

EFICACIA LUMINOSA EN MENDOZA

Ernesto Betman¹

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda – Instituto Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (LAHV INCIHUSA)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas – CRICYT C.C. 131 C.P. 5500 – Mendoza
Tel. 0261-4288797-Fax 0261-4287370 email: ebetman@lab.cricyt.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de mediciones de eficacia luminosa realizadas en Mendoza durante el período abril 2000 – marzo 2001. Los datos fueron analizados para distintos tipos de cielo y se utilizaron para validar en Mendoza los modelos de Perez. Los resultados de los modelos fueron comparados con los datos obtenidos. Los valores de los estadísticos de diferencia y dispersión así como la similitud de tendencias, indican que los modelos son aptos para aplicaciones en iluminación natural en la región. Como aplicación de los modelos se presenta el cálculo de las tres componentes de iluminancia exterior horizontal y se los compara con los valores medidos.

Palabras clave: Eficacia luminosa, modelos de Perez.

INTRODUCCION.

En los últimos años se ha incrementado el interés en la iluminación natural como una estrategia en el ahorro de energía para el diseño de edificios energéticamente eficientes. En Mendoza la iluminación natural es relativamente alta durante todo el año y el potencial para utilizarla en el interior de edificios es grande. Sin embargo, en Mendoza, al igual que en muchos lugares del mundo, los datos básicos de iluminación natural no están disponibles y son el punto de partida para desarrollar cualquier método de predicción que permita conocer las características del recurso.

La eficacia luminosa es la principal variable que se requiere conocer para hacer predicciones de iluminación natural (Littlefair 1985 y 1988, Dumortier 1997). La eficacia luminosa se define como el cociente entre iluminancia e irradiancia y se expresa en lumens por vatio. Su valor depende de la altitud del sol, de la nubosidad y de la concentración de aerosoles y vapor de agua en la atmósfera. Como la eficacia luminosa relaciona iluminancia con irradiancia, permite estimar valores de iluminancia a partir de datos de irradiancia. La manera de hacerlo es utilizando las mediciones de irradiancia y convertirlas al dominio visible utilizando modelos de eficacia luminosa.

De los modelos de predicción de eficacia luminosa, el que más extensamente ha sido validado es el desarrollado en el Atmospheric Sciences Research Center de la State University of New York (Perez et al., 1990). La expresión y los coeficientes de este modelo fueron obtenidos con datos tomados en trece sitios de características climáticas muy variadas: árido, continental y marítimo, de aquí que el modelo puede adaptarse, al menos en principio, a todos los climas.

Para conocer las características de la eficacia luminosa en Mendoza y para estudiar la posible aplicación del modelo de Perez es necesario determinar la eficacia luminosa en forma experimental. Para ello es necesario medir simultáneamente iluminancia e irradiancia en un plano determinado, en nuestro caso el horizontal, y luego obtener su cociente.

OBTENCION DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Las mediciones se tomaron con un sistema automático basado en un microcontrolador MC68HC11 y provisto de cuatro sensores. Cada sensor está conectado a un amplificador de instrumentación y sus características se presentan en la Tabla 1

Medición	Tipo de sensor	Marca y modelo	Corrección de coseno	Coef. de error por temperatura	Banda de sombra
Irradiancia global	Piranómetro	Weathertronics 3020	Hasta 70°	0.025%/°C (típico)	No
Irradiancia difusa	Piranómetro	Weathertronics 3020	Hasta 70°	0.025%/°C (típico)	Si
Iluminancia global	Fotómetro	Li-cor LI-210SA	Hasta 80°	0.15%/°C (máximo)	No
Iluminancia difusa	Fotómetro	Li-cor LI-210SA	Hasta 80°	0.15%/°C (máximo)	Si

Tabla 1: Características de los sensores

¹ Profesional Principal CONICET

Las mediciones son tomadas cada minuto e inmediatamente son almacenadas en una computadora personal a través del puerto serie. El aparato fue instalado sobre el techo del edificio de dos pisos del CRICYT en Mendoza (32.53 S y 68.51 O). El sitio está libre de obstrucciones que afecten la calidad de los datos.

En este tipo de mediciones pueden aparecer errores de tipo experimental por condensación, suciedad, corrección de coseno, corrimientos en la respuesta de los sensores por cambios de temperatura, etc. Littlefair ha estimado estos errores experimentales (Littlefair 1985 y 1988) y su trabajo se resume en la Tabla 2.

Tipo de medición	RMSE estimado		
	Iluminancia	Radiación	Eficacia luminosa
Horizontal global	4%	6%	7%
Horizontal difusa	6%	7%	8%
Horizontal directa	12%	15%	20%

Tabla 2: Estimación de los errores experimentales.

Cuando hay cambios bruscos en las condiciones de medición (generalmente en los cielos parcialmente nublados), pueden aparecer errores debido a la mayor velocidad de respuesta que tienen los sensores de iluminancia respecto de los de irradiancia. Para compensar este problema se tomó como dato horario al del promedio de once mediciones tomadas con intervalo de un minuto y centradas a la hora en punto.

Las mediciones de irradiancia difusa e iluminancia difusa se tomaron con banda de sombra. Debido a que estas bandas de sombra ocultan al sensor parte del cielo se aplicaron coeficientes de corrección de acuerdo a lo estudiado por LeBaron (LeBaron et al., 1990).

Todos los datos fueron chequeados de acuerdo a los controles de calidad establecidos por la CIE (Tregenza et al., 1994). Los datos que no cumplieron las especificaciones fueron descartados.

Iluminancia e irradiancia directa son necesarias para calcular la eficacia luminosa directa y fueron calculadas a partir de las mediciones de irradiancia e iluminancia global y difusa.

Para tener una estimación de la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera, se calculó el coeficiente de turbidez de Ångström β utilizando el método desarrollado por Louche (Louche, 1987). La estimación de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera se estimó calculando la altura de agua precipitable. Para este cálculo se aplicó el desarrollo de Leckner (Leckner, 1987). Los datos de humedad relativa y temperatura ambiente fueron aportados por la estación meteorológica del CRICYT, ubicada a 500m. de nuestros instrumentos.

MODELOS DE PREDICCIÓN DE PEREZ PARA EFICACIA LUMINOSA

Los modelos de Perez relacionan las mediciones experimentales de irradiancia con eficacia luminosa directa, difusa y global. Sus expresiones son las siguientes:

$$Effs = a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \exp(5.73 * Z - 5) + d(\epsilon) * \Delta ; \quad \text{(Eficacia luminosa directa)} \quad (1)$$

$$Effd = a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \cos(Z) + d(\epsilon) * \log(\Delta) ; \quad \text{(Eficacia luminosa difusa)} \quad (2)$$

$$Effg = a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \cos(Z) + d(\epsilon) * \log(\Delta) . \quad \text{(Eficacia luminosa global)} \quad (3)$$

Los datos de entrada a los modelos consisten en mediciones de irradiancia directa y global, así como temperatura ambiente y humedad relativa. Estas entradas se procesan para obtener las cuatro variables de los modelos y que caracterizan a todas las condiciones posibles de cielo, desde nublado a claro. Estas variables son:

- 1- Z : Es el ángulo cenital solar y está dado en radianes.
- 2- ϵ : Es la variable que describe la claridad del cielo y cubre todas las posibilidades que comprenden desde un cielo completamente nublado a un cielo claro de baja turbidez. ϵ esta dada por:

$$\epsilon = \frac{\frac{Eesn}{Eed} + 1 + 1.041 * Z^3}{1 + 1.041 * Z^3} , \quad (4)$$

donde:

Eed= Irradiancia difusa horizontal (W/m²).

Eesn= Irradiancia directa normal (W/m²).

La claridad del cielo se divide en ocho categorías discretas que se utilizan para definir los coeficientes de las otras variables Tabla 3.

3 - La variable Δ o brillo del cielo es la que describe la opacidad y el grosor de las nubes. Está dada por la relación:

$$\Delta = \frac{Eed * m}{Eesno} \quad (5)$$

Eed= irradiancia difusa horizontal (W/m²).

Eesno=irradiancia directa normal extraterrestre (W/m²).

m = masa óptica relativa del aire. Para calcular m hemos utilizado el desarrollo de Kasten (Kasten, 1989)

4 – La variable **w** (cm) es la altura de agua precipitable y da una estimación de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera.

RESULTADOS

EFICACIA LUMINOSA DIRECTA

La Figura 1 muestra las variaciones de la eficacia luminosa directa (Effs) respecto a la altitud del sol. La difusión que producen las moléculas de aire y las partículas de aerosol, disminuyen la radiación en el espectro visible. Esta reducción se hace mayor a medida que el camino recorrido crece; es por esto que para bajas alturas solares Effs disminuye. Superpuestas a los valores medidos, se muestran cálculos del modelo de Perez (1) para cuatro valores de claridad de cielo con su brillo característico. Se observa una similitud de tendencias entre el modelo y las mediciones.

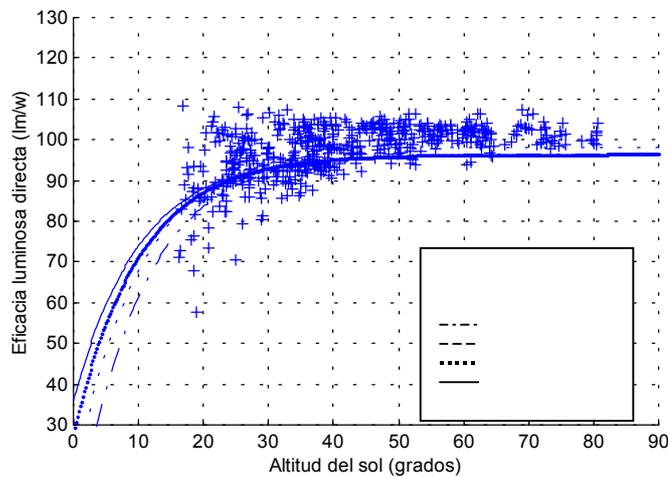


Figura 1. Variaciones de la eficacia luminosa directa con la altitud del sol y resultados modelo de Perez

Si se comparan los datos obtenidos en Mendoza con la reseña publicada por Littlefair (Littlefair,1985) y que presenta mediciones de eficacia luminosa realizadas en once países, es interesante notar que si bien el clima de Mendoza es seco y presenta una importante cantidad de aerosoles en la atmósfera (β medio estimado =1.6), los valores de Effs que se registraron en Mendoza no son inferiores al promedio de las mediciones presentadas en dicha publicación.

MODELO DE EFICACIA LUMINOSA DIRECTA

La Tabla 3 muestra los coeficientes que Perez calculó para los modelos de eficacia luminosa

ε	Eficacia luminosa directa				Eficacia luminosa difusa				Eficacia luminosa global			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	B	c	d
1	57.20	-4.55	-2.98	117.12	97.24	-0.46	12.00	-8.91	96.63	-0.47	11.5	-9.16
2	98.99	-3.46	-1.21	12.38	107.22	1.15	0.59	-3.95	107.54	0.79	1.79	-1.19
3	109.83	-4.90	-1.71	-8.81	104.97	2.96	-5.53	-8.77	98.73	0.70	4.40	-6.95
4	110.34	-5.84	-1.99	-4.56	102.39	5.59	-13.95	-13.90	92.72	0.56	8.36	-8.31
5	106.36	-3.97	-1.75	-6.16	100.71	5.94	-22.75	-23.74	86.73	0.98	7.10	-10.94
6	107.19	-1.25	-1.51	-26.73	106.42	3.83	-36.15	-28.83	88.34	1.39	6.06	-7.60
7	105.75	0.77	-1.26	-34.44	141.88	1.90	-53.24	-14.03	78.63	1.47	4.93	-11.37
8	101.18	1.58	-1.10	-8.29	152.23	0.35	-45.27	-7.98	99.65	1.86	-4.46	-3.15

Tabla 2: Coeficientes de los modelos de eficacia luminosa de Perez.

Con estos coeficientes y la expresión (1) se calcularon las predicciones del modelo de Perez de eficacia luminosa directa y se las comparó con los datos obtenidos en Mendoza en la Tabla 4. La Effs para cielo cubierto no tiene mucho significado (Perez et al. , 1990).

	CIELO CLARO		CIELO INTERMEDIO	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE
Coefficientes de Perez	-5.28%	6%	-12.6%	19.4%
Coefficientes propios	0.6%	2.5%	1.1%	11.5%

Tabla4: Resultados de la comparación del modelo de Eff_s de Perez con los datos obtenidos en Mendoza.

El modelo subestima la eficacia luminosa medida. Este defecto se hace mayor en los cielos intermedios. Haciendo una comparación con la validación del modelo realizada en Nueva Zelanda (Pohlen et al., 1996), vemos que en Mendoza el modelo entregó mejores resultados para cielo claro y estimaciones similares para cielo intermedio. Con los datos obtenidos se calcularon coeficientes propios. Surge una mejora interesante para cielos intermedios. Esta mejora pierde un poco de importancia si la comparamos con el error que introducen los instrumentos (Tabla 2). Además habría que validar estos coeficientes propios con futuras mediciones en Mendoza.

EFICACIA LUMINOSA DIFUSA

La Figura 2 muestra las variaciones de la eficacia luminosa difusa (Eff_d) con respecto a la altitud del sol. Se representan dos condiciones extremas: cielo claro y cielo cubierto. Para cielo claro Eff_d crece para bajas alturas solares debido a que la radiación solar debe recorrer un camino más largo y entonces se incrementan los fenómenos de difusión que producen moléculas de aire y las partículas de aerosol. Para cielo nublado, la Eff_d decrece con la altura solar siguiendo una tendencia similar a la Eff_s que se encuentra encima de la capa de nubes, pero se presenta una importante dispersión de valores que se debe al incremento de la Eff_d que produce el incremento de la absorción infrarroja en las nubes. Los valores medidos y las tendencias que muestra la figura 5, no difieren mucho a lo medido por Dumortier en Vaux en Velin en Francia en 1994 (Dumortier, 1997). La dispersión en los valores medidos es mayor en Mendoza. En cada gráfico se superponen los cálculos del modelo de Perez para valores de brillo y claridad típicas de los cielos que se representan. Hay similitud de tendencias entre las mediciones y el modelo.

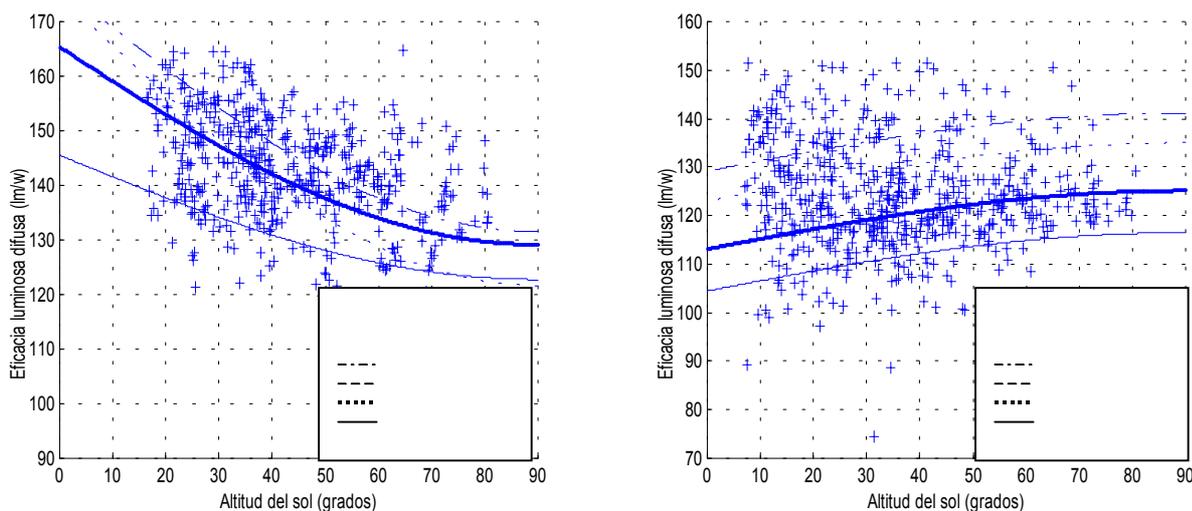


Figura 2: Variaciones de la eficacia luminosa difusa con la altitud del sol para cielo claro (izquierda) y cielo cubierto (derecha). Resultados del modelo de Perez

MODELO DE EFICACIA LUMINOSA DIFUSA

Los resultados de las comparaciones entre el modelo y las mediciones de Eff_d se muestran en la Tabla 5

	CIELO CLARO		CIELO INTERMEDIO		CIELO CUBIERTO	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
Coefficientes de Perez	3.1%	7.2%	12.2%	15.3%	2.4%	11.2%
Coefficientes propios	0.35%	5.9%	0.6%	7.9%	0.7%	10.5%

Tabla 5: Resultados de la comparación del modelo de Eff_d de Perez con los datos obtenidos en Mendoza

El modelo sobrestima la Eff_d, sin embargo para cielo claro y cubierto la diferencia es cercana a la estimación del error que introducen los instrumentos. Para cielo intermedio la diferencia entre el modelo y las mediciones crece, pero no a valores que impidan su aplicación. Comparando con la validación realizada en Nueva Zelanda (Pohlen et al., 1996), los estadísticos de error y dispersión están muy próximos, aunque en Nueva Zelanda el modelo tiende a subestimar la Eff_d. Calculando coeficientes propios se observa nuevamente una mejora importante para todos los tipos de cielo.

EFICACIA LUMINOSA GLOBAL

La Figura 3 muestra las variaciones de la eficacia luminosa global (Effg) con respecto a la altitud del sol para cielo claro y cielo cubierto. La figura también muestra los resultados del modelo de Perez.

Las mediciones tomadas para cielo cubierto presentan un comportamiento muy similar a la figura 5, las pequeñas diferencias se deben principalmente al uso de la banda de sombra. Para cielo claro y alturas mayores de 40 grados, Effg es aproximadamente constante. Para alturas menores sigue una tendencia muy similar a la eficacia luminosa directa.

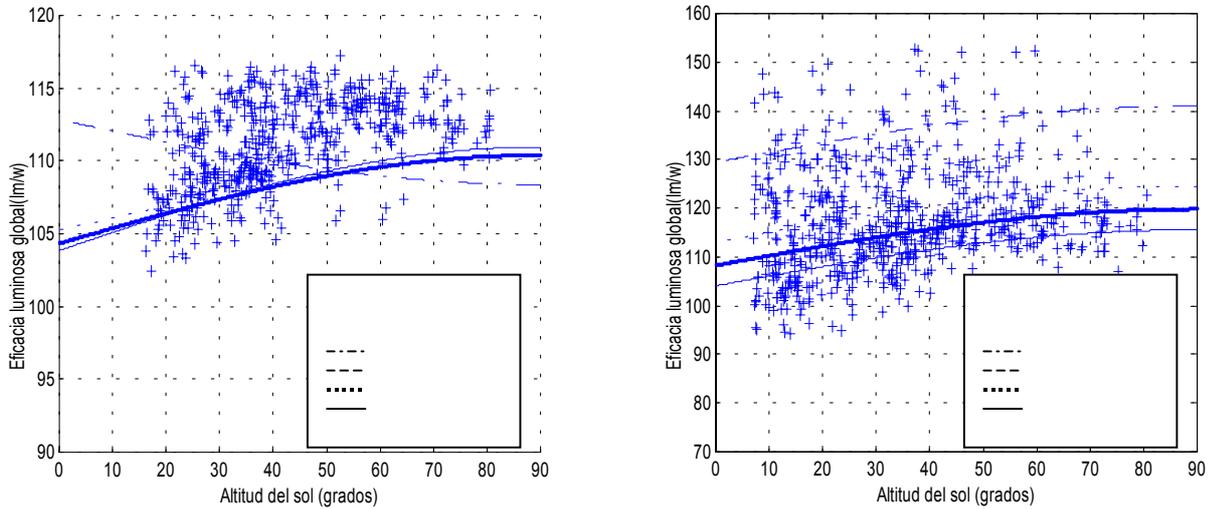


Figura 3: Variaciones de la eficacia luminosa global con la altitud del sol para cielo claro (izquierda) y cielo cubierto (derecha). Cálculos del modelo de Perez

MODELO DE EFICACIA LUMINOSA GLOBAL

Las comparaciones entre los resultados del modelo de Perez y las mediciones se muestran en la Tabla 6.

	CIELO CLARO		CIELO INTERMEDIO		CIELO CUBIERTO	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
Coefficientes de Perez	-7.3%	7.5%	-6.9%	8.2%	8.5%	11.7%
Coefficientes propios	0.12%	1.7%	0.18%	4.25%	0.3%	5.4%

Tabla 6: Resultados de la comparación del modelo de Effg de Perez con los datos obtenidos en Mendoza.

El cálculo de Effg es la mejor respuesta de los modelos. Probablemente la causa sea que en la determinación experimental de la Effg no intervienen mediciones realizadas con banda de sombra y entonces no sea necesario aplicar coeficientes de corrección que no han sido calculados para las condiciones atmosféricas de Mendoza.

CALCULO DE ILUMINANCIA EXTERIOR HORIZONTAL APLICANDO EL MODELO DE PEREZ

Las distintas componentes de iluminancia exterior horizontal se calculan multiplicando cada modelo de eficacia luminosa de Perez por su correspondiente medición de irradiancia:

$$Evs = Ees * [a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \exp(5.73 * Z - 5) + d(\epsilon) * \Delta] ; \text{ Iluminancia directa horizontal (6)}$$

$$Evd = Eed * [a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \cos(Z) + d(\epsilon) * \log(\Delta)] ; \text{ Iluminancia difusa horizontal (7)}$$

$$Evg = Eeg * [a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \cos(Z) + d(\epsilon) * \log(\Delta)] . \text{ Iluminancia global horizontal (8)}$$

La Figura 4 compara los valores de iluminancia calculados con los medidos.

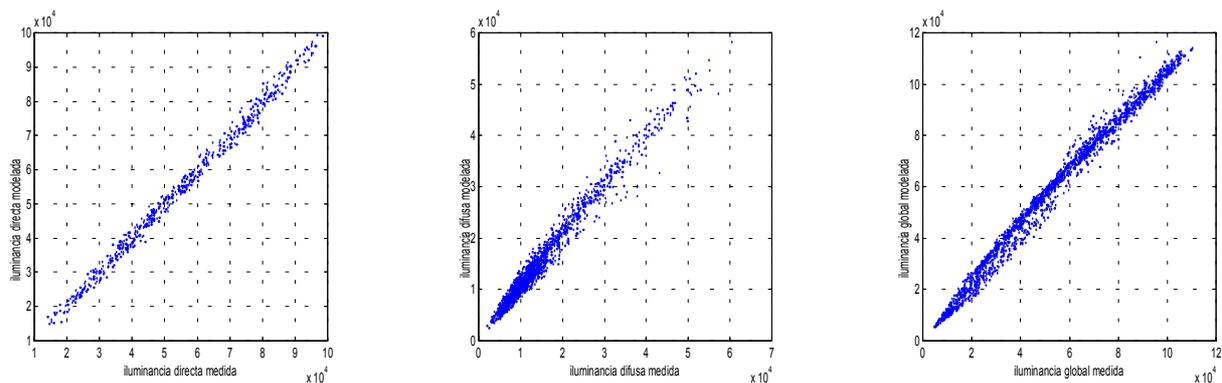


Figura 4: Componentes de iluminancia exterior horizontal calculadas con los modelos de Perez vs. mediciones

CONCLUSIONES

Los resultados de las mediciones experimentales de eficacia luminosa en Mendoza proveen una importante información acerca de las características del clima luminoso de la región. Se han confirmado magnitudes y tendencias encontradas en trabajos llevados a cabo en otras latitudes, aunque en Mendoza se registró mayor dispersión en las mediciones para cielo cubierto. La obtención de datos continuará para confirmar estos resultados y para concluir estudios iniciados acerca del comportamiento de la eficacia luminosa con la turbidez y la concentración de vapor de agua en la atmósfera.

Las predicciones de los modelos de Perez han seguido las tendencias de las mediciones y los estadísticos de diferencia y de dispersión han dado en algunos casos valores comparables al error que introducen las mediciones y en otros valores similares a la validación realizada en Nueva Zelanda. Estos resultados sugieren que el modelo es apto para su aplicación en iluminación natural en Mendoza. La inclusión de coeficientes propios produce una mejora en la adecuación del modelo a las mediciones. No obstante, antes de adoptar estos coeficientes sería necesario validarlos con futuras mediciones en Mendoza.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Dr. Richard Branham por la orientación y las valiosas sugerencias recibidas para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Pattini A, Betman, E. (1998) Estudios preliminares para evaluar la iluminación natural exterior en Mendoza. Mediciones y modelizaciones. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 2,1,3.67-3.69
- Dumortier D. (1997). Evaluation of luminous efficacy models according to sky types and atmospheric conditions. Lux Europa Conference.
- LeBaron B., Michalsky J., y Perez R. (1990). A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. Solar Energy 44,5,249-256.
- Leckner B. (1987). The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface. Solar Energy 20,2,143-150.
- Littlefair P. (1985). The luminous efficacy of daylight: a review. Lighting Research and Technology 17,4,162-182.
- Littlefair P. (1988). Measurements of the luminous efficacy of daylight. Lighting Research and Technology 20,4, 177-188
- Louche A. (1987). Determination of Angström's turbidity coefficient from direct total solar irradiance measurements. Solar Energy 32,2,89-96.
- Kasten F. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. Applied optics 28,4735-4738.
- Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J. y Stewart R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy 44,5,271-289.
- Pohlen S., Ruck B. y Bittar A. (1996). Evaluation of the Perez luminous efficacy models for a southern hemisphere site (New Zealand -41°S, 175°E). Solar Energy 57,4,307-316.
- Tregenza P. et al. (1994). Guide to recommended practice of daylight measurement. CIE 108-1994.

ABSTRACT

This paper presents the results of luminous efficacy measurements made in Mendoza during the period April 2000 – March 2001. The data are analysed for different sky conditions and are used to validate in Mendoza the Perez luminous efficacy models. Data and models were compared. The trends are predicted well and statistics of the differences and variances make the models useful for daylighting applications at the site. The three components of horizontal illuminance were calculated using the model and comparisons with data are shown.

Keywords: luminous efficacy, Perez models.