1963]: *Lines of constant correlated color temperature based on MacAdam's (u,v) uniform chromaticity transformation of the CIE diagram*, Journal of the Optical Society of America, **53**, 999-1002.
- Knestrick G.L., Curcio J.A., [1967]: *Measurements of the spectral radiance of the horizon sky*, Naval Research Laboratory, Report 6615.
- Kok C.J. [1972]: *Spectral irradiance of daylight at Pretoria*, Journal of Physics D: Applied Physics, **5**, 1513-1520.
- Kok C.J. [1972]: *Spectral irradiance of daylight for air mass 2*, Journal of Physics D: Applied Physics, **5**, Letter to the editor, L85-L88.
- Krystek K. [1985]: *An algorithm to calculate correlated colour temperature*, Color Research and Application, **10**, 38-40.
- Lee R.L. Jr. [1988]: *Colorimetric calibration of video digitizing system: algorithm and applications*, Color Research and Application, **13**, 180-186.
- Lee R.L. Jr. [1994a]: *Twilight and daytime colors of the clear sky*, Applied Optics, **33**, 4629-4638.
-

-
- Lee R.L. Jr. [1994b]: *Horizon brightness revisited: Measurements and a model of clear-sky radiances*, Applied Optics, **33**, 4620-4628.
- Lee R.L. Jr [1998]: *Digital imaging of clear-sky polarization*, Applied Optics, **37**, 1465-1476.
- Lenoble J. [1993]: *Atmospheric radiative transfer*, Ed. A. Deepak Publishing, Virginia.
- Liou K.N. [1980]: *An introduction to atmospheric radiation*, Ed. Academic Press, New York.
- Lynch D.K., Livingston W. [1995]: *Color and Light in Nature*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lynch y Soffer [1999]: *On the Solar spectrum and the color sensitivity of the eye*, Optics and Photonic News, **10**, 28-30.
- MacAdam D.L. [1942], *Visual sensitivities to color differences in daylight*, Journal of the Optical Society of America, **32**, 247-274.
- MacAdam D.L. [1943], *Specification of small chromaticity differences in daylight*, Journal of the Optical Society of America, **33**, 18-26.
- MacInnis D.D., Williamson P.B., Nielsen G.P. [1996]: *Sun position and twilight times for driver visibility assessment*, S. A. E. Transactions, **104**, part 1, 263-287.
- McCamy C.S. [1992]: *Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates*, Color Research and Application, **17**, 142-144.
- McCamy C.S. [1993]: *Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates (Erratum)*, Color Research and Application, **18**, 150.
- McCartney E.J. [1976], *Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles*, Ed. John Wiley & Sons, New York.
- Middleton W.E.K. [1954]: *The color of the overcast sky*, Journal of the Optical Society of America, **44**, 793-798.
- Minnaert M.G.J. [1993]: *Light and color in the outdoors*, Ed. Springer-Verlag, New York.
- Molineaux B., Ineichen P., Delaunay J.J. [1995]: *Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity – Improving model performance*, Solar Energy, **55**, 125-137.

-
- Montgomery D.C. [1991]: *Diseño y análisis de experimentos*, Grupo Editorial Iberoamericana, México.
- Navvab M. [1997]: *Variability of daylight in luminous environments*, Journal of the Illuminating Engineering Society, **26**, 101-114.
- Nayatani Y., Hitani M., Minato H. [1967]: *Chromaticity and spectral energy distribution of daylight from north sky at Amagasaki, JAPAN*, Bull Electrotech. Lab., **31**, 1127-1135.
- Nayatani Y., Wyszecki G. [1963]: *Color of daylight from north sky*, Journal of the Optical Society of America, **53**, 626-629.
- Nickerson D. [1960]: *Light sources and color rendering*, Journal of the Optical Society of America, **50**, 57-69.
- Nimeroff I., Yurow J.A. [1965]: *Degree of metamerism*, Journal of the Optical Society of America, **55**, 185-190.
- Olseth J.A., Skartveit A. [1989]: *Observed and modelled hourly luminous efficacies under arbitrary cloudiness*, Solar Energy, **42**, 221-233.
- Parkkinen J.P.S., Hallikainen J., Jaaskelainen T. [1989]: *Characteristic spectra of Munsell colors*, Journal of the Optical Society of America A, **6**, 318-322.
- Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J, Stewart R. [1990]: *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*, Solar Energy, **44**, 271-289.
- Perez R., Webster K., Seals R., Stewart R, Barron J. [1987]: *Variations of the luminous efficacy of global and diffuse radiation and zenith luminance with weather conditions – Description of a potential method to generate key daylight availability data from existing solar radiation data bases*, Solar Energy, **38**, 33-44.
- Pérez-Ocón F., Hita E., Jiménez del Barco L., Nieves J.L. [1999]: *Contribution to the experimental revision of the colorimetric standard observer*, Color Research and Application, **24**, 377-388.
- Pohlen S., Ruck B., Bittar A. [1996]: *Evaluation of the Perez luminous efficacy models for a southern hemisphere site (New Zealand -41°S, 175°E)*, Solar Energy, **57**, 307-315.
- Prasad C.R., Inamdar A.K., Venkatesh H.P. [1987]: *Computation of diffuse radiation*, Solar Energy, **39**, 521-532.
-

-
- Priest I.G. [1933]: *A proposed scale for use in specifying the chromaticity of incandescent illuminants and various phases of daylight*, Journal of the Optical Society of America, **23**, 41-45.
- Riordan C.J., Myers D.R., Hulstrom R.L. [1990]: *Spectral solar radiation data base documentation: Volume I*, Solar Energy Research Institute, Colorado.
- Robertson A.R. [1968]: *Computation of correlated color temperature and distribution temperature*, Journal of the Optical Society of America, **58**, 1528-1535.
- Romero J., García-Beltrán A., Hernández-Andrés J. [1997]: *Linear bases for representation of natural and artificial illuminants*, Journal of the Optical Society of America A, **14**, 1007-1014.
- Romero J., García J.A., García-Beltrán A. [1996]: *Curso introductorio a la óptica fisiológica*, Ed. Comares, Granada.
- Sastri V.D.P., Das S.R. [1966]: *Spectral distribution and color of north sky at Delhi*, Journal of the Optical Society of America, **56**, 829-830.
- Sastri V.D.P., Das S. R. [1968]: *Typical spectral distributions and color for tropical daylight*, Journal of the Optical Society of America, **58**, 391-398.
- Sastri V.D.P., Manamohanan S.B. [1971]: *Spectral distribution and colour of north sky at Bombay*, Journal of Physics D: Applied Physics, **4**, 381-386.
- Schanda J., [1999]: *Assessing light source quality*, V Congreso Nacional de Color, Terrassa 1999, Libro de Actas, 3.
- Schanda J., Dányi M. [1977]: *Correlated color temperature calculations in the CIE 1976 UCS Diagram*, Color Research and Application, **2**, 161-163.
- Schanda J., Mészáros M., Czibula G. [1978]: *Calculating correlated color temperature with a desktop programmable calculator*, Color Research and Application, **3**, 65-68.
- Seidelmann P. K. [1992]: *Explanatory supplement to the astronomical almanac*, The Nautical Almanac Office, U.S. Naval Observatory, University Science Books, California.
- Sekine S. [1991]: *Spectral distributions of clear sky light and their chromaticities*, The Illuminating Engineering Institute of Japan, **15**, 23-32.
- Sekine S. [1992]: *Formulas for luminance distribution on the clear sky and for total horizontal illuminance from the clear sky*, The Illuminating Engineering Institute of Japan, **16**, 70-80.
-

- Simonds J.L. [1963]: *Application of characteristic vector analysis to photographic and optical response data*, Journal of the Optical Society of America, **53**, 968-974.
- Slater D., Healey G. [1998]: *Analyzing the spectral dimensionality of outdoor visible and near-infrared illumination functions*, Journal of the Optical Society of America A, **15**, 2913-2920.
- Tarrant A.W.S. [1968]: *The spectral power distribution of daylight*, Trans. Illum. Eng. Soc. (London), **33**, 75-82.
- Thekaekara M.P. [1973]: *Solar energy outside the earth's atmosphere*, Solar Energy, **14**, 109-127.
- Winch G.T., Boshoff M.C., Kok C.J., Du Toit A.G. [1966]: *Spectroradiometric and colorimetric characteristics of daylight in the southern hemisphere: Pretoria, South Africa*, Journal of the Optical Society of America, **56**, 456-464.
- Winter E.M., Metcalf T.W., Stotts L.B. [1995]: *Sky-radiance gradient measurements at narrow bands in the visible*, Applied Optics, **34**, 3681-3685.
- Wyszecki G., Stiles W.S. [1982]: *Color science: Concepts and methods quantitative data and formulae*, Ed. John Wiley & Sons, New York.
- Xingzhong Q. [1987]: *Formulas for computing correlated color temperature*, Color Research and Application. **12**, 285-287.
- Young A.T. [1982], *Rayleigh scattering*, Physics Today, **35**, 42.
- Zibordi G., Voss K.J. [1989]: *Geometrical and spectral distribution of sky radiance: comparison between simulations and field measurements*, Remote Sensing and Environment, **27**, 343-358.

