

ILUMINACIÓN EN MAQUETAS Y ESPACIOS CON ILUMINACIÓN NATURAL RECOMENDACIONES PARA SU MEDICIÓN

J.M. Evans, M. Bogatto, M.I. Marmora, G.A. San Juan
 CIHE, Centro de Investigación Hábitat y Energía, SICyT-FADU-UBA.
 C.C. 1765, Correo Central (1000), Cap. Fed. o Pabellón 3, 4to Piso, Ciudad Universitaria (1428), Cap. Fed.
 Fax +54 (01) 782 8871. E-Mail: evans@fadu.uba.ar
 IDEHAB, Instituto de Estudios del Hábitat, FAU, UNLP N° 162, CC 478, La Plata, Tel/Fax: +54 (021) 214705

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de los primeros ensayos, mediciones y evaluaciones de la calidad y cantidad de iluminación natural en maquetas de edificios. El cielo artificial, recientemente construido en el Laboratorio de Estudios Bioambientales del CIHE, permite realizar estos estudios con una distribución de iluminación que simula un cielo nublado. Se verificó primero la validez del modelo teórico de la distribución luminica del cielo a emplear, y posteriormente se analizó la distribución de iluminación obtenida en el cielo artificial. Se presenta además el resultado del análisis de las técnicas experimentales y de otros aspectos a considerar cuando se realizan mediciones en un cielo artificial.

INTRODUCCIÓN

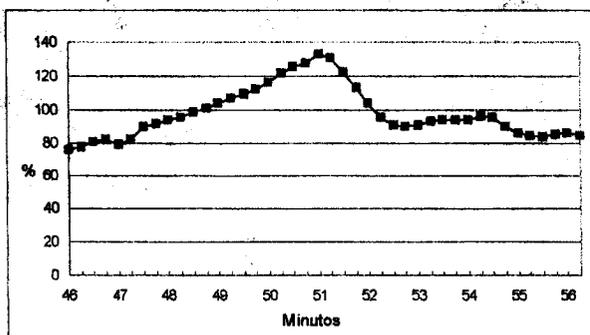
El cielo artificial permite realizar mediciones de intensidad y distribución de iluminación natural, en espacios interiores de maquetas de edificios existentes y de proyectos en desarrollo. El cielo artificial construido en el Centro de Investigación Hábitat y Energía de la FADU-UBA (Evans 1997a, Evans 1997b) simula las condiciones de iluminación más desfavorables, las de un cielo cubierto. El modelo teórico utilizado para su construcción es el propuesto por el CIE (Comité Internacional de l'Éclairage), conocido como "Standard Overcast Sky" o Cielo Nublado Normalizado (CIE, 1970). En este trabajo se presentan los resultados de las primeras mediciones y las experiencias recogidas durante el proceso de calibración. Las mediciones iniciales de calibración tenían como objetivo verificar:

1. la distribución luminica del cielo artificial y su relación con el modelo teórico según el cual ha sido construido;
2. la validez del modelo teórico desarrollado en otras latitudes para cielo nublado de latitud 34°, Buenos Aires;
3. la respuesta de los diferentes instrumentos a la luz procedente de diferentes ángulos de altura (respuesta al coseno);
4. las variaciones de valores obtenidos con distintos instrumentos de medición;
5. la variación de valores de iluminancia debido al calentamiento de tubos fluorescentes, a variaciones de tensión, etc.

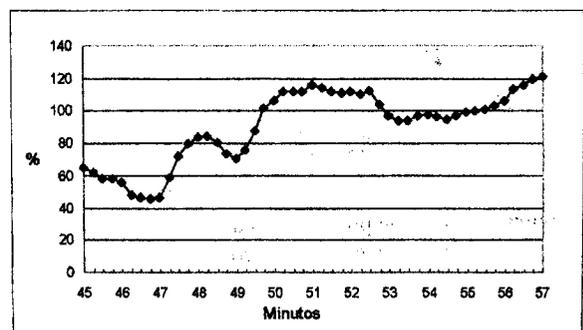
A continuación se presentan los resultados de las mediciones realizadas, con las recomendaciones y conclusiones que surgen del primer año de uso del cielo.

EL CIELO REAL

Un cielo nublado real se caracteriza por una gran variabilidad en el tiempo de los valores de iluminancia medidos en él. Esta variación, escasamente perceptible, puede desviarse del valor medio medido en un 30%, en un período de 15 minutos. Es muy importante tomar en cuenta este factor para la realización de mediciones tanto del mismo cielo, como en el interior de edificios reales y en escala (ver Figura 1 a y b). La distribución de la luminancia no es uniforme, ya que su valor cambia según el ángulo de altura considerado. Fueron elaborados modelos teóricos simplificados, que simulan aproximadamente la distribución de luminancia del cielo nublado real. El modelo más utilizado e internacionalmente reconocido es el Standard Overcast Sky, definido por la Comisión Internationale de l'Éclairage (CIE). En éste, la distribución angular de la iluminancia del cielo fue definida principalmente en base a mediciones realizadas en Europa a diferentes latitudes.



a) Variación en 10 minutos, 10.45 horas en invierno.



b) Variación en 12 minutos, 12.45 horas en invierno.

Figura 1. Variación de la iluminación sobre plano horizontal: variación porcentual desde el promedio (100%) en minutos.

Con el fin de verificar la validez del modelo en latitudes más bajas que las europeas, se realizó una serie de mediciones utilizando un aparato especialmente preparado para tal fin. El aparato consiste en una bandeja de apoyo que gira sobre un eje horizontal, sobre la bandeja se coloca un luxómetro con un tubo de cartón negro que limita la luz que llega al sensor. La bandeja, el sensor y el tubo giran para obtener luz de un sector limitado del cielo, a distintas alturas angulares y orientaciones. El tubo permite recibir luz de un sector del cielo con un ángulo sólido de 4° aproximadamente. En días nublados, las mediciones realizadas en invierno y verano indican una distribución de iluminancia del cielo real de Buenos Aires, latitud 34° S, muy similar a la distribución del modelo teórico. Este resultado indica la validez del modelo teórico desarrollado en otras latitudes, para cielo nublado de latitud 34° .

CALIBRACIÓN DEL CIELO ARTIFICIAL

Se realizaron mediciones de la distribución angular de la iluminancia del cielo artificial con el fin de comparar estos valores con los correspondientes al modelo teórico del CIE y con las mediciones realizadas en cielo real. Los resultados, presentados en otra ponencia (Evans 1997b), indican una buena correlación entre las tres series. Otras mediciones realizadas con intervalos de 15 segundos indican una importante variación en el tiempo de los valores de iluminancia, debido al calentamiento inicial de los tubos fluorescentes. La Figura 2 indica dicha variación. Se puede apreciar un rápido aumento de la iluminancia durante los primeros dos minutos de encendido del cielo, causada por la entrada en régimen de los tubos, y posteriormente se registra una disminución leve provocada por la disminución de la eficiencia luminica de los tubos con el aumento de la temperatura.

Cabe aclarar que la característica espectral de la iluminación sobre el plano de trabajo en el cielo no es optima debido a la distribución espectral de los tubos fluorescentes, la absorción de la película difusora y la mayor absorción de ondas rojas en los espejos, los cuales dan a la luz un característico color verde después de multiples reflejos. El uso de tonos de grises en las maquetas evita problemas de respuesta espectral. En maquetas con colores, se puede registrar leves imprecisiones con importantes superficies de color rojo o de colores que coinciden con las frecuencias pico de los tubos (370, 410, 440 540 nm).

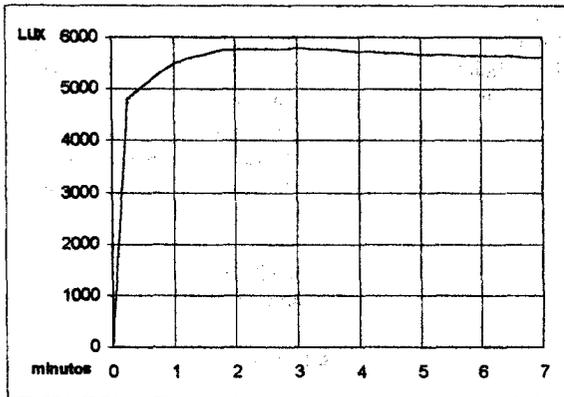


Figura 2. Variación de los valores de iluminancia

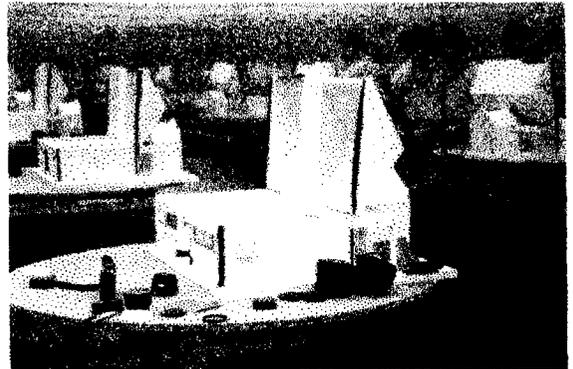


Figura 3. Foto del interior del cielo artificial.

CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS.

El instrumental utilizado para la realización de las mediciones está constituido por 4 luxómetros comunes (Modelo TES1330, TES1332 y LT Lx 103) que usualmente se utilizan para mediciones en ambientes reales con iluminación artificial, y un luxómetro Marca LI-COR dotado de un sensor específicamente diseñado para ser utilizado en maquetas.

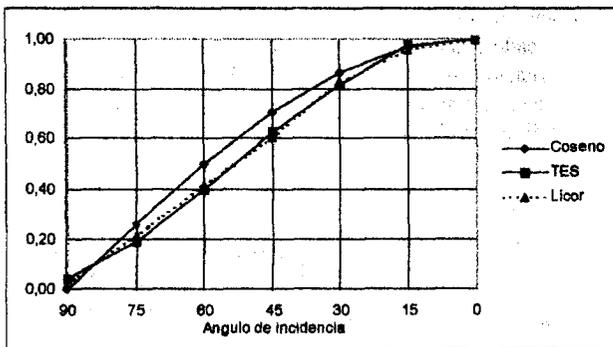


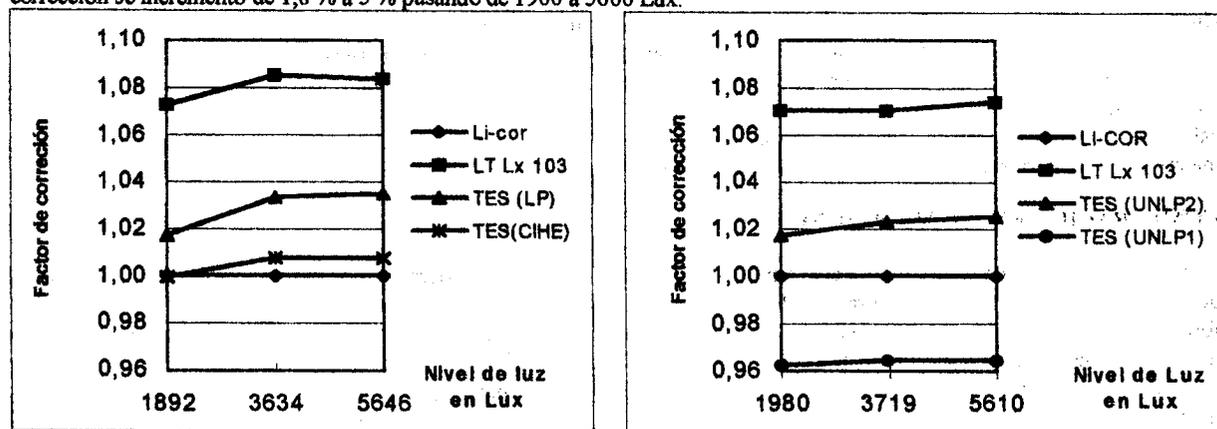
Figura 4. Variación proporcional de los registros, según ángulo de incidencia, comparado con la variación según ley de coseno.



Figura 5. Calibración instrumentos utilizados para distintos ángulos de procedencia de la luz.

Las mediciones iniciales realizadas con un luxómetro TES demostraron una diferencia significativa entre la respuesta teórica al ángulo de incidencia (respuesta de coseno) y la respuesta medida. Por eso, se realizaron mediciones comparativas del instrumental disponible con el fin de verificar la respuesta de los sensores según el ángulo de incidencia de la luz. Se efectuaron mediciones con una lámpara incandescente de 150 watts con vidrio claro a una distancia de 30 cm y ángulos de incidencia de 0° a 90°, con intervalos de 15°, en un recinto oscuro. El sensor LI-COR presenta una respuesta con valores más cercanos a los de la curva teórica óptima, aunque todavía existen diferencias de hasta el 10% para los ángulos de 60° y 45°. (Figuras 4 y 5).

Adicionalmente se realizaron mediciones comparativas de los valores de iluminancia registrados con distintos sensores, con iluminación difusa proveniente del cielo artificial. Se utilizó el nuevo sensor Li-Cor, recientemente calibrado en fábrica como patrón. Se compararon los registros de los diferentes luxómetros con distintos niveles de iluminación, usando 1, 2 y 3 fases del cielo artificial, correspondientes a 1900, 3700 y 5600 Lux respectivamente. La figura 6 indica los resultados obtenidos. La variación máxima entre los instrumentos es de + 8,5% (LT Lx 103), mientras que los otros instrumentos requieren factores de corrección de -1% (TES, CIHE), +3,5% (TES 1, UNLP) y -3% (TES 2, UNLP). En general, no hay variación significativa en los factores de corrección con distintos niveles de iluminancia; pero en el caso del luxómetro TES20 (UNLP), su factor de corrección se incrementó de 1,8 % a 3 % pasando de 1900 a 5600 Lux.



a) Primera serie, con luxómetro TES del CIHE

b) Segunda serie, con 2 luxómetros TES de la UNLP

Figura 6. Factores de calibración de los distintos luxómetros utilizados en las mediciones.

USO DE MODELOS A ESCALA.

Cuando se construye una maqueta en la cual se tienen que realizar mediciones de iluminación natural es aconsejable realizarla en una escala mínima de 1:20 (Baker, 1993), para facilitar el posicionamiento de los sensores y lograr una altura de la superficie receptora correspondiente al plano de trabajo.

En la construcción de las mismas hay que elegir con cuidado el material empleado y evitar aquellos que son levemente translúcidos, como por ejemplo el cartón blanco y el poliestireno expandido, porque inducen valores residuales de iluminancia. Estos valores se miden en el interior de las maquetas colocando material opaco sobre todas las aberturas y midiendo el valor de iluminancia en el centro del recinto; se compara este valor con el medido en la misma posición, pero con entrada de luz a través de las aberturas y con el valor de iluminancia exterior sin obstáculos. Los resultados obtenidos con una maqueta de un aula escolar, construida con una capa de poliestireno entre dos hojas de cartón blanco, dan un valor de iluminancia interior con ventanas abiertas de 617 Lux (FIN 10.9%), y un valor residual con ventanas tapadas de 147 Lux (FIN 2.6%). Este valor muy elevado remarca la importancia de la elección y uso de un material totalmente opaco. Otro factor que hay que tener en cuenta es el del sellado de las juntas para impedir el ingreso indeseado de luz en las aristas de la maqueta, ya que de este modo se incrementan y modifican los valores medidos. Este efecto se registra especialmente en modelos desarmables en los que se aconseja el uso de cinta aisladora negra para cubrir las eventuales rendijas. Hay que prever aberturas en la maqueta para permitir la colocación y deslizamiento de los sensores en el recinto y también para realizar fotografías en el interior de la misma.

Se establece una malla regular de puntos en los que se efectúan las mediciones, incluyendo en ella los más significativos, conformándose una grilla que responda a las características geométricas del recinto en estudio. Un factor importante a considerar es la correspondencia existente entre las distribuciones de puntos de medición, adoptadas en los diferentes métodos de evaluación utilizados: mediciones realizadas en maquetas en el cielo artificial; simulaciones numéricas; mediciones *in situ* de interiores de edificios en uso. La densidad de la malla de puntos afecta directamente los valores de FIN mínimo y máximo, y consecuentemente los factores de uniformidad y contraste. La elección de una malla con mayor densidad facilita la comparación entre métodos y logra una mayor precisión y cobertura en la graficación de las curvas de isoniveles, sin embargo las mallas más densas requieren un tiempo de realización de las mediciones más largo. Para obtener resultados correspondientes a los reales es muy importante establecer con la mayor aproximación posible los valores de los coeficientes de reflexión de superficies interiores (y exteriores) del modelo en escala. Además, es imprescindible conocer con exactitud el valor del coeficiente de transmisión de las superficies transparentes a través de las cuales penetra la luz en los recintos.

Para establecer los coeficientes de reflexión, se utilizó el catálogo "Paint Colours for Building Purposes" (BS 4800, 1972), en el cual se presentan muestras de 85 colores y su respectivo valor Munsell, que indica la reflectividad de la luz visible. Con estas muestras, se puede estimar la reflectividad de colores y materiales con una precisión de +/- 5% aproximadamente. El uso de tonos de gris en maquetas con las misma reflectividad que los colores reales evita problemas espectrales. Se realizó el diseño de un equipamiento experimental que permitirá la medición y evaluación de los coeficientes de reflexión, *in situ* y en laboratorio.

El valor del coeficiente de transparencia se puede establecer empíricamente a través de mediciones efectuadas con muestras del material transparente colocado sobre el sensor ubicado en un plano horizontal e iluminado con luz difusa del cielo artificial. El acrílico (plástico transparente) utilizado, de 1 mm de espesor, resultó tener una transmisión del 85%, mientras que el vidrio de 4 mm tiene una transparencia del 86%. En la bibliografía sobre el argumento se encuentran valores parecidos a los medidos.

En los interiores hay que considerar la presencia de equipamiento y de personas. Los muebles no sólo tienen coeficientes de reflexión que difieren de los de las paredes y del techo, sino también incrementan la superficie total de absorción, aumentando la "rugosidad" y disminuyendo el coeficiente de reflexión interno.

Una correcta evaluación de las condiciones lumínicas de un recinto depende también de la consideración de los objetos y obstáculos exteriores existentes: vegetación (árboles, arbustos y enredaderas), muros (medianeras, línea municipal, etc.) y otros edificios. El color del solado exterior es otro factor importante debido a su influencia sobre la cantidad de luz reflejada hacia el interior del edificio y en especial hacia el cielorraso. De la observación de solados duros típicos, como baldosas calcáreas y de hormigón, ladrillos, etc., se registra un cambio de reflectividad con diversas condiciones de humedad de los materiales; además si son exteriores aumentan su absorción con el tiempo debido a suciedad, moho, musgo, etc.

COMPARACION ENTRE MEDICIONES Y SIMULACION NUMERICA

Se compararon resultados obtenidos con mediciones en el cielo artificial y con programas de simulación numérica. El programa de simulación utilizado 'Daylight' (Frame, 1991) no contempla el uso de techos inclinados, por lo tanto se utilizaron soluciones formales aproximadas a los casos reales. La diferencia entre el número de puntos calculados por computadora y los puntos medidos en maqueta induce un desfase importante entre los valores máximos obtenidos en ambos casos. Por ejemplo, en el caso de un aula con techo a dos aguas, superficies interiores claras y ventana grande en una sola fachada, el valor máximo medido es igual a un FIN del 13% y el punto de medición se sitúa a 1.50m de distancia de la abertura. A la misma distancia, el valor calculado de FIN corresponde a 12%, una diferencia aceptable considerando los límites de precisión de las mediciones. Si se adoptara una malla más densa, similar a la que se utiliza con los programas de simulación, el valor máximo medido sería más alto, debido a la mayor cercanía a la ventana (por ejemplo: a una distancia de 0.20 m de la abertura, el valor máximo obtenido con la simulación es de 29.9%) (San Juan, 1998). Con una ventana igual al 50% de la fachada, el FIN máximo fue 11,8% y 12,3% respectivamente con simulación y medición en el Cielo, mientras el FIN medio fue 4,5% y 5,9%.

CONCLUSIONES

Las mediciones realizadas durante el primer año de uso del Cielo Artificial permitieron verificar la utilidad de este equipamiento para estudiar problemas de iluminación natural, presentándose como una herramienta práctica tanto para trabajos de investigación como para verificar el desarrollo de proyectos de arquitectura. De la experiencia adquirida en cielo artificial y en cielo real, se logró también establecer una serie de recomendaciones de uso y metodología de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo cuenta con apoyo económico de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad de Buenos Aires y la Agencia Nacional de Promoción de Ciencia y Tecnología. Se agradece la colaboración realizada por Christel Biener, becada por la Fundación Carl Duisberg Gesellschaft, Alemania, durante su período de pasantía en el CIHE (1997-98).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Evans, J. M., Baroldi, G. M., Marmora, M. I. (1997a) "Diseño y Construcción de un cielo artificial tipo espejo". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 1, N. 1. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Volume 1, pp. 121-124.

Evans, J. M., Baroldi, G. M., Marmora, M. I. Equipamiento para el estudio de iluminación natural (1997b). "Diseño, construcción y calibración de un cielo artificial". IV Encuentro Nacional de Conforto no Ambiente Construido, Salvador, Bahía, Brasil. 24-28 de noviembre 1997, pp. 319-322.

CIE, Commission Internationale d'Eclairage (1970). "Daylight". Publicación CIE No 16 (E-3.2) París.

Baker, N. et al. (1993). "Daylighting in Architecture" EUR 15006 EN, James & James. Londres.

BS 4800: 1972 (1972). "Paint Colours for Building Purposes". British Standard Institution. Londres.

Frame, I. & Birch, S. (1991). "Daylight Version 4.1", Dept. of Built Environment, University of East Anglia.

San Juan, G. A., Evans, J. M., et al (1998). "Evaluación del comportamiento lumínico en aulas con diferentes soluciones de envolvente edilicia". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. N. 2. Salta, Argentina.