

LA ESTACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR E ILUMINACIÓN DE ALTA CALIDAD DEL IDMP EN MADRID Y SU APLICACIÓN A LA EDIFICACIÓN

¹González Redondo, M.*; ¹Soler Gómez, S.; ²García García, A.; ²Tremps Guerra, E.;
³Somolinos Sánchez, J.A.; ²Morón Fernández, C.

¹*Dpto. de Física e Instalaciones Aplicadas a la Edificación. E.T.S. Arquitectura.*

²*Dpto. de Tecnología de la Edificación. E.U. Arquitectura Técnica.*

³*Dpto. de Sistemas Oceánicos y Navales. E.T.S. de Ingenieros Navales.*

Universidad Politécnica de Madrid

email: mer.gonzalez@upm.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio de la actividad investigadora que se ha realizado hasta el momento en la estación de radiación solar e iluminación de alta calidad del International Daylight Measurement Program (IDMP) en Madrid ubicada en la E. T. S. de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid (40° 25' N, 3° 41' W).

Esta estación ha centrado su investigación fundamental en dos temas: luminancias y eficacias luminosas de la radiación solar (global, difusa y directa) para todo tipo de cielos, todo ello desde un punto de vista físico, cuyos trabajos y resultados se exponen con detalle.

La finalidad de este estudio es poder aplicar los resultados obtenidos a la Edificación, tanto en edificios ya existentes como de nueva construcción, para obtener un máximo confort visual a partir de la iluminación natural, con el consiguiente ahorro energético.

1. Introducción

Desde 1991 en diferentes estaciones de todo el mundo se miden continuamente iluminancia global y difusa en superficies horizontales, iluminancia global en superficies verticales, iluminancia directa y luminancia cenital, todo ello dentro del proyecto del Internacional Daylight Measurement Program (IDMP) de la Comisión Internacional de la Iluminación con sede en Viena (Austria).

Dicho proyecto dispone actualmente de 48 estaciones especializadas en todo el mundo en medidas de radiación solar e iluminación de alta calidad, lo que le hace ser una buena fuente de información climática para muchos campos de investigación distintos y, en concreto, para diseños en la edificación. Una de ellas es la estación española de Madrid, ubicada en la terraza de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid (40° 25' N, 3° 41' W) que entró en este programa IDMP en el año 1993. Desde entonces en esta estación se han realizado medidas para determinar en los distintos tipos de cielo (despejados, cubiertos y parcialmente cubiertos): Luminancia cenital, Iluminancias global, difusa y directa en una superficie horizontal, Irradiancias global, difusa y directa en una superficie horizontal y en planos inclinados, Eficacia luminosa de radiación solar global, directa y difusa en superficies horizontales y Eficacia luminosa de radiación solar global en superficies verticales, únicamente desde un punto de vista físico.

Tras unos años de inactividad de la estación IDMP en Madrid se ha vuelto a poner en funcionamiento con un doble objetivo:

1º. Utilizar los datos existentes y las nuevas medidas que se realicen para su aplicación a la Edificación.

2º. Realizar proyectos de investigación de análisis de Iluminación Natural en distintos edificios (existentes o de nueva construcción).

Todo ello dentro del plan de eficiencia energética de las instalaciones de iluminación, ateniéndose al nuevo Código Técnico de la Edificación (Libro 10. Documento Básico de Ahorro de Energía -HE- Sección 3).

Las medidas que se han realizado hasta el momento han sido de iluminancias globales y difusas, irradiancias globales y difusas, luminancias y luminancias cenitales, obteniéndose a partir de éstas muchos trabajos y resultados que se exponen a continuación.

2. Eficacias luminosas de radiación solar

La eficacia luminosa de la radiación (K) mide la parte de energía electromagnética que se usa para iluminar y se obtiene dividiendo el flujo luminoso L (iluminancia) por el flujo radiante E (irradiancia).

$$K = \frac{L}{E} \quad (1)$$

La parte experimental ha consistido en tomar medidas durante 5 segundos cada 15 minutos diariamente de iluminancias global (L_g) y difusa (L_d) y de irradiancias global (E_g) y difusa (E_d) en superficies horizontales desde junio de 1994 hasta noviembre de 1995 en función de la altitud solar (α) considerando pequeños intervalos de $2,5^\circ$.

Las iluminancias se han medido con fotómetros Licor 210 calibrados cada seis meses y las irradiancias con piranómetros Kipp-Zonnen CM6B calibrados por el Instituto Nacional de Meteorología después de un año de uso.

Los datos obtenidos se han ido clasificando según el índice de claridad (ε') en tres categorías de cielo, despejados, cubiertos o parcialmente cubiertos, de la siguiente forma:

Despejados: $\varepsilon' > 5$

Parcialmente cubiertos: $1,2 < \varepsilon' < 5$

Cubiertos: $\varepsilon' < 1,2$

A partir de estas medidas se han obtenido modelos empíricos para calcular iluminancias e irradiancias globales y difusas en función de la altitud solar (α) para los distintos tipos de cielo.

2.1. Eficacia luminosa global en superficies horizontales

De las medidas de iluminancias e irradiancias globales para cielos despejados se han obtenido las expresiones siguientes [1] [2] [3]:

$$L_g = 150,07 \cdot 10^3 (\text{sen } \alpha)^{1,301} e^{-0,005\alpha} \quad (\text{lux}) \quad (2)$$

$$E_g = 1159,24 (\text{sen } \alpha)^{1,179} e^{-0,0019\alpha} \quad (\text{W} / \text{m}^2) \quad (3)$$

Utilizando (1) para la eficacia luminosa de la radiación solar global (K_g)

$$K_g = \frac{L_g}{E_g} \quad (4)$$

y las expresiones (2) y (3), se obtiene el modelo para calcular la eficacia luminosa de la radiación solar global en cielos despejados:

$$K_g = 129,46 (\text{sen } \alpha)^{0,122} e^{-0,0029\alpha} \quad (\text{lm/W}) \quad (5)$$

2.2. Eficacia luminosa difusa en superficies horizontales

Los estudios de eficacia luminosa de radiación difusa son menos usuales que los de radiación global pero su cálculo es similar al anterior. Para cielos despejados se considera como única variable la altitud solar (α), y partiendo de las medidas experimentales se obtienen los modelos siguientes para determinar la iluminancia difusa (L_d) y la irradiancia difusa (E_d) en función de α [3] [4] [5]:

$$L_d = 16,48 \cdot 10^3 (\text{sen } \alpha)^{0,578} \quad (\text{lux}) \quad (6)$$

$$E_d = 102,57 (\text{sen } \alpha)^{0,692} \quad (\text{W/m}^2) \quad (7)$$

Y utilizando (1) para la radiación difusa,

$$K_d = \frac{L_d}{E_d} \quad (8)$$

Se obtiene el modelo para determinar la eficacia luminosa de la radiación solar difusa para cielos despejados:

$$K_d = 160,67 (\text{sen } \alpha)^{-0,114} \quad (\text{lm/W}) \quad (9)$$

Para los otros tipos de cielo se introduce una segunda variable independiente, el índice de luminosidad (Δ), obteniendo para el mejor ajuste las expresiones siguientes [4]:

$$L_d = 117,09 \cdot 10^3 (\text{sen } \alpha)^{0,942} \Delta^{0,733} \quad (\text{lux}) \quad (10)$$

$$E_d = 1350,79 (\text{sen } \alpha)^{0,976} \Delta^{0,999} \quad (\text{W/m}^2) \quad (11)$$

A partir de estas expresiones se obtiene el modelo para calcular la eficacia luminosa de la radiación solar difusa para todo tipo de cielos:

$$K_d = \frac{L_d}{E_d} = 86,68 (\text{sen } \alpha)^{-0,034} \Delta^{-0,266} \quad (\text{lm/W}) \quad (12)$$

2.3. Eficacia luminosa directa en superficies horizontales

A partir de las medidas de iluminancias e irradiancias globales y difusas se pueden obtener las iluminancias directas (L_b) y las irradiancias directas (E_b) con las diferencias entre ellas [6].

$$L_b = L_g - L_d \quad (13)$$

$$E_b = E_g - E_d \quad (14)$$

De las medidas de L_b y de E_b , con cielos despejados ($\varepsilon' > 5$), para diferentes ángulos de elevación solar, α , se deducen los modelos para calcular estas magnitudes en función de α [7]:

$$L_b = 161,38 \cdot 10^3 (\text{sen } \alpha)^{1,615} e^{-0,0086\alpha} \quad (\text{lux}) \quad (15)$$

$$E_b = 1201,87 (\text{sen } \alpha)^{1,346} e^{-0,0041\alpha} \quad (\text{W} / \text{m}^2) \quad (16)$$

Las funciones correspondientes a las ecuaciones (15) y (16) se han representado en la Fig. 1 por una línea continua en función de la altitud solar, α , con valores medios calculados para intervalos de $2,5^\circ$ [7].

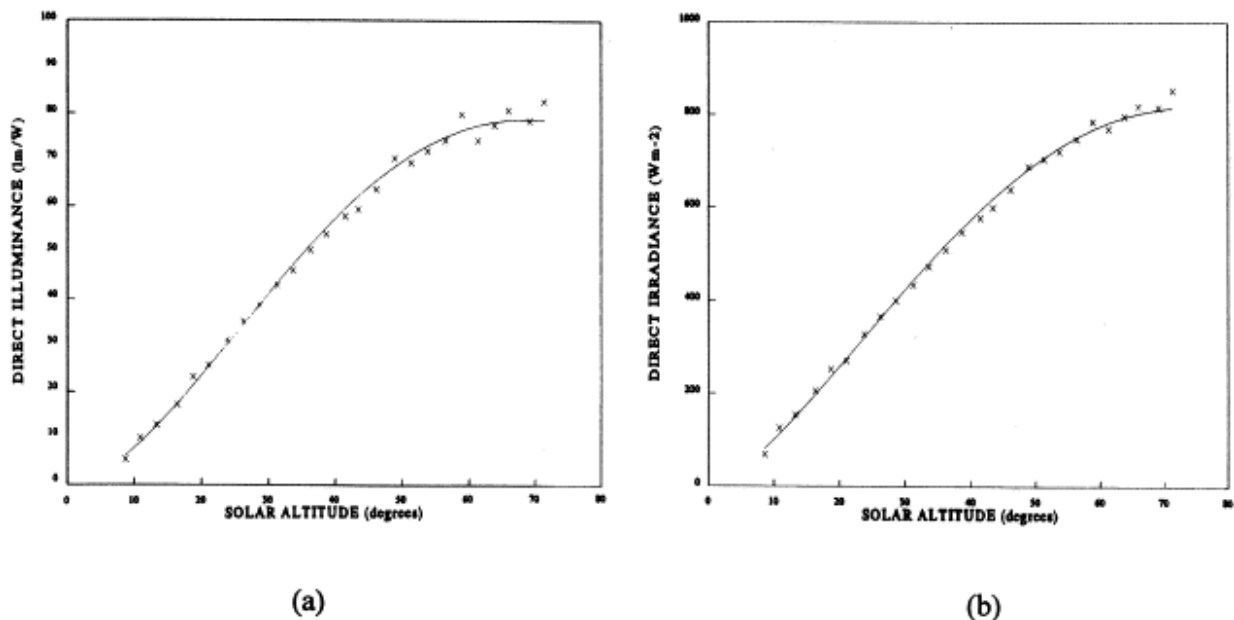


Fig. 1. (a) Iluminancia directa y (b) Irradiancia directa para cielos despejados en función de la altitud solar

Y, a partir de (15) y (16) se obtiene la expresión de la eficacia luminosa directa para cielos despejados:

$$K_b = 134,27 (\text{sen } \alpha)^{0,269} e^{-0,0045\alpha} \quad (\text{lm} / \text{W}) \quad (17)$$

Con todos los datos medios y la ecuación (17) se elabora la gráfica (Fig. 2) que representa la eficacia luminosa de la radiación directa con cielos despejados en función de la altitud solar considerando intervalos de $2,5^\circ$ [7].

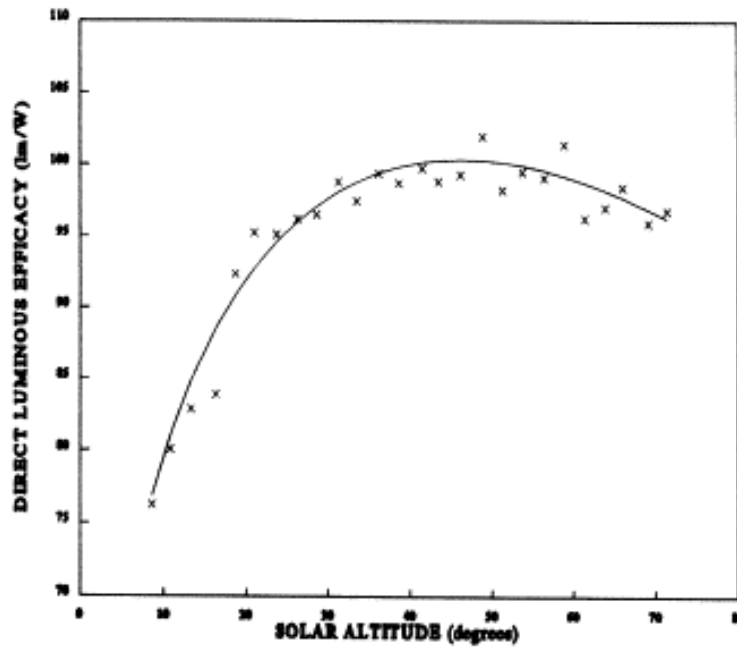


Fig. 2. Eficacia luminosa directa con cielos despejados en función de la altitud solar.

Para otro tipo de cielos [8] la iluminancia y la irradiancia se pueden obtener multiplicando las expresiones anteriores por un factor de atenuación $\varphi(\Delta)$.

$$\varphi_L(\Delta) = 1,101 e^{-12,266\Delta^2} \quad (18)$$

$$\varphi_E(\Delta) = 1,087 e^{-11,053\Delta^2} \quad (19)$$

Los valores obtenidos por las ecuaciones (18) y (19) se han representado en función de Δ , respectivamente, en la Fig. 3 [8].

Una ecuación similar se obtiene para $\varphi_K(\Delta)$:

$$\varphi_K(\Delta) = 1,013 e^{-1,213\Delta^2} \quad (20)$$

Por tanto:

$$K_b = 136,02 (\text{sen } \alpha)^{0,268} e^{-0,0045\alpha - 1,213\Delta^2} \quad (\text{lm/W}) \quad (21)$$

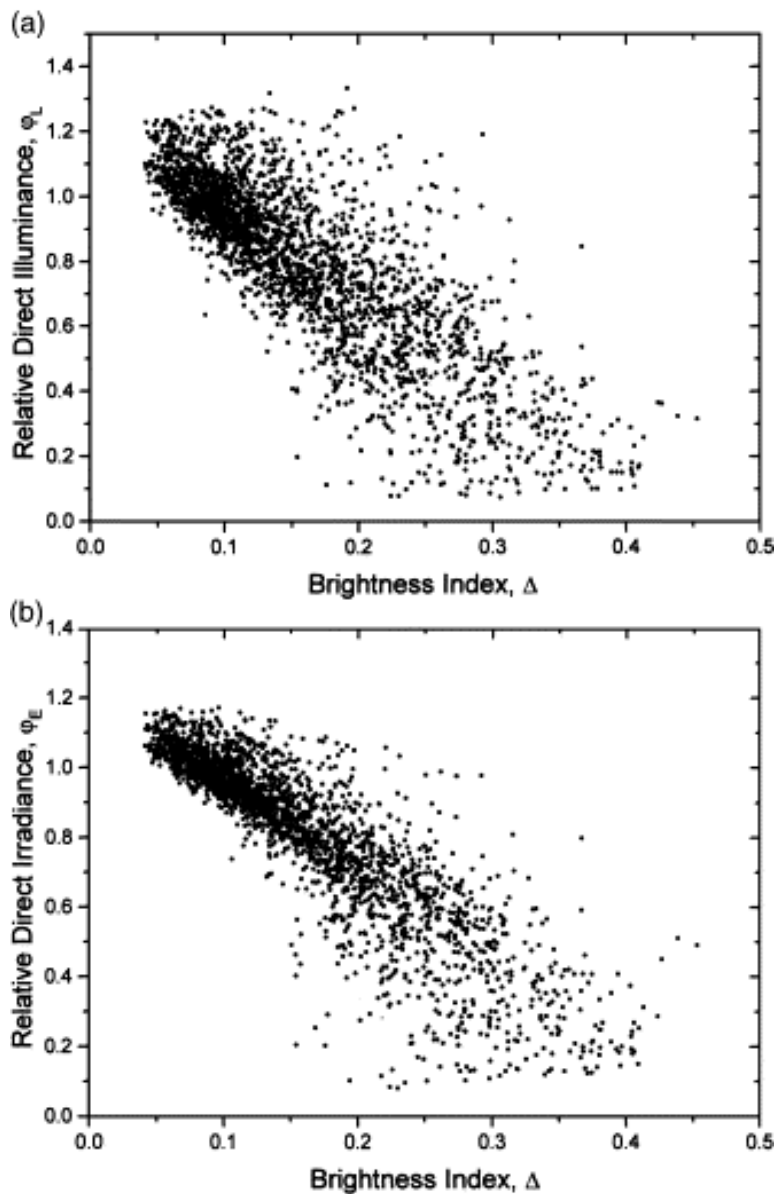


Fig. 3. (a) Iluminancia directa relativa ϕ_L y (b) Irradiancia directa relativa ϕ_E en función el índice de luminosidad, Δ .

3. Luminancias

Durante un año, desde julio de 1997 hasta junio de 1998 se realizaron medidas de luminancias ($L_{z\theta}$) y luminancia cenital (L_z) en Kcd/m^2 , diariamente cada 15 minutos con una duración de 5 segundos [9], utilizando 35 sensores fotométricos Licor 210 con sus correspondientes tubos colimadores negros (Fig. 4) diseñados para un ángulo visual de $10,5^\circ$.

Uno de los sensores fotométricos se colocó en la parte superior para medir las luminancias cenitales y los otros 34 se colocaron en diferentes, de los 145 existentes, agujeros del domo semiesférico de metacrilato transparente colocado sobre una mesa de hierro (Fig. 5) y orientados hacia distintas posiciones (P) de la esfera celeste, que vienen determinadas por los valores de sus ángulos cenital, Z , y acimutal, θ .

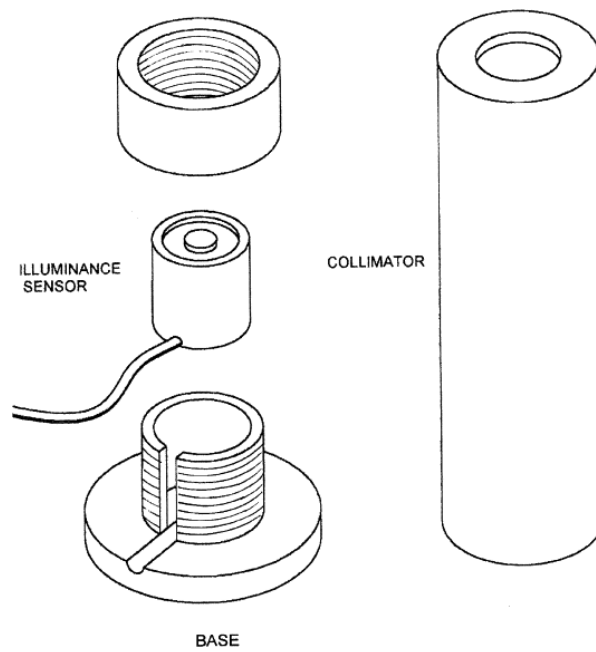


Fig. 4. Tubo colimador que se enrosca en la base alrededor del sensor fotométrico

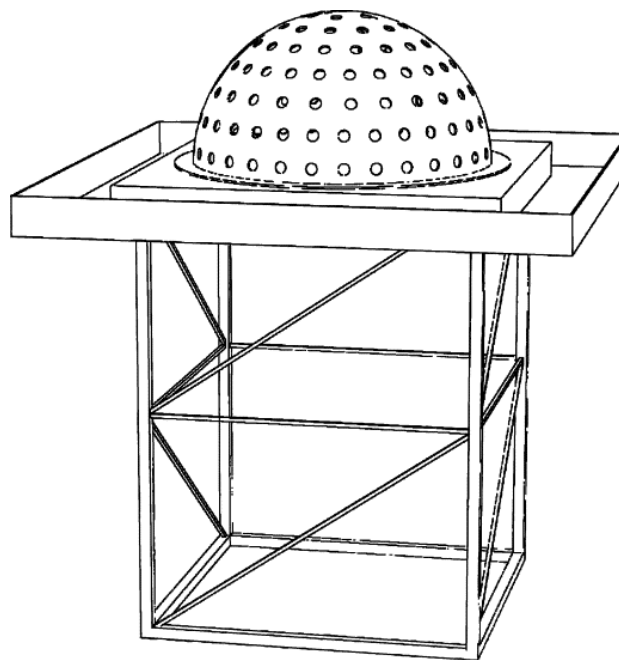


Fig. 5. Domo semiesférico para colocar los fotómetros

El domo celeste se esquematiza en la Fig.6, donde: α es la altitud de P , α_s es la altitud del sol, Z_s es el ángulo solar cenital y θ_s es el ángulo solar acimutal. Se puede observar que sólo es necesario utilizar la mitad del domo, para $0^\circ < \theta < 180^\circ$.

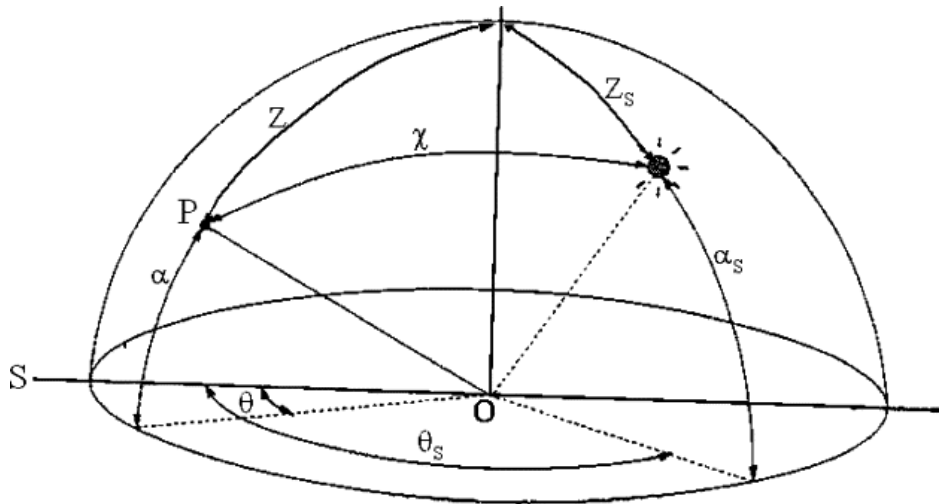


Fig. 6.

Los datos registrados de luminancias cenitales se clasificaron en tres grupos distintos, para cielos despejados, cubiertos y parcialmente cubiertos. A partir de éstos se han elaborado las curvas de nivel de igual luminancia cenital media meses/horas, con las que se obtienen fácilmente los valores aproximados de luminancia cenital media para diferentes condiciones de cielo en distintas horas y meses del año [10], y las gráficas que muestran la dependencia de la L_z con la elevación solar (α) en cielos despejados [11] [12] y cubiertos [13]. También se ha realizado el análisis comparativo de los datos de L_z para todo tipo de cielos [14] y las relaciones entre ellos [15], llegando a la conclusión de que conocida la luminancia cenital media en dos tipos de cielo basta con una relación lineal simple para obtenerla en el tercer tipo de cielo.

A partir de los datos de la luminancia cenital para todo tipo de cielos se han elaborado las gráficas para las distintas estaciones del año que se exponen a continuación (Fig. 7-10) [14]:

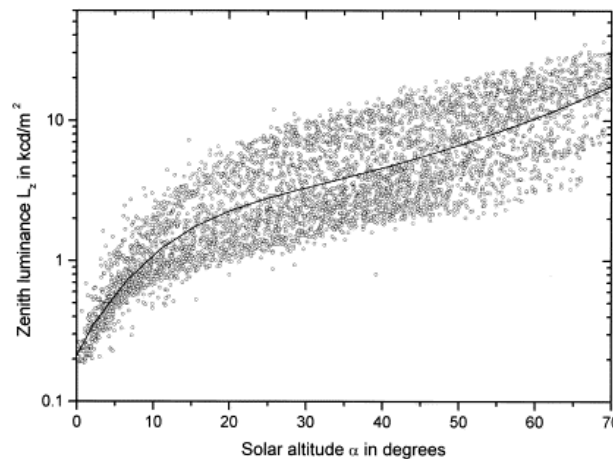


Fig. 7. Valores de L_z y el mejor ajuste polinómico de quinto grado en función de α para Marzo, Abril y Mayo (Primavera)

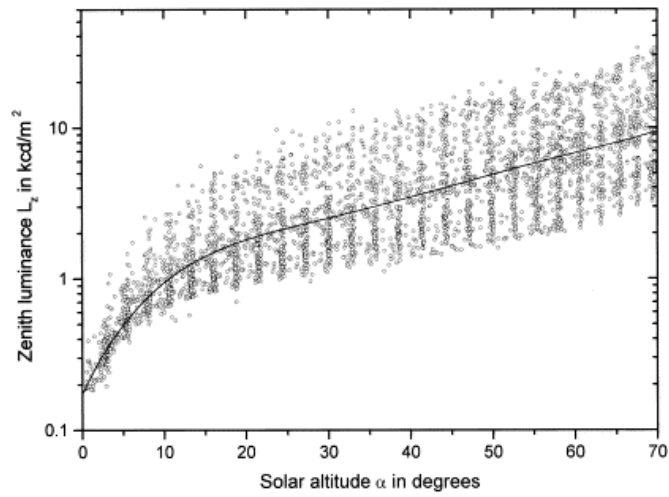


Fig. 8. Valores de L_z y el mejor ajuste polinómico de quinto grado en función de α para Junio, Julio y Agosto (verano).

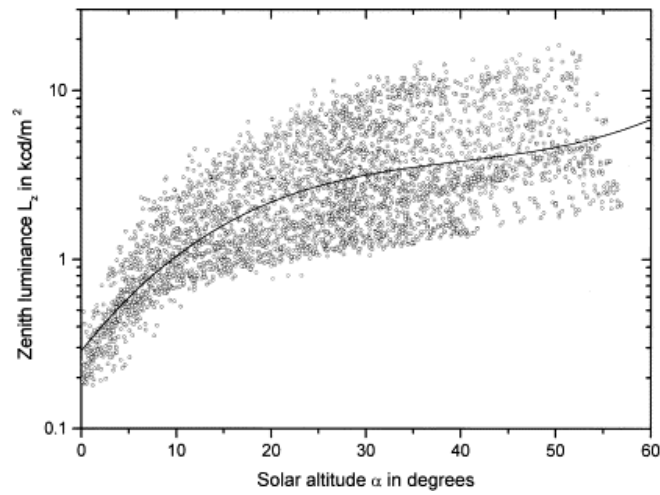


Fig. 9. Valores de L_z y el mejor ajuste polinómico de quinto grado en función de α para Septiembre, Octubre y Noviembre (Otoño).

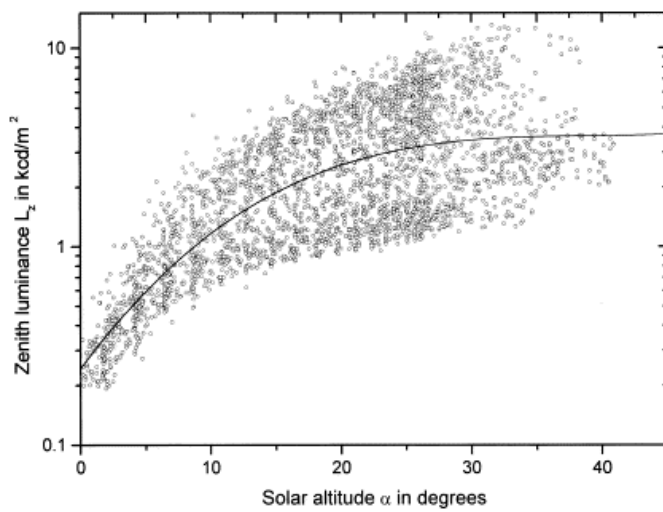


Fig. 10. Valores de L_z y el mejor ajuste polinómico de quinto grado en función de α para Diciembre, Enero y Febrero (Invierno).

Y considerando todas éstas se elabora la gráfica de luminancias cenitales correspondiente a todo el año (Fig. 11) [14].

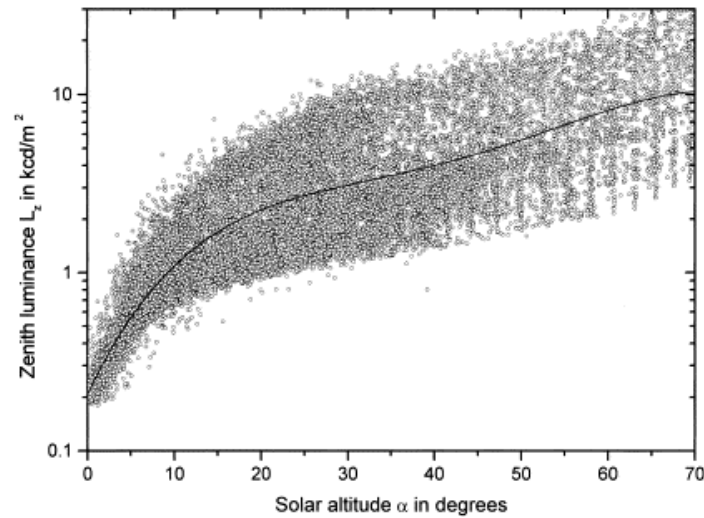


Fig. 11. Valores de L_z y el mejor ajuste polinómico de quinto grado en función de α para todo el año.

A partir de las demás medidas de luminancias se ha propuesto un modelo para la distribución de luminancia media con respecto a la luminancia cenital, $\frac{L_{z\theta}}{L_z}$, teniendo en cuenta los ángulos cenital y acimutal.

$$\frac{L_{z\theta}}{L_z} = \frac{1 + a \exp(b / \cos Z)}{1 + a_{60} \exp(b)} \quad (22)$$

Siendo $a = 0,59072 + 0,93895 \theta$ y $b = 0,57086 + 0,35528 \theta$ (θ en radianes).

4. Conclusión

Se ha realizado un estudio muy completo sobre iluminación en Madrid durante el tiempo que estuvo funcionando la estación española de la IDMP. De ello se han obtenido varios modelos matemáticos para calcular iluminancias, irradiancias y eficiencias luminosas. Gracias a ello actualmente se dispone de mucha información sobre iluminación en Madrid que se puede utilizar para evaluar los sistemas de iluminación, estimar los niveles de iluminancia en recintos con finalidades de diseño y, además, compararla con el software existente.

5. Referencias

[1] L. Robledo y A. Soler, Luminous efficacy of global solar radiation for clear skies. *Energy Conversion & Management*. **41** (2000), 1769–1779.

- [2] A. Soler and L. Robledo, Global luminous efficacy on vertical surfaces for all sky types. *Renew. Energy* **19** (2000), 61–64.
- [3] A. Soler, The dependence on solar elevation of the correlation between monthly average hourly diffuse and global radiation. *Solar Energy* **41** (1988), 335–340.
- [4] L. Robledo y A. Soler, On the luminous efficacy of diffuse solar radiation. *Energy Conversion & Management*. **42** (2001), 1181–1190.
- [5] 38. A. Soler, Dependence on solar elevation and the daily sunshine fraction of the correlation between monthly average hourly diffuse and global radiation. *Solar Energy* **48** (1992), 221–225.
- [6] L. Robledo and A. Soler, Estimation of direct illuminance on a horizontal surface for clear and intermediate skies. *Renew. Energy* **19** (2000), 55–60.
- [7] L. Robledo y A. Soler, Luminous efficacy of direct solar radiation for clear skies. *Energy* **25** (2000), 689–701.
- [8] L. Robledo y A. Soler, Luminous efficacy of direct solar radiation for all sky types. *Energy* **26** (2001), 669–677.
- [9] A. Soler y L. Robledo. Investigation of the overcast skies luminance distribution using 35 sensors fixed on a dome. *Energy Conversion & Management*. **46** (2005), 2739-2747.
- [10] Soler A, Gopinathan KK, Robledo L, Ruiz E. Month–hour distributions of zenith luminance and diffuse illuminance in Madrid. *Energy Conversion & Management* **45** (2004) 1141-1152.
- [11] A. Soler y K.K. Gopinathan. A study of zenith luminance on Madrid cloudless skies. *Sol. Energy* **69** (2000), 403–411.
- [12] A. Soler and K.K. Gopinathan, Modeling zenith luminance on Madrid cloudless skies from illuminance on a horizontal surface. *Energy Conversion Management*. **43** (2002), 2145–2155.
- [13] A. Soler, K.K. Gopinathan and S. Claros, A study of zenith luminance on Madrid overcast skies. *Renew. Energ.* **23** (2001), 49–55.
- [14] A. Soler y K.K. Gopinathan. Analysis of zenith luminance data for all sky conditions. *Renew. Energ.* **24** (2001), 185–196.
- [15] A. Soler y K.K. Gopinathan. Relation between luminances for cloudless, partly cloudy and overcast skies at Madrid. *Energy Conversion Management*. **45** (2004), 2583-2590.