



## CONSTRUCCION Y VALIDACION DE UN PROTOTIPO DE CIELO ARTIFICIAL TIPO CAJA DE ESPEJOS PARA EL CIAL – FAUD - UNC

A. Maristany<sup>1</sup>, S. Barra<sup>2</sup>, P. Bobatto<sup>3</sup>, S. Bonafé<sup>3</sup>, C. Nicasio<sup>3</sup>, M. Pardina<sup>4</sup>, M. Cravero<sup>4</sup>  
Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas (CIAL)  
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño- Universidad Nacional de Córdoba  
Ciudad Universitaria – CP 5000 – Córdoba  
Tel. 0351 4333037 – email: [cial@faudi.unc.edu.ar](mailto:cial@faudi.unc.edu.ar)

**RESUMEN:** En la presente ponencia se presenta la descripción del dispositivo construido en el CIAL-FAUD-UNC para la simulación del cielo CIE cubierto y la verificación de la iluminación en maqueta. El cielo artificial construido corresponde al tipo caja de espejos “mirror box”. El modelo fue adoptado en función de su adecuación a las condiciones de trabajo, la disponibilidad funcional y sobre todo en base a la gran cantidad de experiencia acumulada en el uso de este modelo, tanto en laboratorios nacionales como extranjeros, que surge de la bibliografía analizada. Se presenta también el equipamiento alternativo desarrollado para la medición de los datos de iluminación acorde a la escala de las maquetas. El simulador construido permite su uso para aplicaciones de tipo didácticas, con suficiente versatilidad y facilidad de funcionamiento, y para el desarrollo de proyectos específicos tanto de investigación como de aplicación práctica.

**Palabras clave:** iluminación natural, simulación, cielo artificial

### INTRODUCCIÓN

El cielo artificial es un dispositivo destinado a simular condiciones de cielo con el objetivo de evaluar la iluminación natural en maquetas. Existen internacionalmente numerosos modelos de cielo artificial de diversas complejidades según sean las condiciones de cielo a simular y el procedimiento de simulación.

Los países europeos han dado fundamental importancia al problema de la iluminación natural y su relación con la iluminación artificial y el confort visual como uno de los recursos básicos en los programas de conservación de la energía, aprovechamiento de recursos naturales y calidad del confort visual. El Belgian Building Research Institute es un ejemplo de los muchos laboratorios europeos que cuentan con equipamiento adecuado y avanzado para el desarrollo de investigaciones específicas en el campo de la iluminación natural, entre otros dispositivos dos cielos artificiales para evaluación en maquetas con distintas técnicas de simulación (Bodart et al., 2006). Otro caso es el Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB) del Swiss Federal Institute of Technology en Lausanne, Suiza, en donde se desarrolló un innovador sistema de simulación en maqueta que integra la técnica del cielo artificial con sistemas informáticos para la integración de datos, con lo cual se logran márgenes muy pequeños de error entre la simulación y la situación real en una localización determinada. En nuestro país estudios realizados en iluminación natural por diversos equipos de investigación destacan la importancia del estudio de la iluminación natural en nuestro medio y especialmente la aplicación de las técnicas de simulación en maqueta como herramienta de análisis.

Entre los sistemas menos complejos de cielos artificiales se pueden mencionar básicamente dos tipos: en forma de domo difusor y los caja de espejos o “mirror box”, destinados a simular el cielo tipo CIE cubierto. De este último tipo disponemos de antecedentes construidos en nuestro país como el de la FADU-UBA (Evans, 1997, 1998) o el del CEEMA-UNT (Gonzalo, 2000). A partir de estas consideraciones y de las posibilidades técnicas se decidió la construcción de un cielo tipo caja de espejos.

Los objetivos principales de este proyecto fueron: Rescatar la capacidad de verificación tridimensional de la maqueta de estudio a partir del diseño y construir un prototipo de simulador de cielo con aplicación general en los proyectos con maqueta en la FAUD. El cielo artificial construido es complementario al simulador de trayectoria solar desarrollado anteriormente.

El trabajo desarrollado se estructuró en base a las siguientes etapas metodológicas:

- Recopilación de antecedentes de distintos dispositivos existentes.
- Evaluación en función del espacio disponible.
- Evaluación y adecuación de sistemas de iluminación.
- Desarrollo de proyecto general.
- Construcción, calibración, evaluación y ajuste.
- Formulación de recomendaciones para la construcción de maquetas en orden a ser utilizadas dentro del simulador.

---

<sup>1</sup> Director CIAL-FAUD-UNC

<sup>2</sup> Profesora Titular FAUD-UNC

<sup>3</sup> Profesores Asistentes FAUD-UNC

<sup>4</sup> Profesores Adjuntos FAUD-UNC

Del análisis bibliográfico se desprende también la importancia que tiene la maqueta de trabajo como herramienta de diseño y evaluación, reflejado en la cantidad y calidad de dispositivos de simulación desarrollados en universidades de todo el mundo. Esta ampliamente comprobado que durante el proyecto la maqueta es el banco de pruebas de soluciones proyectuales, con verificación tridimensional inmediata. En el caso de la evaluación de la luz natural con maquetas se destaca la adecuación directa de escala entre la realidad y el modelo, la capacidad de reproducir de manera simple e directa soluciones edilicias complejas, permitiendo predecir los resultados, cuidando ciertas recomendaciones en la construcción del modelo, con un margen de error de aproximadamente 2% (Pattini, 2005).

### PROPUESTA DIMENSIONAL Y CONSTRUCTIVA DEL SIMULADOR

El dispositivo construido está contenido en una caja estructural de madera de 2,45 m x 2,45 m y 2,60 m de altura útil disponible. La caja alberga un volumen cuadrado con las cuatro caras laterales espejadas y cielorraso luminoso difusor. La mesa de trabajo se encuentra a 0,80 m del piso y con una altura útil, hasta el plano difusor de 1,60 m. En las figuras 1 y 2 se muestra corte y planta esquemáticos.

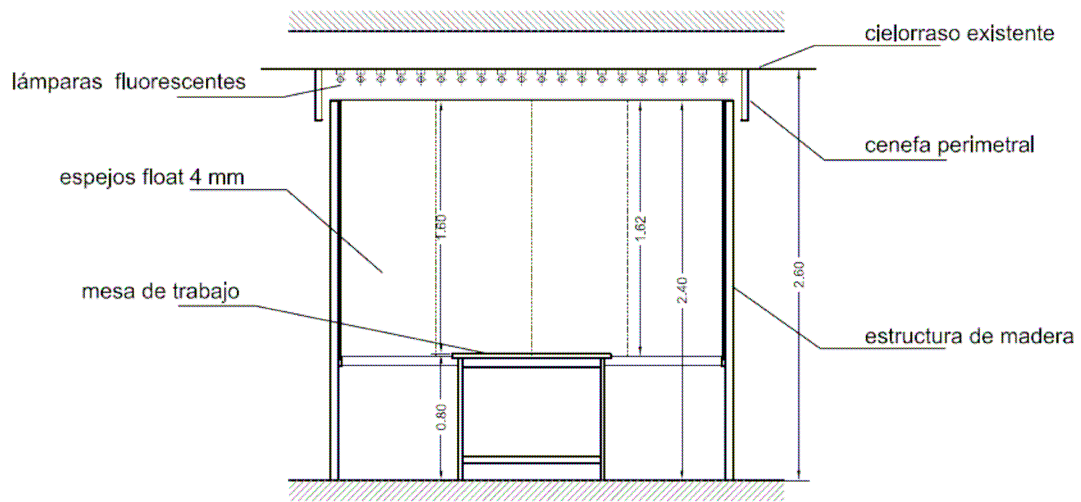


Figura 1: Corte del dispositivo

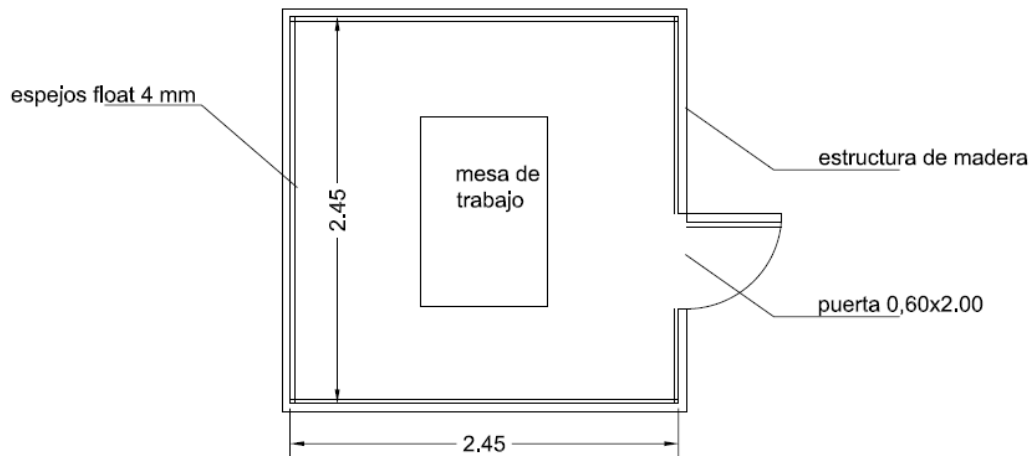


Figura 2: Planta del dispositivo

La definición de las proporciones de la caja es de importancia para la distribución de luminancias en la simulación. Si la dimensión dominante es la altura, la distribución de las luminancias está influenciada principalmente por los espejos laterales, mientras que si la dimensión dominante es el ancho, la distribución está condicionada por el cielorraso. A partir de este concepto es necesario fijar una relación óptima de ancho – alto de la caja para lograr una distribución lo más aproximada posible a la propuesta para el cielo standard CIE cubierto. Según experiencias desarrolladas en la Universidad de Washington (Matusiak, 2005) se recomienda una relación altura/ancho de 2:3 como relación proporcional óptima. En el caso del simulador propuesto, y en función de las dimensiones disponibles, se ha fijado una relación de 1.60/2.45, que da como resultado una proporción 2:3.1, prácticamente dentro de los valores recomendados.

El sistema de iluminación utilizado está basado en una matriz de 40 tubos fluorescentes T8, tipo “Daylight”, luz día, con un flujo luminoso total instalado de 100.000 lm. La superficie difusora está constituida por una tela vinílica translúcida tensada de color blanco. El nivel final de iluminación sobre plano horizontal es de 3500 lux. En las figuras 3 y 4 se muestran vistas interiores del cielo artificial construido.



Figura 3 y 4 – Fotos interiores de la caja de espejos

De acuerdo a las dimensiones finales del cielo artificial se define el tamaño final máximo de la maqueta de estudio, un cielo artificial de 5 x 5 m alberga una maqueta de 1,5 a 2 m (Littlefair, 1989). Considerando que se mantiene una relación proporcional lineal entre el tamaño del simulador y la maqueta, se puede fijar una dimensión máxima del modelo para el simulador construido de aproximadamente 0,60 a 0,90 m.

A los efectos de realizar una primera verificación del comportamiento del sistema, en relación a la curva de referencia CIE para cielo cubierto, se realizaron una serie de mediciones de iluminación en distintos ángulos de altura y azimut. El luxómetro fue montado sobre una estructura graduada en ángulos que permite el movimiento vertical y horizontal cada 10°. La célula del luxómetro fue parcialmente apantallada por un tubo negro limitando el ángulo sólido de ingreso de luz al sensor. Los resultados obtenidos de la medición fueron comparados con la curva de referencia calculada por la expresión (1) a partir del valor de iluminación medido para el cenit, los resultados se muestran en la gráfica de la figura 5.

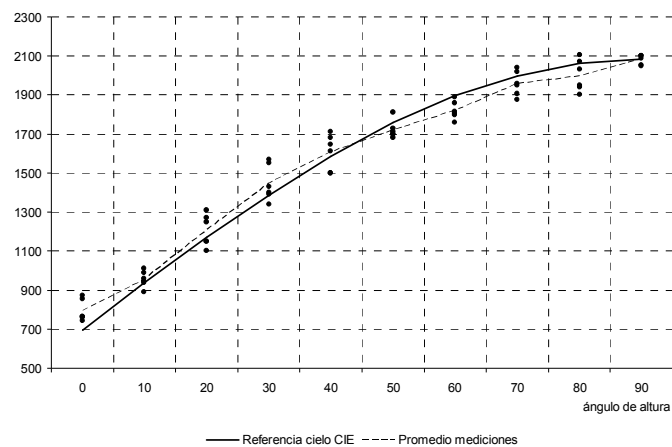


Figura 5 - Comparación de mediciones con curva CIE de referencia

$$E_{\beta} = E_z \left[ \frac{1 + 2\text{seno}\beta}{3} \right] \quad (1)$$

Donde:

$E_z$ : nivel de iluminación medido para 90° (cenit).

$\beta$ : ángulo de altura o elevación.

## DESARROLLO DEL SISTEMA DE MEDICION

Las mediciones de iluminación en modelos a escala implican necesariamente el uso de sensores de dimensiones reducidas que permitan su incorporación en el interior de la maqueta sin influir en las condiciones de iluminación. La medición en el exterior de la maqueta puede ser realizada mediante un luxómetro tradicional, mientras que la medición en el interior implica colocar una matriz de sensores a escala adecuada. Generalmente los sensores fotométricos utilizados son de reducidas dimensiones: 2.38 cm de  $\varnothing$  x 2.54 cm de altura. Estos sensores basados en un fotodiodo de silicón proveen una respuesta espectral ajustada a la curva CIE en  $\pm 5\%$ , ubicado en un cabezal con corrección del coseno.

Se ha desarrollado, para su uso en el cielo artificial construido, un sistema de medición basado en el uso de sensores de luz ambiental marca SHARP modelo GA1A2S100SS, dispositivo que consta de tres fotodiodos y amplificadores diferenciales en cada uno dando una sensibilidad y respuesta similar al ojo humano y una salida lineal como se aprecia en el gráfico de la figura 6 (Sharp, 2007). El costo final de este sistema de sensores es muy inferior al de los sensores fotométricos usuales.

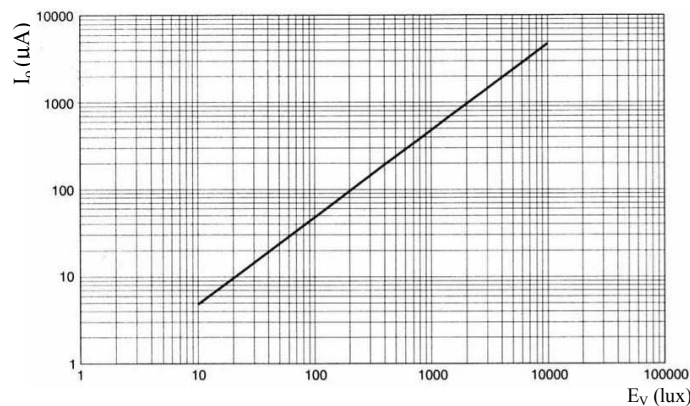
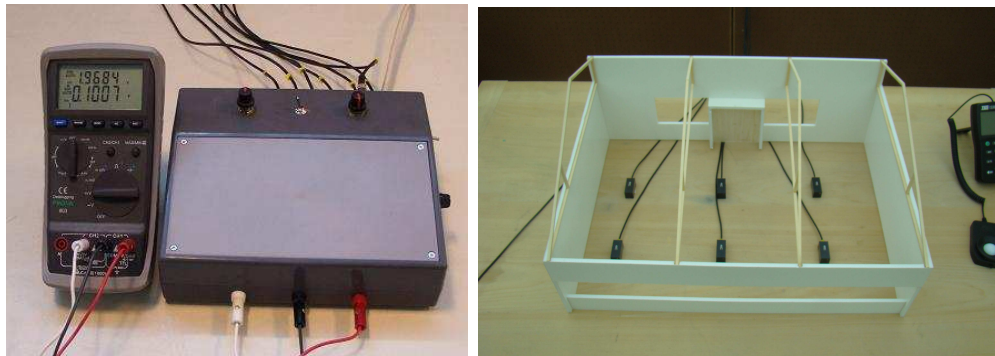


Figura 6 – curva de relación entre  $E_V$  (lux)

El sensor cuenta con tres pines: alimentación ( $V_{cc}$ ), masa (GND) y salida de corriente ( $I_o$ ). A este último se lo conectó a un resistor respecto a masa para obtener una salida de tensión. La alimentación es de 3V en corriente continua, la tensión de salida es de 0 a 2V. El rango de utilización es de 10 a 10000 lux. Para la medición de la tensión se optó por usar un multímetro digital de dos canales marca PROVA modelo 801/803 de 6 dígitos y una precisión de 0,04%. Los sensores fueron calibrados por comparación directa en banco fotométrico con luxómetro calibrado de fábrica marca TES modelo 1339.

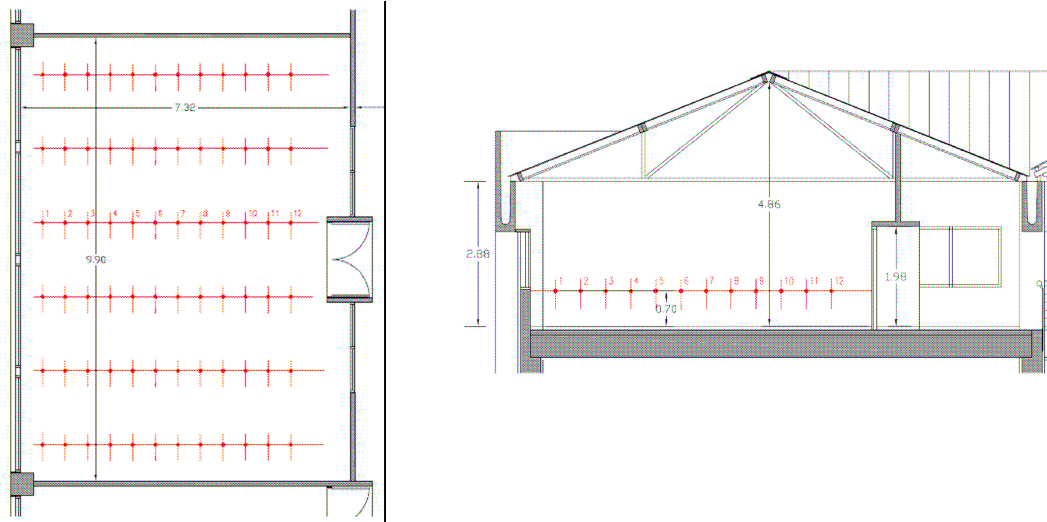
Un canal del multímetro se utiliza para la medición de iluminación fuera de la maqueta (Iluminancia exterior,  $I_e$ ) y el otro canal para los sensores ubicados dentro de la maqueta (Iluminancia interior) pudiendo así calcular la componente de luz diurna (CLD) en cada punto elegido dentro de la maqueta. En las fotos de las figuras 7 y 8 se muestra parte del equipamiento y los sensores colocados en maqueta. El tamaño final de los sensores, 1,2 cm de altura, permite su utilización en maquetas a escala 1:20 e incluso inferiores. Considerando, de acuerdo a lo analizado, que el cielo construido permite una maqueta con largo máximo de 90 cm, el local a estudiar podrá tener hasta 18 metros. Para locales mayores, teniendo en cuenta el tamaño del sensor, aún se podrá reducir la escala adoptada.



Figuras 7 y 8 – Equipamiento de medición

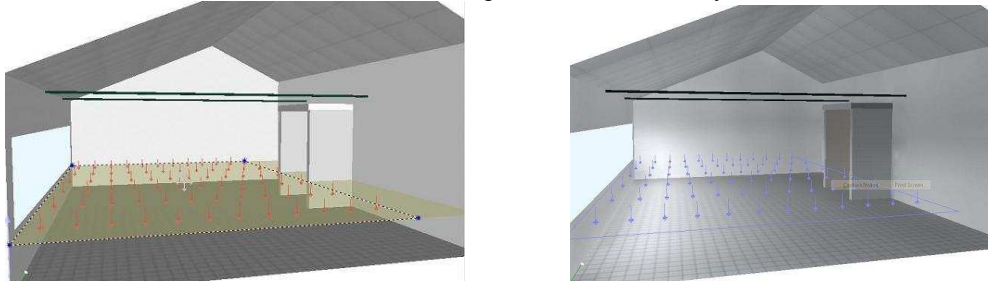
## EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el objetivo de verificar y validar el sistema construido se realizó una evaluación comparativa entre la medición realizada en el cielo artificial del CIAL y una simulación realizada mediante el software de cálculo DIALUX. El modelo utilizado fue una de las aulas – taller de la Facultad de Arquitectura de la UNC ubicada en el edificio de Ciudad Universitaria. El aula, cuya planta y corte se muestran en la figuras 9 y 10, tiene 9,90 x 7,30 metros y una altura media de 3,80 metros. Las paredes están pintadas de color blanco y el cielorraso acústico también es de color claro. Estas terminaciones superficiales interiores fueron tomadas en cuenta tanto para el color de las superficies interiores de la maqueta como para la elección de las terminaciones superficiales en el DIALUX.



Figuras 9 y 10 - Planta y corte del aula con ubicación de puntos de simulación de CLD

Para la simulación por software se consideraron el grado de transmisión del vidrio, el factor de contaminación del entorno y el factor de división por travesaños todos iguales a 1 (100%) a los efectos de equiparar las condiciones de simulación con las de medición en cielo artificial. La simulación fue realizada en DIALUX para la condición de cielo cubierto CIE. En la figuras 11 y 12 se muestra el modelo tridimensional utilizado con la grilla de cálculo definida y un render resultante.



Figuras 11 y 12 - Modelo tridimensional utilizado en DIALUX

Tanto las mediciones como la simulación fueron realizadas para una matriz de 6 x 12 puntos que se muestran en la planta y corte de figuras 9 y 10. En la figura 13 se observa un detalle del interior de la maqueta con los sensores ubicados en una de las posiciones de medición utilizadas. Se adoptó como PT la altura de los sensores. Sobre cada uno de los 72 puntos se calculo y/o midió la componente de luz diurna (CLD). La tabla 1 muestra los valores medidos en cielo y los calculados.



Figura 13 - Interior de maqueta con sensores de medición

Distancia a la ventana (m)	Fila 1		Fila 2		Fila 3		Fila 4		Fila 5		Fila 6	
	maqueta	Dialux	maqueta	Dialux	maqueta	Dialux	maqueta	Dialux	maqueta	Dialux	maqueta	Dialux
	1	0.171	0.110	0.176	0.190	0.176	0.200	0.177	0.200	0.181	0.200	0.175
1.5	0.121	0.080	0.125	0.130	0.128	0.140	0.127	0.140	0.132	0.140	0.128	0.073
2	0.086	0.058	0.087	0.086	0.091	0.100	0.090	0.100	0.093	0.098	0.092	0.056
2.5	0.060	0.039	0.060	0.050	0.064	0.059	0.062	0.059	0.065	0.056	0.066	0.037
3	0.045	0.035	0.044	0.043	0.047	0.050	0.046	0.051	0.047	0.049	0.050	0.033
3.5	0.037	0.031	0.035	0.037	0.039	0.042	0.037	0.043	0.038	0.040	0.040	0.031
4	0.031	0.028	0.029	0.033	0.032	0.037	0.031	0.038	0.032	0.035	0.033	0.028
4.5	0.026	0.025	0.024	0.027	0.027	0.030	0.026	0.030	0.026	0.028	0.028	0.025
5	0.022	0.025	0.021	0.027	0.022	0.029	0.022	0.029	0.022	0.028	0.024	0.025
5.5	0.020	0.024	0.019	0.026	0.020	0.027	0.019	0.027	0.020	0.026	0.021	0.024
6	0.019	0.023	0.018	0.024	0.019	0.025	0.018	0.025	0.018	0.024	0.020	0.024

Tabla 1 – Valores de CLD medidos en cielo y calculados para cada punto de la grilla

En la gráfica de la figura 14 se muestra una comparación de los valores de CLD tomados en una de las filas centrales para distintas distancias al plano de la ventana. Se evidencia un buen ajuste entre los valores medidos en maqueta en cielo artificial y los valores calculados por DIALUX, con un coeficiente de correlación  $R^2=0.99$ , situación que permite validar el sistema construido.

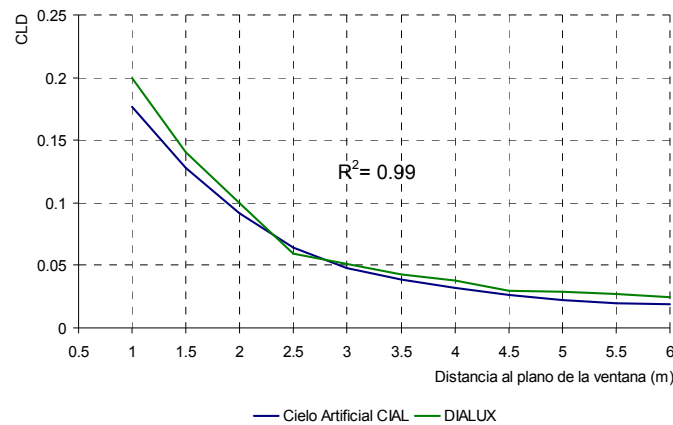


Figura 14 – Comparación gráfica entre valores de CLD medidos en maqueta y calculados

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha desarrollado la construcción de un cielo artificial tipo caja de espejos que permitirá disponer en la FAUD-UNC de un dispositivo para la ejecución de trabajos sistemáticos de evaluación de la iluminación natural en maquetas, tanto por parte de alumnos de la carrera de arquitectura, como para futuros trabajos de investigación y aplicación profesional.

La verificación realizada mediante la medición de iluminancia para distintos ángulos de elevación permite concluir que el cielo construido tiene un importante ajuste en relación a la curva CIE de referencia, lo cual, junto con la correlación entre los resultados obtenidos por medición en el cielo y simulación mediante software, permiten validar su uso.

El sistema de medición desarrollado proporciona mediciones relativas de la CLD suficientemente confiables para los trabajos de tipos académicos y didácticos en que inicialmente se lo utiliza. Aún queda por desarrollar y verificar un dispositivo protector y corrector del coseno que termine de adecuar los sensores para su uso. En este sentido se está comparando el rendimiento de distintos modelos de cúpulas de acrílico que permitan corregir el déficit de lectura que se puede producir para ángulos muy bajos de incidencia.

## REFERENCIAS

Bodart M., A.Deneyer, A.de Herde. and P.Wouters. Design of a new single-patch sky and sun simulator. Lighting Research and Technology. 38,1 (2006) pp. 73/89.

Evans. J. M et all. (1997). Diseño y construcción de un cielo artificial tipo espejo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 1, 1997.

Evans, J. M et all. (1998). Iluminación en Maquetas y espacios con Iluminación Natural. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 2, 1998, N°2, 5.37-5.40.

Gonzalo et all. (2000). Diseño y Construcción de un cielo artificial para el Instituto de Acondicionamiento Ambiental. Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 4, 2000.

Pattini, A. (2005). Evaluación de la Iluminación Natural en Edificios. Modelos a Escala. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 9, 2005.

Matusiak B., Arneses H. (2005). The Limits Of The Mirror Box Concept As An Overcast Sky Simulator. Lighting Research and Technology 37,4 (2005) Pp. 313/328.

Littlefair, Paul J., (1989), "Measuring daylight: the effective use of scale models" dans Daylighting buildings, conference proceedings, Brian Norton & Hugh Lockhart-Ball, Imperial College, London, abril, pp. 43-54.

SHARP Corporation, (2007). Data sheet N°: D1-A00501EN. OPIC Linear Output Ambient Light Sensor - October 1, 2007.

## **ABSTRACT**

This paper presents the description of the device was built in CIAL-FAUDI-UNC for simulating the CIE sky overcast and the verification of lighting using models. The artificial sky built corresponds to the "mirror box" type. The model was chosen on the basis of their suitability to working conditions, availability and especially on the basis of the large amount of accumulated experience in the use of this model, in both local and foreign laboratories that emerges from the bibliography analyzed. The paper also shows the alternative equipment developed for measuring illumination data with the scale models. The simulator built can be used for educational applications, with enough versatility and ease of operation, and for the development of specific projects in both research and practical application

**Keywords:** sunlight, simulation, artificial sky.