

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA



**ILUMINACIÓN NATURAL EN ARQUITECTURA**  
**Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México**

Arturo Valeriano Flores

UNAM - 2010 - MÉXICO



Instituto de Investigaciones Históricas



Facultad de Arquitectura



Facultad de Estudios Superiores - Aragón



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**ILUMINACIÓN NATURAL EN ARQUITECTURA**  
**Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México**

Tesis que para obtener el grado de:  
Maestro en Arquitectura

Presenta:

Arturo Valeriano Flores

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura  
Maestría en Arquitectura - Tecnología

UNAM - 2010 - MÉXICO



Instituto de Investigaciones Históricas



Facultad de Arquitectura



Facultad de Estudios Superiores - Aragón

---

**DIRECTOR DE TESIS:**

Mtro. Leonardo B. Zeevaert Alcántara

**SINODALES:**

Dr. José Diego Morales Ramírez

Mtro. Francisco Reyna Gómez

Dr. Mauro Valdés Barrón

Dr. Eric O. Jiménez Rosas

---

**Para Alfonso**

*Por hacerme sentir y vivir todo lo que un padre puede hacer por un hijo.*

**Para Julieta**

*Porque todo artista tiene una musa que lo inspira y lo impulsa a seguir adelante...*

*yo no soy un artista,*

*por eso le doy gracias a la vida de tenerte a ti.*

---

## *IN MEMORIAM*

### **Dr. Agustín Muhlia V.**

Coordinador del Observatorio de Radiación Solar  
Instituto de Geofísica - UNAM

*Gracias por su apoyo y sus invaluable  
consejos. Esta tesis es sólo una pequeña  
aportación al trabajo que realizó con gran  
dedicación durante muchos años de su vida.*

---

**Al Mtro. Leonardo B. Zeevaert Alcántara**

*Por permitirme seguir sus pasos. Por ser un gran maestro al no haberme dado todas las respuestas y ser quien más preguntas me ha planteado.*

**A mis tutores y maestros**

*Por permitirme compartir algunas de mis inquietudes, dudas e ideas. Por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.*

**A mi familia y amigos**

*Por su paciencia y comprensión. Por darme el tiempo y el espacio para generar este trabajo de investigación.*

**A la UNAM y su Posgrado de Arquitectura, al Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica y al Centro de Ciencias de la Atmósfera.**

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**

*Por el apoyo económico otorgado para la realización de esta investigación.*

En este documento se presentan los resultados de la investigación que consistió en estudiar, analizar, evaluar y validar los métodos de cálculo de iluminación natural en los espacios arquitectónicos. Se presentan los aspectos más relevantes de la relación entre la luz natural, la arquitectura y el ser humano, considerando las interacciones entre estos elementos y sus repercusiones en la salud física y psicológica de las personas. Se establece la importancia de estudiar este fenómeno con la intención de aprovechar sus propiedades y evitar sus efectos nocivos para las usuarios que habitan los espacios. Con esto es posible generar las condiciones de habitabilidad y confort que permitan realizar actividades de una forma adecuada, tal y como lo demuestran los estudios aquí presentados que relacionan a la iluminación natural con la productividad laboral y el rendimiento académico en espacios escolares.

La luz es un fenómeno físico cuya naturaleza es indispensable conocer para poder utilizarla en el diseño arquitectónico, por este motivo se presentan los resultados de los estudios más recientes que buscan conocer las características de este recurso. De forma particular, se presentan los resultados de las mediciones realizadas en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM que permiten establecer algunas de las características de la luz natural en la Ciudad de México. Mediante la obtención de los valores de eficacia luminosa a partir de los valores de radiación solar global, se hace la validación de los modelos de eficacia luminosa para cielo despejado y medio nublado. Con esta información se brinda un panorama general de las condiciones bajo las cuales se presenta la luz natural en la Ciudad de México, específicamente, su disponibilidad. Esto permite establecer las condiciones en las que se deben realizar todos los estudios posteriores que involucren este recurso. Se analizan las relaciones existentes entre las diferentes variables que interactúan y que afectan la iluminación natural en los espacios. Dado que la luz natural es un elemento esencial de la arquitectura y los espacios, se presenta un análisis sobre la normatividad que promueve y regula su utilización con fines de diseño. Se estudian las investigaciones realizadas en los últimos cinco años entorno al cálculo de iluminación natural lo que posibilita establecer que el método del factor de luz de día ha sido, es y seguirá siendo un referente para su utilización en el diseño arquitectónico.

Se propone una metodología que incluye herramientas que permiten llevar a cabo estudios cualitativos y cuantitativos de iluminación natural, las cuales, pueden utilizarse en diferentes etapas del proceso de edificación, desde el anteproyecto hasta etapas posteriores a la construcción y utilización. Las evaluaciones pos-ocupacionales son estudiadas debido a su potencial como instrumentos que permiten complementar los estudios de las interacciones de los fenómenos físicos en los espacios. La metodología propuesta es aplicada a tres casos de estudio con la intención de validar los métodos de cálculo propuestos mediante la comparación de sus resultados. Con este procedimiento se determinó que existen diferencias entre los resultados que arrojan cada uno de los métodos, sin embargo es posible utilizarlos como herramientas que permitan comparar diferentes soluciones para un mismo diseño de iluminación natural en espacios arquitectónicos. Se pone especial atención en las evaluaciones post-ocupacionales debido a la importancia que adquieren al mostrar la opinión de los usuarios. Por último se establecen las diferentes líneas de investigación a seguir generadas a partir de este trabajo de investigación.



This thesis presents the final results of the research that consisted in the study, analysis, evaluation and validation of various calculation methods for daylighting in architecture. It presents the most relevant issues in the relationship between daylight, architecture and the human being. Considering the interactions between these elements and their consequences in psychological and physiological health. The importance of this kind of studies also have been established in this thesis by taking the advantages of daylighting and avoiding their harmful effects in the inhabitants. With this information is possible to create the comfort and habitability conditions to allow the proper use of spaces, this was confirmed by the studies presented in this thesis that links daylighting, work productivity and academic performance in educational spaces.

Light is a physic element which nature is important to know for its application in architectural design. This is the reason why this thesis presents the last researches in daylight and its characterization. In particular, this thesis contains the results of the measurements conducted in the Solar Radiation Observatory of the Geophysics Institute of the Mexican National University (UNAM) in Mexico City. Clear and partially clear sky models validation have been done by the acquisition of the luminous efficacy value by the global solar radiation data. These values give a general view of daylight conditions under Mexico City's sky. With this information is possible to establish the strategies where all daylighting studies have to be conducted. This thesis also contains the analysis of the relationship between the variables which interact and affect daylighting. Daylight is a very important element in architecture, because of this, the thesis presents an analysis of the legislation that promote and regulate its utilization for design purposes. The researches on Daylight estimation that have been done in the last five years were studied in this work. This allowed to establish that the daylight factor method is used as an auxiliary tool, has been a reference for its application in architectural design and it will be in the next years.

This work proposes a methodology that includes tools which allow qualitative and quantitative studies of daylighting. These tools could be used in different stages of the construction process. From the conceptual design to further stages of the construction and occupancy oh the building. Post-occupancy evaluations were studied because their potential as complementary instruments in studies of the physic elements that interact in spaces. The proposed approach had been applied in three study cases to validate the calculation methods by the comparison of their results. With this process it has been established the differences between the results of each method, however is possible to use them as auxiliary tools for the evaluation between different proposals for daylight design. This work also focuses in post-occupancy evaluations because their relevance in showing users opinion. Finally this thesis proposes directions for further research that were generated by this work.

## NOTA SOBRE LA VERSIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS

Debido a la carencia de espacio en sistema de Bibliotecas de la UNAM y el proceso de actualización de los contenidos, así como la modernización de la base de datos sobre los trabajos terminales de investigación del posgrado, esta tesis **NO** se encuentra disponible en versión impresa en la Biblioteca Central del UNAM. Sin embargo existe una versión impresa en la Biblioteca Luis Unikel del posgrado de Arquitectura o también puede obtenerse vía Biblioteca Digital del sistema de Bibliotecas de la UNAM. (<http://www.dgbiblio.unam.mx/>).

Aprovechando los recursos tecnológicos disponibles en el momento de realizar esta tesis, se compilo el documento entero mediante el programa Adobe Acrobat. Mediante el uso de este programa es posible generar una archivo en formato PDF "universalmente" compatible. Este formato, entre otras ventajas, permite una manejo práctico así como facilidad de transferencia mediante recursos electrónicos y a través de internet. Destaca el uso de la herramienta de búsqueda de conceptos, motivo por el cual no se incorporó en el documento un Índice Analítico y Onomástico.

En el caso particular de esta Tesis, se utilizaron otras herramientas que permite este formato electrónico, entre las que destaca es uso de *hiperligas* o *links*. Estos *links* permiten desplazarse y ligar partes del documento de una forma rápida y sencilla. Para ello el lector debe dar click sobre cualquier liga que aparece en el documento y que puede ser identificada con letras subrayadas en color azul tal y como se muestra a continuación: [Ejemplo de liga](#). De la misma forma, en el Contenido del documento puede darse click en el número de la página en la parte derecha de la página para ir la sección deseada.

En la sección de lecturas sugeridas de encuentran las ligas URL que llevan a una página de internet que contiene el recuso electrónico. Se recomienda dar los permisos necesarios al programa Adobe Acrobat en donde se este consultando este documento para permitir el acceso a internet. Cabe hacer la aclaración que esta función esta disponible únicamente cuando se cuente con una conexión a internet. Si por algún motivo los recursos electrónicos hayan sido eliminados o hayan cambiado su ubicación electrónica, el lector puede solicitarlos vía correo electrónico a la siguiente dirección:

valeriano\_arq@yahoo.com.mx

En esta dirección también puede solicitar una copia de este archivo electrónico sin ninguna restricción para impresión y con mayor calidad en las imágenes, así como cualquiera de los textos utilizados en este documento como referencias. Por último en la dirección de correo electrónico se puede hacer la solicitud del programa "*Daylight Factor Calculator*" para el cálculo de iluminación natural que se presenta en el [Capítulo 2.6](#) en donde se describen a detalle sus características.

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
OBJETIVOS .....	5
HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN .....	5
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>9</b>
1.1. ILUMINACIÓN NATURAL EN ARQUITECTURA .....	9
1.2. CALIDAD DE LA LUZ NATURAL .....	12
1.3. LUZ NATURAL Y SALUD DEL SER HUMANO .....	13
1.4. EXPOSICIÓN DEL SER HUMANO A LA LUZ NATURAL .....	16
1.5. ILUMINACIÓN NATURAL Y PRODUCTIVIDAD LABORAL .....	17
1.6. LA LUZ NATURAL EN EL AMBIENTE ESCOLAR .....	18
1.7. CONDICIONES EXTERIORES .....	19
1.8. DISPONIBILIDAD DE LUZ NATURAL .....	28
1.9. EFICACIA LUMINOSA EN LA CIUDAD DE MÉXICO. ....	32
1.10. COMPONENTES DE LA LUZ NATURAL.....	41
1.11. DISTRIBUCIÓN DE LA LUZ NATURAL - INFLUENCIA DE LA FORMA Y POSICIÓN DE LAS VENTANAS .....	45
1.12. NORMATIVIDAD SOBRE EL USO DE LA LUZ NATURAL.....	48
1.13. ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL CÁLCULO DE LA LUZ NATURAL EN ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS .....	52
<b>2. METODOLOGÍA PROPUESTA</b>	<b>63</b>
2.1. ESTUDIOS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN LAS EDIFICACIONES.....	63
2.2. CRITERIOS Y ECUACIONES BÁSICAS .....	70
2.3. EL FACTOR DE LUZ DE DÍA (FLD) .....	81
2.4. CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DEL FACTOR DE LUZ DE DÍA .....	86
2.5. MATRIZ DE RELACIONES ENTRE DIMENSIONES DE VENTANA Y DISTANCIA AL PUNTO DE REFERENCIA.....	95
2.6. SIMULACIÓN Y CÁLCULO DE ILUMINACIÓN NATURAL POR COMPUTADORA. ....	98
2.7. IMÁGENES DE ALTO RANGO DINÁMICO (HDR) .....	110
2.8. EVALUACIONES POST-OCUPACIONALES .....	115

<b>3.</b>	<b>APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA</b>	<b>125</b>
3.1.	CASO DE ESTUDIO 1 - "CENTRO HISTÓRICO" .....	126
3.2.	CASO DE ESTUDIO 2 - "POSGRADO DE ARQUITECTURA - UNAM" .....	143
3.3.	CASO DE ESTUDIO 3 - "TALLER DE ARQUITECTURA UNIVERSIDAD MARISTA" .....	157
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>179</b>
<b>5.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>187</b>
5.1.	BIBLIOGRÁFICAS.....	187
5.2.	TESIS.....	189
5.3.	HEMEROGRÁFICAS .....	190
5.4.	NORMAS Y REGLAMENTOS .....	195
5.5.	PÁGINAS DE INTERNET .....	195
<b>6.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>199</b>
6.1.	LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS .....	199
6.2.	REPORTE DE CALIBRACIÓN DE SENSORES DE ILUMINACIÓN .....	200
6.3.	CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN POST-OCUPACIONAL .....	205
6.4.	LECTURAS SUGERIDAS .....	209

Figuras

CAPÍTULO 1 - MARCO TEÓRICO	PÁGINA
FIGURA 1 Vista aérea de la Ciudad de México en la zona centro.	9
FIGURA 2 Distribución luminosa de los 15 cielos estándar. (Edward Ng, 2007)	23
FIGURA 3 Esquema de Cielo nublado. (Reproducido de Stein 2003)	24
FIGURA 4 Esquema de Cielo despejado. (Reproducido de Stein 2003)	26
FIGURA 5 Fotografías con lente de Ojo de pescado que muestran los tipos cielos: izquierda - cielo nublado, centro - cielo parcialmente nublado derecha - cielo despejado. (Edward Ng, 2006)	27
FIGURA 6 Mapa con la localización de observatorios de la red del IDMP (IDMP 1997)	29
FIGURA 7 Diagrama del proceso de evaluación de la precisión del modelo de eficacia luminosa.	34
FIGURA 8. Gráfica comparativa de iluminancia e irradiancia global. Día despejado. 25-Marzo-10. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	35
FIGURA 9. Gráfica comparativa de iluminancia e irradiancia global. Día nublado. 27-Marzo-10. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	36
FIGURA 10. Gráficas de dispersión de valores de irradiancia contra valores de luminancia global Izquierda: Día despejado (25 marzo) - Derecha: Día nublado (27 marzo) Ciudad Universitaria (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	37
FIGURA 11 Distribución de la Eficacia luminosa global en función de la altitud del sol. Izquierda: Día despejado (25 marzo) Derecha: Día nublado (27 marzo)	37

**CAPÍTULO 1 - MARCO TEÓRICO****PÁGINA**

---

FIGURA 12. Gráfica comparativa de iluminancia global medida y modelada. Día despejado 25-Marzo-10. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99°11'54" O)	38
--	----

---

FIGURA 13. Gráfica comparativa de iluminancia global medida y modelada. Día nublado. 27-Marzo-10. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99°11'54"O)	38
--	----

---

FIGURA 14. Gráfica de iluminancia global medida contra iluminancia global modelada. Izquierda: Día despejado (25 marzo) Derecha: Día nublado (27 marzo). Ciudad Universitaria.	39
--	----

---

FIGURA 15 Componente de Cielo (CC)	41
---------------------------------------	----

---

FIGURA 16 Diagrama del Componente de Cielo (CC)	42
--	----

---

FIGURA 17 Componente Reflejado Exterior (CRE)	43
--	----

---

FIGURA 18 Diagrama del Componente Reflejado Exterior (CRE)	43
---	----

---

FIGURA 19 Componente Reflejado Interior (CRI)	44
--	----

---

FIGURA 20 Diagrama del Componente Reflejado Interior (CRI)	44
---	----

---

FIGURA 21 Distribución luminosa de un espacio con ventanas verticales.	46
---	----

---

FIGURA 22 Distribución luminosa de un espacio con ventanas horizontales	46
--	----

---

FIGURA 23 Distribución luminosa de un espacio con ventanas adyacentes.	47
---	----

---

FIGURA 24 Ventana con obstrucciones colindantes. (A. Valeriano)	48
---	----

---

**CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA PROPUESTA****PÁGINA**

---

FIGURA 25 Iluminación de un espacio en función de la dimensión de la ventana. (Reproducido de Ander 1995)	71
---	----

---

**CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA PROPUESTA****PÁGINA**

FIGURA 26 Iluminación de un espacio en función de la dimensión de la ventana. (Reproducido de Baker 2002)	71
FIGURA 27 Diagrama de los componentes de la ecuación del Factor de luz de día promedio. (Reproducido de Baker 2002)	72
FIGURA 28. Distribución de la luz natural en función de la profundidad del espacio. (Reproducida de Ander 1995)	75
FIGURA 29. Gráfica de valores del factor de luz de día en planos horizontal y vertical, en función de la distancia de la ventana. (Reproducido de Stein 2003)	75
FIGURA 30 Distribución de la luz natural en función de la profundidad del espacio.- Ciudad de México (A. Valeriano)	76
FIGURA 31. Distribución de la luz natural en función de la profundidad del espacio, porcentaje de ventana y transmisibilidad de material de ventana (Reproducida de Hausladen 1995)	77
FIGURA 32 Diagrama del Factor de luz de Día FLD	83
FIGURA 33 Componentes del Factor de luz de día FLD.	84
FIGURA 34 Diagrama con variables para determinar el valor de Componente de Cielo (Reproducido de BRE 1970)	87
FIGURA 35 Diagrama Waldram para la obtención del Componente de cielo. (BRE 1970)	88
FIGURA 36 Transportador para la obtención del Componente de cielo. (Reproducido de BRE 1970)	89
FIGURA 37. Valores de CRI en función de las reflectancias promedio y la proporción de ventana (Reproducido de Stein 2003)	91
FIGURA 38. Gráfica de valores de CRI en función del área de ventana y reflectancias de piso-muro (Basada en Muneer 2003)	92

**CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA PROPUESTA****PÁGINA**

FIGURA 39. Nomograma para el cálculo del CRI. (Reproducido de BRE 1970)	94
FIGURA 40 Diagrama de ventana de 1 metro de alto.	95
FIGURA 41. Gráfica de relaciones – dimensiones de ventana y punto de referencia	97
FIGURA 42. Diagrama de proceso de simulación y calculo de iluminación natural mediante 3D Max Design 2009. (Reproducido de Autodesk© 2008)	102
FIGURA 43 Distribución luminosa de un espacio utilizando programa DFcalc	105
FIGURA 44 Diagrama de funcionamiento del programa Daylight Factor Calculator.	106
FIGURA 45 Ventana principal del programa Daylight Factor Calculator	107
FIGURA 46 Ventana de ingreso de datos del programa Daylight Factor Calculator	108
FIGURA 47 Ventana con tabla para la obtención del valor de CC y ventana para interpoliar valores del programa Daylight Factor Calculator	109
FIGURA 48 Ventana con nomograma para la obtención del valor de CRI del programa Daylight Factor Calculator	109
FIGURA 49 Ventana con submenus auxiliares del programa Daylight Factor Calculator	110
FIGURA 50 Secuencia de fotografías digitales con diferentes niveles de exposición. (A. Valeriano)	112
FIGURA 51 Imagen HDR en gama de colores y su correspondiente escala de valores de luminancia. (A. Valeriano)	113
FIGURA 52. Imagen HDR de la distribución luminosa del cielo. (Inanici 2005)	114
FIGURA 53 Imagen HDR de la distribución luminosa de elementos colindantes a una ventana. (Inanici 2005)	114



**CAPÍTULO 3 - APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA****PÁGINA**

FIGURA 54 Caso de Estudio 1 Vista interior del espacio.	126
FIGURA 55 Caso de estudio 1 Planta del modelo a escala con ubicación de sensores.	127
FIGURA 56 Caso de Estudio 1 Sensores sobre bases de plástico transparente.	128
FIGURA 57 Caso de Estudio 1 Nomograma para la obtención del CRI.	130
FIGURA 58 Caso de estudio 1 Valores de FLD obtenidos para los puntos de referencia.	131
FIGURA 59 Gráfica de de iluminancia global horizontal (EGH) Diciembre 4, Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	132
FIGURA 60 Gráfica de Iluminancia global vertical en fachada oriente (EGV) Diciembre 4, Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	132
FIGURA 61 Gráfica de iluminancia de Fotómetros "Ventana 2" Diciembre 4 Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	133
FIGURA 62 Gráfica de iluminancia de Fotómetros "Ventana 1" Diciembre 4 Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	134
FIGURA 63 Gráfica de iluminancia de Fotómetros "Muro" Diciembre 4 Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	135
FIGURA 64 Valores de Factor de Luz de Día "Ventana 2" Diciembre 4 Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	136
FIGURA 65 Valores de Factor de Luz de Día "Muro" Diciembre 4 Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	136
FIGURA 66. Valores de Factor de Luz de Día "Ventana 1" Diciembre 4 Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	137
FIGURA 67 Caso de Estudio 1 Perspectiva 3D con plano de referencia.	138

**CAPÍTULO 3 - APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA****PÁGINA**

FIGURA 68 Caso de Estudio 1 Planta de plano de referencia en escala de colores	138
FIGURA 69 Caso de estudio 1 Gráfica de superficie 3D con valores de iluminancia obtenidos del modelo 3D.	139
FIGURA 70 Caso de Estudio 1 Calculo de Factor de luz de día mediante programa DFcalc.	140
FIGURA 71 Comparación de valores de FLD en Ventana 1.	141
FIGURA 72. Comparación de valores de FLD en Muro.	141
FIGURA 73 Caso de Estudio 2 Interior de salón de clases (A. Valeriano)	144
FIGURA 74 Caso de Estudio 2 Fachada poniente del edificio (A. Valeriano)	144
FIGURA 75 Caso de estudio 2 Planta del salón con ubicación de sensores	145
FIGURA 76 Caso de estudio 2 Gráfica solar (estereográfica) Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	145
FIGURA 77 Caso de estudio 2 Sensores sobre instalados en la fachada del salón. (A. Valeriano)	147
FIGURA 78 Caso de estudio 2 Iluminancia global vertical (EGV). Fachada poniente. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)	147
FIGURA 79 Caso de estudio 2 Porcentaje de pérdida de iluminancia por protecciones. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)	148

**CAPÍTULO 3 - APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA****PÁGINA**

---

FIGURA 80 Caso de estudio 2 luminancia sobre las superficies verticales en el interior del salón. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)	149
FIGURA 81 Caso de estudio 2 Iluminancia horizontal en el interior del salón - Fotómetros junto a la ventana. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)	150
FIGURA 82 Caso de estudio 2 Iluminancia horizontal en el interior del salón - Fotómetros junto al muro. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)	150
FIGURA 83. Caso de estudio 2 Comparación de valores de Iluminancia horizontal Fotómetros junto a ventana y muro. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)	151
FIGURA 84 Caso de Estudio 2 Captura de video – Interior del salón 17 horas. (A. Valeriano)	152
FIGURA 85. Caso de Estudio 2 Valores de Factor de luz de día - Fotómetros junto a la ventana. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)	153
FIGURA 86 Caso de Estudio 2 Valores de Factor de luz de día - Fotómetros junto al muro. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)	153
FIGURA 87 Caso de Estudio 2 Secuencia de fotografías digitales del salón de clases para la obtención de la imagen HDR. (A. Valeriano)	154
FIGURA 88 Caso de Estudio 2 Imagen HDR de salón de clases en gama de colores y su escala de valores de luminancia. (A. Valeriano)	154
FIGURA 89. Caso de Estudio 3 Planta del Taller de Arquitectura Universidad Marista (S/E)	158
FIGURA 90 Caso de Estudio 3 Cortes longitudinales del Taller de Arquitectura Universidad Marista (S/E)	158

---

**CAPÍTULO 3 - APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA****PÁGINA**

FIGURA 91 Caso de estudio 3 Vista Norte del Taller de (A. Valeriano)	159
FIGURA 92 Caso de estudio 3 Vista Sur del Taller de (A. Valeriano)	159
FIGURA 93 Caso de Estudio 3 Acabado No. 1 - Tabique vidriado (A. Valeriano)	160
FIGURA 94 Caso de Estudio 3 Acabado No. 2 - Piso de concreto pulido (A. Valeriano)	160
FIGURA 95 Caso de Estudio 3 Acabado No. 3- Tela (A. Valeriano)	160
FIGURA 96. Planta del Taller de Arquitectura Universidad Marista con valores de iluminancia (lux).	161
FIGURA 97. Serie de fotografías para la obtención de la imagen HDR	162
FIGURA 98 Caso de estudio 3 Taller de arquitectura en Imagen HDR con curvas de iluminancia y sus valores correspondientes.	163
FIGURA 99 Caso de Estudio 3 Render con distribución luminosa y valores de luminancia.	164
FIGURA 100 Caso de Estudio 3 Render con contornos de iluminancia	164
FIGURA 101 Caso de Estudio 3 Gráfica de la impresión general del espacio.	168
FIGURA 102 Caso de Estudio 3 Gráfica de condiciones de confort del espacio.	168
FIGURA 103 Caso de Estudio 3 Gráfica de los aspectos para considerar un espacio agradable.	169

**CAPÍTULO 3 - APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA****PÁGINA**

---

FIGURA 104  
Caso de Estudio 3  
Gráfica de los niveles de satisfacción para cada uno de los puntos  
evaluados.

169

---

FIGURA 105  
Caso de Estudio 3  
Gráfica de los niveles de satisfacción de iluminación

170

---

FIGURA 106  
Caso de Estudio 3  
Gráfica de opinión. Si las condiciones de iluminación facilitan las  
condiciones de trabajo.

170

---

FIGURA 107  
Caso de estudio 3  
Gráfica de modificaciones a las condiciones del nivel de iluminación  
bajo tres condiciones distintas de trabajo.

171

**ANEXO 2 - REPORTE DE CALIBRACIÓN****PÁGINA**

---

FIGURA A-1  
Base para calibración de fotómetros.

200

---

FIGURA A-2  
Fotómetro de referencia ( $R_f$ )

201

---

FIGURA A-3  
Iluminancia Global Horizontal Referencia (No. 26)  
22 Septiembre de 2008

203

---

FIGURA A-4. Promedio de razones de variación.

204

## Tablas

<b>CAPITULO 1 - MARCO TEÓRICO</b>	<b>PÁGINA</b>
TABLA 1 Descripción de los 15 cielos estándar. (CIE, 2003)	23
TABLA 2 Comparativa de los valores de eficacia luminosa y error medio cuadrático para día despejado y nublado.	40
<b>CAPITULO 2 - METODOLOGÍA PROPUESTA</b>	
TABLA 3 Factores de mantenimiento (M) dependiendo de las condiciones de limpieza del espacio. (Baker 2002)	73
TABLA 4 Porcentajes de área de ventana respecto al área del piso para determinados valores de FLD promedio. (Edward 2001)	74
TABLA 5 Valores del Factor de luz de día recomendados. (CIBSE 1999)	85
TABLA 6. Componentes de cielo para cielo nublado CIE para ventanas verticales rectangulares con cristal claro. (BRE 1970)	87
TABLA 7. Tabla para la obtención de los valores de CRI (Reproducido de BRE 1970)	91
TABLA 8 Tabla de conversión ángulo de obstrucción al coeficiente "C" del CRI. (Reproducido de BRE 1970)	93
TABLA 9. Matriz de relaciones – dimensiones de ventana y punto de referencia	96
TABLA 10 Matriz simplificada de relaciones – dimensiones de ventana y punto de referencia	96
TABLA 11. Tabla de programas de computo para el análisis de iluminación (Alpuche 2009)	99

**CAPITULO 3 - APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA****PÁGINA**

---

TABLA 12 Caso de estudio 1 Valores para el cálculo de CRI.	129
--	-----

---

TABLA 13 Caso de estudio 1 Tabla comparativa de los valores del Factor de luz de día obtenidos por diferentes métodos..	141
---	-----

---

TABLA 14 Caso de Estudio 2 Valores promedio de Factor de luz de día para cada uno de los fotómetros.	152
--	-----

---

TABLA 15 Caso de Estudio 3 Valores de correlación de Pearson, significancia y casos para la variables: "satisfacción con las condiciones de iluminación" y "satisfacción general"	172
---	-----

---

TABLA 16 Caso de estudio 3 Valores de correlación de Pearson, significancia y casos para variables "satisfacción con las condiciones de iluminación" y "confort percibido por los usuarios"	173
---	-----

---

**ANEXO 2 - REPORTE DE CALIBRACIÓN****PÁGINA**

---

TABLA A-1 Constantes de calibración	201
--	-----

---

TABLA A-2 Constantes de calibración iniciales a. Promedio de razones de variación b. Constantes de calibración nuevas	203
--	-----

---



# INTRODUCCIÓN



En el año de 1966 Hopkinson publicó el libro que es considerado hoy en día como “La Biblia de la iluminación natural”. En el primer capítulo de este volumen el autor escribió las siguientes líneas:

**“La iluminación natural es un regalo de la naturaleza. El hombre civilizado aprende a usar las fuentes de luz artificial que lo liberan totalmente de la dependencia de la luz natural, pero también aprende a apreciar el valor de la luz natural y ser consciente de sus ventajas especiales.”**<sup>1</sup>

Con estas palabras el autor estableció muchos de los principios que rigen el estudio de la iluminación natural hasta nuestros días, pero que, durante muchos años no se tomaron en cuenta por los arquitectos, ingenieros y diseñadores. De hecho, el libro “Daylighting” es poco o nada conocido entre el grupo de profesionales dedicados a la construcción y actualmente ha tenido poca influencia en el diseño de los edificios.<sup>2</sup>

Muchos arquitectos asumen que el uso de la luz natural es un aspecto que reside en el sentido común y la experiencia. Otros lo ven como un aspecto que se resuelve en el diseño de las fachadas, por lo tanto el uso de la luz natural se basa en el uso de reglas de geometría, proporción, diseño, composición, modulación y aspectos constructivos. Para esto los arquitectos utilizan patrones estilísticos y formales imitando ejemplos precedentes.

Cuando no es así, los arquitectos utilizan como parámetros aquellos que dictan las normas y reglamentos donde se establecen los criterios mínimos para la utilización de la luz natural. El uso de la iluminación artificial ayudó durante muchos años a “ocultar” o minimizar los efectos negativos que provocaban los errores u omisiones de los arquitectos y constructores. Solo mediante el creciente interés por el ahorro de energía y los nuevos conocimientos en materia de salud y confort visual, el diseño y la utilización de la iluminación natural ha vuelto a ser tema de estudio dentro de la arquitectura.

Al igual que otros fenómenos físicos que interactúan en las edificaciones, la luz natural ha sido objeto de estudio no sólo desde el punto de vista compositivo y perceptual, sino desde el punto de vista físico. Esto ha contribuido a que en años recientes el uso de la luz natural en la arquitectura se estudie y aplique con un enfoque científico-tecnológico y no solo como un aspecto estético. Bajo la perspectiva de abordar el tema de la luz natural desde el punto de vista científico tecnológico y su influencia en la arquitectura, se presenta este informe de investigación que se enfoca la evaluación de las herramientas utilizadas en el diseño de la iluminación natural en la arquitectura.

---

<sup>1</sup> HOPKINSON, R.G., Peterbridge, P., Longmore, J., *Daylighting*. Heinemann, Reino Unido, 1966.

<sup>2</sup> BAKER, N., et al., *Daylight design of buildings*, James & James, Inglaterra, 2002, pp. IX.

Por su naturaleza este trabajo de investigación está dirigido principalmente a aquellas personas que deseen obtener mayor información sobre el recurso de la luz natural. Para los profesionales de la arquitectura, el diseño, ingeniería en iluminación y cualquiera que tenga interés en el tema le resultará de gran utilidad debido a que se presenta información inédita sobre la disponibilidad y caracterización de la luz natural en la Ciudad de México. Esta información resulta fundamental e indispensable para la realización de cualquier estudio, evaluación y análisis que se haga sobre la luz natural y su comportamiento en los espacios urbano arquitectónicos.

Para los estudiantes de arquitectura resultará una herramienta muy útil debido a que se presenta toda una metodología de análisis, evaluación y cálculo de la iluminación natural, misma que puede ser implementada como herramienta auxiliar durante el proceso de diseño. De forma particular y con la información y la metodología aquí contenida, así como las herramientas propuestas, el estudiante podrá hacer evaluaciones del posible comportamiento de luz natural en espacios arquitectónicos. Con la ayuda del documento y los ejemplos que se presentan, auxiliados con los programas de cómputo, tanto los alumnos como los profesionales podrán evaluar el comportamiento lumínico de un espacio arquitectónico. Mediante el estudio y aplicación de dichas herramientas se facilitará la comprensión de las variables que influyen en el desempeño lumínico de un espacio, desde las condiciones del cielo y la posición del sol, hasta la geometría de la ventana y la ubicación del punto de referencia estudiado, por citar algunas.

Aquellas personas interesadas en los estudios y evaluaciones post-ocupacionales encontrarán en los casos de estudio presentados en este documento, información referente cada una de las etapas que se llevan a cabo para la realización de mediciones in situ o en su defecto en modelos a escala. Se presentan diferentes metodologías para llevar a cabo la planeación, instalación, puesta en marcha, adquisición y procesamiento de datos, así como la elaboración del reporte de las evaluaciones y experimentos.

La relación entre la salud física y psicológica con la arquitectura se aborda bajo el concepto de que cualquier espacio arquitectónico es un envolvente que contiene las interacciones de varios fenómenos físicos, entre ellos la luz. Por lo tanto, el diseño de este envolvente deberá propiciar que estas interacciones produzcan en las personas sensaciones positivas (confort, seguridad) y que no afecten su salud. En el apartado referente a salud humana se establecen algunos descubrimientos en materia de psicología y la relación que guarda con la luz natural. Por lo tanto aquellas personas que estén interesadas en conocer los efectos tanto negativos como positivos de la luz, podrán encontrar en este documento información concreta sobre la importancia de la exposición del ser humano a la luz natural.

A pesar de que la información contenida trata de abarcar la mayor cantidad posible de temas relacionados con la luz natural, no se trata de presentar un resumen de todas las ventajas que conlleva la correcta utilización de la luz natural en las edificaciones, sino de presentar aquellas herramientas de las que se puede valer el arquitecto para utilizar de forma adecuada la luz natural.

Al hablar de “el recurso” se refiere al estudio de las características de la luz natural en la Ciudad de México, debido a que como cualquier otro fenómeno físico natural, presenta variaciones dependiendo de la localidad donde se estudie. Bajo la idea de que la luz natural tiene un comportamiento distinto en la Ciudad de México o en Inglaterra, se analizan las variaciones que presenta la luz natural de forma cuantitativa y cualitativa. Esto se puede resumir bajo el siguiente enunciado: para utilizar un recurso, primero se debe conocer y evaluar; solo así, es posible aplicarlo. Debido a lo anterior la finalidad de esta tesis es incrementar el conocimiento que se tiene sobre este fenómeno físico y la interacción que presenta con los espacios arquitectónicos. Mediante el estudio de la disponibilidad de Luz Natural en la ciudad de México, las evaluaciones y experimentos se podrá conocer su potencial de utilización así como las desventajas que puede acarrear su uso incorrecto.

## OBJETIVOS

Los objetivos que se plantean en esta investigación y que permitirán guiar los trabajos a realizar y hacer una evaluación final son los siguientes:

A) General:

***Validar los métodos de cálculo de iluminación natural para su utilización en la Ciudad de México.***

B) Específicos:

- Instalación de un observatorio de iluminación natural para registrar los niveles de iluminación global y difusa en planos horizontales y verticales.
- Generar una base de datos de los niveles de iluminación natural en la Ciudad de México.
- Explicar el comportamiento de la iluminación natural en la Ciudad de México.
- Hacer un análisis estadístico de los registros para llegar a una síntesis que permita su fácil interpretación y aplicación.
- Analizar los métodos de cálculo de iluminación natural desarrollados en Inglaterra, desde su origen y desarrollo hasta su aplicación en proyectos arquitectónicos.
- Evaluación de diferentes espacios arquitectónicos para corroborar la validez de los métodos de cálculo de iluminación natural.

## HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

La hipótesis de este trabajo de investigación es la siguiente:

***El método del Factor de luz de día es válido y confiable para su utilización en la Ciudad de México y se puede aplicar como un criterio de diseño y herramienta de cálculo de iluminación natural en los espacios arquitectónicos.***

## REFERENCIAS - INTRODUCCIÓN

---

<sup>1</sup> **HOPKINSON, R.G., Peterbridge, P., Longmore, J.,**  
*Daylighting*. Heinemann, Reino Unido, 1966.

<sup>2</sup> **BAKER, N., et al.,** *Daylight design of buildings*,  
James & James, Inglaterra, 2002, pp. IX.

# MARCO TEÓRICO

# 1

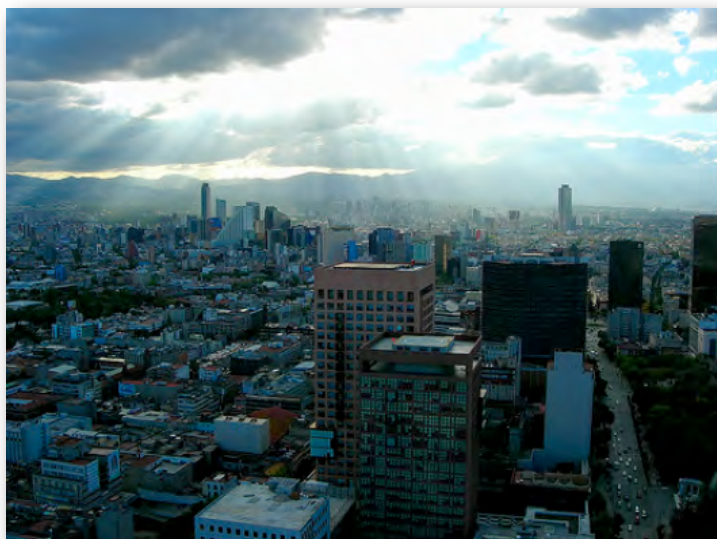
- 1.1 ILUMINACIÓN NATURAL EN ARQUITECTURA
- 1.2 CALIDAD DE LA LUZ NATURAL
- 1.3 LUZ NATURAL Y SALUD DEL SER HUMANO
- 1.4 EXPOSICIÓN DEL SER HUMANO A LA LUZ NATURAL
- 1.5 ILUMINACIÓN NATURAL Y PRODUCTIVIDAD LABORAL
- 1.6 LA LUZ NATURAL EN EL AMBIENTE ESCOLAR
- 1.7 CONDICIONES EXTERIORES
- 1.8 DISPONIBILIDAD DE LUZ NATURAL
- 1.9 EFICACIA LUMINOSA EN LA CIUDAD DE MÉXICO
- 1.10 COMPONENTES DE LA LUZ NATURAL
- 1.11 DISTRIBUCIÓN DE LA LUZ NATURAL DIURNA Y LA INFLUENCIA DE LA FORMA Y POSICIÓN DE LAS VENTANAS
- 1.12 NORMATIVIDAD SOBRE EL USO DE LA LUZ NATURAL
- 1.13 ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL CÁLCULO DE LA LUZ NATURAL EN ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS

## 1.

## MARCO TEÓRICO

## 1.1. ILUMINACIÓN NATURAL EN ARQUITECTURA

La utilización de la luz natural en la arquitectura puede estudiarse desde dos puntos de vista: el primero como arte, emociones y sentimientos. El segundo; como ciencia, tecnología y funcionalidad. De manera histórica estas dos corrientes se han entrelazado, pero desde la invención y utilización de la luz artificial se ha ido separando y esto ha ocasionado que se haya perdido esta visión holística del uso de la luz natural y el papel que juega dentro de la arquitectura. Esta misma separación también ha permitido un aumento del conocimiento de fenómeno científico que es la luz. Es solo mediante la creación de obras maestras de arquitectura que recordamos el carácter dual (poético y científico) que se puede alcanzar mediante la utilización de la luz. Sin hacer un repaso completo por la historia de la arquitectura se plantea algunas circunstancias que han contribuido a que en años recientes el estudio de la luz natural haya recibido mayor atención.



< **FIGURA 1**  
Vista aérea de la Ciudad de México en la zona centro.

La luz natural fue la principal fuente de luz hasta antes del siglo XIX con la aparición de las lámparas que utilizaban combustibles fósiles como el gas y que posteriormente fueron sustituidas a principios del siglo XX por las lámparas de energía eléctrica. Antes de todo esto, el fuego, las velas y lámparas de aceite o petróleo fueron las fuentes de luz que iluminaron calles y espacios interiores, sin embargo los humos y olores que se producían fomentaron la búsqueda de nuevas fuentes de energía para producir luz.

Para el año de 1900 la electricidad ya era una fuente de energía "limpia" utilizada para iluminar y activar otros aparatos y maquinas que necesitaba motores para poder funcionar. El estudio de la iluminación como una ciencia se forjó a principios del siglo XX con la conformación de la Comisión Internacional de Iluminación, CIE (Comisión Internacional d' Eclairage), en el año de 1904. Esta comisión es la encargada del desarrollo de los conocimientos sobre la luz, así como de emitir las normas y estándares a nivel internacional sobre el tema.

Con el desarrollo de la ciencia y tecnología en materia de iluminación artificial en combinación con otras tecnologías como el aire acondicionado se abrieron nuevos caminos para la creación arquitectónica. La arquitectura finalmente adquirió una independencia total de las condiciones exteriores que dictaba el sitio. Los aspectos climáticos se convirtieron en factores despreciables ya que los edificios podían estar iluminados y climatizados de forma constante e uniforme.

El avance tecnológico en materia de acero y el vidrio permitió, además, la experimentación con nuevos lenguajes formales. Así aparecieron las grandes aperturas en fachadas y los "muros cortina" en edificios de gran altura que se construyeron gracias a la rapidez, flexibilidad y ligereza que permite la combinación vidrio-acero. Todo esto provocó un gran impacto en la arquitectura moderna debido a que la utilización de los materiales y métodos constructivos generaron una nueva forma de diseñar y construir. Las fachadas cubiertas en su totalidad de cristal se hicieron muy populares a pesar de que en esta búsqueda de "nuevos lenguajes" se obtuvieron otros efectos no tan agradables. Los deslumbramientos y reflejos, así como las ganancias y pérdidas de calor excesivas provocadas por las aperturas son algunos de los efectos negativos que hasta hace unos años fueron minimizados con el uso de dispositivos de control artificial.

El uso del aire acondicionado y las persianas fueron las medidas de mitigación más socorridas ante esta nueva tendencia de la arquitectura, sin embargo nunca se tomó en cuenta que provocaban, respectivamente, excesivos gastos en energía y demeritaban el aspecto de las construcciones y su propiedad estética de transparencia. La falta de consideración hacia la luz natural no fue vista, durante muchos años, como un aspecto negativo. Para resolver los problemas los arquitectos y constructores confiaron en la tecnología y sus beneficios, sin considerar los costos de la energía y el bienestar de los usuarios. La abundancia de las fuentes de energía y se asequible costo, permitieron la proliferación de construcciones que dependían totalmente fuentes de energía artificiales para iluminar y acondicionar térmicamente los espacios.

Al mismo tiempo que sucedía esto, los estudios y el avance de la ciencia permitió generar nuevos conocimientos acerca de la naturaleza y características de luz. Se pudo cuantificar la disponibilidad de este recurso haciendo posible el desarrollo de herramientas que permitieran hacer estimaciones de la cantidad y calidad de la luz natural en el interior de los espacios. De forma paralela los avances en ciencias médicas y psicológicas revelaron las cualidades y los beneficios que conlleva el uso de la luz natural para iluminar los espacios y se pudo determinar los parámetros adecuados para poder desarrollar actividades cotidianas se forma saludable y sin depender de fuentes artificiales.<sup>3</sup>

Esta información permite tener el conocimiento básico acerca de la naturaleza de la luz que es el fundamento para hacer cualquier diseño de iluminación. De la misma manera en que el arquitecto dimensional los espacios en los cuales se pueden desarrollar ciertas actividades, en el caso del diseño de iluminación, los niveles de iluminación están dados por la actividad que se va a realizar en dicho espacio, dependiendo de las "tareas visuales" a realizarse.

---

<sup>3</sup> **BOYCE, PR.**, Hunter, C., Howlett, O., *The Benefits of daylighting through Windows*, US Department of Energy, EUA, 2003. pp. 2.

Aunado a este aspecto funcional esta el "operacional" que se refiere a los horarios en los cuales se pueden satisfacer esos requerimientos con la utilización de la luz natural. Todo esto, sin dejar de lado los aspectos estéticos característicos de cualquier diseño arquitectónico. Sin embargo no es posible afirmar que un espacio que cuente con los niveles de iluminación adecuada sea un espacio agradable y funcional desde el punto de vista lumínico. Mediante los conocimientos y las herramientas que aportan la ciencia y tecnología, es posible darle a los arquitectos el criterio para entender aquellas variables que hacen de un lugar un espacio funcional, estético, estimulante, saludable y bien iluminado.

En síntesis, la luz natural ha sido considerada como un aspecto puramente estético y por otro lado, como un requerimiento funcional que debe ser cumplido. Sin embargo el estudio de la luz natural debe ser abordado bajo esta doble perspectiva. El diseño de la iluminación debe contemplar los aspectos estéticos y técnicas que reduzcan la dependencia a fuentes artificiales de luz. Esta amalgama entre cantidad y calidad de luz natural es el medio por el cual se puede alcanzar una de las metas de toda arquitectura, debido a que el diseño de iluminación lleva implícito la combinación entre ciencia y arte. Aunque existen muchos factores a considerar en el diseño de iluminación, Stein y Reynolds<sup>4</sup> enumeran algunos de los que consideran más importantes y los separan en dos grandes grupos.

De forma cuantitativa:

1. La luz natural y su incorporación e integración con la luz artificial.
2. La interrelación entre los aspectos energéticos de la luz artificial y natural, calefacción y refrigeración.
3. El efecto de la iluminación en la configuración espacial interior y viceversa.
4. En caso de requerirse, la manera de generar y utilizar iluminación artificial así como sus características.
5. Los requerimientos visuales de los usuarios y las actividades que desarrollan.
6. Los efectos de la brillantez y su influencia en la claridad visual.

De forma cualitativa:

1. La ubicación, interrelación y los efectos psicológicos de los juegos de luz y sombras, así como la brillantez y los reflejos.
2. El uso del color, su combinación con la luz y las superficies, así como los efectos que se producen en sus interacciones.
3. Los efectos artísticos que se pueden producir, los juegos de luces y sombras así como los cambios de tono e intensidad inherentes de la luz natural.
4. Los efectos psicológicos y fisiológicos de la iluminación, particularmente en espacios que son utilizados en periodos prolongados.

---

<sup>4</sup> **STEIN, Benjamin**, et al., *Mechanical and electrical equipment for buildings*, 9ª ed., John Wiley and Sons, E.U.A., 2000, pp. 1049



Como se puede ver el diseño de iluminación es un tema muy amplio y que requiere de un gran conocimiento de las variables que se ven involucradas y que interactúan con la envolvente arquitectónica. El resultado final será producto de un gran número de respuestas que el arquitecto debe plantear y decisiones que debe tomar fundamentadas en su sensibilidad artística y bases científicas.

***[...] Ésta es la razón por la que la tecnología y la arquitectura están tan estrechamente relacionadas. Nuestra verdadera esperanza es que crezcan juntas, que algún día una sea la expresión de la otra. Sólo entonces tendremos una arquitectura digna de su nombre: una arquitectura como símbolo verdadero de nuestro tiempo.”***<sup>5</sup>

---

## 1.2. CALIDAD DE LA LUZ NATURAL

---

Como se verá más adelante, el factor de luz de día es, en términos proporcionales, la medida de iluminación natural en un determinado plano de referencia en el interior del edificio. Pero como se ha dicho, hay ciertas cualidades de luz que, además de su efecto en la capacidad para ver, contribuyen a determinar las cualidades espaciales. Estos aspectos subjetivos son muy complejos y poco estudiados. Se han llevado a cabo intentos de poder determinar métodos de estimación que pueden otorgar importancia numérica a dichos factores cualitativos.<sup>6</sup> Entre los fenómenos subjetivos de la iluminación el deslumbramiento es uno muy importante debido a sus efectos. El CIE lo define así:

***“Una condición de la vista en la que hay malestar o reducción de la capacidad para ver los objetos, o ambos a la vez, debido a una inconveniente distribución de la luz o acentuados contrastes en espacio”***<sup>7</sup>

Hay dos clases de deslumbramiento: el incómodo y el que provoca malestar. El deslumbramiento incómodo se define como un deslumbramiento que debilita la capacidad para ver los objetos, sin causar necesariamente molestia. El deslumbramiento incómodo ocurre en un interior cuando el resplandor causa un efecto de “velo” que oscurece la visión de los objetos próximos a la fuente del deslumbramiento. En el caso del deslumbramiento con malestar se define como aquel que causa malestar sin entorpecer la visión de los objetos. En los espacios interiores este tipo de deslumbramiento puede provocar sensaciones de distracción, fastidio, confusión e incluso dolor, resultado de grandes áreas de excesivo resplandor percibido por los usuarios.

---

<sup>5</sup> VAN DER ROHE, Mies, *Architecture and Technology*, Arts and Architecture, 1950, No.10.

<sup>6</sup> BLANCO, Manuel J., *Psicofísica*, Universitas, España, 1996.

<sup>7</sup> BECKETT, H.E., *Ventanas: Función, diseño e instalación*, Gustavo Gili; España, 1978. pp. 14.

---

### 1.3. LUZ NATURAL Y SALUD DEL SER HUMANO

---

En este documento se consideran algunos de los impactos que tiene la iluminación natural sobre el desempeño de las actividades del ser humano, la relación que tiene su correcta utilización en los edificios y las consecuencias de su aplicación para en el uso eficiente de la energía y la salud de las personas. Basados en una revisión de la literatura sobre el tema Peter Boyce resume los aspectos más importantes sobre la luz mediante las siguientes afirmaciones:<sup>8</sup>

- Hablando en términos Físicos, la luz natural es una fuente de radiación electromagnética en el rango visible.
- Las fuentes de iluminación artificial pueden ser construidas de manera que asemejen el espectro de la luz natural, pero no se han construido instrumentos que iguallen las variaciones y el comportamiento de la luz natural.
- Desde el punto de vista de la salud fisiológica, la iluminación natural es un estimulante muy efectivo para el sistema visual y cardiaco del ser humano.
- Psicológicamente, la iluminación natural y los efectos que produce en el ser humano son más favorables para su bienestar comparados con los efectos de la luz artificial.
- La iluminación natural aumenta de manera considerable la posibilidad de desarrollar las actividades cotidianas del ser humano de una forma más adecuada que con una fuente de iluminación artificial. Sin embargo nada garantiza que la iluminación natural siempre sea mejor para maximizar el desempeño visual.
- La luz natural puede causar molestias mediante el deslumbramiento y la distracción que provoca, además de producir reflejos y sombras que disminuyen el rendimiento de las tareas visuales. Estas conclusiones también se aplican para la iluminación artificial.
- El desempeño de las actividades visuales o no visuales pueden ser afectadas por una perturbación al sistema circadiano o ritmo biológico. Este tipo de perturbación trae como consecuencia problemas de salud a largo plazo.
- La exposición a luz natural durante el día y su ausencia durante la noche ayuda al ajuste del ritmo biológico.

Al hablar de la salud de las personas, en esta parte del documento se mencionan algunas de los descubrimientos recientes sobre las afectaciones desde el punto de vista fisiológico y psicológico. En el caso de la salud psicológica encontramos que desde el año de 1984 Norman Rosenthal estableció la existencia de un desorden afectivo estacional (SAD, por sus siglas en inglés) que provocaba en las personas alteraciones en el estado de ánimo.<sup>9</sup> Estos estudios causaron gran impacto debido que este padecimiento se relacionó por primera vez con las condiciones de iluminación. El SAD se define como un síndrome que se caracteriza por depresiones recurrentes que se presentan anualmente en la misma época del año.

---

<sup>8</sup> **BOYCE, PR.**, *op. cit.*, 2003. pp. 3.

<sup>9</sup> **ROSENTHAL, Norman**, *et al.*, *A Description of the Syndrome and Preliminary Findings With Light Therapy*, *Archives of General Psychiatry*, 1984; vol. 41(1), pp. 72-80.

El cuadro que presentan aquellas personas que padecen este desorden se caracteriza por un desorden afectivo bipolar. Estas depresiones son generalmente caracterizadas por hipersomnia e ingesta de alimentos excesiva. Este padecimiento responde también a cambios en las condiciones del clima de la región. Durante muchos años se han estado estudiando técnicas y tratamientos para esta enfermedad,<sup>10</sup> siendo las más eficientes hasta el momento, las que han incorporado la exposición de los pacientes a fuentes de luz, ya sea artificial o natural.<sup>11</sup>

A partir de estas investigaciones y muchas más que se han desarrollado en torno a este tema, es posible afirmar que los espacios desempeñan un papel fundamental en la salud de las personas. En especial la iluminación natural, que hoy en día es vista como un elemento que debe estar presente en cualquier espacio habitable, independientemente de su función. La luz natural ha pasado de ser una simple amenidad a ser un elemento imprescindible para los espacios, no solo porque permite desarrollar actividades visuales, también es un elemento que para muchas personas es sinónimo de bienestar. Todas estas ideas están reflejadas en los estudios y reflexiones hechas por Torrington y Tregenza<sup>12</sup>, quienes desarrollaron un estudio minucioso de la relación luz, arquitectura y salud. A partir de una serie de investigaciones bibliográficas, vistas y entrevistas, concluyen que los edificios pueden proveer más que un simple refugio contra los efectos del medio y pueden ser elementos terapéuticos y pueden además, ser un factor para que los pacientes con enfermedades crónicas desarrollen actividades agradables que mejoren su salud. Con un enfoque muy similar se encuentran los estudios desarrollados por la Academia de Neurociencias para la Arquitectura (ANFA por sus siglas en inglés) con sede en la ciudad de San Diego California, (E.U.A.). Las líneas de investigación en las que trabaja esta asociación pueden encontrarse en el artículo publicado por John Eberhard<sup>13</sup> (fundador de la ANFA) entre las que destaca los impactos a nivel cerebral, de los fenómenos físicos presentes en los espacios, entre ellos, la luz natural.

Gracias a las últimas investigaciones sabemos que las diferentes condiciones de iluminación pueden cambiar el humor de las personas en el interior de las edificaciones sin embargo no existen recetas simples para determinar qué condiciones de iluminación provocan el "buen humor" o la salud mental en las personas. Las ventanas son muy utilizadas en los espacios arquitectónicos para proveer iluminación natural, estas proporcionan luz y contacto visual hacia el exterior. El "buen humor" que las ventanas pueden producir en las personas depende de las preferencias individuales, así como de sus expectativas. Para la gente que prefiere la luz natural pero que se ha acostumbrado a un lugar poco o mal iluminado, trasladarse a un espacio más y mejor iluminado puede reflejarse en una mejora del estado de ánimo, que irá disminuyendo de manera paulatina con del paso del tiempo. Por otro lado, para las personas que están acostumbradas a espacios con buena iluminación natural, el hecho de estar

---

<sup>10</sup> **TERMAN**, et al., *Light therapy for seasonal affective disorder: A review of efficacy*, *Neuropsychopharmacology*, 1989; vol. 2(1), pp. 1-22.

<sup>11</sup> **LURIE, S.**, et al., *Seasonal affective disorder*, *American Family Physician*, 2006, vol. 74(9), pp. 1521-1524.

<sup>12</sup> **TORRINGTON, J., Tregenza, P.**, *Lighting for people with dementia*, *Lighting Research & Technology*, 2007, vol. 39(1), pp. 81-97.

<sup>13</sup> **EBERHARD, John**, *Applying Neuroscience to Architecture*, *Neuron*, 2009, vol. 65, pp. 753-756.

presentes en espacio que no cumplen con sus expectativas puede resultar en una disminución de su buen humor y estado de bienestar. La forma en que el buen humor influye en la productividad de las personas ha sido estudiado sin llegar a conclusiones puntuales que determinen soluciones infalibles. A pesar de ello existen diferentes estudios<sup>14-15</sup> que han enfatizado que el estado de felicidad de los trabajadores y los usuarios de los edificios, así como su estado de bienestar y satisfacción, influyen en la productividad de las empresas. El problema básico para la iluminación natural es que el "buen humor" es producido y afectado por un gran número de variables, más allá de una buena o mala iluminación; de tal manera que la luz natural puede ser relegada por otra de estas variables. Por otro lado, en México ya se han realizado investigaciones sobre el tema en las cuales se incluyen conceptos como el de iluminación "biológico-dinámica" que consiste en simular las condiciones cambiantes de la luz natural como una forma de mantener los procesos biológicos humanos por medio de la luz, regular el ciclo circadiano y aumentar la productividad en los espacios de trabajo.<sup>16</sup>

La exposición a la luz natural puede tener efectos positivos y negativos en la salud de las personas. Los efectos más importantes ocurren en el exterior y estos efectos se presentan en el ser humano de dos formas. La primera es cuando la luz llega a la retina de los ojos por medio de nuestro sistema visual, dándose reacciones en el metabolismo y los sistemas endocrinos y hormonales. La segunda es cuando la luz interactúa con la piel (en una reacción parecida a la fotosíntesis) y se realiza la producción de la Vitamina D. Exponerse a la luz natural en un espacio abierto puede causar daños en los tejidos y en la piel. La luz del sol que pasa a través del vidrio de una ventana puede tener mucho menor cantidad de rayos y radiación ultra violeta (UV) de la que hay en el exterior, situación que puede minimizar el daño a las personas. En regiones geográficas en donde se presentan niveles elevados de radiación solar, como las regiones tropicales, este tipo de padecimientos se vuelven mucho más comunes. Aunque esta situación es muy conocida, gracias a estudios recientes<sup>17-18</sup> se ha demostrado que la sobreexposición a radiación solar y los rayos UV pueden ocasionar enfermedades graves en los ojos. Es importante destacar que estas afectaciones no solo se presentan bajo condiciones de insolación en un espacio exterior, sino que también pueden ser propiciadas por las condiciones que se dan en espacios interiores mal diseñados desde el punto de vista lumínico. Es ambientes interiores se pueden presentar efectos desagradables como deslumbramientos y reflejos excesivos, los cuales provocan afectaciones de dos tipos: fotobiológicas y bioquímicas, mismas que se derivan en enfermedades degenerativas como las cataratas seniles. Las conclusiones de los estudios apuntan que una forma de prevenir este tipo de padecimientos es mediante el

<sup>14</sup> **BOUBEKRI, Haghghat.,** *Windows and environmental satisfaction: A survey study of an office building*, Indoor and Built Environment, 1993; vol. 2(3), pp. 164-172.

<sup>15</sup> **KESSLER, R., et al.,** *Prevalence and effects of mood disorders on work performance in a nationally representative sample of U.S. worker*, American Journal of Psychiatry, 2006; vol. 163(9), pp. 1561-1568.

<sup>16</sup> **ARANDA Molina, Ana,** *Diseño de sistemas de iluminación biológico - dinámica: en áreas de oficinas en México*, Tesis de Maestría en Arquitectura, UNAM, México, 2009.

<sup>17</sup> **CASTELLANOS Bala, Elvia,** *Efectos de radiación solar sobre el ojo Humano*, Tesis de Especialidad en Oftalmología, Facultad de Medicina, UNAM, México, 2001.

<sup>18</sup> **SLINEY, D.,** *Photoprotection of the eye—UV radiation and sunglasses*, Journal of Photochemistry & Photobiology, 2001; vol. 64, pp. 166-175.

cuidado en el diseño de los espacios para evitar reflejos excesivo en las personas mientras desempeñas sus actividades.

La luz natural, así como las ventanas por las cuales se puede tener contacto del interior de un espacio hacia el exterior del mismo, son factores que reducen el estrés y el malestar. De tal manera que se puede afirmar que la luz natural reduce la incidencia de problemas de salud y la demanda de los servicios de salud general. Hablando particularmente de la salud visual, esta se puede beneficiar mediante la reducción a la exposición de las fluctuaciones rápidas (conocidas como "flicker") que se presentan en los dispositivos que generan luz artificial. Por todo lo anterior este trabajo de investigación se enfocó en el estudio de la luz natural y sus posibilidades de investigación para su posterior aplicación al campo del diseño arquitectónico, urbano - ambiental y de interacción entre la arquitectura y el medio.

---

#### 1.4. EXPOSICIÓN DEL SER HUMANO A LA LUZ NATURAL

---

Para poder estudiar la relación que existe entre la exposición de una persona a la luz natural y sus reacciones a nivel fisiológico y psicológico es necesario conocer la cantidad de luz natural que se esta recibiendo mediante los órganos receptores. Como se mencionó anteriormente, las dos formas en que la luz natural puede interactuar con los canales receptores del ser humano es mediante el ojo y la piel.

Esto trae como consecuencia que sea necesario conocer de forma mucho más precisa la cantidad de luz natural que recibe el ojo y por ende, las células fotosensibles. Para ello se han desarrollado una serie de instrumentos que cuantifican la cantidad de luz a la que esta expuesta una persona. Los métodos destinados a cuantificar la cantidad de luz que se presentan en los espacios se han concentrado en registrar la cantidad de luz que incide sobre las superficies (muros, piso, plafón) u objetos (mobiliario) dentro de los mismos. Hoy en día existen dispositivos que son capaces de medir la cantidad de luz que puede llegar a recibir una persona por medio de los ojos.<sup>19</sup> A diferencia de los procedimientos que existen en los cuales se monitorea la cantidad de luz que hay en un espacio arquitectónico, los métodos que incluyen sensores en los usuarios registran los niveles de iluminación que reciben los órganos receptores de luz. Esto es posible mediante un dispositivo de medición desarrollado por un grupo de investigadores del Centro de investigación en Iluminación, con sede el la ciudad de Nueva York. Toda esta investigación parte del fundamento de que la cantidad de luz que incide sobre la retina del ojo humano estimula la visión y también proporciona información sobre la hora del día. Esta información es fundamental para la regulación del "reloj biológico" o ciclo circadiano. El dispositivo "Daysimeter" desarrollado por este grupo de investigación esta compuesto por una serie de sensores montados en un soporte para la cabeza. El dispositivo es capaz de registrar de manera simultánea la radiación que afecta al sistema visual y el ciclo circadiano. Además de estos parámetros se puede

---

<sup>19</sup> **BIERMAN, A., Klein, Read.** *The daysimeter: a device for measuring optical radiation as a stimulus for the human circadian system*, Measurement Science and Technology, 2005, vol. 16, pp. 2292-2299.

registrar en un sistema de adquisición de datos, la posición y los movimientos de la cabeza. Estos dos últimos datos se correlaciona con el comportamiento y actividad del individuo y sus ciclo circadiano. Esto es posible gracias a que el dispositivo es capaz de medir la luz visible con tonos azules que se presenta en longitudes ondas electromagnéticas entre los 470 y 570 nm (nanometros).

---

### 1.5. ILUMINACIÓN NATURAL Y PRODUCTIVIDAD LABORAL

---

Las personas que estudian la psicología del trabajo y su relación con el rendimiento laboral, así como los psicólogos ambientales han estado interesadas en el vínculo que existe entre la luz natural y la productividad de las personas. Estos estudios iniciaron con Elton Mayo en los años 30's en oficinas de la compañía eléctrica en Chicago (Illinois, E.U.A.), donde se evaluaron aspectos como la productividad y el ambiente de trabajo poniendo especial atención en la iluminación. A partir de esto se dio un "resurgimiento" del interés en el estudio de la luz natural y el ambiente construido, incluyendo sistemas de fachadas, ventanas y cualquier elemento que pueda proveer de este recurso a un espacio interior. Esto se debe a los efectos de la luz natural en el desempeño laboral y escolar, y en general, al bienestar de las personas. La pregunta que ha sido punto de partida de las investigaciones realizadas es: ¿hasta qué punto la luz afecta de manera psicológica en el bienestar de las personas además de contribuir a desarrollar de forma adecuada tareas visuales?.

En las investigaciones relacionadas con el tema se ha encontrado que existe un punto de concordancia entre el desempeño visual y la sensación de satisfacción del usuario, misma que aumenta de forma proporcional al nivel de iluminación, sin embargo la cantidad de luz natural que puede recibir el ojo humano tiene un límite máximo. Se ha encontrado que para una misma tarea visual se puede requerir de un 20% menos iluminancia en condiciones de luz natural que con luz artificial. Esta diferencia se atribuye a las cualidades con las que cuenta la luz natural, a su carácter dinámico y distribución espectral. De la misma manera, la tolerancia a un estado de molestia visual ocasionado por la luz natural es mucho mayor al que se genera por fuentes artificiales de luz. Las cualidades espaciales y ambientales de un espacio de trabajo como lo pueden ser las vistas, la luz natural, la acústica, la privacidad, entre otras; son importantes puntos a considerar dentro del diseño del espacio y han sido temas de interés en las evaluaciones post-ocupacionales.

En muchos casos la luz natural y las vistas algunos de los temas que encabezan la lista de cualidades en orden de importancia que determinan los usuarios de los lugares de trabajo. Tal importancia de la luz natural se pudo comprobar mediante un estudio realizado en una compañía norteamericana en la cual los empleados se reubicaron en nuevas instalaciones que contaban con mejores condiciones de luz natural. A partir de este movimiento se reportaron incrementos en la productividad de hasta el 5% e incrementos en las ventas directas al consumidor de hasta 25% comparados con los mismos periodos de tiempo en las instalaciones anteriores.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> BOUBEKRI M., *Daylighting, architecture and health*, Architectural Press, Inglaterra, 2008, pp. 104.

Un caso similar presenta la gran cadena de tiendas Wal-Mart en los Estados Unidos de América, en donde a partir de 1993 con el lanzamiento del proyecto "ECO-Mart" se remodelaron varias tiendas incorporando sistemas de iluminación natural. Los resultados fueron positivos ya que en en aquellas zonas de las tiendas en donde se contaban con mejores condiciones de iluminación natural, las ventas se incrementaron notablemente, comparadas con tiendas en los mismos estados que no habían incorporado sistemas de iluminación natural.<sup>21</sup>

---

## 1.6. LA LUZ NATURAL EN EL AMBIENTE ESCOLAR

---

Las escuelas son un tipo de edificio que ha recibido la atención de psicólogos, ergonomistas y arquitectos, esto se debe a que es un espacio en el cual los resultados de las evaluaciones pueden ser demostrados y verificados. En el caso especial de los arquitectos se puede decir que es un género de edificio que necesita especial atención y cuidado en su diseño debido a que es aquí donde se puede determinar la forma en que se enseña y se aprende. Tanto arquitectos como diseñadores de iluminación han tomado gran interés en los ambientes de aprendizaje y particularmente en la forma en que los estudiantes son afectados por las condiciones de luz natural y artificial en los salones o espacios donde estudian. A lo largo de casi 30 años se han realizado estudios en distintos países para evaluar la forma en la que la luz natural y artificial influye en el rendimiento de los alumnos. Uno de los más importantes se concentró en analizar las pruebas realizadas por más de 21,000 alumnos en tres escuelas en los estados de California, Colorado y Washington en los Estados Unidos.<sup>22</sup> El estudio incluía un interés particular en la luz natural proveniente del techo (domos, tragaluces) como una forma de aislar los efectos de la iluminación de otras variables presentes en la luz natural proveniente de ventanas, como las vistas y la ventilación. En este estudio se tomó como referencia para medir el desempeño de los alumnos los datos de las autoridades educativas en materia de evaluación y se hizo un tratamiento estadístico y una correlación entre el rendimiento y la cantidad de luz disponible en los salones de clase.

Los resultados del análisis de las variables anteriores indican que los estudiantes que están en salones con mayor cantidad de luz natural tuvieron un progreso 20% más rápido en pruebas de matemáticas y un 26% en pruebas de lectura y comprensión. De estos resultados se realizó una correlación en el tipo de luz natural y se encontró que para salones con un área mayor de ventana existe una relación del 15-23%. Para los salones con domos y tragaluces existe una relación de 19-20% en el mejor desempeño escolar y en el caso de salones con ventanas operables, existe una relación de 7-8%. De la misma forma se han realizado comparaciones entre el rendimiento de estudiantes en escuelas cuya principal fuente de iluminación es la luz natural y se ha encontrado que el rendimiento es mayor, comparado con escuelas que dependen de la iluminación artificial para operar.

---

<sup>21</sup> **LERNER, Steve**, *Eco-Pioneers: Practical Visionaries Solving Today's Environmental Problems*, MIT Press, E.U.A., 1998, pp. 200

<sup>22</sup> **HERSCHONG MAHONE GROUP**, *Daylighting in schools: an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, California Board for Energy Efficiency third party program, E.U.A., 1999.

Sin embargo estos resultados no son determinantes para afirmar que la luz natural es el primer factor determinante que afecta el rendimiento escolar. En México se realizó un estudio para determinar cómo es que los aspectos físicos (incluyendo iluminación natural) afectan el rendimiento escolar.<sup>23</sup> Una de las conclusiones de este estudio es que no es posible establecer que sólo los aspectos ambientales físicos de los espacios destinados para el estudio sean suficientes y únicos para determinar el éxito o fracaso académico. Esto se debe a que existen muchos más factores que afectan la forma en que los alumnos estudian en los espacios educativos como lo son: procesos cognitivos, tipo de enseñanza por parte de los profesores, el material de estudio, etc.

Aunque la relación que existe entre el grado de satisfacción de los alumnos con el espacio de trabajo en la escuela se analiza con mayor detalle en el [Capítulo 2.8](#), es importante mencionar que el espacio como conjunto y sus factores físicos influyen en el comportamiento de los usuarios. En este punto radica la importancia de estudio de la luz natural como un elemento físico capaz de propiciar condiciones de habitabilidad, funcionalidad y confort que promuevan el desarrollo de actividades cognitivas. Más allá del rendimiento escolar es necesario establecer que la luz natural además de ser un elemento que influye en la funcionalidad del espacio es también un elemento que es considerado como indispensable para generar espacios saludables y seguros.<sup>24</sup> Esto se debe a que la cantidad de luz afecta la forma en que se percibe el espacio y genera sentimientos de seguridad en los alumnos. Por otro lado la luz afecta la habilidad de ver la información que se les presenta a los alumnos y les permite resolver tareas complejas más rápido. En especial la luz natural es mejor en calidad y cantidad, lo que representa una ventaja al momento de realizar actividades que requieren tareas visuales precisas.

---

## 1.7. CONDICIONES EXTERIORES

---

El punto de partida para entender los fenómenos físicos que interactúan en un espacio delimitado por una envolvente a la que llamamos arquitectura, es precisamente conocer la naturaleza del fenómeno. En el caso de la luz, conocer la naturaleza así como la disponibilidad de este recurso en una ubicación determinada es el primer paso para aprovechar sus cualidades y evitar su efectos adversos. Debido a que a partir de este punto se mencionaran algunos conceptos relativos a la luz natural es importante establecer algunas definiciones. El concepto más importante es el que se refiera a la fuente de la luz natural. El sol nos provee de luz natural en dos formas. Parte de la energía del sol alcanza la superficie de la tierra como luz directa, lo que comúnmente se conoce como "Rayo del sol", en términos más técnicos a este concepto se conoce como "Componente directo". La otra parte se dispersa por la atmósfera originando la tonalidad característica al cielo. Por este motivo se considera a la bóveda celeste como una fuente de luz natural y es conocida como "Componente difuso".

---

<sup>23</sup> **OLIVA Mendoza, Felix**, *Efectos del medio físico sobre el rendimiento escolar*, Tesis de maestría en Psicología Ambiental, UNAM, México, 2006.

<sup>24</sup> **GELLER, R., et al.**, *Safe and healthy school environments*, The Pediatric Clinics of North America, 2007, vol. 54, pp. 351-373.



La unión de los componente difuso y directo da como resultado la iluminancia global. Estos conceptos relativos a la iluminación surgen, a su vez, de los conceptos que se aplican al estudio de la radiación solar. Al hablar del flujo de la onda corta de la radiación proveniente del sol, a este se le divide en dos partes: la primera que corresponde al flujo que provienen directamente del sol y la segunda, correspondiente al flujo que se esparce en cada volumen elemental de la atmósfera.<sup>25</sup> A continuación se mencionan algunos conceptos fundamentales relativos a la luz natural, los cuales se presentan de forma resumida y concreta debido a que no es la intención de este documento el presentar un estudio exhaustivo sobre la naturaleza de la luz. Si el lector desea profundizar en el tema puede recurrir a la bibliografía proporcionada teniendo una mención especial el texto de Ana María Cetto<sup>26</sup> sobre la luz, su comportamiento y naturaleza.

- *Flujo luminoso.* Se define como la luz emitida por una fuente o que es recibida por una superficie. La unidad de medida del flujo luminoso es el Lumen (lm). Un Lumen es la cantidad de luz emitida en un ángulo solido por una fuente de una candela.

- *Intensidad luminosa.* Es definida como el poder de una fuente para emitir luz en una dirección determinada. Su unidad de medida es la candela (cd).

- *Iluminancia.(E)* Es el flujo luminoso incidente sobre una unidad de área. Se mide en luxes (lx) que equivale a un lumen por metro cuadrado. ( $1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$ ) . Como regla general se considera que la iluminancia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente luminosa y proporcional al coseno del ángulo que se generan entre la normal de la superficie y la dirección del rayo de luz.

- *Luminancia.(L)* Es la medida de la brillantez de una superficie. También se puede definir como la intensidad de la luz que emitida en determinada dirección por una superficie reflejante o área luminosa. La unidad de medida de la luminancia es la candela por metro cuadrado ( $\text{cd/m}^2$ )

- Una vez que la luz es dispersada por la atmósfera terrestre es posible hablar del concepto del *Distribución luminosa del cielo*, la cual, antiguamente era considerada como uniforme. Bajo esta idea y bajo una luminancia del cielo de:  $L(\text{cd/m}^2)$ , la iluminancia horizontal bajo un cielo sin obstrucciones esta determinada por la siguiente ecuación:  $E = \pi L$  . Hoy en día y debido al avance tecnológico de los instrumentos de medición se ha demostrado que la bóveda celeste tiene una distribución luminosa no uniforme. Sobre estos estudios y la distribución luminosa del cielo se hablará mas adelante.

Como arquitectos es necesario tener un entendimiento de las características y los factores que afectan a la iluminación natural. Este entendimiento puede ser adquirido por medio de la experiencia y el conocimiento que da el hecho de vivir y trabajar en una localidad. Sin embargo esta experiencia no es suficiente hablando en términos de la caracterización de la luz natural y en esos casos es necesario recurrir a los estudios científicos que permitan llevar a cabo un estudio más preciso del sitio. La característica más importante de luz natural es su

<sup>25</sup> **MUHLIA V., Agustín**, *Notas del curso: Solarimetría*, 30 Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Veracruz, Ver., México, 2006.

<sup>26</sup> **CETTO, Ana Mária**, *La luz: en la naturaleza y en el laboratorio*, Fondo de Cultura Económica, 3a. Edición, México, 2003.

variabilidad debido a que la fuente donde se origina es el sol. La disponibilidad de la luz natural en un lugar y tiempo determinado depende de los siguientes factores:

1. Posición del sol. Está determinado por la latitud del sitio, el día y la hora.
2. Los elementos del clima
3. Entorno físico natural y artificial: Condiciones del terreno, altitud, relieve, vegetación, edificaciones próximas y sus materiales.

La posición del sol se expresa en términos de su altitud sobre el horizonte y su ángulo de azimut. Este ángulo se define como el ángulo en plano horizontal medido desde el norte. Tanto el azimut como la altitud se expresan en grados. A este conjunto de conocimientos se le conoce como geometría solar y permite conocer con precisión la ubicación del sol dependiendo de la hora, la fecha y la ubicación geográfica. Conocer la posición del sol así como su movimiento aparente dependiendo de la localidad, son requisitos indispensable para poder hacer estudios sobre iluminación natural, diseños solares pasivos y diseños de dispositivos de control solar.

Los elementos del clima son más difíciles de conocer debido a su naturaleza cambiante y únicamente pueden ser estimadas bajo un procedimiento estadístico basados en información histórica de las infinitas combinaciones de los factores que prevalecen en una localidad. Por lo tanto el factor ambiental tiene que ser considerado basándose únicamente en los datos climáticos disponibles en estaciones meteorológicas.<sup>27</sup> El clima es el resultado de la variación de sus factores y elementos, así como de las combinaciones que de esta variación resultan. Estos elementos del clima son: la temperatura, precipitación pluvial, humedad, dirección y velocidad del viento, composición y pureza del aire, radiación solar, nubosidad, visibilidad, presión atmosférica. Es importante analizar estos elementos debido a que la cantidad de luz natural que llega a la superficie terrestre depende de la acción simultánea de las interacciones de estos elementos. Por este motivo se pueden presentar drásticas modificaciones a los niveles de iluminación dependiendo de las condiciones climáticas. Por citar un ejemplo, encontramos que en las zonas rurales se pueden encontrar cielos más limpios que en condiciones urbanas.

En lo que se refiere al entorno físico natural y artificial, se toman en cuenta las características del terreno y construcciones que pueden reducir la iluminación por medio de obstrucciones y sombras, en determinados periodos del día o del año. En este punto es importante mencionar que las obstrucciones no solo impiden la incidencia solar directa sino también pueden obstruir parte de la bóveda celeste y a su vez reducir la iluminación que de forma difusa puede llegar al interior de los espacios. Como se verá en el [Capítulo 1.10](#) esta condición ya había sido establecida desde hace 2000 años por el famoso tratadista romano Vitruvio. En caso contrario, el entorno físico pueden aumentar los niveles por medio de la reflexión, esto es posible cuando dicha obstrucción es más brillante que la parte del cielo que esta bloqueando. Desafortunadamente esta situación se da durante horas y épocas del año muy específicas, además de que intervienen otros factores que no es posible controlar como la forma de las obstrucciones así como sus materiales.

---

<sup>27</sup> STEIN, Benjamin, *et al.*, *op. cit.*, pp. 1114.

Debido a que el tema central de este trabajo son las herramientas para hacer una estimación de la iluminación natural en interior de los espacios, es importante establecer que para efectos de cálculo y de forma general se consideran las siguientes condiciones de cielo: Cielo nublado, cielo despejado y Cielo parcialmente nublado. Esta clasificación general de tres tipos de cielo fue utilizada durante mucho tiempo para hacer los estudios de iluminación natural, sin embargo los investigadores se dieron cuenta que la gama de posibilidades de condiciones de cielo eran mucho mayores y en muchas partes del mundo se presentaban condiciones de cielo muy diferentes a las consideradas por la clasificación general de tres tipos de cielo.

Aunado a esta escasa correspondencia con la realidad, los avances tecnológicos de los instrumentos de medición, permitieron estudiar con mayor nivel de detalle, las condiciones de cielo en diferentes partes del mundo. Fue así que en el año de 1997 salió a luz una nueva clasificación de quince tipos de cielos, en la cual se consideraban variables como la posición del sol, visibilidad, luminancia e iluminancia del cielo.<sup>28</sup> Al hablar del cielo se considera que la iluminancia es la cantidad de luz que llega del cielo a una superficie, en este caso, la superficie terrestre. Por otro lado se entiende que luminancia es la brillantez característica del cielo que es producto de la cantidad y tipología de las nubes, la contaminación y cantidad de partículas suspendidas.

En el año 2003 esta clasificación fue establecida como la estándar para su utilización en estudios de iluminación natural a nivel internacional.<sup>29</sup> El objetivo de esta nueva clasificación es que se cuente con una mayor cantidad de casos de estudio posibles y que estos modelos de cielo sirvan para hacer cálculos de iluminación y la generación de algoritmos que a su vez puedan ser introducidos en nuevas metodologías de cálculo y a los programas de computo.

La tabla 1 presenta la descripción de cada uno de los 15 cielos estándar establecidos por el CIE. A partir de esta clasificación se han desarrollado trabajos de investigación que buscan validar los modelos matemáticos en programas de computo y simulaciones. Por otro lado han surgido estudios en diferentes partes del mundo en donde se han hecho mediciones con el objetivo de caracterizar y escoger los tipos de cielo que mejor se ajusten a la localidad donde se realizaron las mediciones.

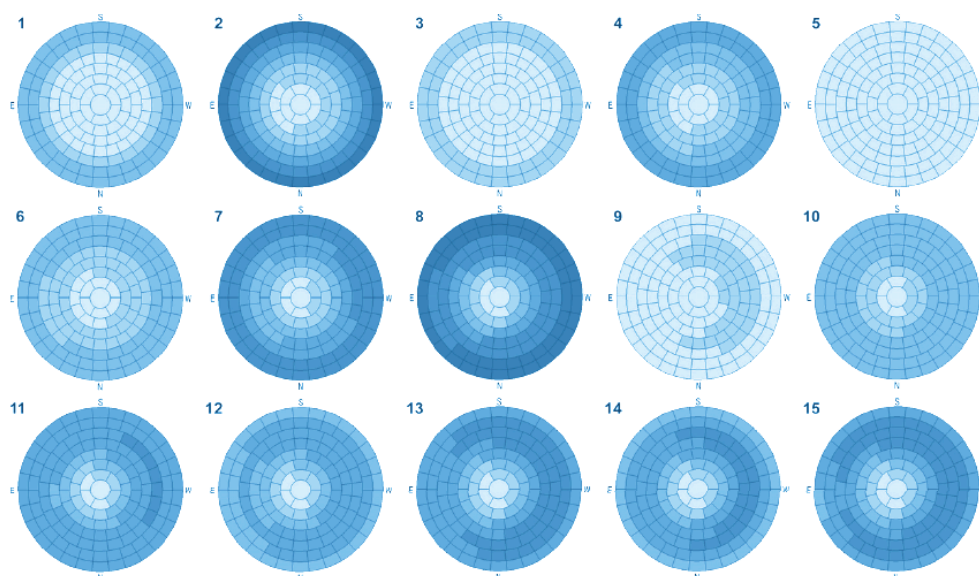
Llama la atención el caso particular de Hong Kong<sup>30</sup> en donde se realizó un a investigación y se llegó a la conclusión que los tipos de cielo que mejor caracterizan a esta región son los numero 1, 8 y 13. Para el caso de la Ciudad de México **NO** es posible determinar los tipos de cielo que mejor se ajustan debido a la carencia de información sobre la disponibilidad de la luz natural así como de las distribución luminosa del cielo. Por este motivo en este trabajo de investigación se utiliza la clasificación general del CIE con tres tipos de cielo los cuales se describen a continuación.

---

<sup>28</sup> **KITTLER, R., et al.,** *A new generation of sky standards*. Proc. Conf. Lux Europa, 1997, pp. 359-373.

<sup>29</sup> **CIE,** *Spatial distribution of daylight*, CIE central bureau, Viena, 2003.

<sup>30</sup> **NG, Edward, et al.,** *Defining standard skies for Hong Kong*. Building and Environment, 2007, vol. 42(2), pp. 866-876.



< **FIGURA 2**  
Distribución luminosa de los 15  
cielos estándar.  
(Edward Ng, 2007)

No.	DISTRIBUCIÓN LUMINOSA
1	Cielo cubierto - CIE estándar con degradación abrupta de luminancia hacia el cenit
2	Cielo cubierto con degradación abrupta de luminancia y brillo ligero hacia el sol
3	Cielo cubierto con degradación moderada y uniformidad azimutal
4	Cielo cubierto con degradación moderada y con brillo ligero hacia el sol
5	Cielo con luminancia uniforme
6	Cielo parcialmente nublado sin degradación hacia el cenit con brillo ligero hacia el sol
7	Cielo parcialmente nublado sin degradación hacia el cenit con mayor brillo en la región circunsolar
8	Cielo parcialmente nublado sin degradación hacia el cenit - corona solar distinguible
9	Cielo parcialmente nublado con sol obscurecido
10	Cielo parcialmente nublado con mayor brillo en la región circunsolar
11	Cielo banco-azul - corona solar distinguible
12	Cielo claro - CIE estándar con poca turbidez de luminancia
13	Cielo claro - CIE estándar con atmósfera contaminada
14	Cielo turbio sin nubes y amplia corona solar
15	Cielo blanco-azul con amplia corona solar

< **TABLA 1**  
Descripción de los 15 cielos  
estándar.  
(CIE, 2003)

Cielo nublado.

Es aquel que se encuentra cubierto por nubes al menos en un 80% de la bóveda celeste. La iluminancia que se presenta bajo este tipo de cielo puede variar de unos cientos hasta varias decenas de miles de luxes, dependiendo del tipo de nubes que cubre el cielo. Esta condición es la que se presenta en gran parte del año en países como Inglaterra y los del noroeste del pacífico. Este tipo de cielo también es conocido como "Cielo CIE" debido a que fue el adoptado por la Comisión Internacional de Iluminación como el cielo estándar para efectos de cálculo y diseño de iluminación natural. Este cielo está definido como aquel que no tiene una distribución uniforme de la brillantez, incrementándose desde el horizonte hacia el cenit en aproximadamente una razón de 1:3. La luminancia en cualquier ángulo de altitud por arriba del horizonte está dada por la siguiente ecuación:

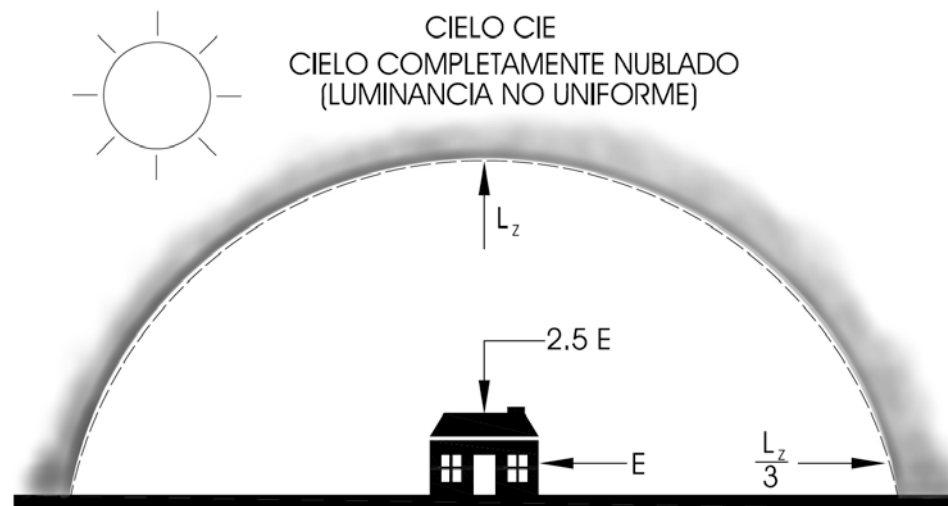
$$L_A = L_Z \frac{1 + 2\text{sen}A}{3}$$

Donde:  $L_A$  = luminancia en el ángulo  $A^\circ$  por encima del horizonte (en cualquier dirección).

$L_Z$  = luminancia en el cenit. De esta manera en el horizonte donde  $A = 0^\circ$ , se tiene que:

$$L_A = \frac{L_Z}{3}$$

La iluminancia (luxes) producida por esta distribución en planos horizontales y verticales bajo una distribución no uniforme se presenta en una razón de 2.5:1 (figura 3). Se puede establecer que bajo estas condiciones de cielo completamente nublado, la iluminancia global en planos verticales varía directamente dependiendo de la altitud del sol, independientemente de su azimut, esto se debe al efecto de difusión provocado por el cielo cubierto por la nubes.



**FIGURA 3 >**  
Esquema de Cielo nublado.  
(Reproducido de Stein 2003)

A lo largo de la historia del estudio de la iluminación natural se han formulado modelos que describen estas distribuciones luminosas. Uno de los más utilizados es el modelo de Krochmann,<sup>31</sup> determinado por la siguiente ecuación:

$$E_H = 300 + 21,000 \operatorname{sen} A \quad (\text{lx})$$

Donde:  $E_H$  es la iluminancia exterior en el plano horizontal y  $A$  es la altitud solar dada en grados.

#### Cielo despejado.

Para considerar un cielo como despejado, la bóveda celeste no debe estar cubierta por nubes en más del 30% de su totalidad. La iluminación que se presenta en un cielo despejado tiene dos componentes: primero el componente que llega de forma directa del sol y el componente que surge de la dispersión de los rayos solares al pasar por la atmósfera terrestre. Como en el caso del cielo nublado para el cielo despejado existen modelos matemáticos que describen el comportamiento de los dos componentes. Para facilitar la obtención de esta información, los niveles de iluminancia global y difusa se presentan en gráficas en donde se muestran los niveles de iluminación en función de la altitud solar. En las gráficas suelen separarse los valores para la iluminancia difusa nombrándola como "componente solo de cielo" y por otro lado el "el componente de sol", la suma de estas dos valores de iluminancia dan por resultado el valor de la iluminancia global.

El valor del componente de cielo es utilizado para hacer cálculos en circunstancias en las cuales no hay incidencia solar directa, como puede ser el caso de una fachada que esta obstruida por un edificio el cual proyecta una sombra que impide el paso de los rayos del sol. Otro caso se da cuando las ventanas están orientadas hacia el norte, el este y oeste y el sol esta del lado opuesto de la edificación.

Además de considerar la iluminancia que se presenta en superficies horizontales es importante tomar en cuenta que la mayor parte de la iluminación natural presente en los espacios arquitectónicos se consigue por medio del uso de ventanas la cuales están ubicadas en superficies verticales. Por lo tanto se puede afirmar que la iluminancia en superficies verticales es el componente principal que ilumina los espacios interiores.

En el caso del cielo despejado la relación que existe entre la iluminancia horizontal y la vertical no es tan simple debido a que bajo estas circunstancias la posición del sol en altitud y azimut son factores determinantes. De forma más específica, depende del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie vertical. Este ángulo se puede definir como el ángulo horizontal comprendido entre el plano vertical perpendicular a la superficie vertical y el plano vertical del sol. Por lo tanto si un ángulo de incidencia es igual a  $0^\circ$  esto quiere decir que el sol esta en una posición perpendicular a la superficie vertical.

<sup>31</sup> STEIN, Benjamin, *et al.*, *op. cit.*, pp. 1115.

Al igual que la iluminancia horizontal, en un cielo despejado la cantidad de iluminación en planos verticales depende de dos componentes: el directo y el difuso (Componente del sol y del cielo, respectivamente). El componente difuso solo es válido para la mitad de la bóveda celeste debido a que una superficie vertical solo puede estar expuesta a la mitad de la luz que llega del cielo. El ángulo de incidencia es un dato importante para fines de cálculos debido a que de él dependen otros valores como el componente de cielo que permite ver la ventana y la transmisibilidad de un cristal u otro material. El componente del cielo o la "fracción del cielo" que permite ver la ventana es un dato fundamental para poder hacer estimaciones de los niveles de iluminación en el interior de los espacios.

Aunque este tema se desarrolla con mayor detalle en el apartado referente al Factor de luz de día, es importante mencionar que debido a la naturaleza no uniforme del cielo despejado, la distribución luminosa en la bóveda celeste cambia dependiendo de la época del año y la hora del día. Independientemente de los cambios estacionales y horarios, se puede afirmar que la luminancia del cielo es mayor mientras más cerca se este del sol y viceversa.



**FIGURA 4 >**  
Esquema de Cielo despejado.  
(Reproducido de Stein 2003)

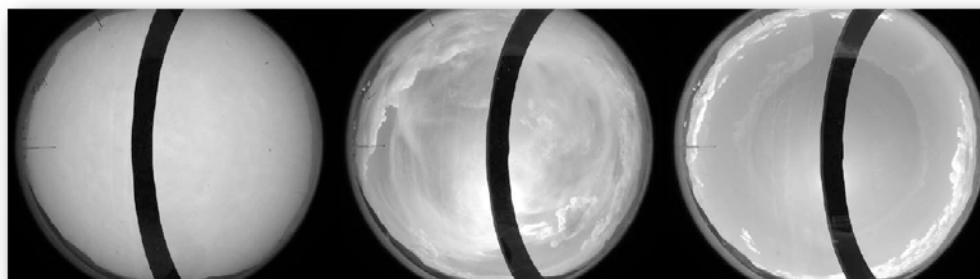
#### Cielo parcialmente nublado

Este cielo es el intermedio entre los dos anteriores, por lo tanto se puede definir como aquel que está cubierto por nubes en un rango que va del 30% al 80% de la bóveda celeste. A diferencia de los casos anteriores no hay forma de expresar matemáticamente la luminancia de un cielo parcialmente nublado debido a su infinita variabilidad. Para fines de estimaciones y cálculos de iluminación natural es importante mencionar que la iluminación que se presenta en un cielo nublado es aproximadamente 10% al 15% mayor. Esto se debe al efecto de reflexión y dispersión provocado por las nubes.

Los registros meteorológicos de una localidad pueden ayudar a conocer la nubosidad y por lo tanto hacer una estimación de tipo estadística sobre la disponibilidad de luz natural. La nubosidad es comúnmente expresada en índices que van de 0 a 1, o de 0 a 8, dependiendo de la técnica utilizada, la más común es la aprobada por la Organización Meteorológica Mundial. Esta última divide al cielo en ocho partes, llamadas *oktas* en las cuales se pueden apreciar las fracciones de cielo que están cubiertas por nubes.<sup>32</sup> La disponibilidad de la luz natural así como su distribución, esta determinada no solo por la cantidad de nubes, también influyen sus formas características y la altura a la que se presentan, las cuales permiten clasificarlas en las siguientes categorías:

- Altas: Cirrus (Ci), Cirrocumulus (Cc) y Cirrostratus (Cs)
- Medias: Alto cumulus (Ac), Altostratus (As) y Nimbostratus (Ns)
- Bajas: Cumulus (Cu), Stratocumulus (Sc), Stratus (St) y Cumulonimbus (Cb)

Todas estas variables deben ser tomadas en cuenta para poder hacer una evaluación de la forma en la que se llevarán a cabo los estudios sobre iluminación que permitan hacer estimaciones sobre la iluminancia en los espacios arquitectónicos. Como se mencionó anteriormente, el conocimiento de los valores de iluminancia en planos verticales y horizontales en sus diferentes componentes y orientaciones, es la base para hacer cualquier tipo de diseño y cálculo de iluminación natural.



< FIGURA 5

Fotografías con lente de Ojo de pescado que muestran los tipos cielos:  
*izquierda* - cielo nublado,  
*centro* - cielo parcialmente nublado  
*derecha* - cielo despejado.  
 (Edward Ng, 2006)

En la práctica del diseño urbano y arquitectónico las estimaciones y cálculos de iluminación natural son requisitos *a priori* para determinar las consecuencias de los diseños o para crear ambientes agradables desde el punto de vista visual tanto en espacios interiores como en exteriores. Debido a esto, durante las primeras etapas del proceso de diseño se deben tomar decisiones que estén orientadas hacia la evaluación de la mejor alternativa de solución. Si las alternativas de diseño o las soluciones (sistemas de iluminación natural) tienen que ser comparadas o evaluadas contra las condiciones exteriores, estas últimas tienen que ser conocidas, estudiadas y estandarizadas. Inclusive en casos más estrictos como aquellos requerimientos de carácter reglamentario o normativo, (que tienen como objetivo procurar el bienestar de las personas) es esencial para poder determinar una evaluación y juicio, contar con una serie de reglas y estándares.

<sup>32</sup> **WMO, World Meteorological Organization**, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: WMO No. 8*, World Meteorological Organization, Suiza, 2008.

Disponible en línea, Fecha de consulta Junio 2010

[http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO\\_Guide-7th\\_Edition-2008.html](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.html)



Los estándares expresan las necesidades ergonómicas y fisiológicas que influyen en la salud de las personas y su desempeño visual, así como las condiciones bajo las cuales se hace el uso eficiente de la energía para su ahorro. Aunque la información completa sobre normatividad de desarrollará en el apartado 2.9 es importante mencionar que las condiciones comparativas para la utilización y predicción de la iluminación natural han sido establecidas en reglamentos y normas a nivel local, nacional e internacional (Reglamento de construcciones para el Distrito Federal y NOM-025-STPS-1999, ISO-CIE Standards) así como en los códigos para la practica de diversas organizaciones profesionales ("IESNA Recommendations" en E.U.A o el "CIBSE Code for interior lighting" en el Reino Unido).

---

## 1.8. DISPONIBILIDAD DE LUZ NATURAL

---

Las investigaciones sobre iluminación natural y radiación solar se comenzaron a finales del siglo XIX en Inglaterra, país en donde se han dado los mayores descubrimientos y aportaciones al tema, ya sea por el desarrollo de métodos e instrumentos de medición o por las metodologías de simulación y cálculo.<sup>33</sup> A lo anterior se sumó el trabajo realizado por el BRE (Building Research Establishment) fundado en 1921, con el objetivo de conjuntar en un solo organismo la mayor cantidad de información relativa a aspectos científicos y tecnológicos relativos a las edificaciones. El interés de este país en el recurso solar se debe principalmente a la poca disponibilidad del mismo dada su ubicación geográfica y su clima, por lo tanto el estudio del aprovechamiento de la radiación solar y la iluminación se convirtió en un recurso que debía ser estudiado para poder aprovecharlo al máximo.

Es indispensable hacer notar que desde hace varios años los investigadores más reconocidos sobre el tema a nivel mundial (John Page y Peter Tregenza) han destacado los avances a nivel mundial en el trabajo realizado en regiones ubicadas en la parte norte del hemisferio, pero también han hecho hincapié en la falta de información que se tiene hoy en día sobre las condiciones que imperan en las regiones tropicales y en la necesidad de hacer mediciones bajo estas condiciones.<sup>34-35</sup> Su importancia radica en que es precisamente en estas regiones tropicales en donde existe el mayor potencial de aprovechamiento de la energía solar para ser transformada en otras formas de energía y principalmente como fuente primaria de iluminación. Para conocer la disponibilidad, las características del clima, la radiación solar y la iluminación natural, resulta indispensable establecer y mantener un observatorio que mida estos parámetros y sus componentes para poder dar respuesta a esta demanda internacional de falta de información que permita complementar los estudios realizados hasta este momento.

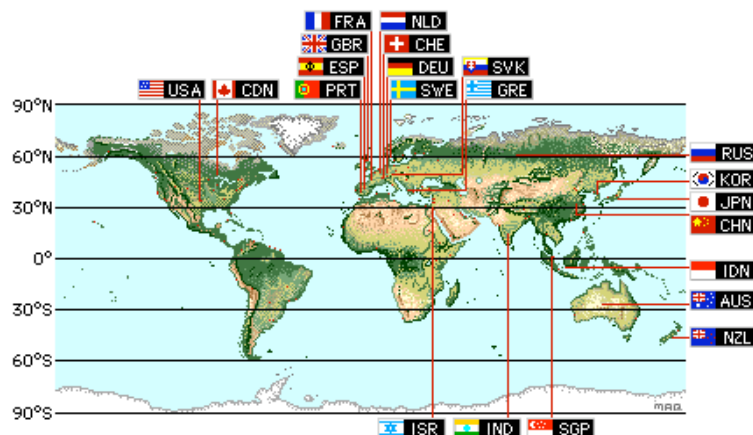
---

<sup>33</sup> **KOTA, S., et al.,** *Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and Their Use in Energy Performance Simulations*. Proceedings of the Ninth International Conference for Enhanced Building Operations, Austin, Texas, E.U.A. 2009.

<sup>34</sup> **TREGENZA, P.,** *Tropical daylighting*, Lighting Research & Technology, 2003, vol. 35(1), pp. 1-2.

<sup>35</sup> **PAGE, J.K.,** *First conference on measurement and modeling of solar radiation and daylight "Challenges for the 21st Century"* Energy, 2005, vol. 30(9), pp. 1501-1515.

Son relativamente recientes los esfuerzos a nivel mundial para cuantificar de forma adecuada la disponibilidad de la iluminación natural y la radiación solar. El Programa Internacional de Medición de Luz Natural, IDMP (por sus siglas en inglés de International Daylight Measurement Programme), fue propuesto en Europa en el año de 1991. Este año fue nombrado el año internacional de la medición de iluminación natural y a partir de ese momento, los investigadores alrededor del mundo tomaron esta oportunidad para instalar estaciones de medición, observatorios y laboratorios de iluminación natural y radiación solar. Desde 1991 hasta la fecha se han montado observatorios alrededor del mundo con lo cual el conocimiento del recurso se ha incrementado de manera considerable (figura 6).



< **FIGURA 6**

Mapa con la localización de observatorios de la red del IDMP (IDMP 1997)

En el caso del continente Americano además de los Estados Unidos y Canadá se tienen reportes de observatorios así como los resultados de sus mediciones en Argentina<sup>36</sup> y Brasil.<sup>37</sup> Debido al número de países participantes (22), fue necesario elaborar un documento que fue titulado "Guía recomendada para la práctica de mediciones de iluminación natural"<sup>38</sup>. Esta guía provee una serie de recomendaciones y convenciones para la correcta medición de la iluminación y radiación, el control de calidad de los procedimientos, así como del registro y manejo de la información. El resultado de estas mediciones se puede ver reflejado en la gran cantidad de trabajos en iluminación natural que utilizan las bases de datos generadas por el programa de IDMP. Los datos también han sido utilizados para desarrollar nuevos algoritmos que se incorporan a los programas de computo que realizan cálculos y simulaciones, o en su defecto, para comprobar y validar los modelos ya existentes. De forma paralela se han hecho grandes avances en el desarrollo de herramientas que permiten a los diseñadores hacer uso de este recurso para mejorar el desempeño de las edificaciones y reducir los consumos de energía eléctrica utilizada para iluminar los espacios. Sin embargo la principal aportación del programa es la clasificación de 15 cielos estándar explicada en el capítulo anterior.

<sup>36</sup> **EVANS, JM., TORRES S.**, *El recurso de iluminación natural en Buenos Aires: Resultados de un año de Mediciones*, ASADES, 2001.

<sup>37</sup> **SOUZA, R., PEREIRA F.**, *Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento*, Ambiente Construído, 2004, (en portugués).

<sup>38</sup> **CIE**, *Guide to recommended practice of daylight measurement*, CIE, Viena, 1994.

En nuestro país el estudio sobre la radiación solar comenzó en 1957 con la instalación del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, instalaciones que hoy en día siguen en funcionamiento y que aportan datos importantes sobre la disponibilidad del recurso solar en esta latitud. Desafortunadamente hasta el día de hoy, en nuestro país no contamos con un observatorio dedicado exclusivamente a la medición de iluminación natural que pueda proporcionar información sobre la disponibilidad y características del recurso. A pesar de esto es posible afirmar que en la Ciudad de México los niveles de iluminación natural son muy altos durante todo el año, esto se puede comprobar al analizar los registros de radiación, los cuales son un parámetro de referencia. Esta situación da como resultado que la luz natural sea un recurso del cual se puede obtener gran provecho.

Debido a la carencia de un observatorio dedicado exclusivamente a registrar los niveles de iluminación, se puede afirmar que en México **NO** existe una base de datos que cuente con los registros de iluminación natural por periodos prolongados. Esto representa un obstáculo en el avance del conocimiento del recurso y es a su vez un impedimento para desarrollar estudios que relacionen la luz natural y su influencia en los espacios arquitectónicos, debido a que el amplio conocimiento del recurso es la base para desarrollar cualquier tipo de metodologías de cálculo y análisis. La carencia de información relativa a la disponibilidad de iluminación natural no es una circunstancia que se de únicamente en la Ciudad de México, este fenómeno se puede observar en distintas partes de la República Mexicana en donde se han realizado estudios similares<sup>39</sup> en los que se hace patente la carencia de datos sobre la disponibilidad de los niveles de iluminación.

Tal es el caso de la ciudad de Mexicali en estado de Baja California donde, a falta de un observatorio que registre de forma constante los niveles de iluminación, Calderón y Vilchis<sup>40</sup> realizaron una estimación de los valores de iluminancia global horizontal (EGH) mediante ajustes a modelos matemáticos y otros factores atmosféricos característicos de la localidad. Este método es un buen intento por generar una base de datos que pueda proporcionar información sobre la disponibilidad del recurso, sin embargo, su confiabilidad es reducida ya que únicamente incorporan variables atmosféricas y geométricas (posición del sol) dejando de lado una variable fundamental: la radiación solar.

Es por esto que muchos investigadores se dieron a la tarea de establecer modelos de estimación de iluminación natural en base a datos de radiación solar. La radiación solar ha sido un recurso que se ha medido desde hace más de 60 años por lo que hoy en día resulta mucho más fácil obtener datos de radiación solar en distintas partes del mundo, situación que no se da en el caso de la iluminación. A partir de las observaciones de radiación solar y las primeras observaciones de iluminación se desarrolló el concepto de Eficacia luminosa ( $K$ ).

---

<sup>39</sup> **LÓPEZ Montelongo, Areli**, *Niveles de iluminancia en los cubos de luz de la comarca lagunera, (ABC-01)*, Memoria de la XXXI Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Zacatecas, México, 2007.

<sup>40</sup> **CALDERÓN Vázquez, Roberto**, *et al.*, *Modelos de iluminancia global para cielos claros en zonas áridas de México*, Memoria de la XX Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Jalapa, Veracruz, México, 1996, pp. 399-402.

La eficacia luminosa se define como el cociente de iluminancia entre el valor de la irradiancia y se expresa en lumens por watt (lm/W). Su valor depende de factores como la posición del sol, la nubosidad, concentración de partículas suspendidas y vapor de agua. Por este motivo se pueden establecer distintos valores para diferentes tipo de cielo ya sea cielos claros, medio nublados o nublados, al igual que se pueden establecer valores de eficacia que impliquen la presencia del sol, es decir se puede determinar un valor para el componente directo, difuso o la suma de los dos. La eficacia luminosa es una de las principales variables que se requieren conocer para realizar estudios de iluminación natural mediante la utilización de rutinas y programas de computo.

Su importancia radica en que relaciona dos valores: la radiación solar e iluminación. Se utiliza para hacer el cálculo de la disponibilidad de la luz natural y estimar las ganancias por radiación térmica. Hoy en día muchos programas de computo que realizan simulaciones de iluminación natural utilizan la eficacia luminosa como el valor básico para realizar sus operaciones. Pero su utilización mas importante es cuando los datos sobre la disponibilidad sobre la iluminación natural no existen en un lugar determinado. Como la eficacia luminosa relaciona iluminancia con irradiancia, permite estimar valores de iluminancia a partir de bases de datos de irradiancia. La manera de hacerlo es utilizando las mediciones de radiación y convertirlas al espectro visible utilizando los modelos de eficacia luminosa.

Gracias a los estudios que se comenzaron hace 20 años con el programa IDMP se ha podido determinar ciertos valores de la eficacia luminosa en otras partes del mundo y a su vez se han generado modelos matemáticos. A partir de esto se han obtenido valores generales para cielo despejado con presencia del rayo solar directo que dependen de la altitud del sol y oscilan entre 50-150 lm/W. El valor de la iluminancia difusa, es decir, solo la luz que llega del cielo se ha estimado en 130 lm/W para cielos despejados y de 110 lm/W para cielos nublados. De los modelos de predicción de eficacia luminosa, el que más extensamente ha sido utilizado es el desarrollado en el Atmospheric Sciences Research Center de la State University of New York por Richard Perez, Pierre Ineichen y Robert Seals.<sup>41</sup> La ventaja de este modelo es que puede ser utilizado para cualquier tipo de cielo ya que los datos básicos para su obtención fueron tomados de 13 localidades en los Estados Unidos con condiciones climáticas distintas. El modelo de Perez esta expresado de la siguiente forma:

$$K_G = a_i + b_i l_w + c_i \cos z + d_i \log(\Delta)$$

Donde  $K_G$  es la eficacia luminosa global y  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  y  $d_i$  son coeficientes que están en función de la claridad del cielo.  $z$  es el ángulo cenital del sol dado en radianes,  $\Delta$  es utilizado como un valor que establece la transparencia u opacidad óptica de la nubes y  $l_w$  es la altura del agua precipitable que determina la cantidad de vapor de agua en la atmósfera.

---

<sup>41</sup> PEREZ, R. *et al.*, *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*. Solar Energy, 1990, vol. 44(5), pp. 271-289.

Otro modelo que ha mostrado gran popularidad y confiabilidad es el desarrollado por Muneer y Kinghorn<sup>42</sup> debido a que esta basado en la filosofía de que la eficacia luminosa esta significativamente influenciada por el "índice de claridad del cielo" ( $K_t$ ) y se expresa de la siguiente forma:

$$K_G = 136.6 - 74.51 K_t + 57.3421 K_t^2$$

Para conocer las características de la eficacia luminosa en la Ciudad de México y para estudiar la posible aplicación del modelo 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. A partir de esto se puede aplicar un modelo para lo obtención de eficacia luminosa y validarlo mediante la comparación entre los valores medidos y los obtenidos por medio del cálculo. Para fines de esta investigación se utilizó el modelo Muneer-Kinghorn por varios motivos. En primer lugar requiere únicamente el valor de irradiancia global, contrario a lo que pasa con el modelo de Perez que utiliza valores de irradiancia global y difusa e iluminancia global y difusa, los cuales no han sido medidos de forma constante.

Aunque no es el modelo más preciso (9.4% de error promedio) comparado con el modelo de Perez (6.7% de error promedio) según una comparación hecha por Vartiainen<sup>43</sup>, el modelo de Muneer-Kinghorn ha sido validado con una gran cantidad de bases de datos a lo largo de todo el mundo. Por otro lado, como concluyen Ng y Tregenza<sup>44</sup> ha demostrado ser el que tiene mejor precisión para obtener valores de iluminancia basados únicamente en los valores de radiación. Por último, los datos de radiación solar global son más fáciles de consultar debido a son un parámetro básico que se mide en las estaciones meteorológicas. La importancia de realizar estos estudios radica en que es posible generar valores de iluminancia a partir de los valores de irradiancia, en el caso en que no se tengan los primeros debido a que no fueron obtenidos de forma directa a través de mediciones hechas en un observatorio.

---

## 1.9. EFICACIA LUMINOSA EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

---

La eficacia luminosa es un concepto que en primera instancia podría parecer la solución a la carencia de información sobre la disponibilidad de luz natural en una localidad determinada. Sobre todo por el hecho que reduce en gran medida la dependencia de un observatorio y todo lo que ello implica, como lo es: instrumentos de medición, infraestructura, personal capacitado y control de calidad de los datos registrados. A pesar de todo esto los especialistas más reconocidos en el tema (Richard Perez y Tariq Muneer) coinciden en que la obtención de valores de iluminancia a partir de modelos matemáticos debe ser

---

<sup>42</sup> **MUNEER, Tariq**, *Solar radiation & daylighting models*, Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2ªed., Reino Unido, 2004, pp. 114.

<sup>43</sup> **VARTIAINEN, A.**, *A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements*, *Renewable energy*, 2000, vol. 20, pp. 265-277

<sup>44</sup> **He, Ng**, *Using satellite-based methods to predict daylight illuminance for subtropical Hong Kong*, *Lighting Research & Technology*, 2010, vol. 42(2), pp. 135-147.

utilizada con reservas, es decir, única y exclusivamente como una alternativa cuando no se cuenten con valores medidos por medio de instrumentos.<sup>45-46</sup> De hecho, esta práctica ha sido muy difundida en todo el mundo debido a la relativa facilidad que representa la generación de información sobre el recurso y posibilita a su vez el desarrollo de mayor cantidad de estudios relativos al aprovechamiento de la luz natural en la edificaciones, permite hacer evaluaciones sobre la efectividad y rendimiento de sistemas de aprovechamiento de la luz natural y desde el punto de vista del ahorro de energía es posible hacer estimaciones del potencial de ahorro mediante el aprovechamiento de este recurso.

Solo por citar algunos ejemplos encontramos estudios similares en España<sup>47</sup>, Finlandia<sup>48</sup>, Grecia<sup>49</sup>, India<sup>50</sup>, Malasia<sup>51</sup> y en América Latina; en la ciudad de Mendoza, Argentina<sup>52</sup> y Florianópolis, Brasil.<sup>53</sup> Sin embargo es importante mencionar que los valores obtenidos a partir de modelos matemáticos son confiables para su utilización únicamente cuando han pasado por un proceso de evaluación de la precisión de los resultados, procedimiento que se presenta en todos los estudios antes mencionados. Este proceso de validación consiste en obtener los valores de iluminancia a partir del modelo matemático y compararlos con los valores registrados por medio de instrumentos en el lugar donde se está haciendo el estudio. Cabe mencionar que el proceso de evaluación requiere de una gran cantidad de información generada por un observatorio durante un período considerable de tiempo (mínimo un año de forma constante), con esto se puede establecer que los datos utilizados abarcan prácticamente todas las condiciones climáticas posibles. De hecho los modelos de eficacia luminosa más populares han sido validados con los datos de por lo menos 3 años de antigüedad (modelo de Perez) o con los recabados en varias localidades de Europa durante el período de medición del Programa Internacional de Medición de Luz Natural, IDMP (modelo Muneer-Kinghorn). Este proceso de evaluación se presenta en forma de diagrama en la figura 7 el cual comienza con la medición de los valores de radiación e iluminación en un observatorio. Para esto es necesario contar con el instrumental básico que consiste en: piranómetros, fotómetros y un sistema de adquisición de datos.

---

<sup>45</sup> MUNEER, Tariq., *op. cit.*, 2004, pp. 104.

<sup>46</sup> PEREZ, R. *et al.*, *op. cit.*, 1990. pp. 271.

<sup>47</sup> ROBLEDO, L., SOLER, A., *Luminous efficacy of direct solar radiation for clear skies*, Energy, 2000, vol. 25(8), pp. 689-701

<sup>48</sup> VARTIAINEN, A., *op. cit.*

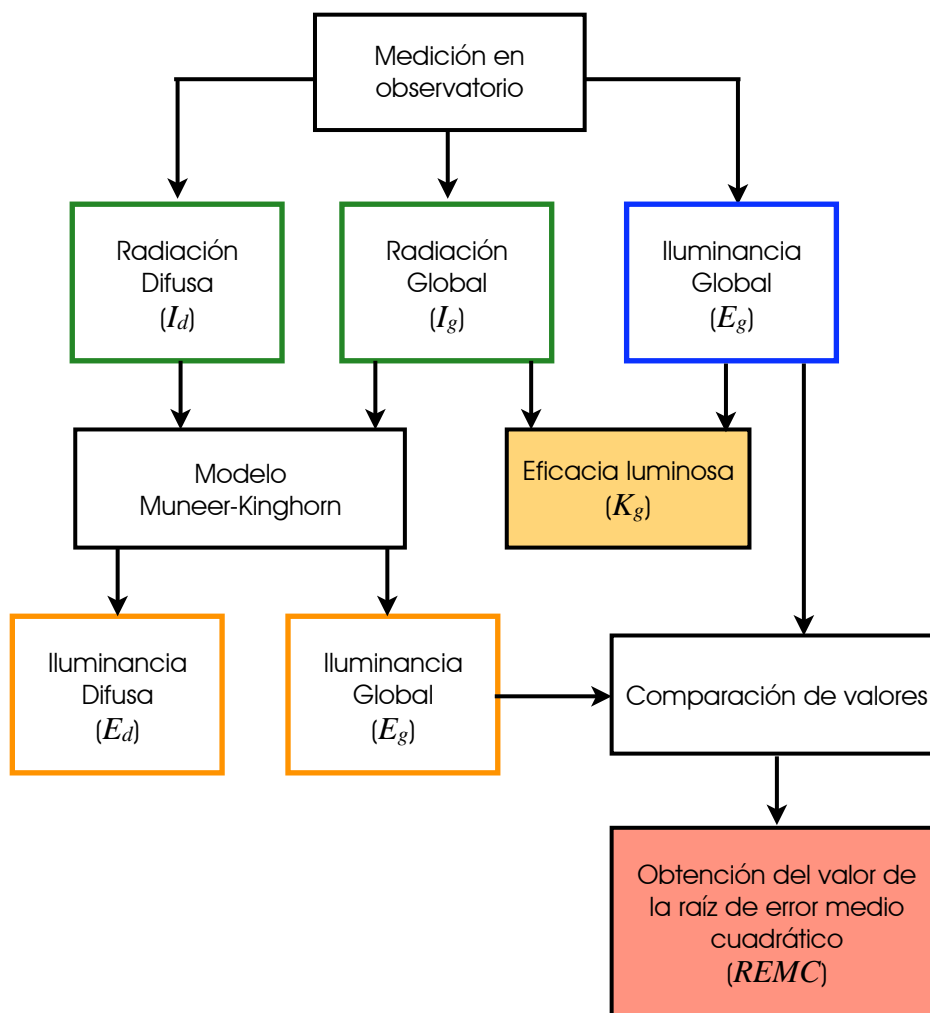
<sup>49</sup> TSICALOUDAKI, K., *A study on luminous efficacy of global radiation under clear sky conditions in Athens, Greece*, Renewable energy, 2005, vol. 30, pp. 551-563.

<sup>50</sup> JOSHI, M., *et al.*, *Estimation of Luminous efficacy of daylight and exterior illuminance for composite climate of Indore city in Mid Western India*, Renewable energy, 2007, vol. 32, pp. 1363-1378.

<sup>51</sup> ZAIN-AHMED, A., *et al.* *The availability of daylight from tropical skies--a case study of Malaysia*, Renewable energy, 2002, vol. 25, pp. 21-30.

<sup>52</sup> BETMAN, E., *Eficacia luminosa en Mendoza*, Avances en energía y medio ambiente, 2001, vol. 5, pp. 19-24.

<sup>53</sup> SOUZA, R., ROBLEDO, L., *Testing diffuse luminous efficacy models for Florianópolis, Brazil*, Building and Environment, 2004, vol. 39, pp. 317-325.



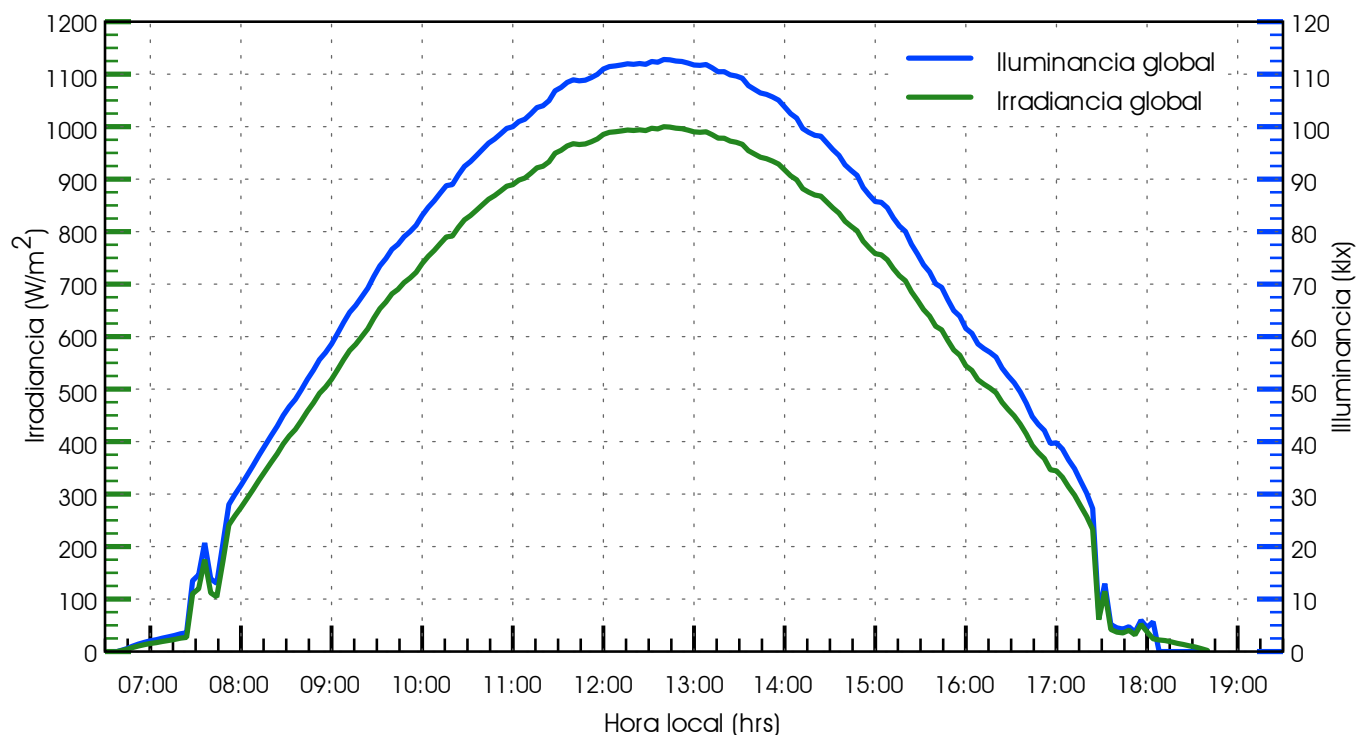
**FIGURA 7 >**  
Diagrama del proceso de evaluación de la precisión del modelo de eficacia luminosa.

Como se mencionó anteriormente, la validación de un modelo de eficacia luminosa se debe hacer con una gran cantidad de datos, sin embargo, para fines de esta investigación y para demostrar el proceso de aplicación y evaluación del modelo Muneer-Kinghorn, se presenta a continuación un breve reporte del procesamiento de datos medidos en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM. La evaluación del modelo de eficacia luminosa se llevo a cabo siguiendo el proceso esquematizado en la figura 7, es decir, se midieron los valores de radiación e iluminación de forma simultánea, se compararon los resultados del modelo Muneer-Kinghorn, se obtuvo el valor de la eficacia luminosa promedio y el valor de la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC o RMSE por sus siglas en ingles).

#### Medición de niveles de radiación e iluminación.

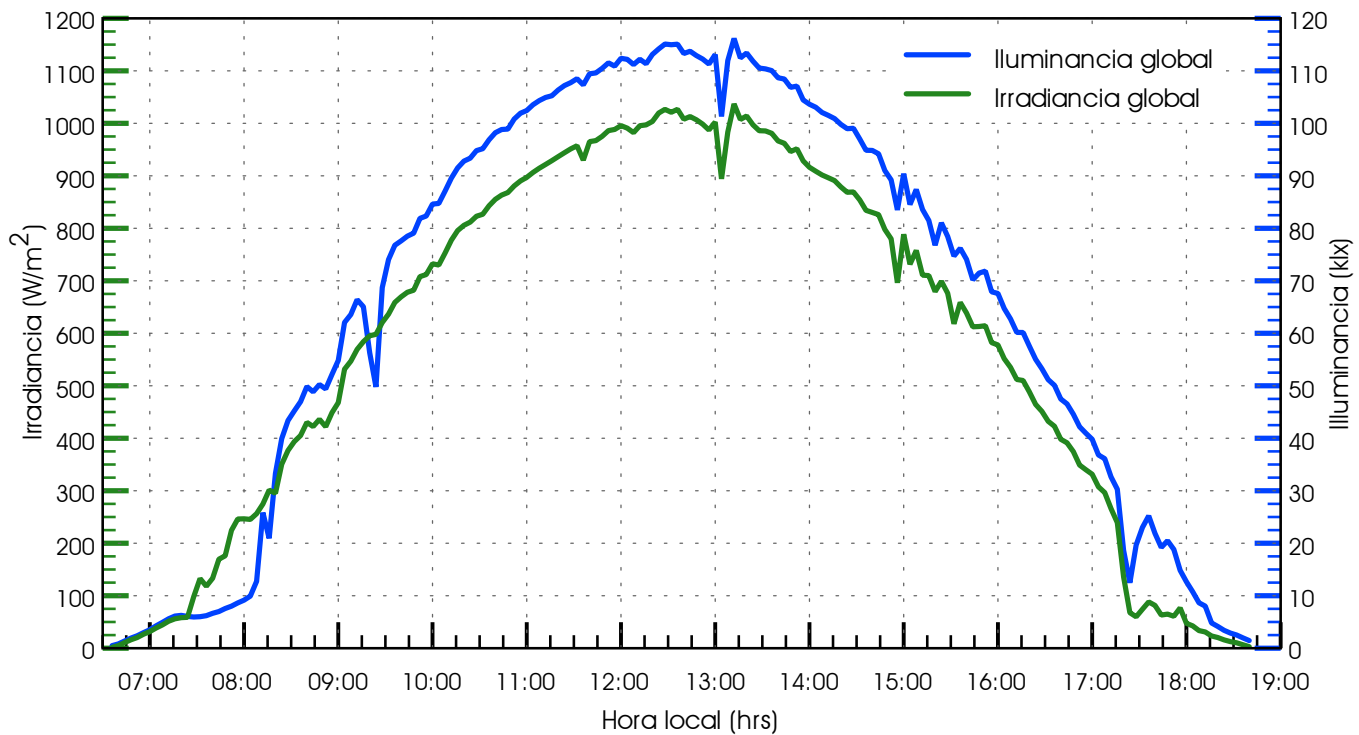
Los registros de los niveles de radiación solar e iluminación se llevaron a cabo durante la semana del 25 al 31 de Marzo del año 2010 en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, ubicado al sur de la ciudad de México ( $19^{\circ} 20' 01''$  N. y  $99^{\circ} 11' 54''$  O., a una altitud de 2268 msnm). La radiación solar se midió con piranómetros *Kipp & Zonen* y un sistema de adquisición de datos *Campbell* en intervalos de un minuto. Los niveles de

iluminancia se midieron con fotómetros *LI-COR* modelo LI-210, en intervalos de 4 minutos los cuales fueron registrados en un sistema de adquisición de datos *Agilent* modelo 34970A. De los días en los que se realizaron las mediciones, para fines de esta investigación se escogieron los días 25 y 27 de marzo. Esto se debió a que el día 25 fue un día completamente despejado, a diferencia del día 27 en donde hubo presencia de nubosidad. La elección de estos días en particular fue con el objetivo de hacer una comparación de los valores de eficacia luminosa y la precisión del modelo bajo dos condiciones de cielo distintas. De hecho resulta muy importante obtener el valor de la eficacia luminosa para la mayor cantidad de condiciones de cielo posibles ya que como se puede esperar, el valor de eficacia luminosa presenta variaciones dependiendo de la presencia de nubosidad y partículas suspendidas. Las mediciones de los valores de irradiancia global e iluminancia global del día 25 de marzo (despejado) se presentan en la figura 8 en la cual se puede observar que la curva que describe la gráfica muestra muy pocas oscilaciones debido a la ausencia de nubosidad. Caso contrario a lo que se presenta en la figura 9 que muestra los registros del día 27 (nublado) en la cual la presencia de nubosidad se ve reflejada en la gráfica mediante oscilaciones en su trazo.



**FIGURA 8.** Gráfica comparativa de Iluminancia e Irradiancia global.  
Día despejado. 25-Marzo-10. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

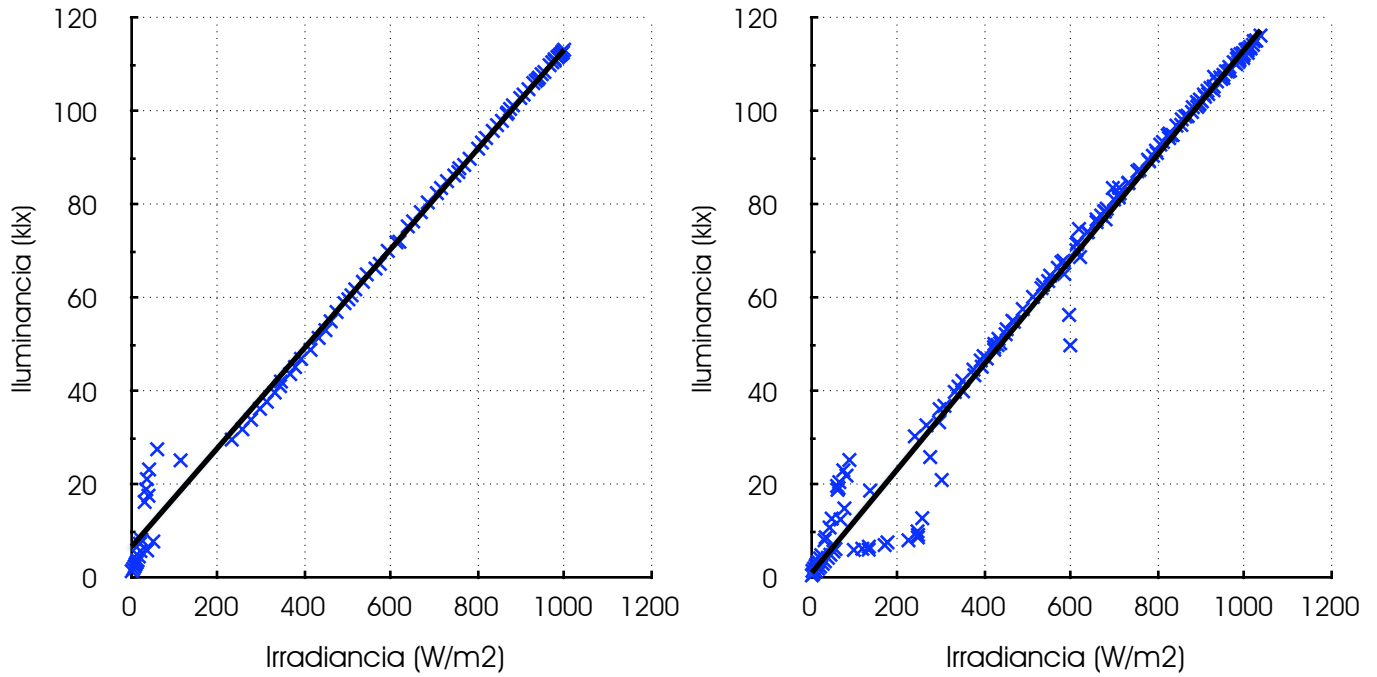




**FIGURA 9.** Gráfica comparativa de iluminancia e irradiancia global.  
 Día nublado. 27-Marzo-10. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

Para poder visualizar la relación que existe entre los valores de irradiancia e iluminancia se tomaron los registros y se incorporaron en una gráfica de dispersión de puntos en la cual se muestra esta relación lineal que guardan los valores. En la gráfica la pendiente de la línea de tendencia representa el valor de la eficacia luminosa, en otras palabras, el valor de la eficacia luminosa es directamente proporcional a la pendiente de la línea de tendencia. En la figura 10 se muestran las gráficas que correlaciona los valores medidos de irradiancia global contra los valores de iluminancia global, en ambos casos, medidos en un plano horizontal. En la gráfica correspondiente al día despejado (25 marzo) se puede apreciar que la dispersión de puntos es mucho menor y se aproximan mucho más a la línea de tendencia, caso contrario a lo que se puede observar en el gráfica correspondiente al día nublado (27 marzo).

En cuanto a la pendiente de la línea de tendencia se observa a simple vista que son muy parecidas lo que podría significar que la variación del valor de eficacia luminosa es mínima. Aunque como se verá mas adelante, este valor sí presenta una variación numérica. Por último en es estas figuras es posible apreciar que en valores de irradiancia global por debajo de los 300 W/m<sup>2</sup> se presentan una mayor dispersión de puntos en la gráfica esto se debe a la ubicación actual del observatorio ya que la vegetación que lo circunda obstruye los rayos del sol por la mañanas y tardes, provocando que los registros tanto de iluminancia como irradiancia presenten lecturas inestables. Con los mismos datos medidos se obtuvo el valor de eficacia luminosa para ambos días y se graficó este valor en función de la altitud del sol a lo largo el día.

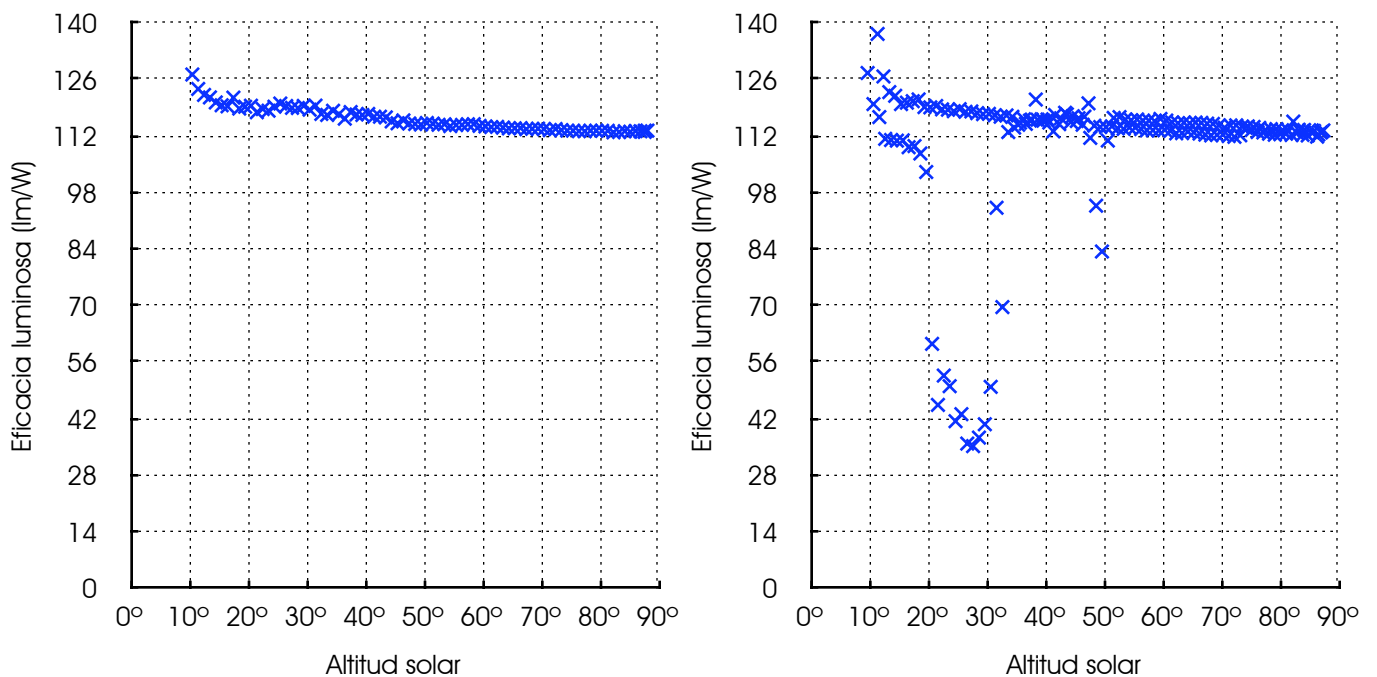


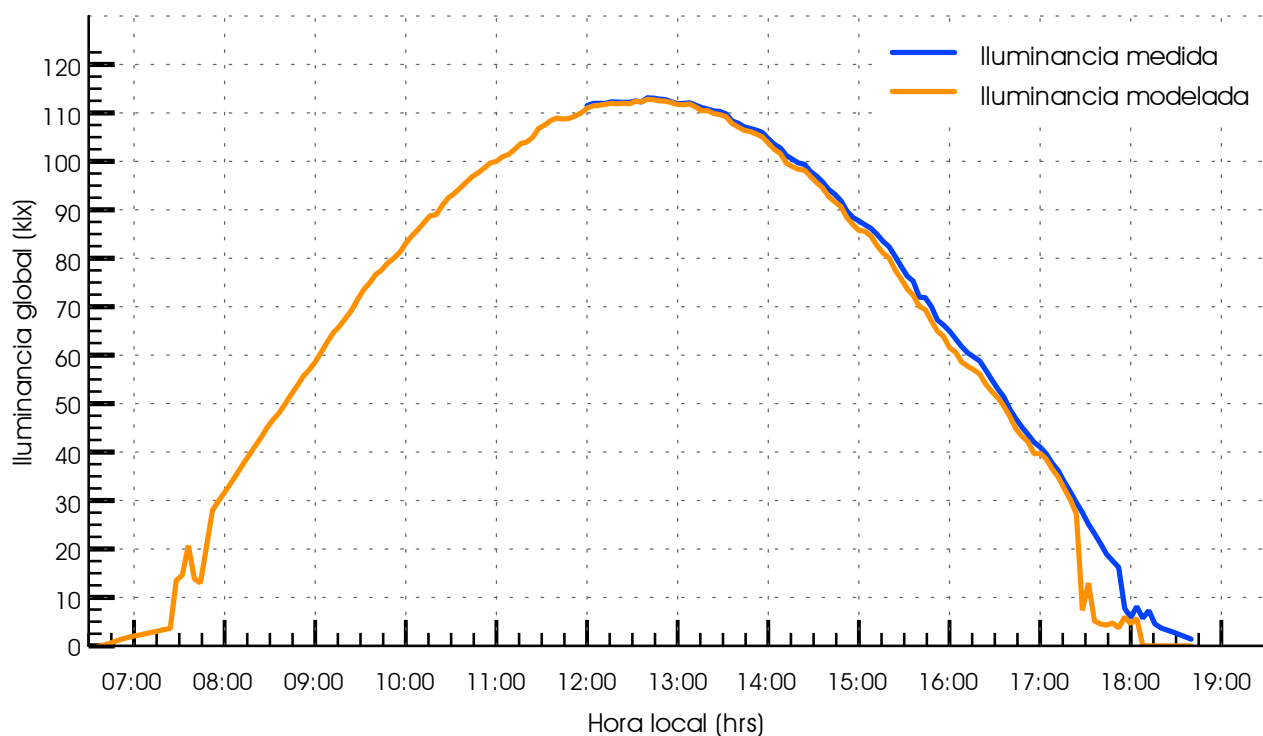
**FIGURA 10.** Gráficas de dispersión de valores de irradiancia contra valores de luminancia global  
 Izquierda: Día despejado (25 marzo) - Derecha: Día nublado (27 marzo)  
 Ciudad Universitaria (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

Como se puede observar en la Figura 11 la eficacia luminosa esta por arriba de los 112 lm/W para ambos casos, pero en el día despejado el comportamiento del valor es mucho más estable comparado con el día nublado, en donde hay una dispersión mayor de valores sobre todo en ángulos de altitud por debajo de los 50° que equivale, por la mañana, desde la salida del sol (6:36 hrs.) hasta las 9:30 hrs. y por la tarde, después de las 14:40 hrs. hasta la puesta del sol.

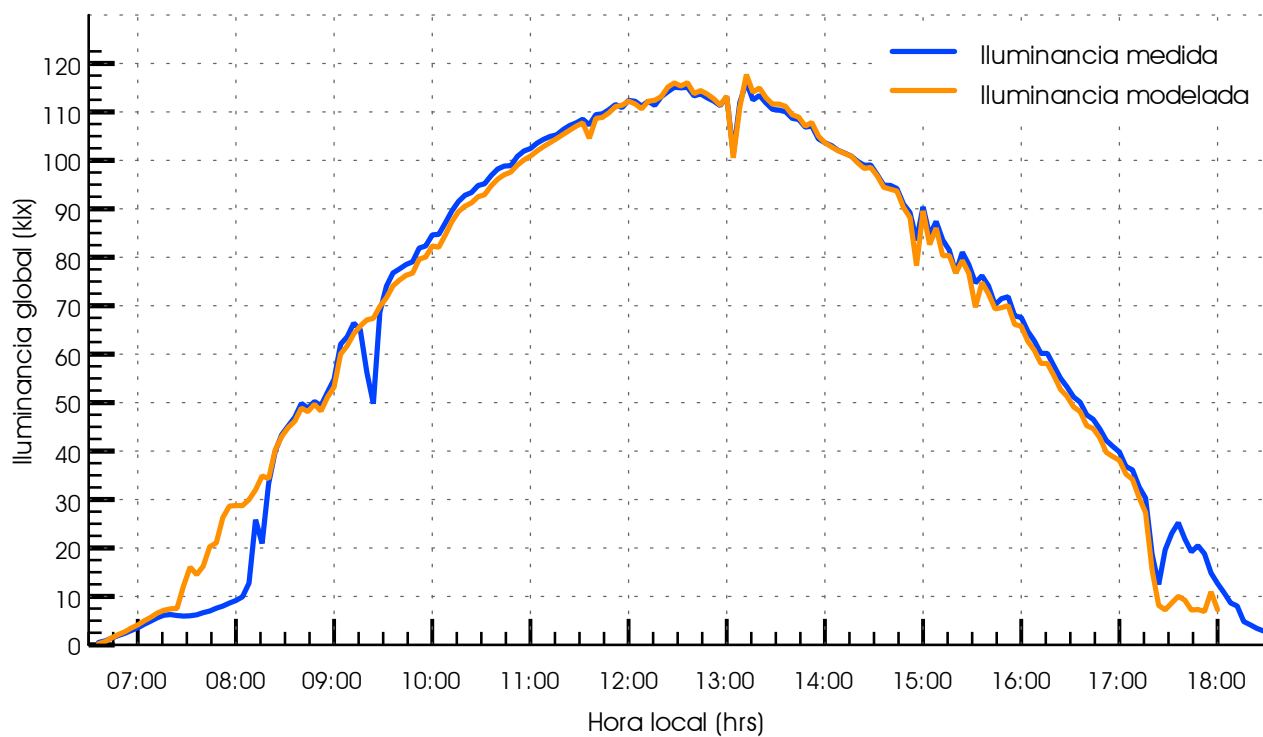
Distribución de la Eficacia luminosa global en función de la altitud del sol.  
 Izquierda: Día despejado (25 marzo)  
 Derecha: Día nublado (27 marzo)

↓ **FIGURA 11**

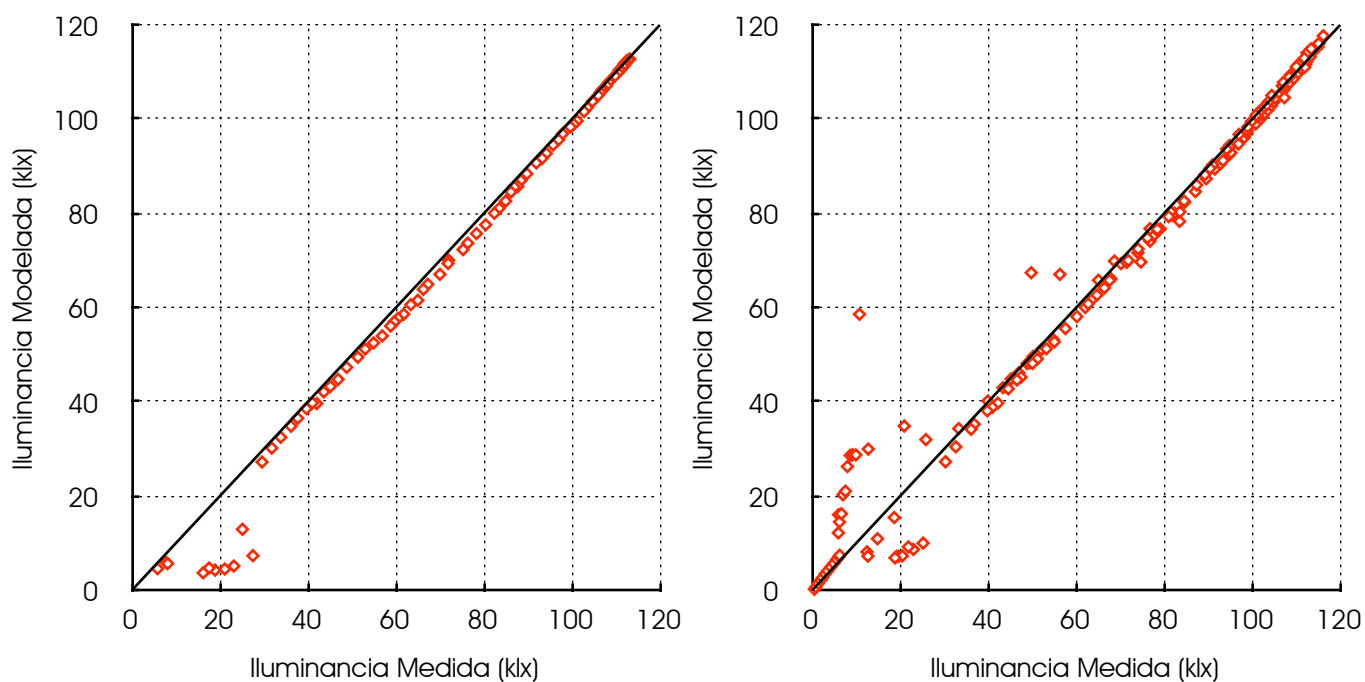




**FIGURA 12.** Gráfica comparativa de iluminancia global medida y modelada.  
Día despejado 25-Marzo-10. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)



**FIGURA 13.** Gráfica comparativa de iluminancia global medida y modelada.  
Día nublado. 27-Marzo-10. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)



**FIGURA 14.** Gráfica de iluminancia global medida contra iluminancia global modelada. Izquierda: Día despejado (25 marzo) - Derecha: Día nublado (27 marzo). Ciudad Universitaria.

#### Obtención de valores de iluminancia por medio del modelo Muneer-Kinghorn

El siguiente paso del procedimiento fue la obtención de los valores de iluminancia global a partir de los valores de irradiancia global con la ayuda del modelo Muneer-Kinghorn. Los valores de iluminancia global modelada así como los valores medidos en el observatorio tanto para el día despejado y nublado se presentan en las figuras 12 y 13, respectivamente. En ambos casos se puede apreciar que los valores obtenidos por medio del modelo son muy similares a los valores medidos con el fotómetro. De forma gráfica es posible apreciar la correspondencia entre los dos valores que se comparan ya que las dos curvas, tanto en el día despejado como en el día nublado representan el mismo comportamiento.

Otra forma de observar la correspondencia entre los valores de iluminancia medidos y modelados es con la ayuda de una gráfica de dispersión de puntos de correlación. En la figura 14 se presentan las gráficas de dispersión para ambos días analizados. En ellas se puede ver una línea de tendencia que representa la correspondencia total entre los valores medidos y modelados.

Al comparar ambas gráficas se puede observar la gráfica de día despejado, la dispersión de puntos es mucho menor a la correspondiente al día nublado. Por otro lado también se puede observar en este tipo de gráficas que la correspondencia es mucho menor para valores de iluminancia por debajo de los 30 kilo luxes, es decir, cuando la altitud del sol es baja, este comportamiento concuerda con el que ya se había observado en las gráficas de dispersión de valores de irradiancia e iluminancia (figura 10) y eficacia luminosa en función de la altitud del sol (figura 11).

Aunque las gráficas son de gran ayuda para observar el comportamiento de los valores de los modelos y mediciones, esto no es suficiente para hacer una evaluación completa de las diferencias que existen entre los valores y la precisión del modelo estudiado. Para ello es necesario hacer un análisis estadístico de los resultados que permita obtener valores concretos que permitan llevar a cabo dos evaluaciones concretas. En primer lugar se puede evaluar el nivel de precisión del modelo, es decir, conocer mediante cifras precisas, la validez del algoritmo, entendiendo validez como el acuerdo entre el resultado de un modelo y el fenómeno que supone modelar.

Esto se hace al obtener el rango de error que presenta o la diferencia entre los valores que se miden por medio de instrumentos. Por lo tanto entre menor sea el valor del error del modelo, con mayor precisión representa un fenómeno que se mide en la naturaleza, en este caso, la cantidad luz natural. La segunda evaluación es la que se lleva a cabo al comparar el grado de error del modelo bajo dos circunstancias distintas, en este caso la primera es bajo condiciones de cielo despejado y la segunda es el valor obtenido para el día nublado.

Para hacer las evaluaciones, una vez que se obtuvieron los valores de iluminancia global por medio del modelo se compararon con los valores medidos con el fotómetro. Con esta comparación se puede obtener el valor de la Raíz de Error Medio Cuadrático (REMC) que es el valor de la raíz del promedio de la diferencias cuadráticas de los valores modelados y medidos, entre el promedio de los valores medidos expresado como un porcentaje que indica el grado de precisión de un modelo. Este concepto se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$REMC = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (E_{j,c} - E_{j,m})^2}{n}}}{\frac{\sum_{j=1}^n E_{j,m}}{n}}$$

Donde  $j$  es el numero ordinal del valor,  $n$  es el numero de valores registrados,  $E_{j,c}$  es el valor de iluminancia obtenida con el modelo,  $E_{j,m}$  es el valor de iluminancia medida con el fotómetro. Aplicando la ecuación se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se presentan en la tabla 2, en la cual se incluye también el valor de la eficacia luminosa para el día nublado y despejado. Con estos valores se puede afirmar en un día despejado el valor de eficacia luminosa y la precisión del modelo son mayores que en un día nublado.

**TABLA 2 >**

Comparativa de los valores de eficacia luminosa y error medio cuadrático para día despejado y nublado.

TIPO DE CIELO	EFICACIA LUMINOSA (K)	ERROR MEDIO CUADRÁTICO
Despejado -25 marzo	115.81 lm/W	5.85%
Nublado - 27 marzo	114.78 lm/W	9.29%

---

## 1.10. COMPONENTES DE LA LUZ NATURAL.

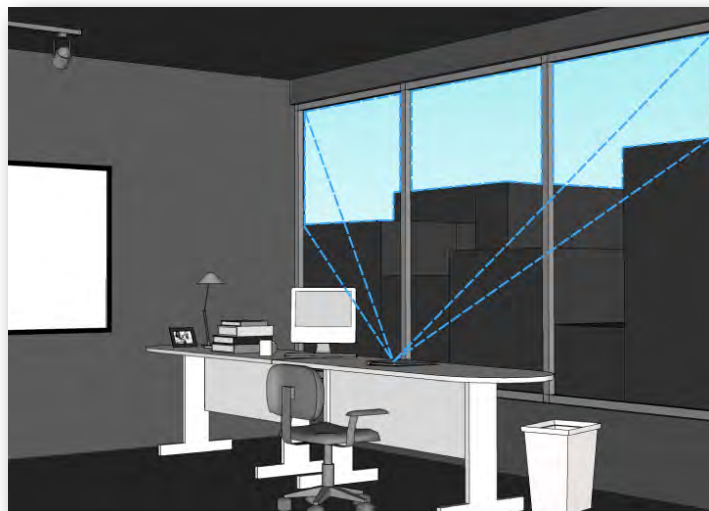
---

Antes de analizar las variables arquitectónicas que determinan la forma en que se iluminan los espacios, es necesario explicar los componentes de la luz natural y la forma en que interactúan fuera y dentro de los espacios, para finalmente llegar al un punto de referencia determinado. La luz que llega al interior de un espacio en un punto específico, esta conformada por tres componentes.

Primeramente está la luz que llega directamente desde el cielo llamada **Componente del Cielo** (CC). En segundo lugar esta la luz que llega de forma reflejada de elementos exteriores como lo pueden ser edificios u otras superficies, el cual es llamando **Componente Reflejado Exterior** (CRE). Y finalmente esta la luz que es reflejada por las superficies internas del espacio, **Componente Reflejado Interior** (CRI).

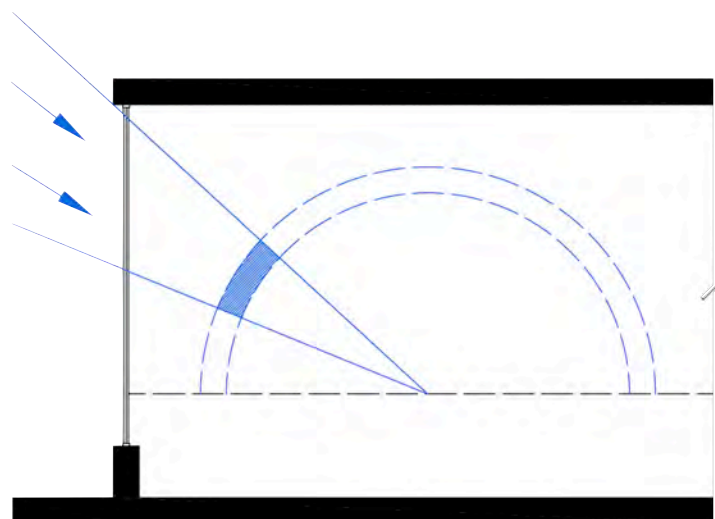
### Componente del cielo (CC)

Se refiere a la porción del cielo que se puede ver a través de una abertura como lo puede ser una ventana sin considerar la incidencia solar directa. Toma en cuenta la luz que llega desde la bóveda celeste y que pasa libremente por encima de elementos adyacentes (edificios, árboles, anuncios). Depende directamente de las propiedades de la ventana o vano por donde accede la luz al espacio, las dimensiones de la cancelería, además del material que filtra el paso de luz (cristal, plástico, membranas). En el caso del componente del cielo, este aporta el mayor porcentaje de luz natural que hay en un espacio interior, motivo por el cual el cielo durante muchos siglos fue considerado como la principal fuente de iluminación.



< **FIGURA 15**  
Componente de Cielo (CC)

.....



**FIGURA 16 >**  
Diagrama del Componente de Cielo (CC)

De hecho era considerada una condición indispensable para que los espacios fueran tuvieran las condiciones de habitabilidad y funcionalidad según el teórico romano Vitruvio<sup>54</sup>, el cual habló de las características de las ventanas en su famoso tratado "Los diez libros de Arquitectura", en su libro sexto establece lo siguiente:

***Debe ponerse el máximo cuidado en que todos los edificios queden perfectamente iluminados. Conseguir este objetivo parece muchos más sencillo en las casas de campo ya que no se interponen las paredes de viviendas vecinas que puedan obstaculizar su luminosidad; en la ciudad, sin embargo, la altura de las paredes comunes y las calle angostas constituyen un verdadero inconveniente para la luminosidad de las viviendas [...] debe procederse siempre de forma que las aberturas de las ventanas queden situadas en cualquier parte que permita contemplar el cielo; así se lograrán edificios bien iluminados.***

#### Componente reflejado exterior (CRE)

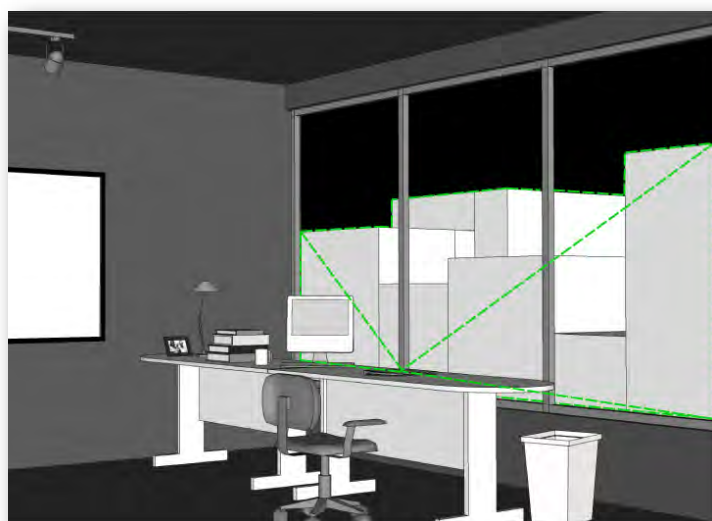
Es la luz que llega al punto de referencia proveniente del reflejo en superficies externas al espacio. Estas superficies pueden ser edificaciones o algunos elementos de estas. En este caso no se considera la luz proveniente del suelo, aunque en los nuevos métodos de cálculo se toma en cuenta como un factor a considerar, pero no como un componente de la luz. Sobre este factor se hablara más adelante cuando se aborden los métodos de cálculo.

Este componente es de gran importancia sobre todo en zonas urbanas o construidas, sin importar su densidad debido a que las edificaciones son objetos conformados por superficies que a su vez reflejan la luz proveniente de forma difusa del cielo y la directa proveniente del sol.

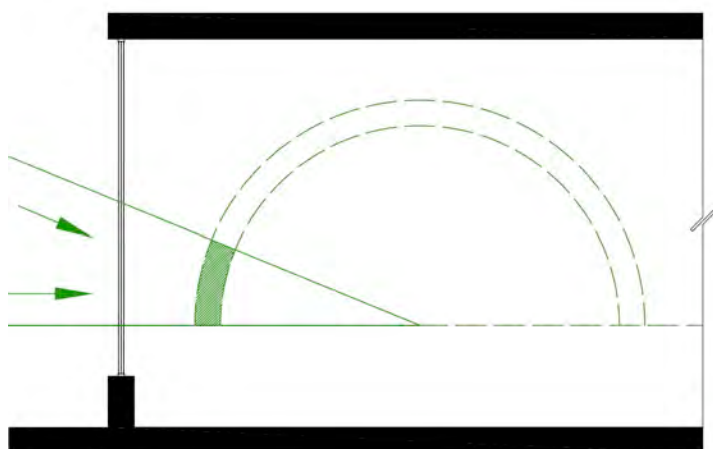
<sup>54</sup> **VITRUVIO, Marco Lucio**, *Los diez libros de Arquitectura*, Alianza Editorial, España, 2006, pp. 246.

Por lo tanto la proximidad entre las edificaciones es un factor que determina tanto el componente del cielo como los reflejos exteriores. Esto quiere decir que hay casos en los cuales un edificio bloquea totalmente la luz proveniente del cielo, sin embargo, puede aportar iluminación por medio de la luz que se refleja en él. En otras palabras se puede recibir luz natural reflejada evitando ganancias de calor por medio de la radiación directa que incide en la ventana.

La cantidad de luz que es reflejada por elementos exteriores puede ser fácilmente calculada tomando en cuenta la porción del cielo que esta obstruyendo. Debido a que la luz que "emiten" estos objetos es producto del fenómeno de la reflexión, se consideran las propiedades ópticas de los materiales con los cuales están cubiertas las superficies. Los factores de reflectancias de las superficies determinan la forma en que la luz es absorbida o reflejada.



< **FIGURA 17**  
Componente Reflejado Exterior  
(CRE)



< **FIGURA 18**  
Diagrama del Componente  
Reflejado Exterior (CRE)

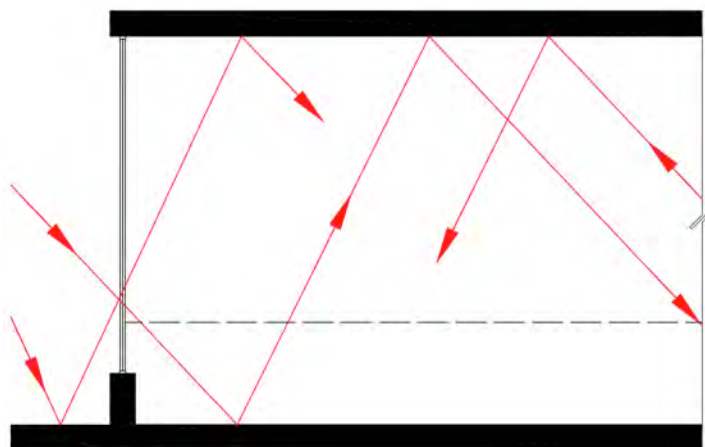


### Componente reflejado interior (CRI)

Una vez que la luz proveniente del cielo o reflejada de las superficies externas pasa por la ventana o un vano, esta se dispersa en interior de espacio y llega a al punto de referencia. Esta dispersión se lleva a cabo mediante la interacción de la luz con los elementos interiores como lo son las superficies (piso, muros, plafón) y los objetos (mobiliario, objetos decorativos). En este caso el CRI también contempla la luz que proviene de los elementos exteriores más próximos.



**FIGURA 19 >**  
Componente Reflejado Interior (CRI)



**FIGURA 20 >**  
Diagrama del Componente Reflejado Interior (CRI)

La mayoría de las ocasiones, este valor es mínimo, por lo tanto algunas metodologías de cálculo no lo consideraban. Sin embargo en estudios recientes se han retomados los valores de estos elementos en casos de ciudades densamente pobladas, en donde hasta los "valores despreciables" son incorporados para mejorar los niveles de iluminación.<sup>55-56</sup>

<sup>55</sup> LI, H.W. Danny, et al., *A simplified procedure for determining indoor daylight illuminance using daylight coefficient concept*, Building and Environment, 2006, vol. 41, pp. 578-589.

<sup>56</sup> LI, H.W. Danny, et al., *Simple method for determining daylight illuminance in a heavily obstructed environment*. Building and Environment, 2009, vol. 44(5), pp. 1074-1080.

El valor del CRI generalmente se obtiene de tablas debido a que su cálculo es largo y complicado. La complejidad radica en el número de variables que se deben tomar en cuenta. Hoy en día gracias a los programas de cómputo, estas operaciones pueden llevarse a cabo de una forma rápida. Una característica importante del CRI es que mantiene un comportamiento relativamente uniforme en todo el espacio. Esto quiere decir que a diferencia de los otros dos componentes (Componente de Cielo y Componente Reflejado Exterior), su valor es independiente de la distancia entre el punto de referencia y la ventana. El valor del CRI adquiere una importancia mayor cuando en un espacio el punto de referencia está muy alejado de la ventana y el CC desaparece ( $CC=0$ ). Es decir, cuando los edificios no permiten "ver" el cielo desde el punto de referencia. Esta situación también se puede dar en el caso del CRE cuando por la orientación que presenta el espacio dificulta el paso de la luz que viene de las superficies externas.

---

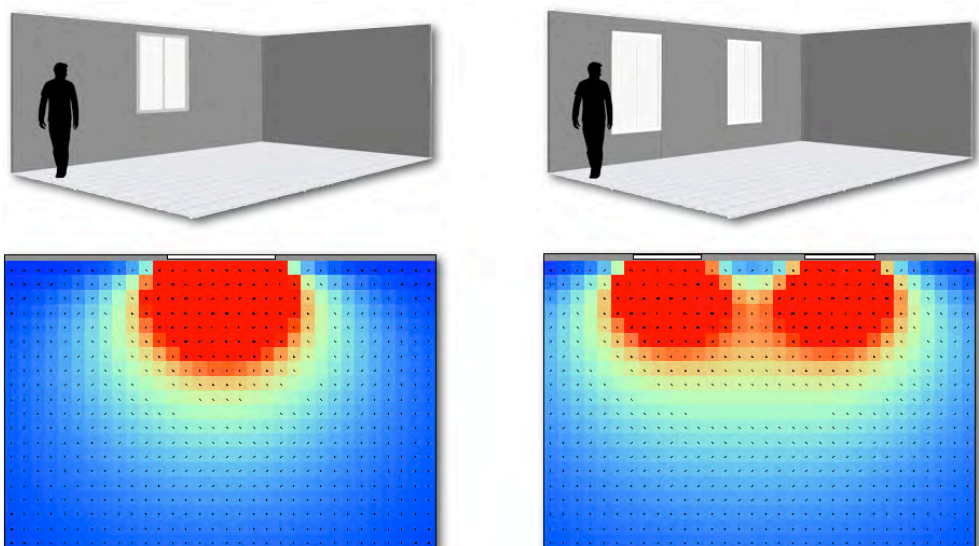
### 1.11. DISTRIBUCIÓN DE LA LUZ NATURAL - INFLUENCIA DE LA FORMA Y POSICIÓN DE LAS VENTANAS

---

Para decidir si un espacio recibe la iluminación adecuada y comprobar si las ventanas tienen la forma correcta y la debida posición, es necesario efectuar el cálculo del factor de luz de día para varios puntos respecto a la posición de la ventana sobre el plano de trabajo y trazar líneas curvas que unan los mismos puntos (isolineas). De estas curvas puede deducirse la distribución general de la luz natural sobre el plano de trabajo y la contribución de luz que aporta cada una de las ventanas. Las curvas indicarán los puntos donde la luz puede ser insuficiente y por el contrario, la cantidad de luz puede ser excesiva. Para hacer estos estudios hoy en día se cuentan con herramientas que permiten hacer análisis de tipo cualitativo y cuantitativo. En ambos casos es importante mencionar que muchas de estas herramientas consideran pocas variables de diseño, generalmente se consideran únicamente las variables geométricas del espacio y de las ventanas. Sin embargo hoy en día estas variables son los principales factores a considerar en el momento de diseñar debido a que son aquellas que el arquitecto puede determinar como parte de las propuestas de diseño y sobre las cuales tiene el "control" y poder de decisión. Por otro lado y como se verá más adelante, las metodologías de análisis más sencillas consideran estas mismas variables. Un buen diseño de iluminación natural depende, entre otras cosas, de las dimensiones y la ubicación correcta de las ventanas respecto a las dimensiones del espacio a iluminar. Bajo este punto de vista es importante repasar algunas de las propiedades lumínicas que tienen las formas típicas de las ventanas y las condiciones bajo las cuales es posible iluminar un espacio.

#### Ventanas altas y estrechas.

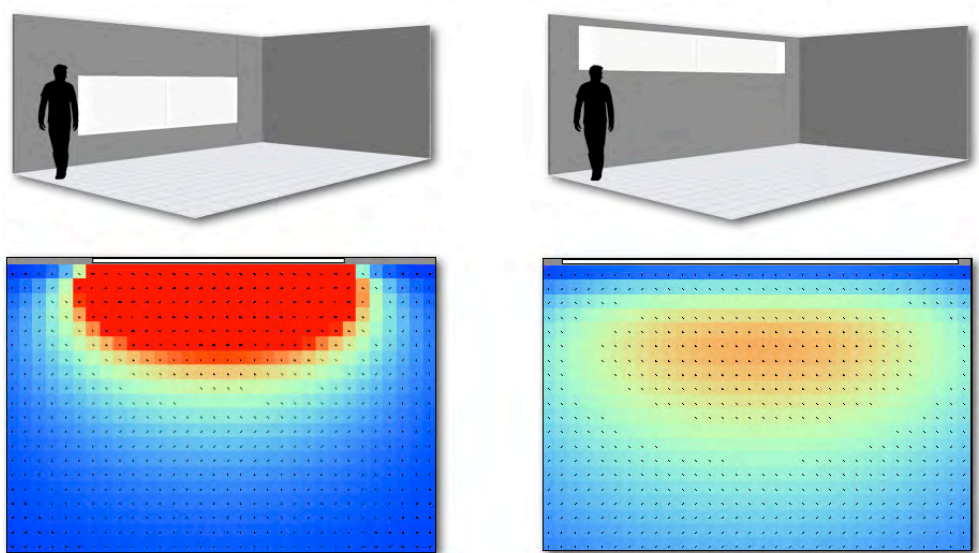
Si tienen la misma superficie de vidrio, las ventanas altas y estrechas proporcionan, en general, mejor accesibilidad de la luz natural en determinados puntos del lado opuesto a las ventanas. Esto es, si se comparan con ventanas largas y bajas. Sin embargo si estas ventanas están en fila y muy separadas unas de otras, la distribución de la luz resulta irregular y algunas zonas del piso y de las paredes adyacentes pueden estar oscuras, a no ser de que incidan sobre ellas, luz proveniente de otras ventanas en el lado opuesto.



**FIGURA 21 >**  
Distribución luminosa de un espacio con ventanas verticales.

Ventanas largas y horizontales.

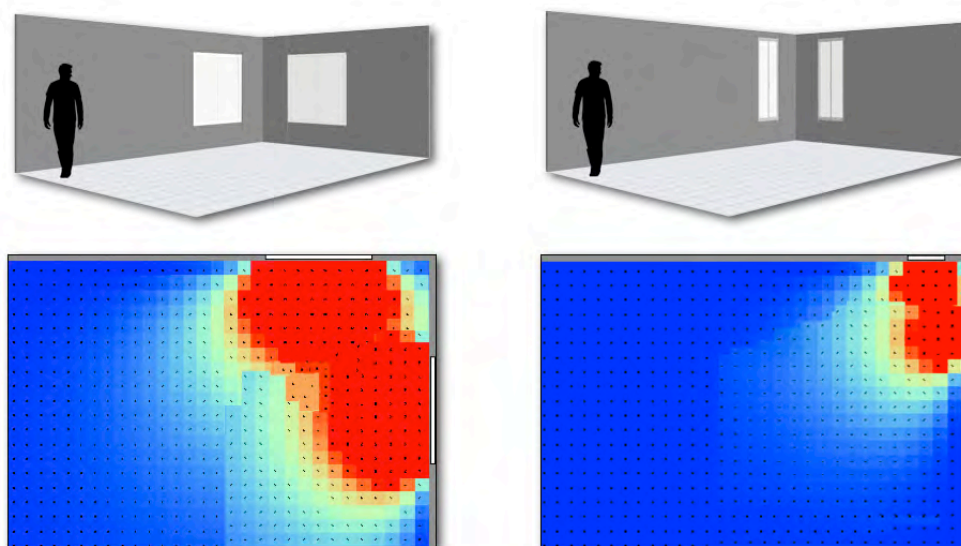
Contrario a lo que pasa con el caso anterior, las ventanas largas y horizontales tienden a facilitar la accesibilidad de la luz. Esto se debe a que las curvas de distribución luminosa que generan es una forma de elipse larga y paralela a la pared opuesta donde se encuentran ubicadas la ventanas. La ventanas de este tipo, que forman series largas y continuas, tienden a ser empleadas en espacios con una profundidad considerable. En estos casos es necesario recurrir a iluminación artificial complementaria. Las ventanas horizontales largas y en una posición alta generan una franja de luz natural paralela a la pared donde se abren pero muy remeteda en el espacio. Con este tipo de ventana (de un solo lado del espacio), el área de la pared debajo de la ventana queda poco iluminada y puede generarse un desagradable contraste de resplandor por la vista del cielo a través de la ventana.



**FIGURA 22 >**  
Distribución luminosa de un espacio con ventanas horizontales.

### Ventanas en paredes adyacentes.

Si las ventanas están ubicadas en paredes perpendiculares o “en escuadra”, darán buena penetración de luz, a no ser que resulten relativamente estrechas y colocadas cerca de la esquina del espacio. También reducen el deslumbramiento, al iluminar el área de pared que rodea la ventana opuesta.



< **FIGURA 23**  
Distribución luminosa de un espacio con ventanas adyacentes.

### Muros cortina

Aunque son las que proveen de mayor cantidad de luz natural y pueden proporcionar una distribución de luz más uniforme en el espacio, presentan una serie de inconvenientes. El primero está relacionado con el deslumbramiento debido al resplandor del cielo o la incidencia del rayo directo del sol. Esto puede ser evitado con dispositivos de control solar como persianas o volados. Otro inconveniente es el calor pueden llegar a ganar debido a incidencia de la radiación solar directa.

### Efectos de las obstrucciones externas

La distribución de la luz procedente de ventanas está condicionada por los elementos urbanos y naturales del entorno exterior contiguo a las ventanas. El efecto de una obstrucción larga, continua y horizontal puede disminuir la accesibilidad de la luz. Salvo en el caso en que el obstáculo tenga un alto poder de reflexión. Esto significa que el efecto de obstrucción externa se modifica hasta cierto punto por las propiedades reflejantes de los materiales, pero, al establecer el límite de las obstrucciones y la visión del cielo que permite, tendremos una idea aproximada de cualquier cambio en el grado de iluminación y una noción general de la cantidad de luz que incide en la ventana.



**FIGURA 24 >**  
Ventana con obstrucciones  
colindantes.  
(A. Valeriano)

---

## 1.12. NORMATIVIDAD SOBRE EL USO DE LA LUZ NATURAL

---

Hasta el momento en que se realizó esta investigación se encontró que la legislación referente a la utilización de la luz natural varía de un país a otro y generalmente se toman criterios muy diversos en cada región del mundo. Sin embargo y a pesar de estas diferencias en gran parte de los manuales y recomendaciones que promueven y regulan la utilización de la luz natural tienen como principal objetivo el propiciar el bienestar de los usuarios. Es importante mencionar que de la normatividad estudiada a nivel internacional se encontró que muchos reglamentos hoy en día basan su argumentación en métodos de estimación de luz natural realizados por medio de datos climáticos y de la disponibilidad de luz natural. Aquí radica la importancia de contar con registros de iluminación natural para poder hacer uso de estas herramientas que permiten aprovechar la luz natural.

Otro aspecto que se debe destacar es el hecho de que cada vez más códigos y reglamentos de construcción se están apoyando de métodos de cálculo. En ellos se establecen niveles máximos, mínimos y los óptimos para el desarrollo de las actividades para las cuales fueron diseñados los espacios. Al realizar un análisis general de la legislación encontramos que se pueden clasificar en tres grandes grupos: la primera y posiblemente la más práctica esta basada en la accesibilidad de los edificios a la insolación.

El segundo tipo de legislación esta relacionada con los requerimientos de ventanas y su tamaño. Este tipo de legislación se encuentra sobre todo en los reglamentos de construcciones. El tercer tipo de legislación se basa en la cantidad de luz natural que prevalece en los espacios. En este caso los métodos de cálculo como el Factor de luz de día cobra mayor importancia debido a que la gran mayoría de los países donde se busca aprovechar la luz natural están estableciendo este método como el "parámetro base".

La legislación referente al factor de luz de Día no apunta hacia conseguir un nivel específico de iluminación natural en un espacio, esto se debe a la constante variabilidad de las condiciones de iluminación que se presentan en el exterior. A diferencia de otros métodos, el Factor de Luz de día se basa en un porcentaje de la luz disponible en ese momento y por lo tanto es mucho más práctico para su utilización en normas y reglamentos. Como ejemplos de utilización del método alrededor del mundo se pueden citar los siguientes:

Francia. En este país, el documento denominando *Cahier des Recommendations Techniques de Construction* (Ministère d'Education, 1977)<sup>57</sup> recomienda un valor mínimo del factor de luz de día en salones de clase de 1.5% bajo condiciones de cielo nublado.

Italia. Mediante el decreto 05/07/75 para casas habitación se estable como área mínima de ventana el 12.5% de área del espacio o un valor del factor de luz de día igual o mayor al 2%. El decreto 18/12/75 para escuelas establece un factor de luz de día de 3% para salones de clase y laboratorios, un valor del 2% en áreas deportivas y un valor de 1% en pasillos, escaleras y sanitarios.<sup>58</sup>

Noruega. El documento denominado "*Tekniske forskrifter til plan og bygningsloven*" de 1997, regula la accesibilidad a la luz natura en casas y oficinas con un valor mínimo de factor de luz de día de 1% hasta la parte media del espacio a un metro de los muros laterales y a una altura de 0.85 metros por encima del nivel de piso, con un área mínima de ventana del 10%.<sup>59</sup>

Reino Unido. Durante el periodo de la posguerra, el gobierno estableció un valor de factor de luz de día mínimo del 2% en salones de clase. Posteriormente esta norma se derogó debido a que encontró que este valor no podía ser alcanzado en condiciones en las que el espacio tiene ventanas en un solo lado. Para lograr esto las ventanas tenían que ser tan grandes que provocaban ganancias de calor por radiación, problemas de confort térmico en los espacios, deslumbramientos y problemas de confort visual en general. Hoy en día En el Reino Unido no existe una normatividad en materia de luz natural.

Sin embargo existe una serie de recomendaciones emitidas por el Building Research Establishment (BRE)<sup>60</sup> que permite cierta flexibilidad en el forma que en los arquitectos y diseñadores en el momento de generar espacios arquitectónicos. Este organismo recomienda un valor de aproximadamente 27% de componente vertical de cielo que recibe una ventana. Este valor se puede conseguir de forma fácil en un entorno con baja densidad de construcción y con alturas de paramentos bajos. En el caso de zonas urbanas altamente densificadas y de grandes alturas este valor no siempre se puede conseguir. Ante esta situación las recomendaciones del BRE se aplican solo a espacios residenciales y que son habitables como lo son, estancias, comedores, recamaras, estudios y cocinas.

<sup>57</sup> **BOUBEKRI, M.**, *Daylighting, architecture and health*, Architectural Press, Inglaterra, 2008, pp. 51.

<sup>58</sup> **BAKER, N.**, *et al.*, *op. cit.*, 2002, pp. 220.

<sup>59</sup> *ibidem*. pp. 221.

<sup>60</sup> **BRE, Building Research Establishment**, *Digest 41: Estimating daylight in buildings*, BRE, Inglaterra, 1970.

Hong Kong. Esta ciudad al ser la más densamente poblada del planeta cuenta con una configuración urbana muy particular. La presencia de grandes complejos habitacionales verticales muy próximos unos de otros provoca que la accesibilidad a la luz natural sea una problema a resolver por parte de los arquitectos. Por este motivo la legislación de esta ciudad contempla un apartado en su reglamento dedicado exclusivamente al tema de la luz natural.<sup>61</sup> De forma general establecen un valor del Factor de luz de día vertical mínimo de 8% para espacios habitables. Para obtener estos valores el documento proporciona una guía del método a emplear para realizar los análisis correspondientes, muchos de los cuales están basados en estudios científicos relativos al factor de luz de día y sus variantes.

La Ciudad de México cuenta con un reglamento de construcción donde se establece el criterio para la utilización de la iluminación natural a partir del dimensionamiento de las ventanas.<sup>62</sup> El reglamento establece que las ventanas no deberán tener un área menor al 17.5% del total del área del espacio a iluminar.

Este breve análisis de los estándares referentes a la iluminación natural dejan claro la deficiencia que existe en relación con el uso y aprovechamiento de luz natural. Si pensamos en la iluminación natural como el uso dinámico de la luz natural en el interior de los edificios para lograr desarrollar una actividad en particular, encontramos que no existe en el mundo una normatividad que regule el uso de este recurso. La normatividad existente que se basa en el tamaño de las ventanas no puede considerarse como legislación de iluminación natural debido a que no necesariamente se traduce en la presencia real de la luz natural en el interior de un espacio. Este caso se puede dar cuando el material con el que está hecha la ventana tenga un bajo coeficiente de transmisibilidad de la luz natural.

En el caso particular de la Ciudad de México se debe resaltar el hecho de que el criterio utilizado carece de fundamento y resulta ser inapropiado debido a que hoy en día existen documentos basados en estudios científicos que demuestran que el cumplimiento del porcentaje mínimo no garantiza que el espacio cuente con la iluminación natural adecuada en cantidad y calidad. Por otro lado se encuentran los estudios que han propuesto nuevas metodologías de análisis para determinar el tamaño de las ventanas. Estas metodologías se pueden dividir en dos categorías: la primera que toma como punto de partida el área del espacio y la segunda considera el área del muro en donde se ubica la ventana. Entre los estudios que se encuentran en la primera categoría destaca el de Hausladen<sup>63</sup> en donde establece que el porcentaje de ventana debe ser entre el 20% y 30% del área del espacio. El argumento principal para estos valores radica en el hecho que porcentajes menores de ventana no garantizan el óptimo aprovechamiento de la luz natural y no propicia que la iluminación natural sea suficiente y adecuada. Similar al estudio anterior encontramos el

---

<sup>61</sup> **Hong Kong Buildings Department**, *Lighting and Ventilation Requirements: Performance-based Approach*, Hong Kong, 2005.

<sup>62</sup> **Gobierno del Distrito Federal**, *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*, México, D.F., 2004.

<sup>63</sup> **HAUSLADEN, G.**, et al., *Climate skin: building-skin concepts that can do more with less energy*, Birkhäuser, Berlin, 2006, pp. 67.

realizado por Ghisi y Tinker<sup>64</sup> quienes proponen una metodología de dimensionamiento de la ventana en función del área del muro, su orientación, la proporción que guarda el espacio en sus dimensiones y respecto al área de ventana y el potencial de ahorro energético mediante la reducción en consumos eléctricos utilizados en iluminar los espacios.

En este trabajo no se llega a un valor en específico debido a que como lo muestran los ejemplos presentados, el valor "ideal" de porcentaje de área dependerá de las proporciones del espacio y su orientación. Por otro lado la carencia de criterios de dimensionamiento de ventanas basados en estudios científicos, pueden generar efectos adversos en desde el punto de vista lumínico, térmicos y acústico. Estos criterios y su efectividad se describen con mayor detalle en el [Capítulo 2.2.](#)

Desde el punto de vista normativo, un mal diseño de ventana puede impedir que se cumplan con niveles mínimos de iluminación establecidos en las normas oficiales mexicanas (NOM).<sup>65</sup> Y aunque no existe normatividad desde el punto de vista térmico, un mal diseño de ventana puede provocar ganancias de calor excesivas lo que ocasiona condiciones de confort térmico adverso. Por todo lo anterior el estudio de otros métodos y criterios de diseño se vuelve necesario para dar solución a esta problemática.

En muchos casos, la legislación basada en el área de la ventana esta dirigida a proveer de vistas y ventilación. Aunque países como Canadá, Alemania y Holanda tienen recomendaciones sobre el uso de la luz natural, ninguno de ellos lo ha establecido como normatividad obligatoria. Para que el uso de luz natural sea utilizado y aceptado, la normatividad respectiva tiene que prescribir niveles de iluminación dentro de un espacio durante un periodo determinado del día, dependiendo de la época del año, las condiciones climáticas de la localidad y por supuesto, el uso y las condiciones del espacio, todo esto sin dejar de considerar las características de los usuarios.

Estas condiciones reglamentarias promoverían de forma inevitable soluciones arquitectónicas mucho más estudiadas y llevaría a los diseñadores hasta el límite del análisis y la creatividad, además de promover estudios mucho más profundos sobre la ubicación, posición y tamaño de las ventanas. Solo así la función de las ventanas tendrá un papel en la provisión de luz natural, contrario a lo que sucede hoy en día con la función de muchas ventanas que solo sirven para generar vistas hacia el exterior y ventilar el espacio. Hasta el día de hoy la gran mayoría de los estudios de luz natural se han enfocado principalmente en el potencial para ahorrar energía eléctrica y debido a esto se ha popularizado su utilización.

A pesar de estos progresos, la energía eléctrica que se utiliza para iluminar los espacios representa el mayor porcentaje de consumo. Muchos códigos y normas a nivel internacional han tratado de revertir esta situación mediante la regulación y promoción de la utilización de la luz natural como fuente principal para iluminar los espacios. Sin embargo el desarrollo tecnológico de los aparatos de

<sup>64</sup> **GHISI EneDir, Tinker John A.** *An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings.* Building and environment. 2005, vol. 40, pp. 51-61.

<sup>65</sup> **Secretaría del trabajo y previsión social,** *Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 Condiciones de iluminación en los centros de trabajo,* México, D.F., 2008.



iluminación artificial los ha hecho cada vez más eficientes por lo que el uso de la luz natural para ahorrar energía ha perdido fuerza y credibilidad, debido a esto la normatividad en materia de iluminación ha realizado ajuste que reflejan estas condiciones. Hoy en día el principal argumento para regular el uso de la luz natural no está fundamentado en el ahorro de energía sino en la procuración de la buena salud de los usuarios.

Para concluir con este apartado se puede afirmar que la normatividad en materia de iluminación tiene algunos obstáculos, unos directamente relacionados con la iluminación en general y otros con su propiedad de ser un recurso natural. Su origen y su calidad espectral, que es muy difícil de reproducir mediante métodos artificiales la hacen un tipo de luz completamente diferente. Al conocer más sobre la naturaleza de la luz es posible hacer predicciones y estimaciones sobre los niveles de iluminación que puede haber tanto en espacios exteriores como interiores. Esto es posible gracias a modelos empíricos y matemáticos además de técnicas de simulación.

---

### 1.13. ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL CÁLCULO DE LA LUZ NATURAL EN ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS

---

Basados en la literatura disponible sobre el tema de iluminación natural y los métodos de cálculo utilizados alrededor del mundo, a continuación se comentan algunos de los artículos más relevantes sobre el tema en un periodo que abarca los últimos 5 años.

Li, Danny H.W., Tsang, Ernest K.W., *An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong*, Building and Environment. 2008, vol. 43, pp. 1146-1458.

En este estudio se utiliza el método de factor de luz día para hacer la comparativa de 35 edificios de oficinas en Hong Kong. Debido a que en esta ciudad el mayor consumo energético en edificios comerciales y de oficinas se da en sistemas de iluminación artificial, se estudió la relación entre la iluminación natural que entra por las ventanas de los edificios y el consumo de energía eléctrica. Se presentan algunos de los aspectos claves que intervienen en el diseño de la iluminación natural. Con esta información se hace la comparativa entre dos edificios mediante programas de cómputo. El desempeño de los edificios desde el punto de vista de la iluminación natural se evalúa en términos del factor de luz de día, profundidad del espacio e índice de deslumbramiento. En el estudio se concluye que es posible lograr ahorros del 25% en el consumo de energía eléctrica mediante el uso adecuado de la iluminación natural.

Li D.H.W., Wong S.L., Tsang C.L., Gary H.W. Cheung. *A study of the daylighting performance and energy use in heavily obstructed residential buildings via computer simulation techniques*, Energy and Buildings. 2006, vol. 38, pp.1343-1348.

La calidad y cantidad de luz natural que entra a un edificio depende tanto de factores internos como de los externos. En Hong Kong, muchos edificios están agrupados en grandes bloques de gran altura construidos unos cerca de otros y

por lo tanto los factores externos juegan un papel significativo en el diseño de la iluminación natural. Este artículo estudia el comportamiento de la luz natural y el consumo de energía en departamentos que presentan obstrucciones del cielo. El análisis de los factores se realiza por medio de simulaciones hechas por computadora.

Se presentan los parámetros constructivos que afectan el diseño de la iluminación natural. Se investiga el desempeño de la iluminación natural para espacios interiores en términos de los niveles de iluminancia y del factor de luz día. Los niveles de iluminación natural para departamentos residenciales pueden verse drásticamente reducidos por edificaciones colindantes y por lo tanto, el componente externo reflejado puede ser la principal fuente de luz natural. Se encontró que la iluminación en el interior de espacios como estancias y cocinas, que están orientadas hacia edificios colindantes, es mucho menor a los requerimientos de iluminación durante el día. Esto implica que muchos departamentos en Hong Kong tengan que depender de iluminación artificial complementaria.

Nabil, Azza, Mardeljevic, John, *Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors*. Energy and Buildings. 2006, vol. 38, pp. 905-913.

En este estudio se plantea una nueva metodología para hacer evaluaciones de la iluminación natural en los edificios. Llamado UDI por sus siglas en inglés (*Useful daylight illuminances*) puede ser traducido como iluminancia natural útil. Este método se basa en datos meteorológicos. A diferencia del método convencional del factor de luz de día, un análisis basado en datos climáticos emplea información real de la variación luminosa del cielo, radiación solar y nubosidad. Según los autores, a diferencia del método convencional del factor de luz de día, el UDI proporciona información de los niveles de luz natural en un punto determinado a cada hora durante un año, información que no puede ser obtenida por el método convencional.

Otra ventaja del método es que puede proporcionar información relevante en el momento en que los niveles de iluminación están por debajo del nivel mínimo para desarrollar una actividad. De la misma manera se pueden estimar los períodos en el día y en el año cuando la incidencia solar puede provocar deslumbramientos y ganancias térmicas indeseables. Para demostrar lo anterior se aplica el método UDI en un caso de estudio considerando también otros factores como lo son: dimensiones del espacio y profundidad. Las comparaciones se hacen entre el método tradicional del factor de luz de día y la autonomía de la luz natural (independencia a la utilización de fuentes de luz artificial).

Cheung H.D., Cheng T.M., *Calculation for the Vertical Daylight Factor on Window Façades in a Dense Urban Environment*, Architectural Science Review, 2005, vol. 48, pp. 81-92.

La configuración y la forma de los edificios en entornos urbanos de alta densidad es uno de los factores principales para obtener la incidencia correcta de la luz natural en las ventanas de los espacios. La metodología para obtener el Factor de luz de día vertical (VDF) es definida y explicada en este estudio, la cual

puede ser utilizada como una medida de la disponibilidad de la iluminación natural en las ventanas de las edificaciones. Los autores manifiestan la carencia de un método que sea comprensible y fácil para hacer el cálculo del valor del VDF. En el estudio se plantea un método que se basa en los principios elementales del VDF. Para ello se aplica en cuatro diferentes casos de estudio con cielo nublado (*overcast*) según la clasificación del CIE. Los resultados obtenidos al aplicar el método de cálculo propuesto se comparan con los resultados obtenidos mediante simulaciones hechas por computadora. Finalmente se presenta un método simplificado que permite hacer el cálculo del factor de luz de día vertical de una forma más sencilla.

Thanachareonkit A., Scartezzin J.L., Andersen M., *Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and test modules*, Solar Energy, 2005, vol. 79, pp.168-182.

La utilización de modelos a escala para hacer evaluaciones del desempeño lumínico de las edificaciones es una práctica muy difundida a lo largo del mundo. Esto se debe a la relativa facilidad de elaborar un modelo a escala. Sin embargo los estudios han demostrado que en los modelos a escala los valores obtenidos son mayores a los que se presentan en casos de estudio reales. Estas discrepancias son provocadas principalmente por los "errores experimentales" así como los errores en la elaboración de la maqueta, los materiales utilizados, los vidrios y los instrumentos de medición. Para analizar las principales fuentes de error en la utilización de modelos a escala el estudio presenta la comparativa entre un espacio a escala real construido especialmente para esta investigación y su respectivo modelo a escala 1:10. Ambos ubicados en la misma posición y en condiciones exteriores idénticas. En el experimento se manejan un gran número de variables físicas con el objetivo de determinar el impacto en la evaluación final de la iluminación natural. En los resultados que arrojó el estudio se determina que uno de estos factores es la precisión en la elaboración de la maqueta y la concordancia entre las propiedades de los materiales del modelo a escala y el modelo real. Otro factor importante es el hecho de que para poder hacer cualquier tipo de medición en el interior de los modelos a escala se debe realizar previamente un ejercicio de calibración de los instrumentos. Otro de los factores que afectan la concordancia entre los resultados es el factor de corrección de coseno de los sensores utilizados para hacer las mediciones.

Li, D.H.W., Cheun, Gary H.W., *Average daylight factor for the 15 CIE standard skies*, Lighting Research and Technology, 2006, vol 38(2), pp. 137-152.

En los cálculos de iluminación el criterio "base" de iluminación es expresado en términos del promedio del Factor de luz de día, esto se realiza tomando en cuenta el cielo completamente nublado según la clasificación del CIE. Esto se debe a que el cielo nublado es considerado como la peor condición bajo la cual se puede hacer uso de la luz natural. Sin embargo esta situación no es la más apropiada para hacer las estimaciones debido a que no representa la totalidad de condiciones posibles. Este estudio presenta una aproximación al cálculo de los valores del promedio del factor de luz de día para los 15 cielos propuestos por Kittler y adoptados por el CIE como estándares a nivel internacional. Los resultados obtenidos mediante el método propuesto en este estudio son comparados contra los resultados de otros dos métodos y simulaciones por computadora.

Li, D.H.W., Lau Chris C.S., Lam Joseph C., *Predicting daylight illuminance on inclined surfaces using sky luminance data*, Energy, 2005, vol. 30, pp. 1649-1665.

La iluminancia natural, particularmente en superficies verticales juega un papel importante en la determinación y evaluación del desempeño lumínico de un edificio. En muchas partes del mundo la información referente a los niveles de iluminación en planos verticales no existe. Para resolver esta carencia de información existe un método comúnmente utilizado para obtener dichos valores basados en las mediciones realizadas en planos horizontales. En este estudio se presenta un método para hacer la estimación de los valores de iluminancia en superficies verticales e inclinadas a partir de las mediciones de la iluminancia del cielo y auxiliados por la geometría solar. Los resultados obtenidos mediante los cálculos propuestos en este estudio son comparados con los datos medidos y de los cuales se tienen registros en la ciudad de Hong Kong. Los resultados demuestran que los valores calculados y los medidos presentan concordancias aceptables, lo que representa una herramienta importante en el caso en que no se cuenten con valores de iluminancia en planos verticales o inclinados.

Naeem M., Wilson M., *A study of the application of the BRE Average Daylight Factor formula to rooms with window areas below the working plane*, Proceedings of 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 2007, Crete Island, Greece.

En el estudio se presenta la evaluación del método denominado "promedio del factor de luz de día" en ventanas que tiene un área mayor o que están bajo el límite del plano de trabajo efectivo. El objetivo es estudiar la influencia de esta área por debajo del plano y evaluar su aportación al resultado final de las estimaciones de luz natural. Este concepto es muy importante sobre todo en ambientes urbanos con densidad alta en la cual los reflejos de las superficies adyacentes a las ventanas son una aportación de luz al interior de los espacios. En este estudio se comparan los valores obtenidos por medio de cálculos manuales utilizando el método del BRE y valores registrados en un modelo a escala. Los resultados muestran que los cálculos suelen sobreestimar los valores cuando se considera el área de ventana que esta por debajo del plano de referencia, llegando a incrementarse hasta 45% comparados con los casos en los que no se considera esta área. Mientras que al comparar los valores registrados en el modelo a escala estos muestran incrementos no mayores al 17%.

En los estudios anteriores se pueden observar algunos puntos en particular y que son comunes a la gran mayoría. El primero que se debe considerar es el hecho de que gran parte de las nuevas metodologías de estimación se basan en principios geométricos del espacio y de su contexto. Aquí radica la importancia de considerar tanto las variables que se encuentran en el exterior de los espacios como aquellas que se encuentran en el interior. Por otro lado es posible apreciar que los algoritmos propuestos generalmente están basados en ecuaciones más simples. Tal es el caso del concepto del factor de luz de día vertical que propone Cheung y Cheng, en el cual se consideran componentes muy similares al los que incorpora el método del Factor de luz de día horizontal.

Aunque hoy en día están surgiendo nuevos métodos de cálculo y análisis, muchos autores se refieren al concepto del factor de luz de día como un paradigma y un referente obligado. Gracias al avance tecnológico en materia de instrumentación es posible incorporar a los algoritmos básicos e "históricos" nuevas variables que los complementan y que permiten mejorar su validez y confiabilidad. Es el caso de los métodos en los cuales se incorpora la distribución luminosa del cielo y que permite hacer análisis mucho más realistas teniendo como base una fuente luminosa real, variable y con propiedades específicas como nubosidad y concentración de partículas.

Como se puede ver, este cambio y adopción de nuevos modelos de cielo resulta de gran utilidad en regiones tropicales y con estaciones bien definidas, situación que no se podía establecer con los modelos tradicionales de cielo propuestos en los años setentas por el CIE. Sin embargo es posible afirmar que el método de factor de luz de día, que tiene como base un cielo completamente nublado se presenta con gran frecuencia en casi todas partes del mundo y la Ciudad de México no es la excepción. Por lo tanto utilizar el modelo de cielo completamente nublado para hacer estudios de iluminación natural no es algo que sea ajeno y mucho menos irreal, con ello se puede garantizar que, hasta en las condiciones con la menor disponibilidad de luz natural se podrá contar con una iluminación suficiente en los espacios interiores de las edificaciones.

Otro rasgo en particular de los nuevos métodos propuestos es que estos son validados mediante la comparación con otros métodos más simples, con otros más complejos, simulaciones por computadora y principalmente contra mediciones realizadas en un espacio ya sea a escala o real. Este procedimiento que se ha vuelto obligado para la mayoría de los estudios presentados tiene dos ventajas principales. Por un lado permite demostrar el grado de validez y confiabilidad del procedimiento, los resultados y su aplicación final. La otra ventaja que resulta aun más significativa es que para hacer la comparación, los investigadores aplican el método a un caso de estudio, el cual en la mayoría de los casos, trata de acercarse a espacios reales o toma como ejemplo un espacio construido. Este procedimiento da la posibilidad de que sea replicado por otros investigadores en otra localidad, en otro momento y bajo circunstancias similares lo que permite a su vez hacer una comparación de resultados.

En este punto es conveniente mencionar que los avances tecnológicos en computación y procesamiento de información han sido determinantes para el desarrollo de nuevos métodos de cálculo, que de otra forma habrían sido muy difíciles de generar debido al gran número de variables que se tienen que analizar. Por un lado encontramos que hay mucha información que conforma toda la base de datos que entra a los programas de cómputo (*input*) y por otro lado están los resultados (*output*). En el caso de los resultados es muy importante que puedan ser manejables, interpretables y aplicables en los diseños arquitectónicos, por lo tanto, la representación en forma de imágenes que permiten los nuevos equipos de cómputo se vuelven imprescindibles.

Desde el punto de vista energético existe una urgencia de contar con métodos que permitan dotar de buena iluminación a los espacios tomando en cuenta los consumos y ahorros que se pueden obtener. A pesar de esto no se deja de considerar como un factor determinante la salud y confort de los usuarios. Estos temas, junto con el rendimiento escolar y laboral en espacios de

trabajo, son los más recurrentes en los estudios que involucran el uso de la luz natural.

En general las herramientas de cálculo se enfocan en obtener los niveles óptimos de iluminación para un espacio con una función determinada y realizada por los usuarios, aquí radica la importancia de tomar en cuenta a las personas en cualquier estudio similar. Por último es importante mencionar que, aunque el hecho de aumentar las variables a los métodos de cálculo aumenta el grado de precisión y permiten tener niveles de confianza y validez muy altos, esta provoca que su aplicación sea mucho más difícil y poco práctica. Esta combinación hace que las nuevas metodologías no sean adoptadas por los arquitectos y diseñadores debido al tiempo, instrumental y conocimiento que se debe tener para poder aplicarlas, dejando a los verdaderos especialistas en el tema como los únicos personajes capaces de utilizar estas herramientas.

## REFERENCIAS - CAPÍTULO 1

---

<sup>3</sup> **BOYCE, PR.**, Hunter, C., Howlett, O., *The Benefits of daylighting through Windows*, US Department of Energy, EUA, 2003. pp. 2.

<sup>4</sup> **STEIN, Benjamin**, et al., *Mechanical and electrical equipment for buildings*, 9ª ed., John Wiley and Sons, E.U.A., 2000, pp. 1049

<sup>5</sup> **VAN DER ROHE, Mies**, *Architecture and Technology*, Arts and Architecture, 1950, No.10.

<sup>6</sup> **BLANCO, Manuel J.**, *Psicofísica*, Universitas, España, 1996.

<sup>7</sup> **BECKETT, H.E.**, *Ventanas: Función, diseño e instalación*, Gustavo Gili; España, 1978. pp. 14.

<sup>8</sup> **BOYCE, PR.**, *op. cit.*, 2003. pp. 3.

<sup>9</sup> **ROSENTHAL, Norman**, et al., *A Description of the Syndrome and Preliminary Findings With Light Therapy*, Archives of General Psychiatry, 1984; vol. 41(1), pp. 72-80.

<sup>10</sup> **TERMAN**, et al., *Light therapy for seasonal affective disorder: A review of efficacy*, Neuropsychopharmacology, 1989; vol. 2(1), pp. 1-22.

<sup>11</sup> **LURIE, S.**, et al., *Seasonal affective disorder*, American Family Physician, 2006, vol. 74(9), pp. 1521-1524.

<sup>12</sup> **TORRINGTON, J., Tregenza, P.**, *Lighting for people with dementia*, Lighting Research & Technology, 2007, vol. 39(1), pp. 81-97.

<sup>13</sup> **EBERHARD, John**, *Applying Neuroscience to Architecture*, Neuron, 2009, vol. 65, pp. 753-756.

<sup>14</sup> **BOUBEKRI, Haghigat.**, *Windows and environmental satisfaction: A survey study of an office building*, Indoor and Built Environment, 1993; vol. 2(3), pp. 164-172.

<sup>15</sup> **KESSLER, R.**, et al., *Prevalence and effects of mood disorders on work performance in a nationally representative*

*sample of U.S. worker*, American Journal of Psychiatry, 2006; vol. 163(9), pp. 1561-1568.

<sup>16</sup> **ARANDA Molina, Ana**, *Diseño de sistemas de iluminación biológico - dinámica: en áreas de oficinas en México*, Tesis de Maestría en Arquitectura, UNAM, México, 2009.

<sup>17</sup> **CASTELLANOS Bala, Elvia**, *Efectos de radiación solar sobre el ojo Humano*, Tesis de Especialidad en Oftalmología, Facultad de Medicina, UNAM, México, 2001.

- <sup>18</sup> **SLINEY, D.**, *Photoprotection of the eye-UV radiation and sunglasses*, Journal of Photochemistry & Photobiology, 2001; vol. 64, pp. 166-175.
- <sup>19</sup> **BIERMAN, A., Klein, Read.** *The daysimeter: a device for measuring optical radiation as a stimulus for the human circadian system*, Measurement Science and Technology, 2005, vol. 16, pp. 2292-2299.
- <sup>20</sup> **BOUBEKRI M.**, *Daylighting, architecture and health*, Architectural Press, Inglaterra, 2008, pp. 104.
- <sup>21</sup> **LERNER, Steve**, *Eco-Pioneers: Practical Visionaries Solving Today's Environmental Problems*, MIT Press, E.U.A., 1998, pp. 200
- <sup>22</sup> **HERSCHONG MAHONE GROUP**, *Daylighting in schools: an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, California Board for Energy Efficiency third party program, E.U.A., 1999.
- <sup>23</sup> **OLIVA Mendoza, Felix**, *Efectos del medio físico sobre el rendimiento escolar*, Tesis de maestría en Psicología Ambiental, UNAM, México, 2006.
- <sup>24</sup> **GELLER, R., et al.**, *Safe and healthy school environments*, The Pediatric Clinics of North America, 2007, vol. 54, pp. 351-373.
- <sup>25</sup> **MUHLIA V., Agustín**, *Notas del curso: Solarimetría*, 30 Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Veracruz, Ver., México, 2006.
- <sup>26</sup> **CETTO, Ana María**, *La luz: en la naturaleza y en el laboratorio*, Fondo de Cultura Económica, 3a. Edición, México, 2003.
- <sup>27</sup> **STEIN, Benjamin, et al.**, *op. cit.*, pp. 1114.
- <sup>28</sup> **KITTLER, R., et al.**, *A new generation of sky standards*. Proc. Conf. Lux Europa, 1997, pp. 359-373.
- <sup>29</sup> **CIE**, *Spatial distribution of daylight*, CIE central bureau, Viena, 2003.
- <sup>30</sup> **NG, Edward, et al.**, *Defining standard skies for Hong Kong*. Building and Environment, 2007, vol. 42(2), pp. 866-876.
- <sup>31</sup> **STEIN, Benjamin, et al.**, *op. cit.*, pp. 1115.
- <sup>32</sup> **WMO, World Meteorological Organization**, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: WMO No. 8*, World Meteorological Organization, Suiza, 2008. Disponible en línea, Fecha de consulta Junio 2010
- [http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO\\_Guide-7th\\_Edition-2008.html](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.html)
- <sup>33</sup> **KOTA, S., et al.**, *Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and Their Use in Energy Performance Simulations*. Proceedings of the Ninth International Conference for Enhanced Building Operations, Austin, Texas, E.U.A. 2009.
- <sup>34</sup> **TREGENZA, P.**, *Tropical daylighting*, Lighting Research & Technology, 2003, vol. 35(1), pp.1-2.
- <sup>35</sup> **PAGE, J.K.**, *First conference on measurement and modeling of solar radiation and daylight "Challenges for the 21st Century"* Energy, 2005, vol. 30(9), pp. 1501-1515.
- <sup>36</sup> **EVANS, JM., TORRES S.**, *El recurso de iluminación natural en Buenos Aires: Resultados de un año de Mediciones*, ASADES, 2001.
- <sup>37</sup> **SOUZA, R., PEREIRA F.**, *Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento*, Ambiente Construído, 2004, (en portuges).
- <sup>38</sup> **CIE**, *Guide to recommended practice of daylight measurement*, CIE, Viena, 1994.
- <sup>39</sup> **LÓPEZ Montelongo, Areli**, *Niveles de iluminancia en los cubos de luz de la comarca lagunera, (ABC-01)*, Memoria de la XXXI Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Zacatecas, México, 2007.
- <sup>40</sup> **CALDERÓN Vázquez, Roberto, et al.**, *Modelos de iluminancia global para cielos claros en zonas áridas de México*, Memoria de la XX Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Jalapa, Veracruz, México, 1996, pp. 399-402.
- <sup>41</sup> **PEREZ, R. et al.**, *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*. Solar Energy, 1990, vol. 44(5), pp. 271-289.
- <sup>42</sup> **MUNEER, Tariq**, *Solar radiation & daylighting models*, Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2ªed., Reino Unido, 2004, pp. 114.

- <sup>43</sup> **VARTIAINEN, A.**, *A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements*, *Renewable energy*, 2000, vol. 20, pp. 265-277
- <sup>44</sup> **He, Ng**, *Using satellite-based methods to predict daylight illuminance for subtropical Hong Kong*, *Lighting Research & Technology*, 2010, vol. 42(2), pp. 135-147.
- <sup>45</sup> **MUNEER, Tariq.**, *op. cit.*, 2004, pp. 104.
- <sup>46</sup> **PEREZ, R.** *et al.*, *op. cit.*, 1990. pp. 271.
- <sup>47</sup> **ROBLEDO, L., SOLER, A.**, *Luminous efficacy of direct solar radiation for clear skies*, *Energy*, 2000, vol. 25(8), pp. 689-701
- <sup>48</sup> **VARTIAINEN, A.**, *op. cit.*
- <sup>49</sup> **TSIKALOUKAKI, K.**, *A study on luminous efficacy of global radiation under clear sky conditions in Athens, Greece*, *Renewable energy*, 2005, vol. 30, pp. 551-563.
- <sup>50</sup> **JOSHI, M.**, *et al.*, *Estimation of Luminous efficacy of daylight and exterior illuminance for composite climate of Indore city in Mid Western India*, *Renewable energy*, 2007, vol. 32, pp. 1363-1378.
- <sup>51</sup> **ZAIN-AHMED, A.**, *et al.* *The availability of daylight from tropical skies--a case study of Malaysia*, *Renewable energy*, 2002, vol. 25, pp. 21-30.
- <sup>52</sup> **BETMAN, E.**, *Eficacia luminosa en Mendoza*, *Avances en energía y medio ambiente*, 2001, vol. 5, pp. 19-24.
- <sup>53</sup> **SOUZA, R., ROBLEDO, L.**, *Testing diffuse luminous efficacy models for Florianópolis, Brazil*, *Building and Environment*, 2004, vol. 39, pp. 317-325.
- <sup>54</sup> **VITRUVIO, Marco Lucio**, *Los diez libros de Arquitectura*, Alianza Editorial, España, 2006, pp. 246.
- <sup>55</sup> **LI, H.W. Danny**, *et al.*, *A simplified procedure for determining indoor daylight illuminance using daylight coefficient concept*, *Building and Environment*, 2006, vol. 41, pp. 578-589.
- <sup>56</sup> **LI, H.W. Danny**, *et al.*, *Simple method for determining daylight illuminance in a heavily obstructed environment*. *Building and Environment*, 2009, vol. 44(5), pp. 1074-1080.
- <sup>57</sup> **BOUBEKRI, M.**, *Daylighting, architecture and health*, Architectural Press, Inglaterra, 2008, pp. 51.
- <sup>58</sup> **BAKER, N.**, *et al.*, *op. cit.*, 2002, pp. 220.
- <sup>59</sup> *ibidem*. pp. 221.
- <sup>60</sup> **BRE, Building Research Establishment**, *Digest 41: Estimating daylight in buildings*, BRE, Inglaterra, 1970.
- <sup>61</sup> **Hong Kong Buildings Department**, *Lighting and Ventilation Requirements: Performance-based Approach*, Hong Kong, 2005.
- <sup>62</sup> **Gobierno del Distrito Federal**, *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*, México, D.F., 2004.
- <sup>63</sup> **HAUSLADEN, G.**, *et al.*, *Climate skin: building-skin concepts that can do more with less energy*, Birkhäuser, Berlin, 2006, pp. 67.
- <sup>64</sup> **GHSI EneDir, Tinker John A.** *An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings*. *Building and environment*. 2005, vol. 40, pp. 51-61.
- <sup>65</sup> **Secretaría del trabajo y previsión social**, *Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*, México, D.F., 2008.





# METODOLOGÍA PROPUESTA

# 2

- 2.1 ESTUDIOS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN LAS EDIFICACIONES
- 2.2 CRITERIOS Y ECUACIONES BÁSICAS
- 2.3 EL FACTOR DE LUZ DE DÍA (FLD)
- 2.4 CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DEL FACTOR DE LUZ DE DÍA
- 2.5 MATRIZ DE RELACIONES ENTRE DIMENSIONES DE VENTANA Y DISTANCIAS AL PUNTO DE REFERENCIA
- 2.6 SIMULACIÓN Y CÁLCULO DE ILUMINACIÓN NATURAL POR COMPUTADORA
- 2.7 IMÁGENES DE ALTO RANGO DINÁMICO (HDR)
- 2.8 EVALUACIONES POST-OCUPACIONALES

## 2. METODOLOGÍA PROPUESTA

### 2.1. ESTUDIOS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN LAS EDIFICACIONES

Dada la diversidad y complejidad tipológica y geométrica de los edificios, es muy difícil realizar un tratamiento riguroso de carácter analítico del cálculo de iluminación natural. A esta situación se debe agregar el hecho de que en muchas partes del mundo no existe información sobre el comportamiento y disponibilidad de la luz natural.

Con el objetivo de conocer de forma detallada las herramientas disponibles hoy en día para hacer estudios y evaluaciones de iluminación natural se analizaron varios artículos en los que se muestran los resultados de investigaciones en diferentes partes del mundo.<sup>66</sup> Con esta información se busca tener un mejor entendimiento de cuál es “el estado del arte” en materia de herramientas (guías, manuales, software) utilizadas en el estudio de la luz natural en la arquitectura. Como se podrá apreciar en las [referencias](#) y las [lecturas sugeridas](#), existen una gran cantidad de información relativa a la utilización de la luz natural en espacios arquitectónicos y a nivel de planeación urbana. Sin embargo la gran mayoría de estos textos están en inglés y otros son muy especializados. Esta situación, en un país como México representa un importante obstáculo para la difusión del conocimiento, los diferentes métodos de cálculo y análisis, así como de las herramientas disponibles para hacer los estudios y evaluaciones de iluminación natural. Ante esta situación habría que sumar el hecho de que en México desafortunadamente tanto en ambientes escolares como profesionales, la luz natural en la arquitectura es considerada como un aspecto que requiere, por parte del arquitecto: intuición, sensibilidad, buen gusto, experiencia y criterios subjetivos. Los estudios sistemáticos, el análisis de los componentes del sistema de iluminación, la aplicación de métodos y herramientas científicas no son implementadas al proceso de diseño arquitectónico. Para fundamentar estas afirmaciones se buscaron estudios en donde se presentaran datos sobre la forma en que se realizan estudios de iluminación y su aplicación al diseño. En México no existen estudios de este tipo sin embargo se encontraron varios estudios tanto en la Comunidad Europea como en el Norte (Canadá) y el sur de América (Brasil).

El primero de ellos fue realizado en el año de 1996 por el BRE<sup>67</sup>, el cual consistió en un cuestionario que se envió por correo a 323 diseñadores y despachos de arquitectura, de los cuales solamente el 20% fueron regresados al BRE para su análisis. De esta cifra (30) más de la mitad (55%) nunca realizan cálculos y estimaciones de iluminación natural, el resto (45%) lo hacen de forma poco habitual y dependiendo del proyecto. De los que respondieron la encuesta se lograron identificar alrededor de 18 programas de cómputo y 27 métodos manuales.

Sin embargo se encontró que los programas de cómputo son utilizados principalmente por especialistas en materia de iluminación natural. Un dato

<sup>66</sup> **INANICI, M.**, *Application of the state-of-the-art computer simulation and visualization in architectural lighting research*, Proceedings of 7th IBPSA Conference, Brasil, 2001.

<sup>67</sup> **AIZLEWOOD, LITTLEFAIR.** *Daylight prediction methods A survey of their use*, Memorias de la conferencia nacional en iluminación, Bath, Inglaterra, CIBSE, 1994. pp. 136-140.

significativo es que solo el 20% de los que respondieron la encuesta han utilizado métodos cálculo simples como el factor de luz de día promedio y la gran mayoría no toman en cuenta las características de los acabados. Este estudio concluye que existe un gran potencial para el desarrollo de la iluminación natural y sus métodos de cálculo (manuales, programas de computo, maquetas), sin embargo se requiere de mucho trabajo para convertirlos en herramientas practicas y fáciles de aprender y utilizar.

El segundo estudio fue realizado en el año de 2008 en Brasil<sup>68</sup> y tuvo como objetivo conocer la forma en que trabajan los despachos de arquitectura especializados en estudios de iluminación. El estudio consistió en entrevistar 14 despachos registrados como especialistas en diseño de iluminación y demostró que el 71% de las oficinas se concentran exclusivamente en proyectos de iluminación artificial y el resto en proyectos de iluminación natural y artificial. De los entrevistados la gran mayoría mencionó que sus servicios son requeridos en etapas avanzadas del proyecto arquitectónico cuando las decisiones que afectan directamente el desempeño lumínico de los espacios ya han sido tomadas, esto da como resultados que los estudios de iluminación tengan poco margen de influencia.

Sobre los métodos utilizados el 85% de los entrevistados manifestó utilizar programas computacionales para hacer los estudios de iluminación siendo el modelado 3D y la generación de perspectivas virtuales la más recurrente en un 35% de los entrevistados. En cuanto a las guías o normas en las que se basan para hacer los diseños de iluminación el 80% dijo basarse en las recomendaciones del IESNA y en segundo lugar toman como base la norma brasileña NBR 5413 de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas. Finalmente el estudio concluye que existe una falta de información y de herramientas en el campo de la iluminación natural que permitan integrar esta disciplina en los proyectos arquitectónicos. Por último, el tercer y más completo estudio analizado, se realizó también en el año de 2008 en Canadá, el objetivo principal fue conocer la forma en que los equipos de diseño que realizan estudios de iluminación natural con el interés de mejorar el proceso de análisis y evaluación de los proyectos.<sup>69</sup>

Este estudio realizado por el Instituto de Investigación en la Construcción (IRC por sus siglas en ingles) con sede en Ottawa, llevó a cabo encuestas para conocer la manera que son utilizadas las herramientas disponibles para realizar estudios de iluminación natural. El estudio tuvo como principales objetivos, en primer lugar, entender cuáles son los principales indicadores del desempeño en la utilización de luz natural como fuente de luz y las herramientas utilizadas por los diseñadores para la integración de este recurso en los proyectos. Como segundo objetivo se buscó identificar la información adicional que puede ser requerida y que muchas veces no esta disponible en guías de diseño o manuales. Como último objetivo se buscó encontrar la información que debería incluirse en nuevas guías y manuales de diseño de iluminación natural. A partir de la encuesta realizada a 177 participantes se encontró que el 90% apoya la creación y

---

<sup>68</sup> **GUIMARÃES Toledo, Beatriz**, *Integração de iluminação natural e artificial: métodos e guia prático para projeto luminotécnico*, Tesis de Maestría en Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Brasília, Brasil, 2008, pp. 127-130. (En Portugués).

<sup>69</sup> **GALASIU, REINHART**. *Current daylighting design practice: a survey*, Building Research and Information, vol. 36(2), 2008, pp. 159-174.

desarrollo de una nueva guía de diseño bajo la modalidad de “*en línea*” que les facilite el acceso a métodos de cálculo sencillos y también a otro tipo de herramientas de diseño avanzadas para el diseño de iluminación natural. El estudio también arrojó como resultado que hoy en día se están utilizando un gran cantidad de métodos no estandarizados o regulados (recetas), por lo tanto no existe un “acuerdo” o convención acerca de los métodos para llevar a cabo evaluaciones del desempeño lumínico en términos cuantitativos y cualitativos. Esto provoca que tampoco existan métodos para analizar el ahorro de energía eléctrica, evaluar efectos como el deslumbramiento, reflejos y otros factores que influyen en el confort lumínico de los usuarios de los espacios. Otra consecuencia de esta falta de estandarización es el desconocimiento del tema y mal entendimiento sobre lo que significa un “buen diseño” de iluminación. A partir de la popularización de sistemas de evaluación y certificación que establecen como factores a evaluar la calidad de los espacios y la utilización de luz natural, el interés en el estudio de la iluminación natural ha tenido un auge en los últimos 10 años. Esta situación también ha provocado el incremento de normas, reglamentos y manuales de diseño enfocados únicamente en el uso correcto de la luz natural (Ver apartado referente a [normatividad](#)). A pesar de estos avances la discusión entre la comunidad de diseñadores y científicos puede continuar durante algunos años más. La controversia se ha concentrado en encontrar las unidades de medición y por lo tanto, las unidades de evaluación, más adecuadas que permitan analizar las cualidades espaciales y lumínicas de las construcciones. Mientras tanto los arquitectos, ingenieros y diseñadores hacen uso de la gran variedad de herramientas disponibles en la actualidad (reglamentos, normas, guías, manuales, programas de computadora y “recetas de cocina”).

Un dato importante que arrojó el estudio es el hecho de que la gran mayoría de las personas involucradas en el diseño de espacios considera el uso de la luz natural como un aspecto importante a considerar en el proyecto. Sin embargo existe todavía un porcentaje de participantes (19%) que no incluyen la iluminación natural entre los puntos prioritarios de diseño. Los motivos de esta situación son principalmente: la falta de conocimiento de las herramientas utilizadas para realizar los estudios, el desconocimiento del tema y la falta de instrucción. Otro motivo es que los clientes no pagan por los estudios y no los ven como un aspecto esencial del proyecto. Para aquellos que consideran el uso de luz natural el uso de las herramientas de diseño y cálculo se vuelve un punto fundamental que contribuye en la etapa de anteproyecto y proyecto.

Entre las herramientas más utilizadas se encuentran los programas de simulación y cálculo por computadora, seguidos del conocimiento que deja la experiencia de trabajos previos. En tercer lugar se encuentran las “recetas” y las guías de diseño. Como última alternativa se considera el uso de modelos a escala y mediciones. Con referencia a los criterios o “unidades” utilizadas para hacer los estudios de iluminación natural se encontró que la mayoría (46%) utilizan el criterio de “accesibilidad a la luz y las vistas”. Algunos se basan en los criterios enunciados por los criterios de certificación de edificios, mientras que otros utilizan maquetas y técnicas de visualización (perspectivas y renders). Sin embargo la mayoría confía en su experiencia, intuición o métodos personales, argumentado que las “vistas” sirven como estrategias de venta o para satisfacer necesidades subjetivas de los usuarios. En segundo lugar (64%) se encuentra la evaluación del reflejo dentro de los espacios, sin embargo solo la mitad de este porcentaje utilizan criterios de evaluación basados en información científica y el resto lo deja a la experiencia y la percepción de carácter subjetivo de cada individuo.

El 38% de los participantes en el estudio mencionaron al factor de luz de día como el criterio utilizado para hacer los estudios de iluminación natural, esto se debe a que en varios manuales y reglamentos (IESNA, DIN) se establecen los valores a considerar. Respecto al tema energético, una gran mayoría de los encuestados (78%) mencionaron que el ahorro que se puede conseguir mediante la utilización de la luz natural es un indicador a considerar en el diseño de la iluminación. A pesar de esto el 20% considera que con el simple hecho de utilizar más luz natural se pueden conseguir ahorros en energía eléctrica y por lo tanto no utilizan herramientas de cálculo o simulación durante las etapas del proyecto.

Al estudiar quiénes son los agentes que más influyen en la toma de decisiones sobre el diseño de iluminación, se encontró que el 84% considera que es el arquitecto el que debe encabezar el equipo de trabajo en aspectos de iluminación natural y por lo tanto el que debe tener mayor influencia. En segundo lugar (43%) mencionó que es el cliente el que debe influir de forma mayoritaria. Por último se mencionaron a los diseñadores de iluminación y a los consultores (30% y 22% respectivamente). Del total de encuestados el 65% considera que las decisiones se deben tomar de forma conjunta para no dejar caer la responsabilidad en una sola persona. Por último y con respecto a las limitaciones que existen para implementar el uso de la iluminación natural en los proyectos se encontró que las restricciones de tiempo y presupuestos son los principales factores que impiden la realización de estudios de iluminación, seguida de la garantía de funcionamiento adecuado de los sistemas implementados y la falta de asesores o especialistas en el materia. Como se mencionó anteriormente este estudio fue realizado en Canadá y permite analizar la situación que guarda el tema de la iluminación y la arquitectura en otras partes del mundo.

En el caso de México se pueden esperar condiciones muy similares debido a que el estudio del tema de la luz natural no ha sido muy desarrollado. Esto se puede comprobar al analizar la cantidad de material publicado en libros, tesis de grado y revistas especializadas, así como la cantidad de trabajos presentados en congresos nacionales referentes al tema. Por citar un ejemplo, al momento de escribir este documento, en la edición número 33 de la Semana Nacional de Energía Solar organizada por la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) en el año 2009, de un total de 53 trabajos presentados en torno al tema de Arquitectura se presentaron únicamente dos trabajos referentes al tema de la iluminación natural.<sup>70</sup> A pesar de esto también se puede afirmar que el interés en el tema crecerá debido que ha generado el tema como una opción muy viable para el ahorro de energía utilizada en los edificios.

En los capítulos que se presentan a continuación se explicaran los métodos de cálculo y análisis que han sido desarrollados y utilizados como herramienta durante el proceso de diseño y evaluación de la iluminación natural en espacios arquitectónicos. De forma general podemos agrupar los métodos presentados en este capítulo tomando dos criterios. El primero es periodo en el tiempo en el cual pueden ser utilizados. Por periodo de tiempo entendemos el ciclo de vida de un proyecto arquitectónico, es así que prácticamente todos los métodos, desde las ecuaciones básicas hasta las imágenes de alto rango dinámico, pueden ser utilizados durante la etapa de proyecto (antes de la construcción) como herramientas auxiliares. Esto permite que durante el proceso de toma de

<sup>70</sup> **Asociación Nacional de Energía Solar**, *Memoria de la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, Guadalajara, México, 2009.

decisiones, los resultados de las estimaciones y su análisis dan pie a que se puedan llevar a cabo revisiones, correcciones al proyecto y para justificar las propuestas finales. Por otro lado se presentan métodos que pueden ser utilizados en objetos arquitectónicos construidos y cuyo principal objetivo será de evaluar el comportamiento y desempeño lumínico dentro de los espacios. El segundo criterio esta basado en el tipo de análisis que se puede llevar a cabo mediante el método propuesto. Es así que podemos obtener resultados de forma cuantitativa, que incluyen la estimación de valores, niveles y/o porcentajes del factor de luz de día. De forma cualitativa se pueden obtener: modelos tridimensionales, *renders*, animaciones, recorridos virtuales, imágenes en escala de colores e imágenes de alto rango dinámico. De forma resumida, la elección del método a utilizar dependerá del momento en que se utilicen las herramientas, del grado de precisión que requiera en los estudios y evaluaciones o en su de defecto, la forma de presentar los resultados.

Como se podrá apreciar, cada uno de los métodos presentados a continuación tienen rasgos especiales que los distinguen de los demás, aunque algunos guardan cierta similitud debido a que parten del mismo principio, podemos afirmar que no son iguales en su procedimiento de aplicación y por lo tanto en los resultados que arrojan. Por todo esto es importante mencionar que se debe realizar un análisis previo de los métodos para determinar cual es el más apropiado en el caso de estudio que se aborde. Para confirmar esta idea en el Capítulo 4 (aplicación de la metodología) se presentan tres casos de estudio en donde se aplica la metodología propuesta en el Capítulo 3. En estos ejercicios es posible observar algunos de los criterios utilizados para determinar los métodos de análisis empleados en cada caso particular. Aunque cada herramienta es distinta y esta destinada a un objetivo en particular se puede afirmar que todas ellas de manera general, persiguen por lo menos uno de los siguientes aspectos:

- Permitir la visualización del comportamiento lumínico de un espacio que utiliza luz natural.
- Estimar valores de iluminancia, iluminancia o factor de luz de día.
- Identificar el potencial de deslumbramiento, brillantez y contrastare de un espacio.
- Evaluar el grado de confort visual que se puede presentar en el espacio.
- Determinar el potencial de ahorro de energía mediante el uso de luz natural.
- Identificar la incidencia de los rayos directos del sol y diseñar dispositivos de control.
- Visualizar el comportamiento dinámico de la luz natural a lo largo de un periodo de tiempo.

Parte de las intenciones de esta investigación es que diera como resultado un documento que pudiera servir de base para desarrollar estudios similares y que también sirviera como una breve guía que permita poner en práctica algunas de las técnicas aquí propuestas. Motivo por el cual se presentan a continuación los aspectos más importantes que se deben contemplar en el caso de hacer estudios similares o en la aplicación de algunas de los métodos de cálculo y análisis aquí presentados.

1. *Conocimiento previo sobre el tema.* Para hacer cualquier estudio de iluminación natural es necesario contar con los conocimientos básicos como lo son: principios físicos (radiación solar y luz natural), unidades de medición, principios de solarimetría e instrumentos de medición, computación y manejo de los programas relacionados (hojas de calculo, bases de datos, simuladores).

2. *Experiencia en el manejo de las herramientas.* Algunas herramientas de calculo así como programas de computo requieren de cierto grado de experiencia en su manejo debido a la complejidad del procedimiento. Por este motivo resultará más fácil la obtención de resultados confiables una vez que el usuario adquiera experiencia en el uso de las herramientas.

3. *Recursos disponibles (instrumentos, personal, material, software, presupuesto).* Los recursos muchas veces determinan el grado de precisión y confiabilidad de los estudios así como de sus resultados. Si pensamos en estudios en los que se vea involucrado el uso de instrumentos de medición, estos deberán cumplir con los criterios mínimos de calidad en su manufactura así como de su calibración. Por lo tanto el rango de error de los resultados estarán en función de la calidad de los instrumentos de medición y naturalmente de su precio en el mercado.

4. *Tiempo disponible para la ejecución de estudio.* Al hablar del tiempo, muchas veces los estudios de iluminación que implican mediciones en sitio, requieren de una mayor cantidad de tiempo debido a la instalación de instrumentos y al periodo de medición que se quiera abarcar. A esto hay que agregar el hecho de que las mediciones tienen que llevarse a cabo bajo condiciones cambiantes del clima lo que puede llegar a prolongar los periodos de medición y en general, de todo el estudio.

5. *Etapas del proyecto en la cual se realiza el estudio.* Como se mencionó anteriormente, existen herramientas que son más útiles que otras dependiendo de la etapa en la que se encuentre el desarrollo de un proyecto y por lo tanto la precisión de los resultados obtenidos será mayor entre más definido se encuentre. Es así que pueden utilizarse las herramientas más sencillas en la etapa de anteproyecto y las más complejas (debido a que requieren más variables) en la etapa de proyecto ejecutivo.

6. *Grado de precisión del análisis y confiabilidad de los resultados.* Dependiendo del grado de precisión requerido en los estudios serán las herramientas que se utilicen. Las herramientas más sencillas tienen menor grado de precisión debido a que incorporan solo unas cuantas variables del total que pueden ser consideradas. Las más complejas y por lo tanto más precisas, son aquellas que incluyen todas las variables posibles: climáticas, geométricas, arquitectónicas y de contexto urbano-ambiental.

7. *Forma de presentar los resultados de los análisis.* Algunas herramientas arrojan resultados que únicamente son visibles mediante gráficas o tablas de datos, lo que las hacen más difíciles de interpretar para aquellas personas que no están familiarizadas con el tema. Por otro lado existen resultados cuya representación es más "visual" lo que facilita su análisis y aplicación para fines de diseño arquitectónico.

8. *Complejidad del proyecto.* Es posible afirmar que la complejidad de las herramientas es directamente proporcional a la complejidad del proyecto así como a sus dimensiones. Esto se ve reflejado en el tiempo que requiere el estudio de un proyecto de gran complejidad y a la cantidad de información que a su vez puede contener. Aunque por otro lado existen soluciones



arquitectónicas en las cuales es posible replicar un estudio siendo válido debido a que las modificaciones que se pueden presentar son mínimas. Por ejemplo un complejo habitacional de alta densidad o en un edificio de oficinas en donde las dimensiones de los vanos, así como de los espacios se conservan y lo único que cambia es la orientación y la altura a la cual esta ubicada la ventana respecto al nivel del piso.

9. *Disponibilidad de información y bases de datos (climáticos, lumínicos).* Como se mencionó con anterioridad, contar con la información referente a las condiciones climáticas así como de los registros de iluminación es básico para hacer cualquier tipo de estudio. De lo contrario se corre el riesgo que los estudios tengan un carácter subjetivo o su confiabilidad sea inferior a la que se puede obtener con datos procedentes de mediciones en un observatorio.

10. *Campo de aplicación de los resultados. (cumplimiento de normatividad, certificación, ahorro de energía, mejorar desempeño del espacio, salud de los usuarios, productividad).* En función de la utilización de los estudios es posible definir las herramientas a utilizar debido a que con las herramientas más sencillas es posible comprobar el cumplimiento con normas y reglamentos. Por otro lado es posible que los estudios tengan el fin de evaluar el desempeño lumínico de un espacio construido y su potencial de ahorro energético, por lo tanto algunas herramientas serán más útiles que otras.

11. *Normatividad vigente.* Como se estableció en el apartado referente a la normatividad en el uso de la luz natural en las edificaciones, esta cambia de una región a otra. Por este motivo es necesario verificar los requerimientos de carácter legal y hacer que los resultados de los estudios de iluminación concuerden con lo solicitado. Por lo tanto si una norma exige cumplir con un número determinado de luxes en los espacios, la herramienta utilizada para hacer los estudios, deberá proporcionar los resultados en dichas unidades.

12. *Objetivos del estudio (diagnostico, estimación, demostración, comprobación).* Es posible que en ciertas ocasiones los estudios de iluminación sean utilizados únicamente como respaldo a las decisiones que ya han sido tomadas en un proyecto por lo tanto su fin ultimo será comprobar la efectividad de los criterios utilizados, como las dimensiones de las ventanas. Por otro lado los estudios pueden ser utilizados como un fundamento para realizar cambios a un espacio determinado, al servir como "pruebas" que avalen y den soporte a las posibles adecuaciones.

13. *Integración y compatibilidad entre métodos.* Algunas de las herramientas que se estudian en este documento surgen de un mismo principio, por lo tanto, aunque tengan variantes es posible afirmar que son compatibles. Esta situación debe ser considerada sobre todo en el uso de programas de computo. Los resultados de los modelos de simulación y programas de cálculo son generados por la computadora mediante un código en particular, por lo tanto la compatibilidad de los archivos que se generen posibilitan la comunicación entre las distintas herramientas.

14. *Grado de replicabilidad del estudio.* Cada proyecto es único, sin embargo es posible establecer condiciones que posibiliten la repetición de los estudios para fines similares o en otro periodo de tiempo. Es así que existen herramientas que han sido utilizadas por muchos años y otras que han sido reemplazados. Nuevamente, esta situación se presentan con mayor frecuencia con el uso de programas de computo los cuales son reemplazados por nuevas versiones, lo que impide que sean replicados con otro programa similar en otro periodo de tiempo.

---

## 2.2. CRITERIOS Y ECUACIONES BÁSICAS

---

Ante una situación como la que se presenta en el apartado anterior en la cual la falta de herramientas sencillas representan un impedimento para hacer estudios de iluminación, existen algunas ecuaciones y criterios básicos para poder dotar de iluminación natural un espacio. Estos sencillas "recetas" tienen un fundamento científico igual de sencillo que su formulación y aplicación. Sin embargo, es importante mencionar que estos criterios y ecuaciones están restringidos a casos muy simples en los cuales se cuenta con un espacio y un ventana en uno de sus lados.

Otra limitante es el hecho de que consideran pocas variables del total de posibilidades que interactúan en los espacios. Debido a lo anterior es recomendable usar estos métodos con la debida precaución y durante las primeras etapas de diseño, ya que los resultados obtenidos presentarán un margen de error mucho mayor en comparación con los métodos de cálculo más complejos (Factor de luz de día y software)

### Apertura efectiva

El concepto denominado "Apertura efectiva" esta basada mayormente en el sentido común, aunque como se verá más adelante, puede ser convertida a un algoritmo que sirve como parámetro para dimensionar una ventana o tragaluz. El sentido común indica que a mayor área de apertura mayor será la cantidad de luz natural que recibe el espacio. Sin embargo es importante considerar el material del que esta hecho la ventana porque de este último depende la cantidad la luz que lo atraviesa y llega al espacio.

De estos dos principios se puede concluir que el área de una ventana no puede ser el único parámetro para estimar los niveles de iluminación natural, como auxiliar en el proceso de diseño y mucho menos puede ser considerado para establecer un parámetro normativo como en el caso del reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Para ir más allá es necesario establecer una relación entre el área efectiva y las propiedades del material con el que esta cubierto el vano, en particular de su transmisibilidad. Autores como Greg Ander<sup>71</sup> proponen que el área efectiva este en función de una proporción ventana-muro y la transmisibilidad del material. Esto se establece en la siguiente ecuación:

$$AE = P_{VM} \times T_v$$

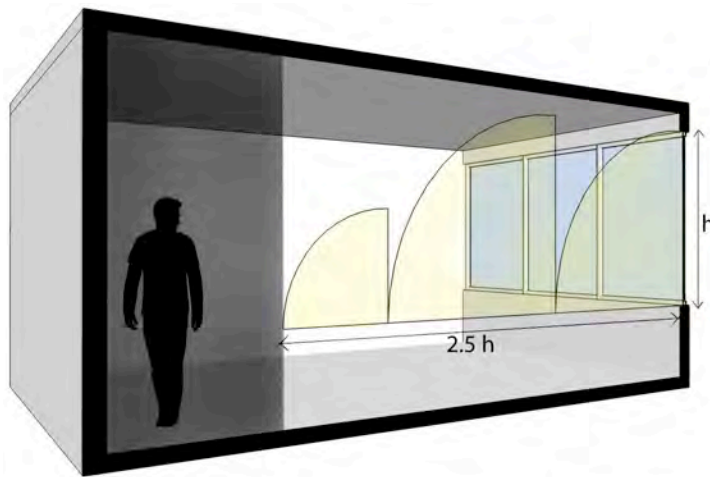
Donde  $AE$  es la apertura efectiva,  $P_{VM}$  es la proporción ventana-muro y  $T_v$  es la transmisibilidad del material de la ventana. Cabe aclarar que este concepto puede ser aplicado de la misma forma para aberturas en posición horizontal (domos).

---

<sup>71</sup> **ANDER, Greg**, *Daylighting performance and design*, John Wiley & Sons, E.U.A. 1995. pp. 12.

### Dimensiones y ubicación del vano

La ubicación de los vanos y ventanas afectan directamente la forma en que la luz natural ilumina los espacios. A una ventana con una ubicación con mayor altura respecto al nivel del piso, mayor será la accesibilidad que tenga la luz al interior. Este factor combinado con las dimensiones de la ventana son un criterio que puede utilizarse con fines de análisis de la posible distribución de la luz natural. Entre la "recetas" más populares que utilizan estas variables encontramos la que determina que la accesibilidad de la luz será aproximadamente 2.5 veces la altura de la ventana, medida desde el antepecho a la parte superior (figura 25). Más allá de esta distancia se requerirán otros sistemas auxiliares para poder elevar los niveles de iluminación en la parte más alejada de la ventana.

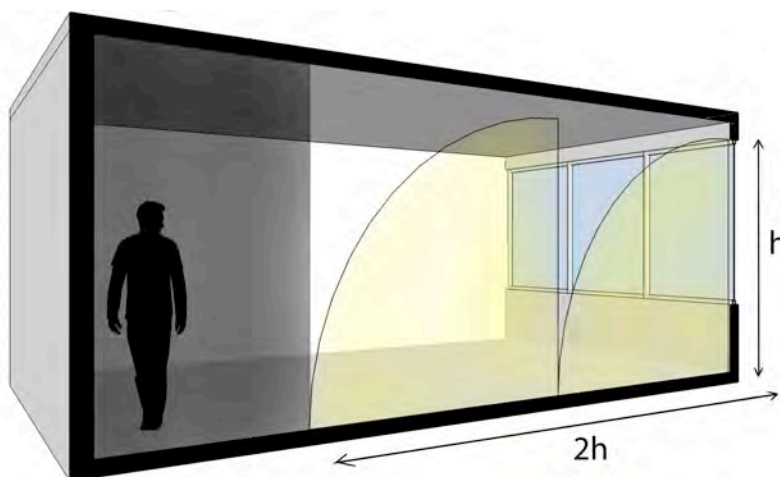


< FIGURA 25

Iluminación de un espacio en función de la dimensión de la ventana.

(Reproducido de Ander 1995)

Un método muy similar es el que presenta Baker<sup>72</sup> en la cual se establece que un espacio que está iluminado por una ventana contará con una iluminación adecuada siempre y cuando la profundidad no exceda dos veces la altura medida desde el nivel de piso al límite superior de la ventana. (figura 26)



< FIGURA 26

Iluminación de un espacio en función de la dimensión de la ventana.

(Reproducido de Baker 2002)

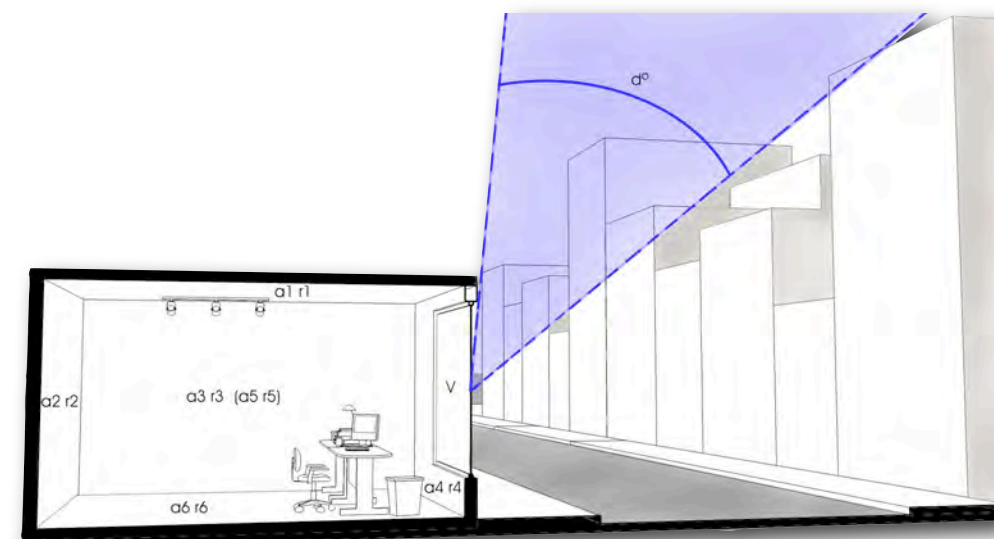
<sup>72</sup> BAKER, N., *et al.*, *op. cit.*, 2002. pp. 64.

Estas simples reglas, aunque no son absolutas, pueden ser útiles para fines de diseño en las primeras etapas del proyecto porque, además de ayudar a pre-dimensionar el tamaño de las ventanas, permiten determinar las dimensiones máximas de los espacios contiguos a las ventanas.

#### Área de ventana en función del Factor de luz de día promedio

Aunque el cálculo completo del Factor de luz de día se describe de forma detallada en el siguiente capítulo, el cual es utilizado para configuraciones arquitectónicas más complejas que un espacio rectangular con una ventana en uno de sus muros; es posible llevar a cabo cálculos en los que se incluya este concepto. En el caso de estudios simples Lynes y Littlefair<sup>73</sup> proponen utilizar el concepto del factor de luz de día promedio para determinar el área de ventana necesaria para alcanzar el nivel promedio de FLD deseado con un rango de error de +/- 10% comparado con los valores medidos en el espacio.

Este método es muy útil sobre todo en las primeras etapas de diseño en donde es necesario establecer las dimensiones y proporciones de ventanas con respecto a las dimensiones del espacio y los acabados. La ecuación que utiliza relaciona los siguientes conceptos: el área de la ventana (que esta en función del valor deseado de FLD), la porción del cielo que es posible ver por la ventana, las áreas del espacio y sus reflectancias, la transmisibilidad del material de la ventana y un factor de mantenimiento. (figura 27).



**FIGURA 27 >**  
Diagrama de los componentes de la ecuación del Factor de luz de día promedio.  
(Reproducido de Baker 2002)

La ecuación establece lo siguiente:

$$V = \frac{FLD_{prom} \times A(1 - R^2)}{d \times T \times M}$$

<sup>73</sup> LYNES, J., LITTLEFAIR, P., *Lighting energy savings from daylight: estimation at the sketch design stage*, Lighting Research & Technology, 1990, vol. 22(3), pp. 129-137.

Donde  $V$ = área de la ventana ( $m^2$ ),  $FLD_{prom}$ =factor de luz de día promedio,  $A$ =área de todas las superficies interiores ( $m^2$ ),  $R$ =reflectancia interior promedio que se obtiene a partir de la suma de los productos de las áreas de las superficies por sus reflectancias, entre la suma de las áreas ( $a_{irj}$ ),  $d$ =ángulo vertical de la porción de cielo visible sin obstrucciones (medido desde el centro de la ventana en grados),  $T$ =valor de transmisibilidad de material de la ventana,  $M$ =factor de mantenimiento de la ventana (Tabla 3).

UBICACIÓN DEL ESPACIO	INCLINACIÓN DE LA VENTANA	TIPO DE TRABAJO EN EL	
		SUCIO	LIMPIO
Área no industrial	Vertical	0.9	0.8
	Inclinada	0.8	0.7
	Horizontal	0.7	0.6
Área industrial sucia	Vertical	0.8	0.7
	Inclinada	0.7	0.6
	Horizontal	0.6	0.5

< **TABLA 3**  
Factores de mantenimiento ( $M$ ) dependiendo de las condiciones de limpieza del espacio.  
(Baker 2002)

Siguiendo este procedimiento es posible obtener matrices en donde se relacionen los valores del ángulo de obstrucción y el área de ventana requerida con respecto al área del piso, para obtener un valor del factor de luz de día promedio. De esta forma se puede establecer una serie de combinaciones "típicas" o estándar y que son comúnmente utilizadas. A su vez es posible generar matrices en donde se relacionen los valores, las cuales pueden resultar muy útiles en las primeras etapas de diseño cuando se determinan las dimensiones de las ventanas. Dichas matrices pueden ser de dos tipos: la primera, en donde se obtengan los valores de FLD promedio, dependiendo del área de ventana, las características del espacio y el ángulo de obstrucción de la ventanas; la segunda, es la opción de obtener el área de ventana mínima para satisfacer un valor de FLD promedio.

Para ejemplificar los anterior, a continuación se presenta un ejercicio realizado por el investigador Edward N.G.<sup>74</sup> en espacios residenciales en varios niveles y de alta densidad típicos de la ciudad de Hong Kong bajo las siguientes características:

- Alto=2.5 m.
- Ancho=3m.
- Profundidad=5m.
- Reflectancia plafón=0.8
- Reflectancia muros=0.6
- Reflectancia piso=0.2.

<sup>74</sup> **NG. Edward.** *A simplified daylighting design tool for high-density urban residential buildings*, Lighting Research & Technology, 2001, vol. 33(4) pp. 259-272.

Ángulo de obstrucción ( $d$ )	PORCENTAJE DE VENTANA RESPECTO A LA SUPERFICIE DEL ESPACIO		
	$FLD_{prom=1\%}$	$FLD_{prom=1.5\%}$	$FLD_{prom=2\%}$
20°	21.2%	31.8%	42.3%
30°	14.1%	21.2%	28.2%
40°	10.6%	15.9%	21.1%
50°	8.5%	12.7%	16.9%
60°	7.1%	10.6%	14.1%
70°	6.0%	9.1%	12.1%
80°	5.3%	7.9%	10.6%

**TABLA 4 >**  
Porcentajes de área de ventana respecto al área del piso para determinados valores de FLD promedio. (Edward 2001)

### Dimensiones del espacio

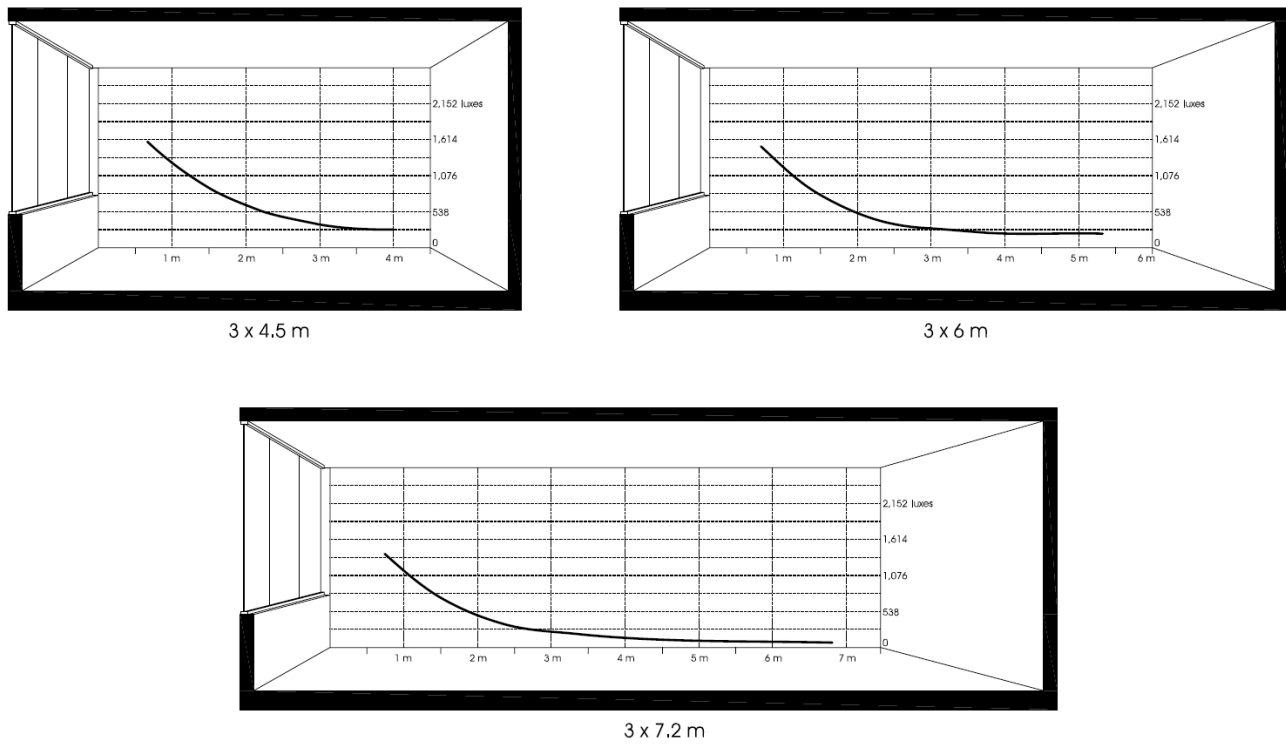
Por otro lado encontramos que la geometría de los espacios juegan un papel fundamental en la forma en que se comporta la luz natural. En primera instancia, la altura del plafón respecto al límite superior de la ventana afecta la manera en que la luz natural ilumina el espacio, ya que a mayor altura del plafón, mayor será la distancia que tenga que recorrer la luz y menor será el reflejo de la luz sobre esta superficie y las adyacentes.

La profundidad del espacio también es un factor primario del comportamiento de la luz natural y su intensidad. Si un espacio cuenta con una ventana que cuenta a su vez con una ubicación y medidas constantes, así como altura de muro a plafón también constantes, al variar la profundidad del espacio se alterarán los niveles de iluminación. Por este motivo se puede establecer que a mayor profundidad del espacio la cantidad de luz que entra por una ventana se distribuirá a lo largo de toda el área. Ander<sup>75</sup> proporciona unas figuras en las cuales se puede ver el comportamiento de la luz para diferentes profundidades del espacio. (figura 28).

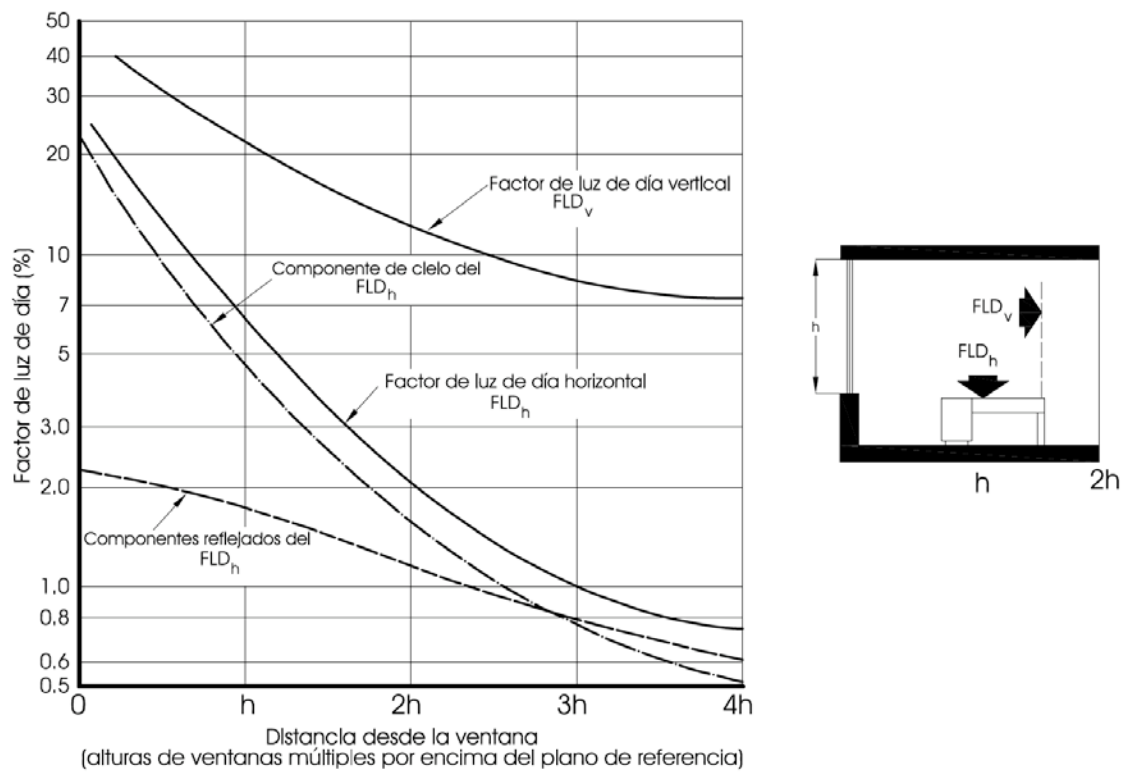
Una gráfica similar es la que presenta Stein<sup>76</sup> en la cual se relaciona la altura de la ventana para determinar el valor de FLD en función de la distancia de la ventana. En este caso es importante hacer notar que como en los casos anteriores no se considera el valor del ancho de la ventana sin embargo incorpora un valor probable del factor de luz de en un plano vertical el cual, como se puede apreciar en la figura 29, es proporcionalmente mayor al factor de luz de día en el plano horizontal.

<sup>75</sup> ANDER, Greg, *op.cit.*, pp. 13.

<sup>76</sup> STEIN, Benjamin, *et al.*, *op. cit.*, pp. 1123.

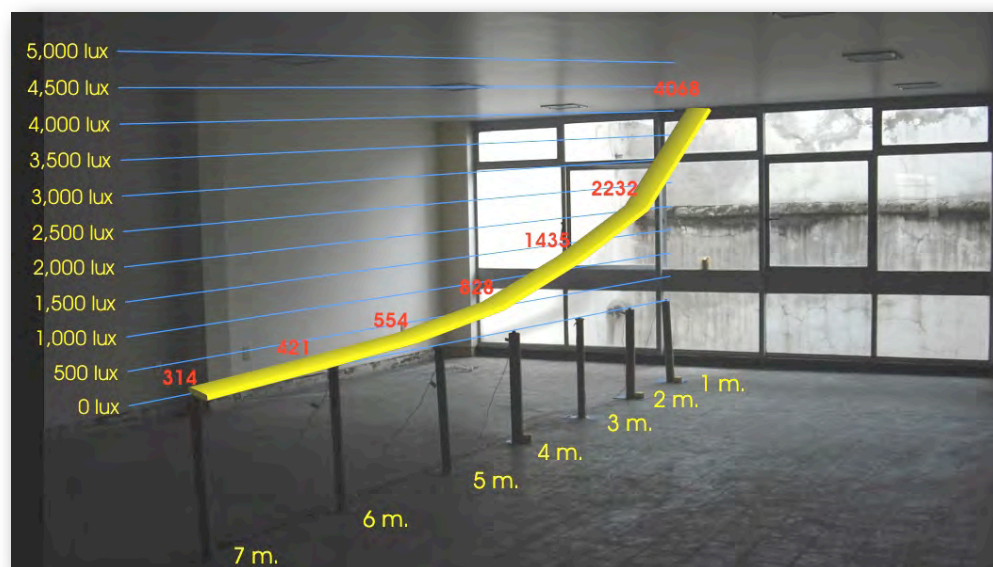


**FIGURA 28.** Distribución de la luz natural en función de la profundidad del espacio. (Reproducida de Ander 1995)



**FIGURA 29.** Gráfica de valores del factor de luz de día en planos horizontal y vertical, en función de la distancia de la ventana. (Reproducido de Stein 2003)

Este comportamiento se presenta en una infinidad de configuraciones espaciales, incluyendo los casos en los que la ventana se encuentra obstruida por un elemento que impide la entrada del componente directo del sol o cuando la ventana sea un elemento completo en la fachada como se muestra en la figura 30, la cual corresponde a un espacio real. En este espacio ubicado en la zona centro de la Ciudad de México se hicieron diferentes estudios de iluminación, incluyendo el análisis de la intensidad de la luz natural en función de la profundidad del espacio. Como se puede ver en la gráfica, la luz disminuye de forma constante en función de la distancia desde la ventana. A pesar de que este comportamiento se puede presentar en cualquier caso similar no se pueden establecer reglas, "recetas" o generar algún algoritmo que permita estimar los niveles de iluminación. Esto se debe a que existen otros factores que determinarán la forma en que la luz disminuye al alejarse de la ventana.



**FIGURA 30 >**  
Distribución de la luz natural en función de la profundidad del espacio.- Ciudad de México (A. Valeriano)

Para tratar de enriquecer este tipo de diagramas, Gerhard Hausladen<sup>77</sup> complementa estos estudios incluyendo esas variables que afectan el comportamiento de la luz para obtener valores del factor de luz de día. La intención de estas gráficas es que sean utilizadas como una herramienta en el proceso de diseño, a diferencia de las presentadas por Ander que únicamente proporcionan una idea del comportamiento de la luz.

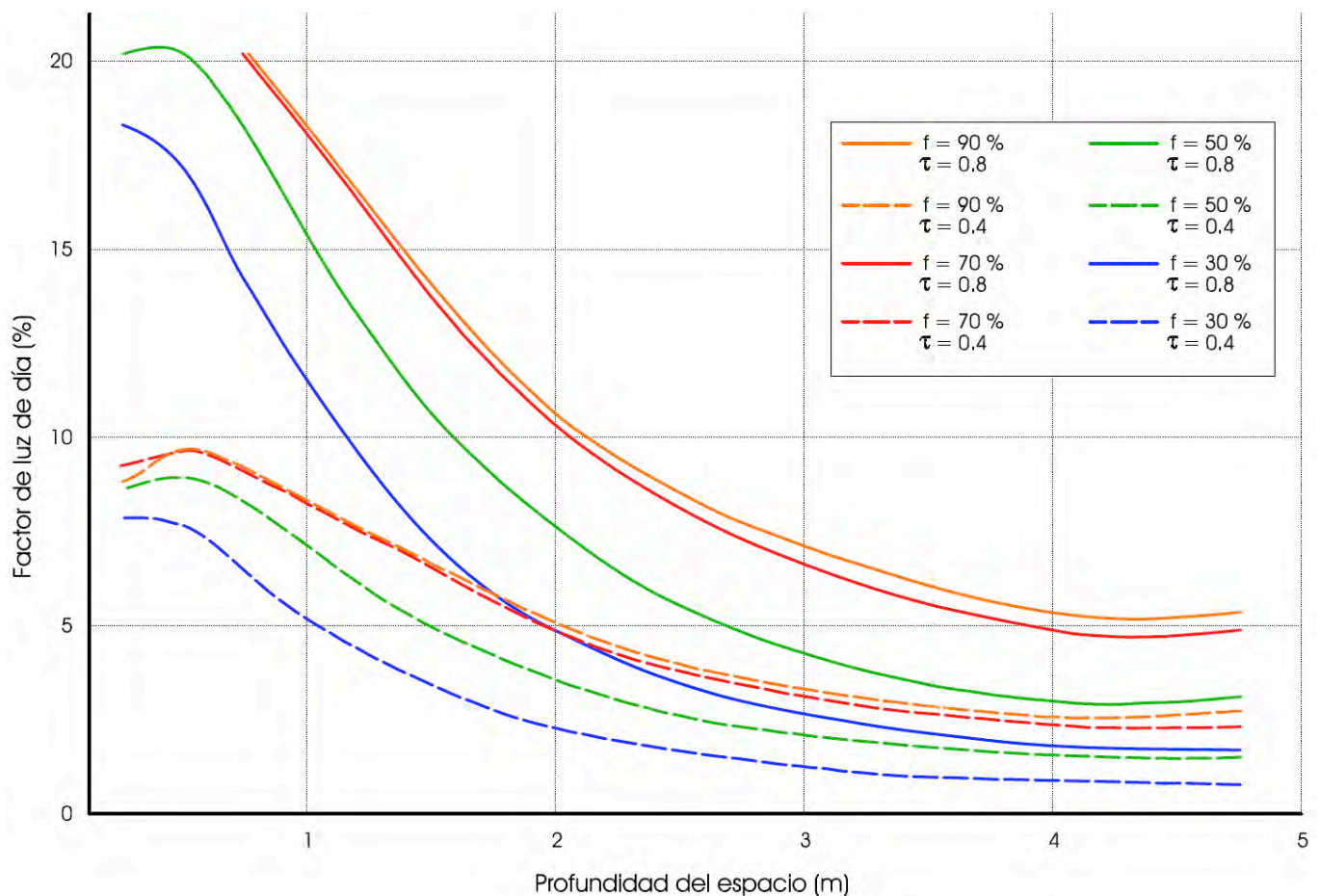
Hausladen incorpora tres variables en su gráficas (figura 31) En primer lugar incluye un valor del que se hablo anteriormente que es el porcentaje de ventana ( $f$ ), el cual esta en función de área de ventana y no del área del espacio. En segundo lugar esta otro valor del que también se hablo al mencionar el concepto de apertura efectiva, que es la transmisibilidad del material de la ventana ( $T$ ) expresado como un factor, siendo 1 (uno) transmisibilidad total. Y por ultimo se incorpora la distancia desde la ventana dada en metros ( $m$ ).

<sup>77</sup> HAUSLADEN, G., *et al.*, *op. cit.*, pp. 81.



Es importante hacer la aclaración de que esta gráfica fue obtenida considerando como constantes los siguientes factores:

- Área del espacio = 22,5 m<sup>2</sup>
- Orientación = sur
- Área de la fachada = 13,5 m<sup>2</sup>
- Valores de proporción de ventana respecto al muro = 30/50/70/90 %
- Valores de transmisibilidad de material de ventana = 0,4 / 0,8 %
- Espesor de cancelería: 0,08 m
- Reflectancia de muros = 80 %
- Reflectancia de plafón = 80 %
- Reflectancia de piso = 20 %
- Ubicación: Würzburg , Alemania.
- Condiciones de iluminación exterior = 10,000 lx.



**FIGURA 31.** Distribución de la luz natural en función de la profundidad del espacio, porcentaje de ventana y transmisibilidad de material de ventana (Reproducida de Hausladen 1995)

Para realizar estudios más detallados sobre iluminación natural, los arquitectos cuentan con muchas herramientas que les permiten realizar análisis y evaluaciones de los espacios construidos o de aquellos que se encuentren en etapa de proyecto. Sin embargo como se mencionó anteriormente, se requiere contar con aquellos conocimientos sobre los métodos y las herramientas disponibles para hacer dichos estudios. Al hacer la revisión de la literatura disponible sobre los diferentes métodos para hacer cálculos de iluminación natural se encontró que en la mayoría de los libros y artículos se utilizan criterios distintos para hacer las estimaciones. Un factor determinante en la elección de los métodos presentados en los textos es la región donde estos se generan, el mercado hacia el cual está enfocado el texto, la nacionalidad y formación de sus autores. Mientras que los autores y ediciones americanas utilizan los criterios establecidos por el IESNA; los europeos y asiáticos utilizan los criterios del CIBSE, CIE y del BRE. Es así que al consultar los textos especializados en el tema de iluminación se pueden encontrar criterios distintos.

En este punto es importante mencionar que aunque no fue el objetivo de este estudio emitir un juicio o hacer una valoración sobre los diferentes métodos de cálculo y sus variantes. En su etapa inicial y para conformar el marco teórico, el objetivo fue hacer una revisión de la gran mayoría de métodos. Esto con el fin de establecer, cuáles de ellos serían los idóneos para ser analizados, aplicados y validados. Si el lector desea conocer a mayor detalle algunos de los métodos estudiados puede consultar la lista de [referencias](#) y las [lecturas sugeridas](#).

La bibliografía sobre el tema de iluminación natural da una gran cantidad de información sobre los métodos y herramientas de cálculo. Por mencionar un ejemplo, existe un estudio incluido en el libro *Daylight in Architecture*<sup>78</sup> en el cual están contenidos 54 métodos de cálculo manuales:

- 7 ecuaciones.
- 5 métodos de “un solo paso”.
- 3 métodos “LUMEN”.
- 5 tablas.
- 10 nomogramas.
- 8 transportadores.
- 5 digramas de “puntos”.
- 6 Diagramas “Waldram”.
- 5 métodos de análisis a nivel urbano.

Cabe hacer la aclaración que el estudio mencionado se realizó en el año de 1992, por lo tanto, para el año 2010 la cifra de métodos habrá aumentado considerablemente. Como muestra, basta hacer una revisión a los estudios recientes contenidos en Capítulo 1.10 en donde se proponen nuevos métodos de cálculo.

---

<sup>78</sup> **BAKER, N.**, et al., *Daylighting in architecture: an European reference book*, James & James, Londres, 1993.

Dentro de la literatura consultada tiene una mención especial el texto de Szokolay<sup>79</sup>, quién examina de forma sintetizada siete métodos de hacer una estimación de la luz natural, los cuales se mencionan a continuación:

1. Método de flujo total
2. Método de flujos separados. (mediante transportadores)
3. Tablas simplificadas de luz natural
4. Gráficas de luz natural
5. Diagrama Waldram
6. Diagrama de puntos
7. Estudio de maquetas

Al analizar la clasificación de los métodos presentados por Baker y Szokolay se encontró que estos a su vez pueden ser reagrupados en tres métodos principales, los cuales se explican a continuación:

#### Método LUMEN

En el caso del llamada "método de flujo total", este fue desarrollado con mayor grado de precisión por el IESNA y se convirtió en el método "LUMEN" desarrollado en los Estados Unidos, también es conocido como el método "Griffith" y fue mayormente popularizado por la compañía Libbey-Owens-Ford Company, posteriormente conocido como el método "LOF"<sup>80</sup>. Este método es el recomendado por el IESNA (por sus siglas en inglés de Illuminating Engineering Society of North America) en sus recomendaciones para el uso de la iluminación natural. Este método se basa en la aplicación de "coeficientes de utilización" en el espacio. Con los datos de iluminación natural exterior en un plano horizontal, este método considera el componente del cielo y el componente reflejado del suelo. Estos valores se suman para obtener la iluminación interior resultante. Los coeficientes de utilización del espacio se obtienen de los datos proporcionados por los experimentos realizados en modelos a escala que constituyen la referencia para cielo claro y totalmente nublado. Se considera la transmitancia del vidrio, el efecto de persianas y de elementos de protección solar. Por medio de tablas se obtienen los niveles de iluminación en tres puntos del espacio situados en el eje medio perpendicular a la ventana. Con este método no es posible obtener valores de iluminación fuera de dicho plano y la exactitud del método será mayor a medida que el espacio que se está analizando se aproxime más al modelo de referencia del método. Este modelo de referencia es un ejemplo teórico de dimensiones del espacio y de ventana determinadas al igual que los valores de reflectancia de las superficies. Este aspecto es la principal deficiencia el método ya que los valores de los coeficientes están dados por las propiedades del modelo de referencia.

<sup>79</sup> **SZOKOLAY, S.V.**, *Environmental science handbook for architects and builders*, Wiley & Sons, E.U.A., 1980. pp. 104.

<sup>80</sup> **LOF Libbey-Owens-Ford Company**, *How to predict interior daylight illumination : conserve energy and increase visual performance by effective daylight design*, Toledo, Ohio, 1976.

### Flujos separados

En el caso de los métodos de flujos separados que son: los transportadores, tablas simplificadas, diagramas Waldram y de puntos, forman parte del método de factor de luz día desarrollado en Inglaterra en los años 60's. Los niveles de iluminación de un espacio se obtienen como una fracción de la iluminación natural exterior en plano horizontal. Los valores típicos se sitúan entre 0.5% y 10%. Para fines de este método se considera el cielo totalmente nublado y no se tiene en cuenta el efecto de persianas u otros elementos de control solar similares. Sin embargo este método sí considera los obstáculos al paso de la luz. Este método admite tratamientos gráficos para obtener la fracción de bóveda celeste que se es posible ver desde el punto de referencia dentro del espacio a evaluar. También considera la aportación de luz que llega reflejada de elementos exteriores.

### Maquetas

De no existir aun el espacio analizado a un escala real, se pueden utilizar maquetas que simulen de la forma más precisa, las condiciones del espacio. El procedimiento más adecuado para evaluar la iluminación natural en un espacio a escala consiste en tomar mediciones del nivel de iluminación de forma directa con la ayuda de equipos de medición. Las maquetas tienen la ventaja de que son relativamente fáciles de elaborar y permiten una evaluación completa, tanto a nivel cuantitativo (comportamiento de iluminación interior) como cualitativo (juego de luces y sombras).

Esto se hace colocando la maqueta al aire libre con la orientación e inclinación adecuada. También se puede utilizar un cielo artificial para un estudio más completo dentro de un laboratorio. Aunque esta práctica es la menos recomendada debido a que los cielos artificiales no logran igualar el comportamiento de la fuente natural de luz y se basan en modelos matemáticos que no presentan las mismas características del cielo y del sol. Además de que la mayoría de los modelos que tratan de simular luz natural, sólo consideran el componente difuso de la luz natural, ya que es difícil obtener un modelo matemático que simule de forma simultánea el componente difuso y directo de la luz natural.

A los métodos anteriormente descritos hay que agregarles aquellos que utilizan las herramientas tecnológicas para hacer estudios y simulaciones, tal es el caso de los programas de cómputo y el uso de fotografías digitales. Mediante estas herramientas es posible procesar una gran cantidad de operaciones y datos, a diferencia de los considerados en los métodos tradicionales. Los datos se obtienen a partir de maquetas virtuales o modelos tridimensionales (3D) con los cuales se hacen cálculos y operaciones para obtener los niveles de iluminación. Hoy en día gracias a la velocidad de procesamiento de datos e imágenes, los programas de cómputo han demostrado ser muy buenas herramientas ya que facilitan la labor del diseñador, sin embargo es necesario contar con la información con la que se "alimentan" los programas (*input*) para obtener datos confiables (*output*).

---

### 2.3. EL FACTOR DE LUZ DE DÍA (FLD)

---

De los métodos antes citados se eligió el Método de factor de luz de día debido a su relativa facilidad de aplicación, por otro lado, el valor del factor de luz de día se puede obtener desde las primeras etapas del proyecto arquitectónico. Esto resulta de gran utilidad ya que permite hacer ajustes a los diseños preliminares o conceptuales para que en las etapas posteriores las modificaciones sean mínimas. Así se podrá satisfacer con los requerimientos de cantidad y calidad de luz natural para propiciar el confort visual de las personas. Aunado a esto y debido a las fluctuaciones en los niveles de iluminación natural se ha generalizado la práctica de especificar los requerimientos de luz natural en los espacios mediante el factor de luz de día (porcentaje) y no con valores absolutos (luxes) como se hace en el caso de la luz artificial. Otra ventaja que presenta el método del factor de luz de día es que aunque aumenten o disminuyan los niveles de iluminación en el exterior, dicho factor permanecerá relativamente constante, esto se debe a que la iluminación interior también variará gradualmente conforme la exterior. Por consiguiente, el factor de luz de día no es solamente una medida conveniente de iluminación interna, también da al diseñador o arquitecto una mejor idea del comportamiento de la luz natural a comparación de la que se puede dar con valores absolutos.

Como se estableció en el apartado referente a las condiciones exteriores, la intensidad y calidad de luz natural varía conforme a la ubicación geográfica, la época del año, la hora del día, así como las condiciones atmosféricas locales. Es así que en regiones Nórdicas, para realizar las estimaciones de la iluminancia no se considera la aportación del componente directo del sol, ya que por su ubicación geográfica en países como Inglaterra, Noruega o Suecia, se presentan condiciones climáticas en donde predominan los cielos nublados. Al contrario de lo que pasa en los países nórdicos, en las regiones tropicales se cuentan con mayores niveles de iluminación. Esto es posible gracias a que hay una mayor disponibilidad del componente directo del sol debido a que predominan los cielos despejados y los parcialmente nublados. En este punto es importante hacer la aclaración de que el presente estudio contempla los métodos de cálculo desarrollados en Inglaterra, debido a que es precisamente en este país en donde se han realizado la mayor cantidad de estudios y avances en materia de iluminación natural y radiación solar.<sup>81</sup>

Otro factor que fue determinante para estudiar los métodos de cálculo ingleses es el hecho de que los nuevos métodos de cálculo que se han desarrollado en los últimos 20 años, han tomado como punto de partida los primeros métodos desarrollados a partir de los años 60 en el Reino Unido. Como se podrá comprobar en los capítulos subsecuentes el método del FLD se ha conservado en su esencia y las investigaciones recientes tratan de mejorar la precisión de los cálculos incorporando más variables que el método original no contemplaba. Por este motivo se hacen una extensa explicación del método original, con el objetivo de apreciar la evolución que ha tenido este método de estimación de la luz natural en los últimos 40 años. Esto se reitera debido a que uno de los objetivos de esta investigación es validar este método de cálculo en regiones tropicales.

---

<sup>81</sup> PAGE, J.K. *op. cit.*, pp. 1505.

Es importante mencionar que aunque es una metodología desarrollada en una región con características climáticas distintas a las que se presentan en la Ciudad de México, el procedimiento y el criterio de análisis es el mismo en cualquier parte del mundo. Así lo muestran estudios que se han hecho para regiones tropicales basados en los principios básicos del Factor de Luz de Día.<sup>82</sup> Otro aspecto que permite hacer uso de este método de estimación es el hecho de que en la Ciudad de México se presentan durante casi la mitad del año, condiciones similares a las que se presentan en el Reino Unido. Los cielos completamente nublados no son ajenos a la Ciudad de México.

La presencia de cielos completamente nublados se refleja en una disminución de los niveles de iluminación, situación que no se considera para fines del diseño de iluminación natural en las edificaciones. Por lo tanto, es posible estimar los niveles de iluminación para esas condiciones climáticas utilizando el método del FLD. Haciendo las estimaciones bajo las peores condiciones lumínicas exteriores puede garantizar que hasta en estas circunstancias, los niveles de iluminación en el interior de los espacios tendrán iluminación natural en cantidad y calidad requerida para poder realizar las actividades para las cuales fueron diseñados. Con todo esto, la necesidad de utilizar energía eléctrica para iluminar será reducida obteniendo así los beneficios de la correcta utilización de luz natural como fuente primaria de iluminación.

Para fines de diseño, la luz natural se puede estimar de forma cuantitativa de dos formas: la primera es mediante valores absolutos o "cantidades de luz" (flujo luminoso, iluminancia), esto se logra mediante el conocimiento de los valores en el exterior y calculando los resultantes en el interior del espacio. El segundo método utiliza valores relativos (factor de luz de día), calculando la proporción de iluminancia en un punto de referencia interior, respecto al exterior. Este segundo método resulta más conveniente debido a que de la luz que se recibe de todo el cielo, solo una pequeña porción es recibida en el interior de los espacios, misma que va cambiando conforme a las variaciones de las condiciones exteriores.

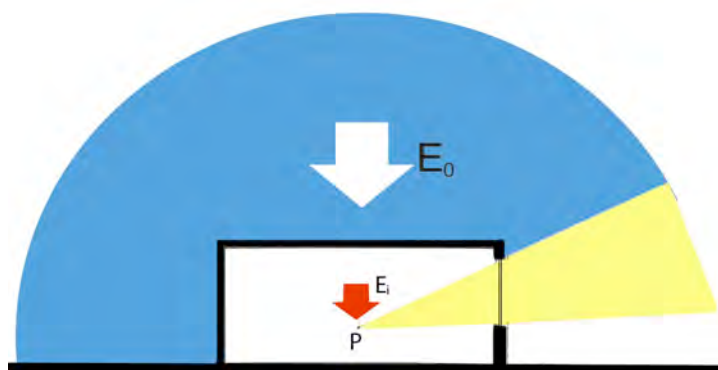
Motivo por el cual resulta poco práctico hacer cálculos en términos de iluminancia real o valores absolutos porque se puede tener incontables variaciones en un espacio a lo largo del día y del año. En otras palabras la estimación será invalidada en un lapso muy corto de tiempo debido a la rápida variación de la luminancia exterior. Para resolver esta situación de una forma práctica, se utiliza el factor de luz día, que es una razón expresada de la siguiente manera:

$$FLD = E_i / E_o \times 100$$

Donde  $E_i$  es la iluminancia en el interior del espacio,  $E_o$  es la iluminancia exterior que ocurre de forma simultánea. Este factor de luz día únicamente es válido para el punto de referencia (P). Es claro que para poder hacer uso de este método es indispensable contar con el valor de la iluminancia exterior. Este dato se puede obtener por dos métodos: por medio de cálculos y midiendo el valor de forma directa mediante instrumentos.

---

<sup>82</sup> EDMONDS, I.R., GREENUP, P.J., *Daylight in the tropics*, Solar Energy, 2002, vol. 73(2), pp. 111-121.



< FIGURA 32  
Diagrama del Factor de luz de  
Día *FLD*

Para estos fines se puede utilizar como "cielo tipo" el determinado por CIE y para el caso del cielo de despejado se pueden utilizar cualquier otro de los modelos matemáticos disponibles y que también están normalizados por el CIE.<sup>83</sup>

En esta ecuación, la luz directa del sol se excluye tanto en valores de iluminancia externa como interna. El FLD resulta inválido para la estimación bajo condiciones en constante cambio, como en el caso de los cielos parcialmente nublados. Esto se debe a que bajo estas circunstancias el FLD también varía de forma constante, haciendo que el método pierda utilidad para hacer estimaciones de valores de iluminación natural absoluta. Sin embargo el método resulta útil en la medida en que se considera la posible distribución de la iluminación en función de los Factores de luz de día estimados. La validez del concepto del Factor de luz día como un método para estimar la iluminancia en espacios interiores radica en su capacidad de respuesta.

Para una distribución luminosa que varía dependiendo de la altitud del sol, la variación de los niveles de iluminación en interior corresponden exactamente a las variaciones exteriores, esto significa que la razón o FDL es siempre la misma. Desde el punto de vista arquitectónico, el método del factor de luz de día no restringe la libertad para hacer estudios sobre la distribución lumínica el interior, esto permite hacer variaciones en el tipo de ventana, forma y tamaño, así como en la distribución espacial y la orientación.

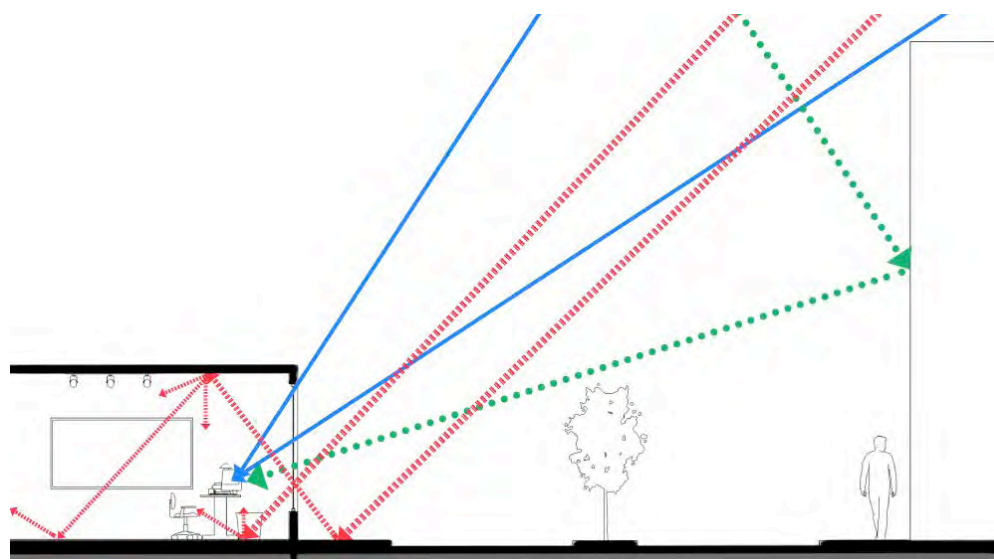
En el cálculo del factor de luz día se consideran los tres componentes de la luz que se mencionaron en el capítulo anterior (1.7):

**Componente de Cielo** (CC),  
**Componente Reflejado Exterior** (CRE) y  
**Componente Reflejado Interior** (CRI).

Para hacer el cálculo global del FLD, cada uno de los componentes se calculan de forma independiente y después se hace la suma de los resultados de cada uno. El cálculo se establece bajo la siguiente ecuación:

$$FLD = CC + CRE + CRI$$

<sup>83</sup> CIE, *op. cit.*, 2003.



**FIGURA 33 >**  
Componentes del Factor de luz de día *FLD*.

En este método también se consideran las pérdidas por la utilización de diferentes tipos de cristales así como las pérdidas ocasionadas por la suciedad y las dimensiones de la cancelería utilizada. Estos valores simplemente se aplican a la ecuación como un factor de pérdida. En la tabla 5 se presentan los valores del FLD mínimos recomendados para diferentes géneros de edificios.<sup>84</sup> Estos valores se han establecido en manuales y reglamentos en gran parte de los países del norte de Europa donde predominan los cielos nublados, en regiones ubicadas en el sur del continente, estos valores recomendados son menores debido a que las condiciones meteorológicas cambian al contar con mayor disponibilidad a la luz natural y se considera también la aportación de luz proveniente directamente del sol.

Podría resultar que estos valores son demasiado bajos en comparación con los porcentajes que se utilizan normalmente, ya sea en áreas de ventana con respecto al área total del espacio o con respecto a valores de iluminancia mínima. Sin embargo muchas veces no se tiene conciencia de las grandes diferencias en los valores de iluminancia que se presentan en condiciones exteriores comparadas con las que hay en los espacios interiores. Esto se debe a la maravillosa habilidad que tiene el ojo humano para adaptarse a estos cambios de iluminación y al rango tan amplio de condiciones bajo las cuales se puede dar la visión.

Para entender mejor el concepto del FLD hay que considerar que la iluminación en el exterior puede ser tan alta (hasta 100,000 luxes) y teniendo valores tan “bajos” del FLD se puede obtener una iluminación suficiente en un espacio. Por ejemplo con un FLD de 1% y una iluminancia exterior de 30,000 luxes, (20 klux) resulta que en interior se puede llegar a obtener una iluminancia interior de 300 luxes, que es adecuada para muchas actividades como leer o trabajar en la computadora. En un espacio iluminado por una sola ventana el nivel de iluminación disminuye en la medida en que nos alejamos de la fuente de luz, de la misma manera el FLD varía debido a que es la razón entre la iluminación interior y la exterior.

<sup>84</sup> **CIBSE**, *SLL Lighting Guide: Daylighting and Window design*, Inglaterra, 1999.



GÉNERO	ESPACIO	FACTOR DE LUZ DE DÍA PROMEDIO (%)
AEROPUERTOS	Recepción	2
	Circulaciones	2
OFICINAS	Recepción	2
	Oficinas generales	3
	Oficinas de dibujo	5
BIBLIOTECAS	Estantería	3
	Áreas de lectura	6
MUSEOS Y GALERIAS	Áreas generales	1
ESCUELAS	Salones de clase	2
	Salones de reunión	1
	Salones de dibujo	4
HABITACIONAL	Estancias	1
	Cocinas	2
	Recámaras	0.5
HOSPITALES	Recepción, salas de espera	2
	Recuperación	1
CONSULTORIOS	Farmacias	3
	Recepción, salas de espera	2
	Laboratorios	3
INST. DEPORTIVAS	Canchas	2
	Albercas	2
	Servicios	1
SALAS DE CONCIERTOS	Vestíbulo	1
	Pasillos	0.5

< **TABLA 5**  
Valores del Factor de luz de día recomendados.  
(CIBSE 1999)

Sin embargo esta variación permanece relativamente constante en una configuración espacial y la ventana que lo ilumina. Por lo tanto al conocer la variación del FLD en un espacio y la variación de la iluminancia exterior derivada de la información de la luminancia del cielo, los niveles de iluminación reales a lo largo y ancho del espacio pueden ser fácilmente calculados.

De la misma forma en la que se toman niveles mínimos de diseño para el cálculo de la iluminación artificial, se pueden tomar valores mínimos del FLD que deben tener los espacios dependiendo de la actividad que ahí se desarrolle. Como se puede observar nuevamente en la tabla 5, estos valores son un parámetro de diseño que debe ser utilizado por los especialistas en iluminación con el objetivo de cumplir con los requerimientos de iluminación. Todo este proceso de estudio que conjuga condiciones de iluminancia exterior mínimas y valores del FLD mínimos requeridos, resultara en niveles de iluminación natural suficientes para gran parte del día en las horas de ocupación bajo cualquier condición exterior. Por último es necesario garantizar que la iluminación natural este presente en un espacio con la cantidad y calidad necesaria para desarrollar las actividades. Además de los valores de FLD promedio y mínimos establecidos en las normas, reglamentos y guías de diseño, es importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones:<sup>85</sup>

<sup>85</sup> STEIN, Benjamin, *et al.*, *op. cit.*, pp. 1123

1. Los valores mínimos del FLD **nunca** deberán estar por debajo de 0.5% que es el valor suficiente para iluminar las circulaciones.
2. La relación que se debe guardar entre los valores del factor de luz de día mínimos y el promedio del espacio no deberá ser menor al 30%, es decir:

$$FLD_{\min} / FLD_{\text{prom.}} \geq 0.3$$

Donde  $FLD_{\min}$  = el factor de luz de día mínimo y  $FLD_{\text{prom.}}$  = el factor de luz de día promedio.

---

## 2.4. CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DEL FACTOR DE LUZ DE DÍA

---

### Componente de cielo (CC)

El componente de cielo es la razón de la iluminancia para cualquier punto en el interior de un espacio que recibe luz desde el cielo, con una iluminancia conocida respecto a la iluminancia horizontal bajo la bóveda celeste sin obstrucciones.<sup>86</sup> Existen tres métodos con los que se puede calcular el valor del componente del cielo: mediante tablas y matrices, método de red o "Waldram" y el método de transportadores.<sup>87</sup>

#### *Tablas de luz de día*

Estas tablas fueron creadas con el objetivo de ser utilizadas para hacer el cálculo del CC cuando aun no existen planos y dibujos a escala, por lo tanto pueden ser utilizadas en las etapas iniciales del proyecto arquitectónico. En la tabla 6 se encuentran los valores de los componentes de cielo para el caso de un cielo completamente nublado y para ventanas verticales con forma rectangular y vidrio claro. En el caso de estas tablas se considera que no existen obstrucciones exteriores. Para hacer uso de las tablas es necesaria la siguiente información:

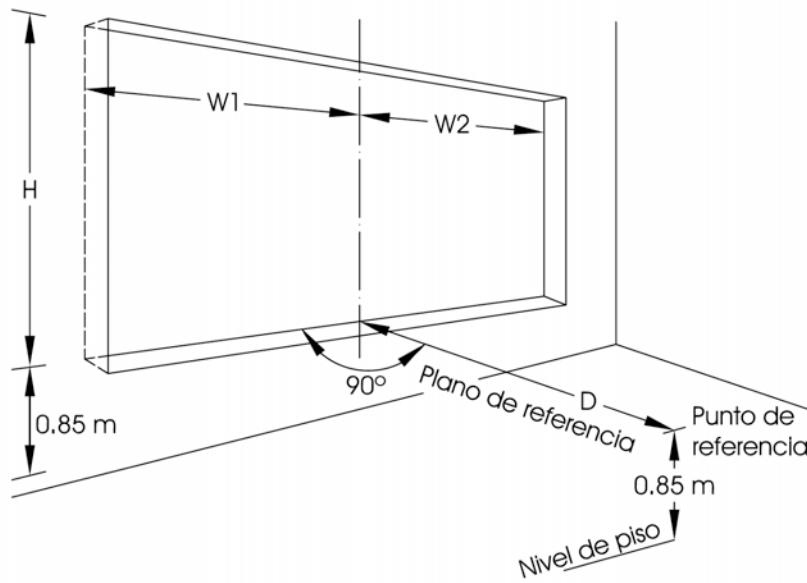
- La altura efectiva de la ventana por encima del plano de trabajo y sin ninguna obstrucción. ( $H$ )
- Los anchos efectivos de la ventana de cada lado de eje que existe entre el plano perpendicular de la ventana y el punto de referencia, tomado de forma independiente ( $W_1$ ,  $W_2$ ).
- La distancia desde del punto de referencia al plano vertical de la ventana. ( $D$ )

Las razones que resultan de dividir  $H/D$ ,  $W_1/D$  y  $W_2/D$  pueden ser aplicadas para obtener los valores de CC, los cuales se pueden tomar directamente de la tabla 6. De forma general se puede decir que para cualquier punto de referencia se puede obtener el valor del componente de cielo mediante sencillas operaciones.

---

<sup>86</sup> **MUNEER, Tariq**, et al., *Windows in buildings: thermal, acoustic, visual and solar performance*, Oxford, Boston: Architectural, E.U.A., 2000, pp. 151.

<sup>87</sup> **BRE, Building Research Establishment**, *Digest 41: Estimating daylight in buildings*, BRE, Inglaterra, 1970.



< FIGURA 34  
 Diagrama con variables para determinar el valor de Componente de Cielo (Reproducido de BRE 1970)

		Razón H/D ( Altura de la ventana por encima del plano de trabajo / distancia desde la ventana)																													
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.5	4.0	5.0	$\infty$
Razón W/D (Ancho de la ventana de un lado de la normal / distancia desde la ventana)	0.1	0	0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3
	0.2	0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5
	0.3	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.4	3.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7
	0.4	0	0.1	0.3	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2	2.5	2.7	2.9	3.2	3.3	3.5	3.6	3.8	3.9	4.0	4.1	4.3	4.4	4.5	4.5	4.6	4.7	4.8	4.8	4.9
	0.5	0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.2	1.5	1.9	2.2	2.6	3.0	3.3	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.7	4.8	5.0	5.2	5.3	5.4	5.5	5.7	5.8	5.9	5.9	5.9
	0.6	0	0.1	0.3	0.6	1.0	1.3	1.7	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.1	5.3	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.3	6.4	6.6	6.7	6.8	6.8	6.9
	0.7	0	0.2	0.4	0.7	1.0	1.5	1.9	2.4	2.8	3.3	3.8	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.1	7.3	7.4	7.6	7.7	7.7
	0.8	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.1	4.5	4.9	5.2	5.6	5.8	6.1	6.3	6.5	6.7	7.0	7.3	7.5	7.6	7.8	8.0	8.2	8.3	8.4	8.4
	1.0	0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	1.7	2.2	2.7	3.3	3.8	4.3	4.8	5.2	5.6	5.9	6.2	6.5	6.7	6.9	7.1	7.4	7.7	7.9	8.1	8.2	8.5	8.7	8.8	8.8	9.0
	1.2	0.1	0.2	0.4	0.8	1.3	1.8	2.3	2.9	3.4	4.0	4.6	5.0	5.5	5.9	6.2	6.5	6.8	7.1	7.3	7.5	7.9	8.1	8.4	8.6	8.7	9.0	9.2	9.4	9.4	9.6
	1.4	0.1	0.2	0.5	0.9	1.4	1.9	2.5	3.1	3.7	4.3	4.9	5.4	5.9	6.4	6.8	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.7	9.1	9.3	9.6	9.8	10.1	10.3	10.5	10.7	10.7
	1.6	0.1	0.2	0.5	0.9	1.4	1.9	2.5	3.2	3.8	4.5	5.1	5.7	6.2	6.7	7.1	7.5	7.8	8.2	8.5	8.7	9.1	9.5	9.8	10.0	10.2	10.6	10.9	11.1	11.6	11.6
	1.8	0.1	0.2	0.5	0.9	1.4	2.0	2.6	3.3	3.9	4.6	5.3	5.9	6.4	7.0	7.4	7.8	8.2	8.5	8.8	9.1	9.6	10.0	10.2	10.5	10.7	11.1	11.4	11.7	12.2	12.2
	1.9	0.1	0.2	0.5	1.0	1.4	2.0	2.6	3.3	4.0	4.7	5.4	6.0	6.6	7.2	7.6	8.1	8.5	8.8	9.2	9.5	10.0	10.4	10.8	11.1	11.3	11.8	12.0	12.3	12.6	12.6
	2.0	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.6	3.3	4.0	4.7	5.4	6.1	6.7	7.3	7.8	8.2	8.6	9.0	9.4	9.7	10.2	10.7	11.1	11.4	11.7	12.2	12.4	12.7	13.0	13.0
	2.5	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.1	2.6	3.3	4.0	4.8	5.5	6.2	6.8	7.4	7.9	8.4	8.8	9.2	9.6	9.9	10.5	11.0	11.4	11.7	12.0	12.6	12.9	13.3	13.7	13.7
3.0	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.1	2.7	3.4	4.1	4.8	5.6	6.2	6.9	7.5	8.0	8.5	8.9	9.3	9.7	10.0	10.7	11.2	11.7	12.0	12.4	12.9	13.3	13.7	14.2	14.2	
4.0	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.1	2.7	3.4	4.1	4.9	5.6	6.3	6.9	7.5	8.0	8.6	9.0	9.4	9.8	10.1	10.8	11.3	11.8	12.2	12.5	13.2	13.5	14.0	14.6	14.6	
6.0	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.1	2.8	3.4	4.2	5.0	5.7	6.3	6.9	7.6	8.1	8.6	9.1	9.5	9.9	10.2	10.9	11.4	11.9	12.3	12.6	13.2	13.6	14.1	14.9	14.9	
$\infty$	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.1	2.8	3.4	4.2	5.0	5.7	6.3	7.0	7.6	8.1	8.6	9.1	9.5	9.9	10.3	10.9	11.5	11.9	12.3	12.7	13.3	13.7	14.2	15.0	15.0	
Ángulo de obstrucción		0°	6°	11°	17°	22°	27°	31°	35°	39°	42°	45°	48°	50°	52°	54°	56°	58°	60°	61°	62°	63°	66°	67°	69°	70°	72°	74°	76°	79°	90°

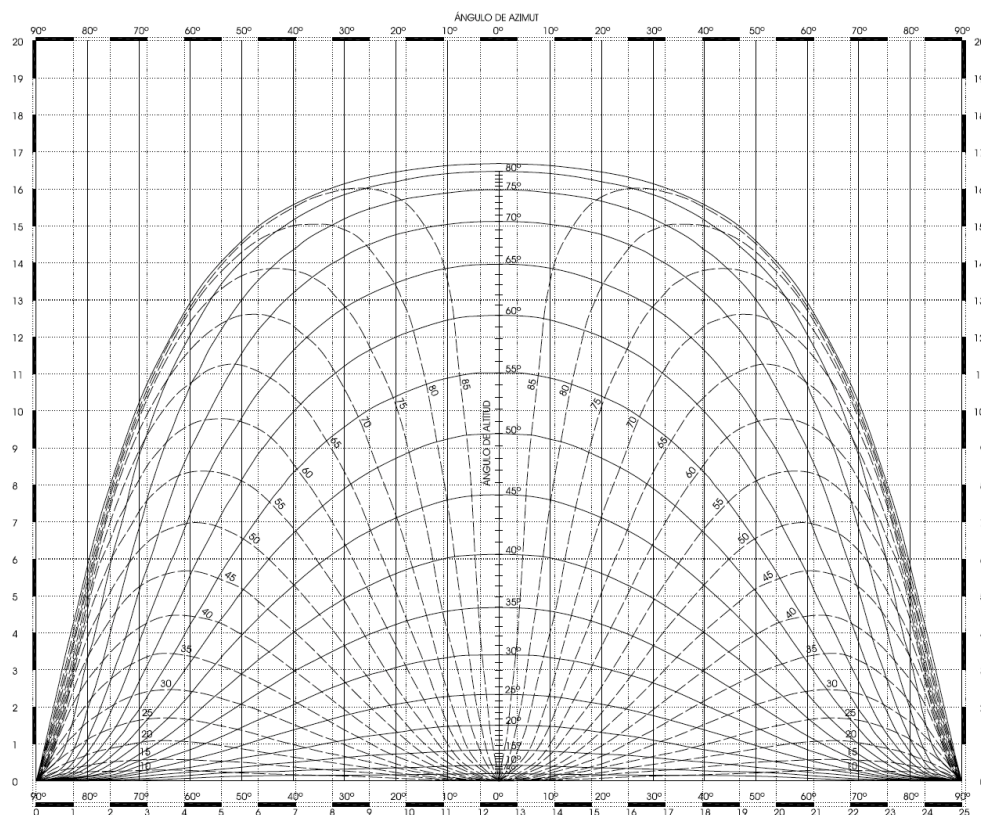
TABLA 6. Componentes de cielo para cielo nublado CIE para ventanas verticales rectangulares con cristal claro. (BRE 1970)

### Diagrama Waldram

Los métodos de cálculo basados en gráficas de redes pueden ser aplicados con mayor grado de precisión para una gran variedad de circunstancias pero la mayoría de las ocasiones son complicadas y tediosas. Sin embargo son muy útiles en los casos en los cuales se presentan obstrucciones en las ventanas o cuando la forma de la ventana representa mayor dificultad en el cálculo y no puede hacerse por medio de tablas. El diagrama más utilizado es el basado en la red *Waldram*, el cual considera la distribución luminosa del cielo completamente nublado y las pérdidas de iluminación debido a la presencia de cristal en la ventana.

El diagrama esta compuesto por una red que representa la mitad de la bóveda celeste y esta construido de tal forma que para áreas iguales de red representan iguales componentes de cielo. El área del cielo visible desde la ventana desde el punto de referencia es dibujado en la red en líneas con determinadas coordenadas angulares. Estas dimensiones se obtienen de los dibujos a escala (plantas y cortes) del espacio estudiado.

El área de esta "porción" de cielo que se dibuja en el diagrama es proporcional al componente de cielo para el punto de referencia. En el diagrama Waldram también es posible dibujar y establecer las "perdidas" de componentes de cielo provocadas por el la obstrucciones (edificios, vegetación). Estas áreas obstruidas son contabilizadas como Componentes de Cielo y se restan del total contabilizados que permite la ventana sin obstrucciones.

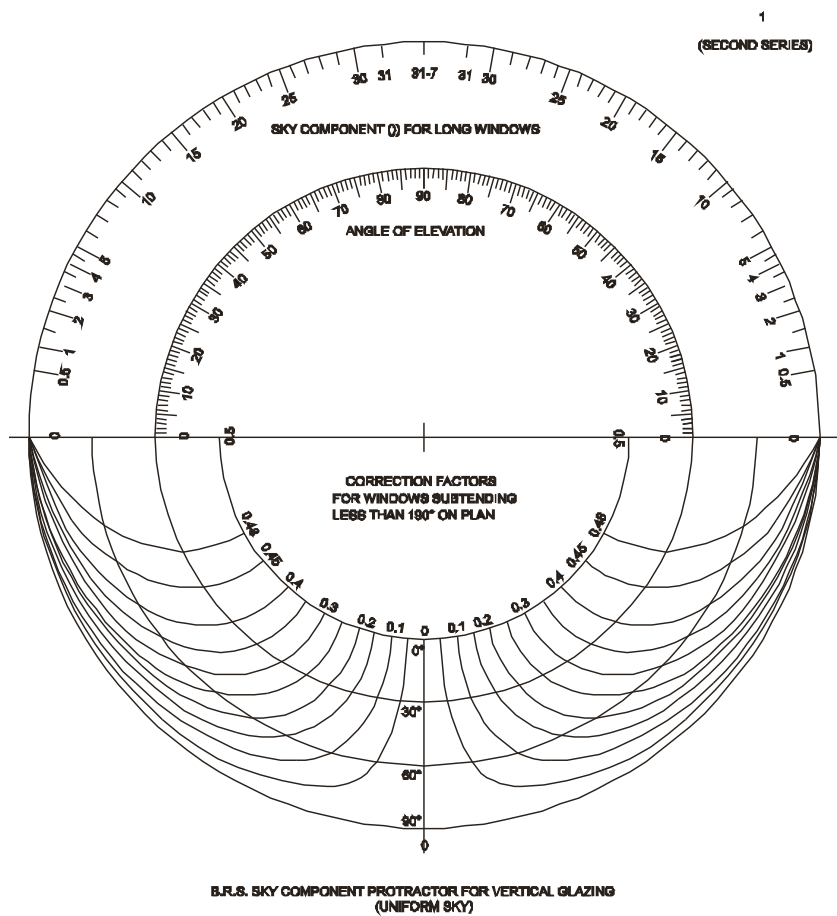


**FIGURA 35 >**  
Diagrama Waldram para la obtención del Componente de cielo.  
(BRE 1970)

## Transportadores BRE

De los métodos para estimar el componente de cielo durante las primeras etapas de diseño, el método de los Transportadores del *Building Research Establishment* (BRE), es el más utilizado. Esto se debe a la facilidad que representa el poder sobreponer los transportadores sobre las plantas y cortes del proyecto y hacer la evaluación directamente sobre el mismo. Sin embargo pueden resultar poco precisos cuando se presentan condiciones de obstrucciones exteriores o cuando la geometría de la ventana es más elaborada. Los transportadores fueron diseñados para ser usados sobre los planos y poder determinar los componentes del cielo de una forma gráfica.

En las primeras versiones de esta herramienta la estimación se hacía únicamente bajo condiciones de cielo completamente nublado (*overcast*). La nueva versión de los transportadores considera también los componentes de cielo para condiciones de cielo despejado. El transportador se compone de dos partes. La primera sirve para calcular el componente de cielo y la segunda sirve para determinar un coeficiente de corrección debido al ancho finito de la ventana. También incluyen un transportador normal para poder determinar el ángulo promedio del la porción del cielo que permite ver la ventana así como el ángulo promedio de las obstrucciones.



< **FIGURA 36**  
Transportador para la obtención del Componente de cielo.  
(Reproducido de BRE 1970)

### Componente de Reflectancia Externa (CRE)

Si no existen obstrucciones próximas a la ventana se considera que el valor del ERC es igual a cero ( $ERC=0$ ). Si llegara a existir objetos mas altos que la línea de referencia, la luz reflejada de estos objetos puede alcanzar el punto de referencia y contribuir en la iluminación global de ese punto. Esta cantidad de luz proveniente de elementos exteriores se puede calcular de la siguiente forma:

En primer lugar se calcula el componente de obstrucción para la parte del cielo que esta cubierta por la dicha obstrucción de la misma manera que se hace con el componente de cielo CC.

Se multiplica este valor por la iluminancia de esta superficie proveniente del cielo. Esta iluminancia se calcula multiplicando la reflectancia promedio de la superficie por un factor de 0.50.

Si no se conoce la reflectancia de los elementos exteriores que obstruyen la ventana se suele utilizar una reflectancia promedio de 20%.<sup>88</sup>

### Componente de Reflectancia Interna (CRI)

Una gran cantidad de luz natural que entra por las ventanas alcanza el punto de referencia después de haber sido reflejada por las superficies interiores del espacio (muros, techo y piso) y otros elementos (mobiliario) dentro de la habitación. La magnitud de esta contribución de luz sobre el punto de referencia es el llamado componente de reflectancias internas (CRI).

Este componente es el que presenta los valores más bajos comparado con los otros dos componentes (Componente de Cielo y el Reflejado Exterior) sin embargo se vuelve un parte muy importante en el valor total del DLF en espacios que tienen profundidades mayores a 2.5 veces la altura de la ventana (Como se explico en el [Capítulo 2.2](#)). El motivo es que a mayor distancia del punto de referencia a la ventana, los valores de CC y CRE disminuyen de forma considerable.

Este componente al igual que el CC y el CRE dependen en gran medida de las proporciones de la ventana. Por lo tanto también es posible relacionar las dimensiones de la ventana con el valor promedio de las reflectancias de los acabados para obtener un valor aproximado del CRI tal y como se presenta en la figura 37. Es importante hacer la aclaración que este método es el más simple debido a que considera solamente un par de valores de reflectancia promedio del espacio (30% y 65%) por lo tanto deben tomarse solamente como un valor aproximado.

También es posible hacer una estimación de este valor mediante el uso de tablas (tabla 7) y gráficas (figura 38) en donde se relacionan las reflectancias del piso, muros y el porcentaje del área de ventana respecto al espacio.

---

<sup>88</sup> BAKER, N., *op. cit.*, 2002. pp. 207.

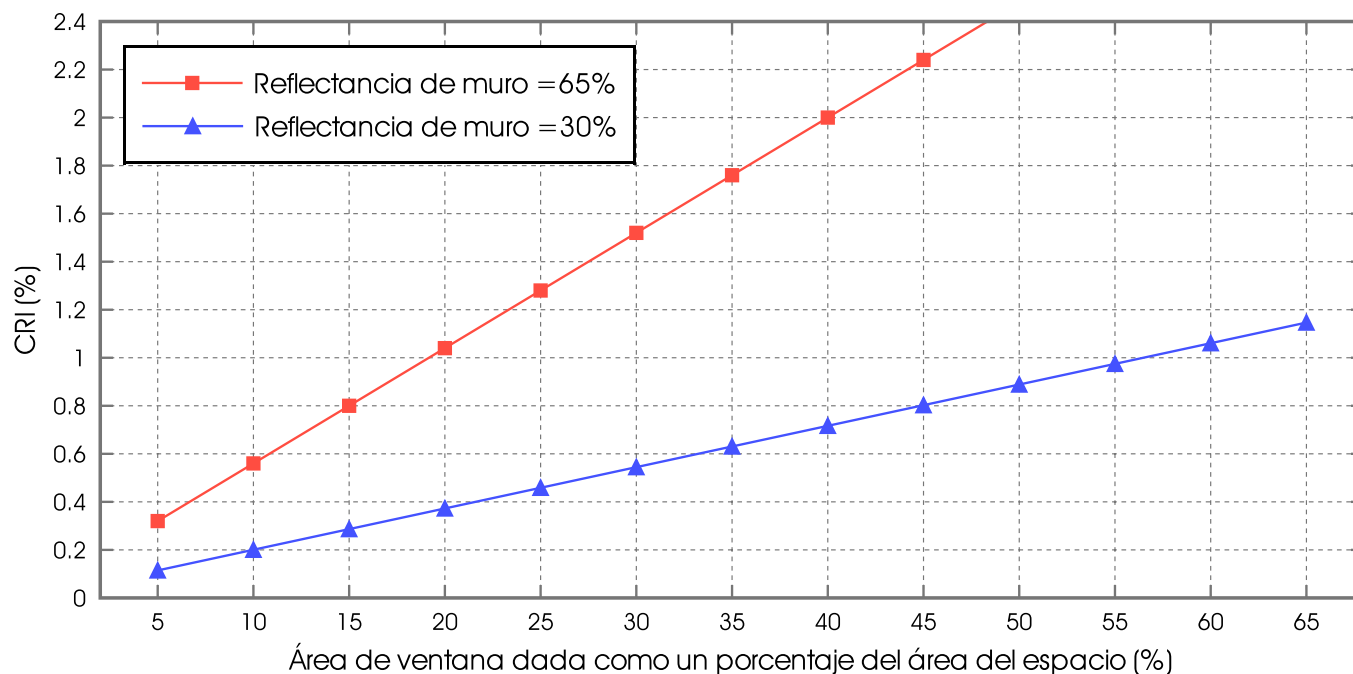
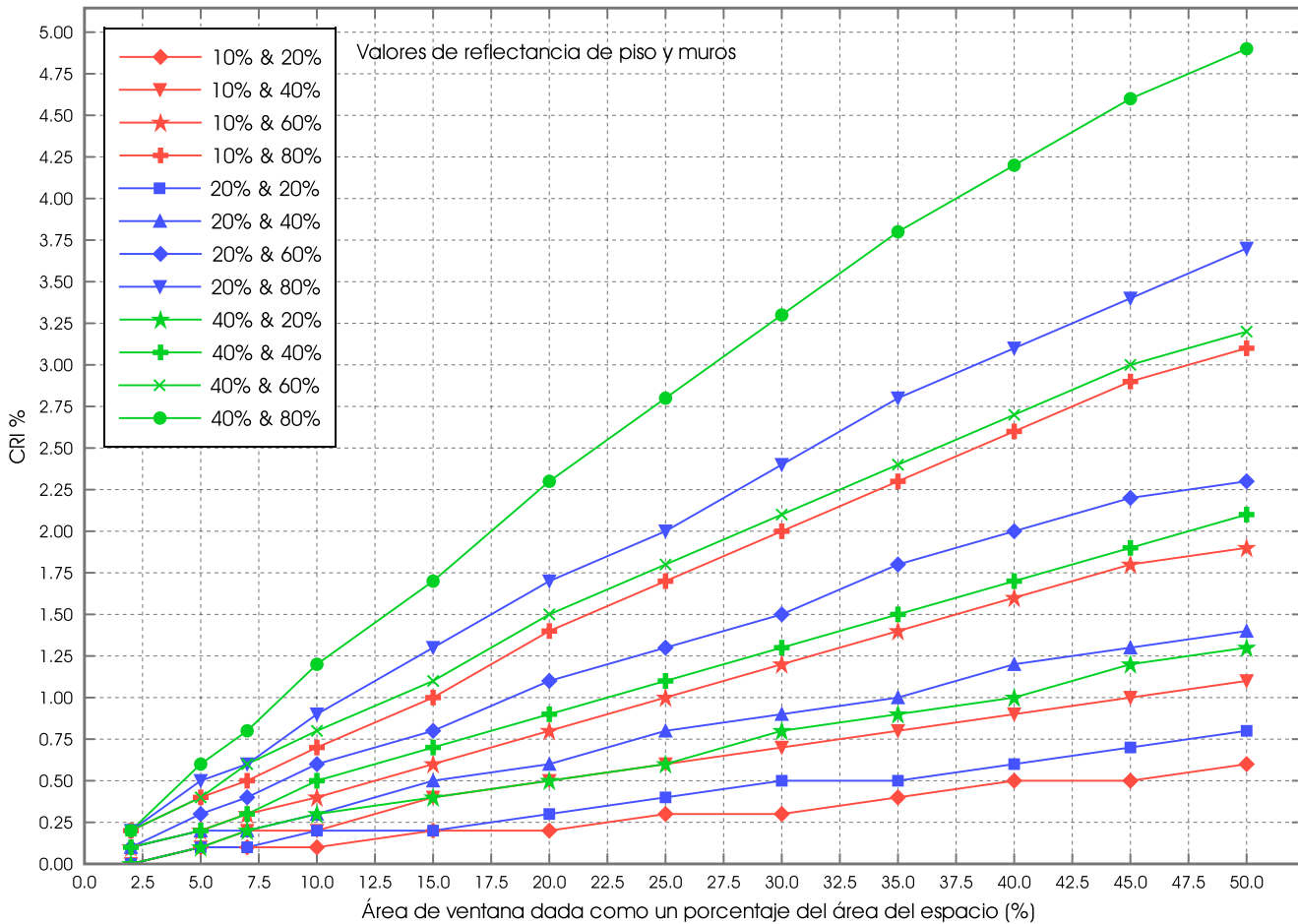


FIGURA 37. Valores de CRI en función de las reflectancias promedio y la proporción de ventana (Reproducido de Stein 2003)

ÁREA DE VENTANA DADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA DEL ESPACIO (%)	FACTOR DE REFLECTANCIA DEL PISO											
	10%				20%				40%			
	FACTOR DE REFLECTANCIA PROMEDIO DE LOS MUROS (EXCLUYENDO LA VENTANA)											
	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
2	-	-	0.1	0.2	-	0.1	0.1	0.2	-	0.1	0.2	0.2
5	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.3	0.5	0.1	0.2	0.4	0.6
7	0.1	0.2	0.3	0.5	0.1	0.2	0.4	0.6	0.2	0.3	0.6	0.8
10	0.1	0.2	0.4	0.7	0.2	0.3	0.6	0.9	0.3	0.5	0.8	1.2
15	0.2	0.4	0.6	1.0	0.2	0.5	0.8	1.3	0.4	0.7	1.1	1.7
20	0.2	0.5	0.8	1.4	0.3	0.6	1.1	1.7	0.5	0.9	1.5	2.3
25	0.3	0.6	1.0	1.7	0.4	0.8	1.3	2.0	0.6	1.1	1.8	2.8
30	0.3	0.7	1.2	2.0	0.5	0.9	1.5	2.4	0.8	1.3	2.1	3.3
35	0.4	0.8	1.4	2.3	0.5	1.0	1.8	2.8	0.9	1.5	2.4	3.8
40	0.5	0.9	1.6	2.6	0.6	1.2	2.0	3.1	1.0	1.7	2.7	4.2
45	0.5	1.0	1.8	2.9	0.7	1.3	2.2	3.4	1.2	1.9	3.0	4.6
50	0.6	1.1	1.9	3.1	0.8	1.4	2.3	3.7	1.3	2.1	3.2	4.9

TABLA 7. Tabla para la obtención de los valores de CRI (Reproducido de BRE 1970)



**FIGURA 38.** Gráfica de valores de CRI en función del área de ventana y reflectancias de piso-muro (Basada en Muneer 2003)

Para hacer cálculos que tengan mayor exactitud y confiabilidad es necesario obtener las áreas de todas las superficies y multiplicarlas por las reflectancias de sus acabados. Esto significa que a mayor cantidad de materiales utilizados en un espacio, mayor será el número de variables que sean procesadas.

Con esta información se obtiene un valor promedio de todas las reflectancias presentes en el espacio. Este valor es casi uniforme a lo largo del espacio y para fines prácticos únicamente se determina el valor promedio del CRI.

Para obtener el valor promedio de CRI es indispensable conocer el valor de las reflectancias de cada uno de los materiales del espacio analizado. Estos valores pueden consultarse en manuales, guías de diseño o en las hojas técnicas de los acabados que proporcionan sus fabricantes. Con estos datos y las áreas de cada superficie se puede utilizar la siguiente ecuación:



$$CRI = \frac{0.85V}{A(1-R)} \times (CR_{fw} + 5R_{cw})$$

Donde  $V$  = al área de la ventana,

$A$  = el área total del plafón, piso y muros, incluyendo el área de la ventana.

$R$  = promedio de las reflectancias del plafón, piso, muros, incluyendo ventanas y expresada en decimales.

$R_{fw}$  = promedio de reflectancias del piso y aquellas partes de los muros que están por debajo de un plano a la mitad de la altura de la ventana (se excluye el muro de la ventana).

$R_{cw}$  = promedio de la reflectancia del plafón y aquellas partes de los muros que están por encima de un plano a la mitad de la altura de la ventana (se excluye el muro de la ventana).

$C$  = coeficiente dependiente del valor de las obstrucciones exteriores que se obtienen de la tabla 8.

Ángulo de obstrucción medido desde el centro de la ventana (grados por encima de la horizontal)	Coeficiente "C"
No hay obstrucción	39
10°	35
20°	31
30°	25
40°	20
50°	14
60°	10
70°	7
80°	5

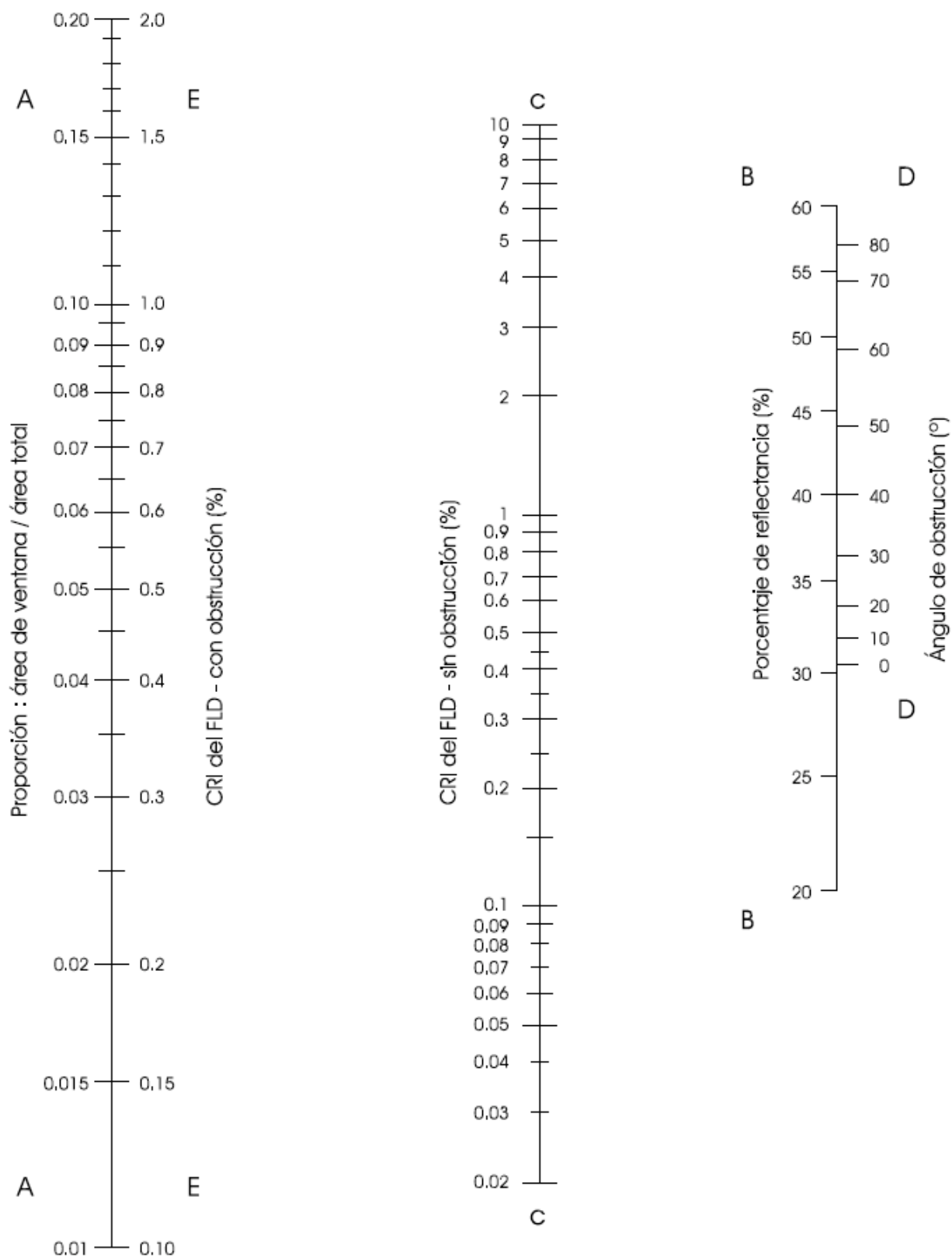
< TABLA 8

Tabla de conversión de ángulo de obstrucción al coeficiente "C" del CRI.

(Reproducido de BRE 1970)

Sin embargo existen métodos simplificados que permiten hacer estimaciones con un buen grado de precisión con la ayuda de un programa de computo, una hoja de cálculo, tablas y nomogramas. Esto se puede hacer una vez que se obtienen los valores de las reflectancias y las proporciones entre los elementos del espacio (ventana/superficie total). Con esta información se obtienen los valores mediante el uso del Nomograma correspondiente (figura 39).<sup>89</sup>

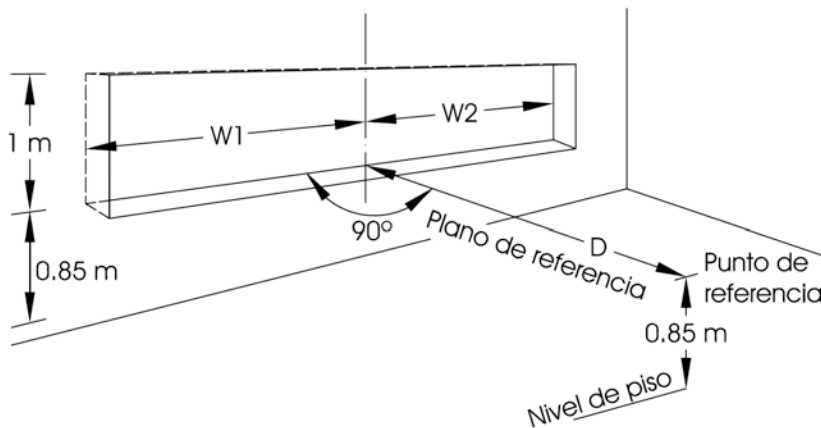
<sup>89</sup> BRE, Building Research Establishment, *Digest 42: Estimating daylight in buildings II*, BRE, Inglaterra, 1969.



**FIGURA 39.** Nomograma para el cálculo del CRI.  
 (Reproducido de BRE 1970)

## 2.5. MATRIZ DE RELACIONES ENTRE DIMENSIONES DE VENTANA Y DISTANCIA AL PUNTO DE REFERENCIA

Las matrices se elaboraron siguiendo el método de Tablas de luz de día, las cuales se presentan como la tabulación de las relaciones entre las dimensiones de una ventana y la distancia del punto de referencia a la fuente lumínica. En este caso en específico se presenta una matriz de doble entrada en donde por un lado se establece la distancia desde la ventana al punto de referencia y por otro lado el ancho de la ventana para una altura determinada (figura 40).



< **FIGURA 40**  
Diagrama de ventana de 1 metro de alto.

Los resultados que se presentan en la Tabla 9 son los valores de las relaciones  $H/D$  y  $W/D$ . Con estos valores se hace la interpolación para obtener los valores del Componente de Cielo (CC) que se presenta en la segunda matriz (Tabla 10). De la misma forma se pueden elaborar matrices en donde la altura o el ancho de la ventana sean variables.

Por medio de estas matrices se pueden obtener valores aproximados del factor de luz de día para espacios construidos con el objetivo de hacer un análisis sobre el desempeño lumínico. También pueden utilizarse como una guía durante el proceso de diseño. De esta manera es posible pre-dimensionar ventanas que doten de iluminación natural adecuada dependiendo de la función del espacio.

En esta matriz se presentan las dimensiones de una ventana y se relacionan con la distancia del punto de referencia a la ventana. Los valores obtenidos a partir del cruce de las dos entradas es el valor aproximado del Factor de luz de día (considerando una altura del plano de trabajo de 75 cms). Las reflectancias promedio de las superficies interiores del 20% y una altura de la ventana de 1 metro sobre el nivel del plano de trabajo.

DISTANCIA DESDE LA VENTANA (m)	ANCHO DE VENTANA (m)									
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0.5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
2	0.16666667	0.33333333	0.5	0.66666667	0.83333333	1	1.16666667	1.33333333	1.5	1.66666667
2.5	0.125	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75	0.875	1	1.125	1.25
3	0.08333333	0.16666667	0.25	0.33333333	0.41666667	0.5	0.58333333	0.66666667	0.75	0.83333333
3.5	0.07142857	0.14285714	0.21428571	0.28571429	0.35714286	0.42857143	0.5	0.57142857	0.64285714	0.71428571
4	0.0625	0.125	0.1875	0.25	0.3125	0.375	0.4375	0.5	0.5625	0.625
4.5	0.05555556	0.11111111	0.16666667	0.22222222	0.27777778	0.33333333	0.38888889	0.44444444	0.5	0.55555556
5	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
5.5	0.04545455	0.09090909	0.13636364	0.18181818	0.22727273	0.27272727	0.31818182	0.36363636	0.40909091	0.45454545
6	0.04166667	0.08333333	0.125	0.16666667	0.20833333	0.25	0.29166667	0.33333333	0.375	0.41666667
6.5	0.03846154	0.07692308	0.11538462	0.15384615	0.19230769	0.23076923	0.26923077	0.30769231	0.34615385	0.38461538
7	0.03571429	0.07142857	0.10714286	0.14285714	0.17857143	0.21428571	0.25	0.28571429	0.32142857	0.35714286
7.5	0.03333333	0.06666667	0.1	0.13333333	0.16666667	0.2	0.23333333	0.26666667	0.3	0.33333333
8	0.03125	0.0625	0.09375	0.125	0.15625	0.1875	0.21875	0.25	0.28125	0.3125
8.5	0.02941177	0.05882353	0.08823529	0.11764706	0.14705882	0.17647059	0.20588235	0.23529412	0.26470588	0.29411765
9	0.02777778	0.05555556	0.08333333	0.11111111	0.13888889	0.16666667	0.19444444	0.22222222	0.25	0.27777778
9.5	0.02631579	0.05263158	0.07894737	0.10526316	0.13157895	0.15789474	0.18421053	0.21052632	0.23684211	0.26315789
10	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25

TABLA 9. Matriz de relaciones – dimensiones de ventana y punto de referencia

DISTANCIA DESDE LA VENTANA (m)	ANCHO DE VENTANA (m)									
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0.5	4.8	7.5	8.9	9.7	9.9	10	10	10	10	10
1	1.4	2.6	3.4	4	4.3	4.6	4.7	4.7	4.8	4.8
1.5	0.5	1	1.4	1.7	2	2.1	2.3	2.3	2.4	2.4
2	0.4	0.8	1.1	1.1	1.6	1.9	2	2.1	2.2	2.3
2.5	0.1	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9
3	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
3.5	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
4.5	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
5	0.2	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

TABLA 10 >  
Matriz simplificada de relaciones – dimensiones de ventana y punto de referencia

En este caso, si se considera un ancho de ventana de 1.5 m. y una distancia al punto de referencia de 2 m. se obtiene un valor de Factor de luz de día de **1.11 %**. Con esta matriz se puede llevar a cabo el proceso inverso para determinar las dimensiones de una ventana para que cumplan con un valor de FLD mínimo requerido. Si se considera que para un espacio determinado se requiere tener un factor de luz de día mínimo de 2%, basados en la matriz se pueden obtener las siguientes alternativas:

- 1.- Ventana de 1x1 a un metro de distancia.
- 2.- Ventana de 1x2.5 a 1.5 metros de distancia.
- 3.- Ventana de 1x3.5 a 2 metros de distancia.

Otra forma de encontrar los valores óptimos del ancho de una ventana de 1 metro de alto, con respecto a la distancia de la misma y viceversa, es por medio de gráficas como la presentada en la figura 41. Por medio de la gráfica se facilita la visualización de las posibles combinaciones de dimensiones y así se pueden determinar rangos de valores recomendados. Esto también resulta útil para establecer a su vez la profundidad máxima de los espacios con respecto a las dimensiones de las ventanas.

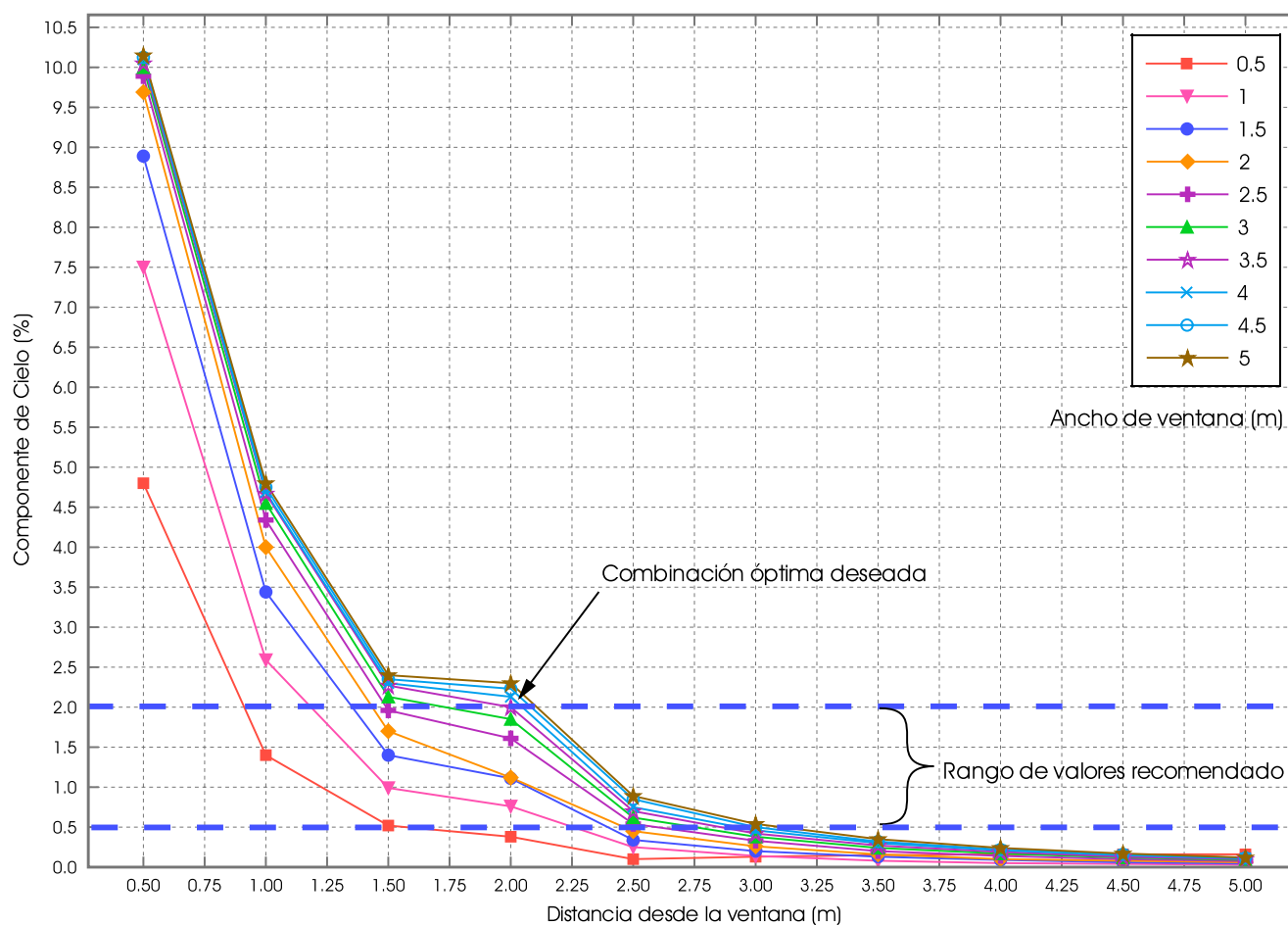


FIGURA 41. Gráfica de relaciones – dimensiones de ventana y punto de referencia

## 2.6. SIMULACIÓN Y CÁLCULO DE ILUMINACIÓN NATURAL POR COMPUTADORA.

Debido a que hoy en día existen diferentes programas de computo (software) que permiten hacer una evaluación de las condiciones de iluminación, es posible conocer en calidad y cantidad las diferentes variables que afectan el desempeño lumínico de un espacio arquitectónico. Estas herramientas se pueden clasificar, dependiendo de los fines y resultados obtenidos, en las siguientes categorías:<sup>90</sup>

- Herramientas para la visualización.
- Predicción de los factores de luz de día.
- Identificación de las fuentes de deslumbramiento.
- Predicción de ahorro de energía.
- Control de acceso de la luz directa al espacio.

Los programas de computo que existen hoy en día permiten procesar distintas variables de forma simultánea. Entre estas variables se pueden encontrar: el factor de luz de día, valores promedio de luminancia e iluminancia, análisis del confort visual. La información que se puede obtener por medio de los programas contribuye a tomar decisiones de forma temprana en las etapas del proyecto o en su defecto, (como se vera mas adelante en los casos de estudio) hacer una evaluación del comportamiento de objeto construido. Estudios similares son muy utilizados en el proceso de diseño arquitectónico y el ahorro de energía, entre ellos encontramos el realizado por Rocío Rangel<sup>91</sup> donde menciona las formas en las cuales los programas de computo aplicados a la arquitectura coadyuvan en las tareas de diseño.

1. Durante el proceso de diseño los programas permiten poner a prueba diversas opciones y escoger aquella que mejor se adapte a las necesidades del proyecto, del cliente y del arquitecto.

2. Una vez que el edificio ha sido ocupado, el análisis energético es útil para comprobar su funcionamiento. Es una manera de recompensar al diseñador por su trabajo, o en su defecto, proponer remodelaciones y cambios para mejorar el proyecto original.

3. Como herramienta de investigación, el uso de los simuladores energéticos es útil para estudiar proyectos arquitectónicos de manera conjunta o aislada. La comparación de resultados de diferentes programas se considera importante para llegar a conclusiones sobre la utilidad y precisión de los mismos.

Las simulaciones hechas por medio de programas de computo, aunque presentan un gran numero de ventajas, es necesario tener ciertas consideraciones en el momento de realizar el procesamiento. Esto se debe a que no todos los programas presentan las mismas características y funciones, por ejemplo existen programas que realizan visualizaciones muy precisas pero no permiten conocer los valores de iluminancia.

<sup>90</sup> **International Energy Agency**, *Daylight in Buildings: a Source Book on Daylighting Systems and Components*, E.U.A., 2000.

<sup>91</sup> **RANGEL Ruiz, Rocío**, *Iluminación natural y ahorro energético en las edificaciones: un modelo computarizado para evaluar soluciones arquitectónicas*, Tesis de Maestría en Arquitectura, UNAM, México, 1999.

PROGRAMA	APLICACIONES
ADELIN	Iluminación natural y artificial, edificios comerciales.
AGI32	Iluminación artificial y natural.
BSim2002	Simulación de edificios, energía, iluminación natural, análisis térmico.
Building Design Advisor	Diseño, Iluminación natural, evaluación de energía, casos de estudios, Ed. Comerciales.
CompuLyte	Iluminación artificial y natural.
Daylight	Iluminación natural y Factor de luz de día.
DAYSIM	Simulación anuales de iluminación natural, artificial y control de iluminación.
DesignBuilder	Simulación de edificios, visualización, emisiones de CO <sub>2</sub> , sombreado solar, ventilación, iluminación natural, confort, aire acondicionado, cálculos con EnergyPlus.
DIALux	Diseño de iluminación natural y artificial.
Ecasys	Control de simulación de energía
EcoAdvisor	Edificios comerciales, iluminación, HVAC, simulación vía Internet.
Eco Lumen	Diseño de iluminación, eficiencia energética.
ECOTECT	Análisis completo de edificios, diseño conceptual, validación, control solar, sombreado, análisis térmico, cálculo de ganancias térmicas, cálculo económico, análisis acústico, iluminación natural y artificial.
FLUCS	Iluminación natural y artificial.
FlucsDL	Simulación de iluminación natural
FlucsPro	Luminarias, diseño de iluminación, análisis de iluminación, datos fotométricos.
HiLight	Iluminación, energía.
LESODIAL	Iluminación natural, diseño inicial, interfaz amigable.
Lighting Boy	Diseño de iluminación, casos de estudio.
LightPro	Luminarias, diseño de iluminación.
Load Express	Diseño, iluminación en edificios comerciales, cargas de enfriamiento y calentamiento, HVAC.
OptoMizer	Análisis de iluminación, eficiencia lumínica.
Quick Calc	Diseño de iluminación, dibujo en 3d, iluminación interior.
Quick Est	Iluminación interior, dibujo en 3d.
Radiance	Iluminación natural y artificial, rendering
R a d i a n c e Control Panel	Iluminación natural y artificial, deslumbramiento
R a d i a n c e Interface	Iluminación natural y artificial, deslumbramiento.
SkyVision	Iluminación natural, características ópticas de materiales.
Sombrero 3.01	Sombreado, radiación solar, sistemas solares.
SPOT	Iluminación natural y artificial, ahorro de energía.

.....

**TABLA 11.** Tabla de programas de computo para el análisis de iluminación (Alpuche 2009)

Por otro lado existen programas cuyo cálculos son muy precisos pero su capacidades de visualización y simulación del espacio son muy limitadas. Con el objetivo de tener un panorama general sobre los programas que existen en hoy día y con los cuales se pueden realizar estudios de iluminación natural que contemplen los puntos anteriores, se presenta la tabla 11 en la que se enuncian los programas y sus aplicaciones principales.<sup>92</sup> Al hablar sobre programas de computo se deben tomar en cuenta otros aspectos además de la capacidad para realizar simulaciones de forma adecuada. Entre estos factores se puede nombrar: la interface del programa y la disponibilidad en el mercado. De los programas de la tabla 11 muchos no son "amigables" desde el punto de vista de su utilización, por lo tanto resultan difíciles de aprender a utilizar y se convierten en un obstáculo. A partir de estas ideas se realizó una búsqueda de los programas que cumpliera con las características antes citadas, es decir: facilidad de uso, capacidad de hacer simulaciones, calidad en las visualizaciones producidas, interface amigable y buena disponibilidad en el mercado.

El primer programa que se eligió para incluirlo dentro de la metodología propuesta es 3ds Max Design versión 2009, desarrollado por la empresa Autodesk®. Este programa presenta la ventaja de realizar simulaciones de buena calidad en aspectos cualitativos (calidad de la imagen) y cuantitativos (valores y niveles). Otro factor que se consideró es el hecho de que ya se han realizado estudios<sup>93</sup> sobre la validez de las simulaciones que procesa el programa comparadas con mediciones hechas en un espacio real, dando resultados confiables, comparado con otro programa similar (Daysim V3.0). Es importante mencionar que las versiones anteriores del programa 3ds Max ya contaban con una herramienta que permitía hacer simulaciones por medio de modelos tridimensionales y obtener imágenes (*Renders*) que mostraban el comportamiento lumínico de un espacio. Sin embargo no era posible obtener imágenes que fueran compatibles con otros programas de análisis de iluminación natural. Las nuevas versiones del programa (2010, 2011) generan imágenes HDR (*High Dynamic Range*) que incorporan valores absolutos de iluminancia para cada uno de los pixeles que contiene la imagen. Esto da la posibilidad de utilizar las imágenes generadas a partir de una simulación en programas de computo como si hubieran sido obtenidas por el procedimiento de ensamble de fotografías digitales, es cual se explicara más adelante en el [capítulo 2.7](#).

Otra herramienta que es muy útil en el momento de hacer cálculos y simulaciones en 3ds Max es aquella que permite obtener valores de iluminancia de forma mucho más precisa. Esta herramienta se ha denominado como *Exposure Technology*, que consiste en simulaciones de escenarios complejos en 3D con la incorporación de una fuente de iluminación natural. Este modulo de simulación ha sido desarrollado para realizar análisis más precisos en el estudio del comportamiento de la luz natural en las edificaciones. El programa realiza simulaciones en espacios interiores con luz natural mediante condiciones de cielo variables utilizando los modelos determinados por el CIE<sup>94</sup> así como otros

<sup>92</sup> **ALPUCHE, María**, et al., *Análisis lumínico de las aulas del programa de Arquitectura UNISON*, Memoria de la 32 Semana Nacional de Energía Solar, Mérida Yucatán, 2009.

<sup>93</sup> **REINHART, C., Breton, P.F.**, *Experimental validation of 3DS MAX® Design 2009 and DAYSIM 3.0*, Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference, Escocia, 2009.

<sup>94</sup> **CIE Technical Committee, 4.2**: *Standardization of luminance distribution on clear skies*. CIE, Paris 1973.



modelos de cielos realizados por investigadores en el campo de la iluminación natural (Richard Perez y Peter Tregenza). Estos modelos de cielo permiten hacer evaluaciones tomando como criterio los lineamientos que establecen los consejos de certificación en edificaciones como el US GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC) en los Estados Unidos de América o el BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) de Reino Unido. El programa también tiene la posibilidad de estimar valores de iluminancia y proporcionar resultados de forma gráfica y tabulada (hoja de cálculo). Este procedimiento se encuentra en forma de diagrama en la siguiente página (figura 42) donde se muestra el proceso para hacer una simulación mediante el programa 3d Max Design .<sup>95</sup>

Aunque los programas de computo cuenten con herramientas que los haga populares y fáciles de utilizar es importante decir que no hay “recetas de cocina” para el calculo de iluminación mediante estas herramientas. Es necesario utilizar diferentes técnicas para el análisis de espacios mas complejos. Actualmente se ha dado aumento de la utilización y por lo tanto la popularidad de los programas de simulación por computadora. En el caso especial de las simulaciones de iluminación existe un estándar a nivel internacional que certifica la validez de las simulaciones y cálculos de iluminación. Esta certificación es la emitida por el CIE<sup>96</sup> denominada “*Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs*”. Esta normatividad es muy reciente, lo que ha originado la proliferación de programas que no realizan de forma precisa las operaciones que han sido generados como el fundamento de los cálculos y que dan validez a las simulaciones. Al momento de escribir este documento se encontró que solo los siguientes programas habían sido validados con los parámetros establecidos por el CIE: Apolux<sup>97</sup>, Dialux<sup>98</sup>, Velux<sup>99</sup>, Agi32<sup>100</sup>, Radiance<sup>101</sup> y el motor de render Mental Ray<sup>102</sup>. Este último, es el motor de render que utiliza el programa 3ds Max Design 2009 y aunque no tiene la misma precisión de los otros programas, 3ds Max y Mental Ray proporcionan resultados considerablemente aceptables siendo la calidad y realismo de la imágenes generadas una de sus cualidades principales.

<sup>95</sup> **REINHART, C., et al.,** *Daylight simulation in 3ds Max Design 2009 – Getting Started*, Autodesk, E.U.A., 2008.

<sup>96</sup> **CIE,** *CIE 171:2006 Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs*, CIE, Viena, 2006.

<sup>97</sup> **ROCHA Carvalho, Carolina,** *Avaliação do Programa APOLUX Segundo Protocolos do Relatório CIE 171:2006 Referentes à Iluminação Natural*, Tesis de Maestría en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2009. (En portugués)

<sup>98</sup> **US Department of Energy,** *Bulding Energy Software tools*, Dialux, Documento en línea, consulta Junio 2010.  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=497](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=497)

<sup>99</sup> **LABAYRADE, R., et al.,** *Validation of Velux daylight visualizer 2 against CIE 171:2006 test cases*, Proceedings Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, 2009, pp. 1503-1513.

<sup>100</sup> **Dau Design and Consulting,** *Validation of AGi32 against CIE 171:2006*, 2007, pp. 1-62

<sup>101</sup> **GEISLER-MORODER, D , DÜ A.,,** *Validation of Radiance against CIE 171:2006 and improved adaptive subdivision of circular light sources*, 7th International RADIANCE workshop, Fribourg, 2008.

<sup>102</sup> **LABAYRADE, R.,** *Use of CIE 171:2006 test cases to assess the scope of lighting simulation programs*, Proceedings Light and Lighting Conference with Special Emphasis on LEDs and Solid State Lighting, Budapest, 2009.

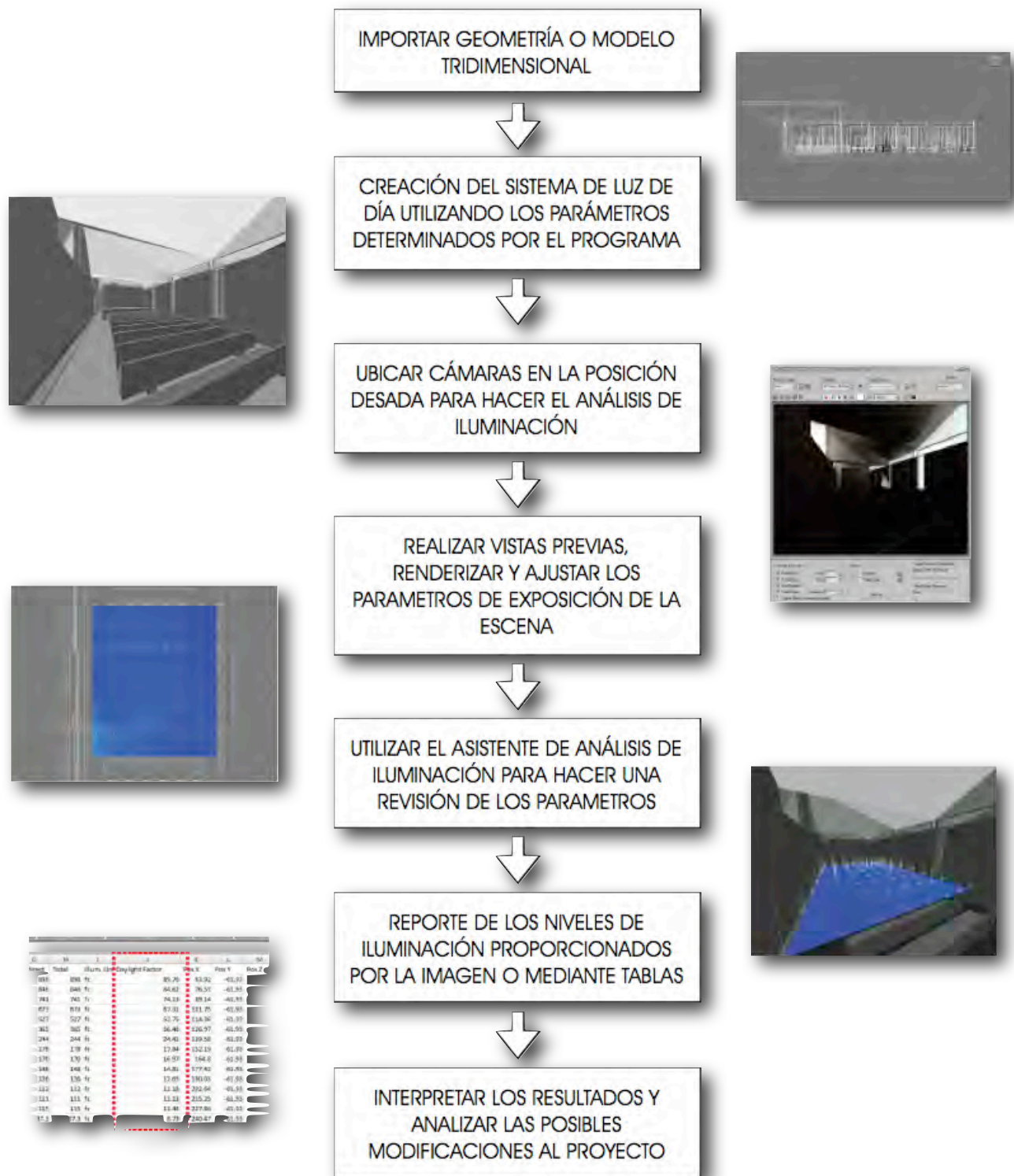


FIGURA 42. Diagrama de proceso de simulación y cálculo de iluminación natural mediante 3D Max Design 2009. (Reproducido de Autodesk© 2008)

Por otro lado el "control de calidad" o el cuidado que se tenga en el momento de hacer el uso de los programas de computo es una parte fundamental del éxito de las simulaciones. Por este motivo, la experiencia del usuario del programa y el nivel de conocimiento de las metodologías de análisis, son factores a considerar en el procesamiento, interpretación y reporte de los resultados.

Es así que encontramos que existe una gran diferencia entre los usuarios expertos, los usuarios-desarrolladores y los desarrolladores de los programas, entendiendo desarrolladores como aquellas personas que son capaces de acceder, modificar y crear nuevos algoritmos y rutinas de computo.

No se puede afirmar que la validez de un programa se concentre únicamente en los resultados obtenidos debido a que puede contener errores durante el procedimiento de simulación en el cual puede haber errores metodológicos que comenten los usuarios. Para Ibarra y Reinhart<sup>103</sup> la confiabilidad depende de una serie de factores a considerar para llevar a cabo la simulación por computadora y obtener resultados confiables, por lo tanto establecen las siguientes consideraciones generales para hacer cálculos y simulaciones por computadora.

#### *General.*

- Experiencia del usuario en modelado, simulación por computadora y estudios de iluminación.

#### *Geometría y modelado.*

- Programa utilizado para realizar el modelo 3D.
- Procedimiento o metodología aplicada para hacer el modelo 3D.
- Grado de precisión resultante después del proceso de importación del modelo del programa de modelado al programa de simulación.
- Modelado considerando las dimensiones interiores del espacio.
- Modelado considerando las dimensiones de las ventanas u otros elementos como domos, alabes, volados, protecciones, persianas, etc.
- Modelado considerando el espesor de los muros, cancelería u otros elementos adyacentes a las ventanas.
- Modelado de los edificios colindantes y obstrucciones.
- Modelado de la vegetación adyacente al espacio.

<sup>103</sup> IBARRA, D., REINHART, C., *Daylight factor simulations - How close do simulation beginners 'Really' get?*, Proceedings Eleventh International IBPSA Conference, Escocia, 2009.

*Materiales.*

- Utilización de la librería de materiales establecida por algún organismo de investigación o certificación o, la librería de materiales incluida en el programa de simulación.
- Utilización de los valores de transmisibilidad del cristal en el modelo de las ventanas.
- Utilización de los valores reflectancias del plafones, pisos y muros

*Variables de simulación:*

- Ubicación del plano de referencia conforme al análisis buscado.
- Modelado de forma precisa del plano de referencia.
- Grado de procesamiento y número de interacciones utilizados en la simulación.

Con toda la información anterior aunado a las recomendaciones dadas por el desarrollador del programa, se llevaron a cabo las simulaciones de cada uno de los casos de estudio analizados durante el desarrollo de esta investigación. Se puso especial atención en los máximos valores permisibles de variación ocasionados por las omisiones enumeradas con anterioridad. Como se explicó, la confiabilidad de los resultados finales depende en gran medida del grado de precisión y cuidado que se tenga en la realización del modelo 3ds y de la simulación.

Por otro lado se hizo una revisión de la página en internet del departamento de energía de los Estados Unidos de América<sup>104</sup> y se encontraron varios programas de computo que realizan análisis, cálculos y simulaciones de iluminación natural. De forma general se puede decir que la mayoría de los programas de computo están enfocados a realizar cálculos simples y arrojan como resultados los niveles de iluminación y valores del factor de luz de día.

Por mencionar un ejemplo se encuentra el programa "DFcalc"<sup>105</sup> el cual es fácilmente manejable ya que no implica mayor dificultad que introducir las variables como las dimensiones de la ventanas, el espacio y el tipo de cristal. A partir de esta información el programa calcula el factor de luz de día y la distribución de la luz en el espacio analizado.

Esto permite al usuario modificar las dimensiones y posición de la ventanas, así como los espesores del muro. Las ventanas y las propiedades de las mismas permiten hacer el calculo de los valores de  $U \times A$  (coeficiente global de transferencia de calor x área) que al multiplicarse por una diferencia de temperatura, da como resultado el valor de  $Q$  que es flujo de calor que pasa por la ventana.

---

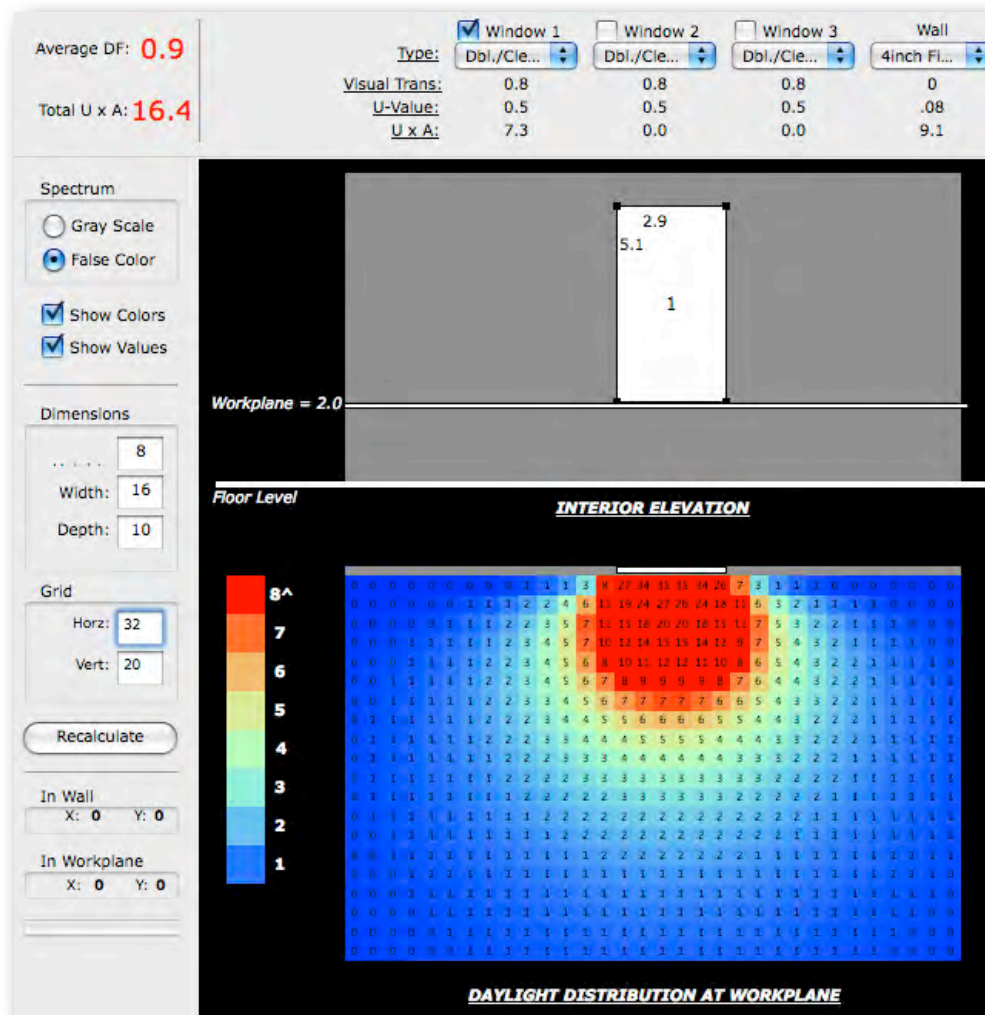
<sup>104</sup> U.S. Department of Energy - [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/) - Consulta Junio 2010

<sup>105</sup> ArchiPhysics - <http://www.archiphysics.com> - Consulta Junio 2010

Aunque el programa no está destinado para hacer cálculos térmicos, la influencia que tienen las ventanas en el comportamiento de la envolvente hace que esta variable sea considerada en los cálculos que realiza el programa con fines de análisis para el arquitecto. Esta variable que pocas veces es tomada en cuenta con fines de diseño, es una de las grandes ventajas que presenta este sencillo programa y que no incorporan otros programas similares.

Aunque no es objeto de esta investigación es importante mencionar que la relación que existe entre las ventanas, la luz natural, los espacios y las condiciones térmicas de los espacios, es un tema que debe ser analizado con mayor detalle.

El análisis para el cual está destinado el programa es el valor del factor de luz de día, el cual es calculado en una malla o "grid" con dimensiones determinadas por el usuario. Con estos valores el programa hace un promedio de los valores del factor de luz de día, el cual sirve como criterio para fines de diseño, cumplimiento de normas reglamentarias y para hacer modificaciones al proyecto. Estos valores se muestran al usuario en una imagen en escala de colores que representa de forma gráfica la distribución luminosa del espacio. (figura 43).



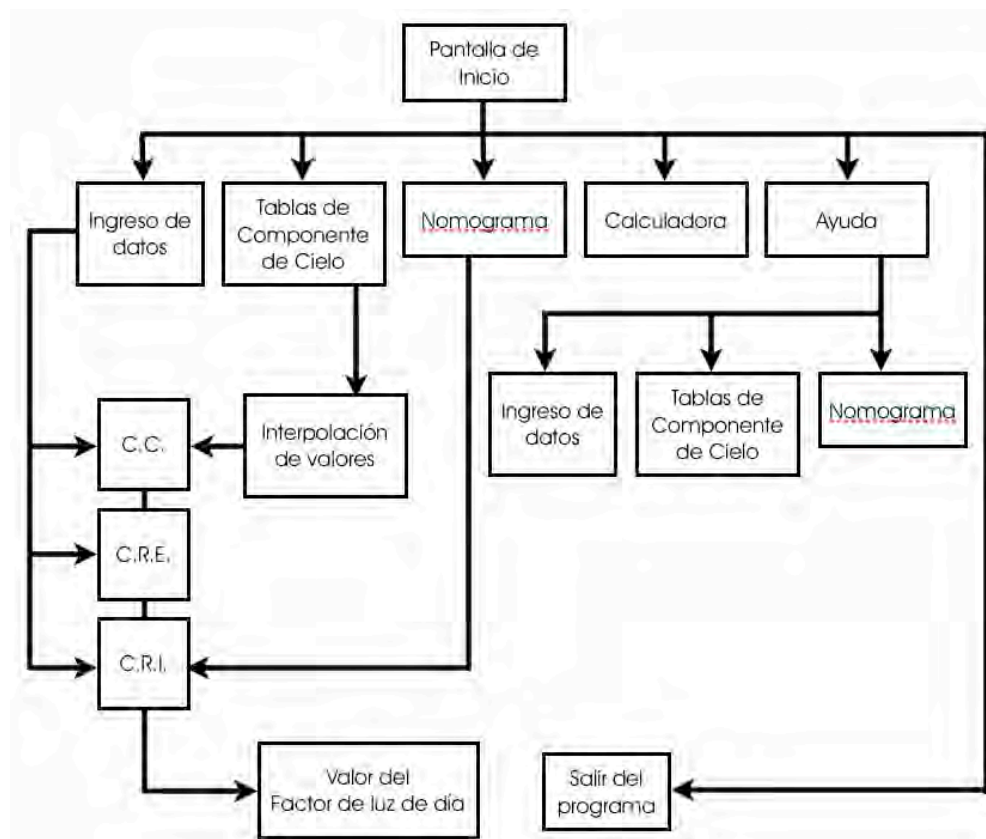
< FIGURA 43  
Distribución luminosa de un espacio utilizando programa DFcalc

PROGRAMA DAYLIGHT FACTOR V1.0

Con el objetivo de agilizar y facilitar los cálculos realizados para la obtención del factor de luz de día, se desarrolló el programa "Daylight Factor Calculator". La función principal del programa es simplificar el cálculo de los tres componentes del FLD. El programa fue compilado bajo plataforma Windows utilizando a su vez, el programa Visual Basic y puede ser utilizado con cualquier versión del sistema operativo de Microsoft.

El programa utiliza la metodología presentada en el [Capítulo 2.4](#), es decir, una tabla para obtener el Componente de Cielo (CC), el Nomograma para obtener el Componente Reflejado Interior (CRI) y el ángulo promedio de las obstrucciones (si existieran) para obtener el Componente Reflejado Exterior (CRE). Por medio de este sencillo programa el usuario es capaz de ingresar los datos, obtener valores y finalmente procesarla la información para obtener como resultados valores de iluminancia estimados en un espacio y para un solo punto de referencia. También puede obtener el valor del Factor de luz de día para ese mismo punto de referencia.

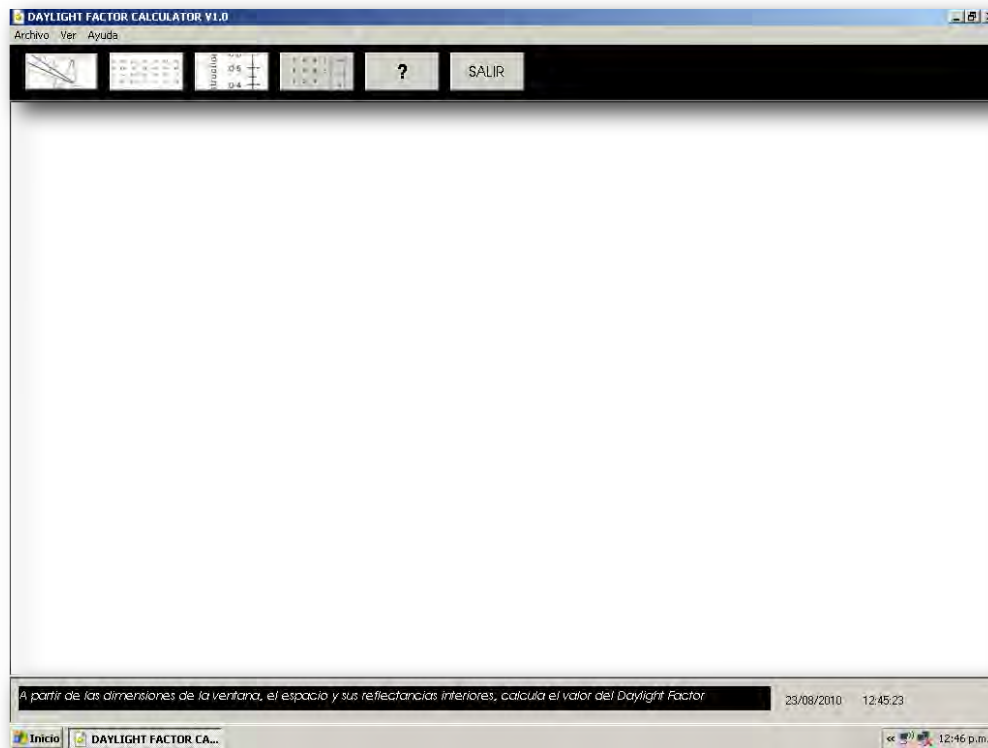
En la figura 44 se presenta la estructura del programa, el cual consta de una ventana principal y cinco sub-ventanas o menús secundarios para su funcionamiento.



**FIGURA 44 >**  
Diagrama de funcionamiento del programa Daylight Factor Calculator.

La ventana principal o de inicio (figura 45) es muy similar a cualquier otro programa que funciona sobre el sistema operativo *Windows*. Cuenta con un menú de opciones en la parte superior izquierda con los cuales se puede acceder a todas las funciones del programa.

En parte superior derecha se encuentra los iconos tradicionales de minimizar, maximizar y cerrar el programa. Debajo de los menús se encuentra la única barra de herramientas donde están situados los iconos que despliegan las demás ventanas o submenús del programa. Por último en la parte inferior de la ventana encontramos un espacio que contiene una barra que presenta una línea de texto en la cual se describe la ventana o menú que ha sido activado por el usuario.



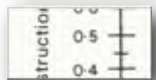
< **FIGURA 45**  
Ventana principal del programa *Daylight Factor Calculator*



Despliega la ventana para ingresar datos.



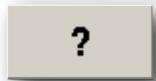
Despliega la ventana con tabla para obtener el valor del C.C.



Despliega la ventana con Nomograma para obtener el valor de CRI.

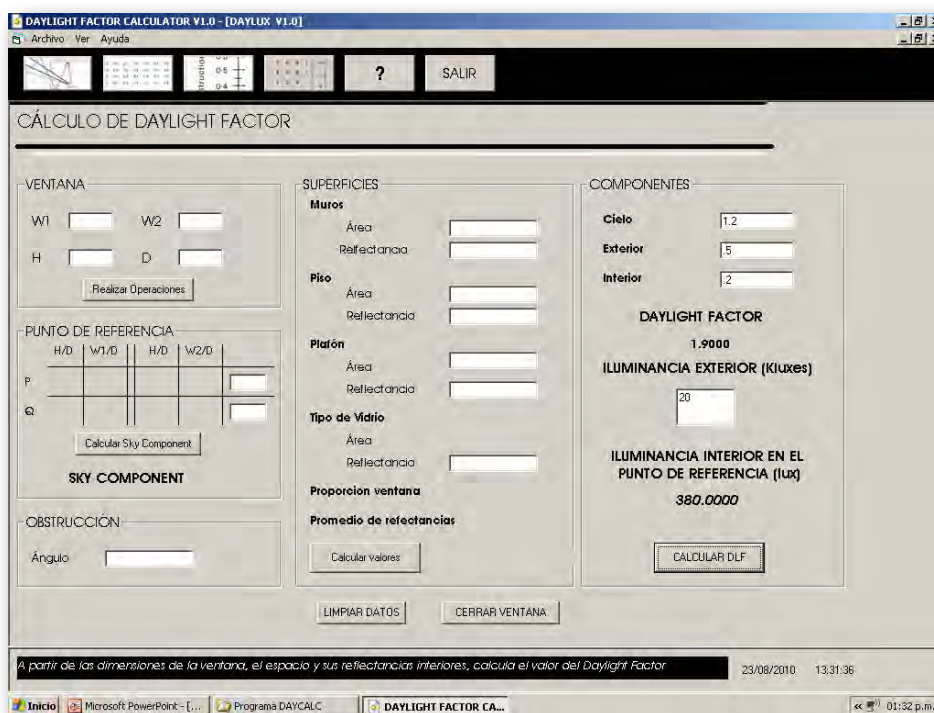


Despliega una calculadora básica



Despliega la ventana de ayuda del programa

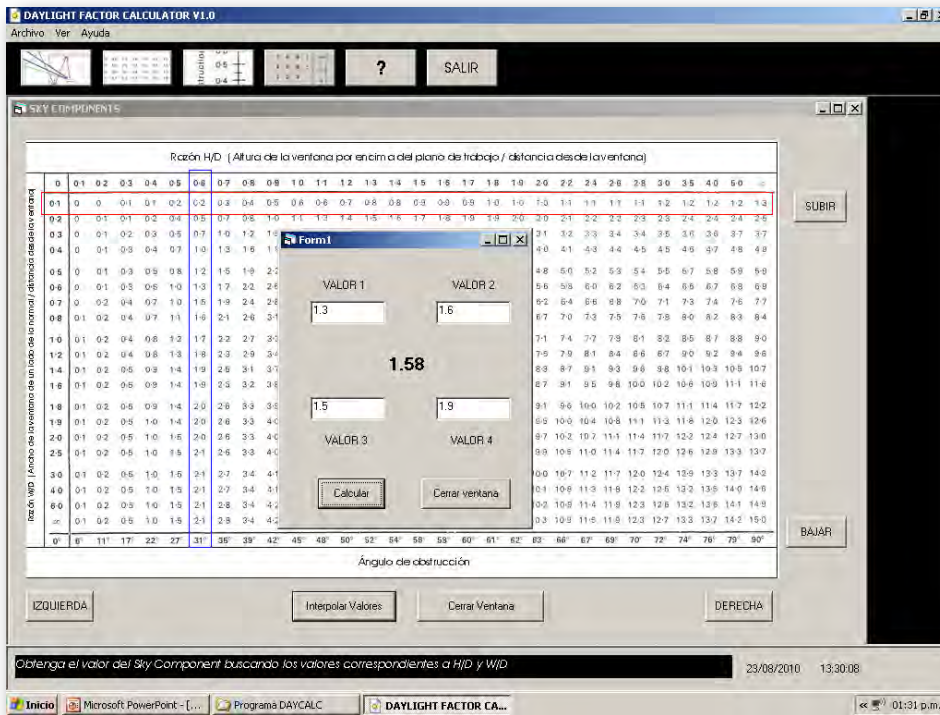
En la ventana donde se ingresan los datos (figura 46) se pueden encontrar tres columnas principales. En la columna del lado izquierdo se ingresan los datos generales de las dimensiones de ventana del espacio analizado, así como la ubicación del punto de referencia respecto a la misma. Con estos datos se obtienen los valores de las proporciones "H/D" y "W/D" a partir de los cuales en la tabla correspondiente se encuentran los valores de "P" y "Q". En la parte inferior de la columna izquierda se puede ingresar el valor del ángulo promedio de la obstrucción, en caso de que existiera, de lo contrario el espacio se deja en blanco. En la columna de la parte central se ingresan los valores del área de las superficies interiores así como las reflectancias de cada una de ellas. El resultado del procesamiento de estos datos arroja como resultados el valor de proporción de la ventana respecto al espacio (A) y el promedio de las reflectancias de las superficies (B). Por último en la ventana del lado derecho se ingresan los valores de cada uno de los componentes obtenidos para realizar la suma de los valores y en el caso contar con el valor de iluminancia exterior, se puede estimar el valor de la iluminancia interior en el punto de referencia.



**FIGURA 46 >**  
Ventana de ingreso de datos  
del programa *Daylight Factor  
Calculator*

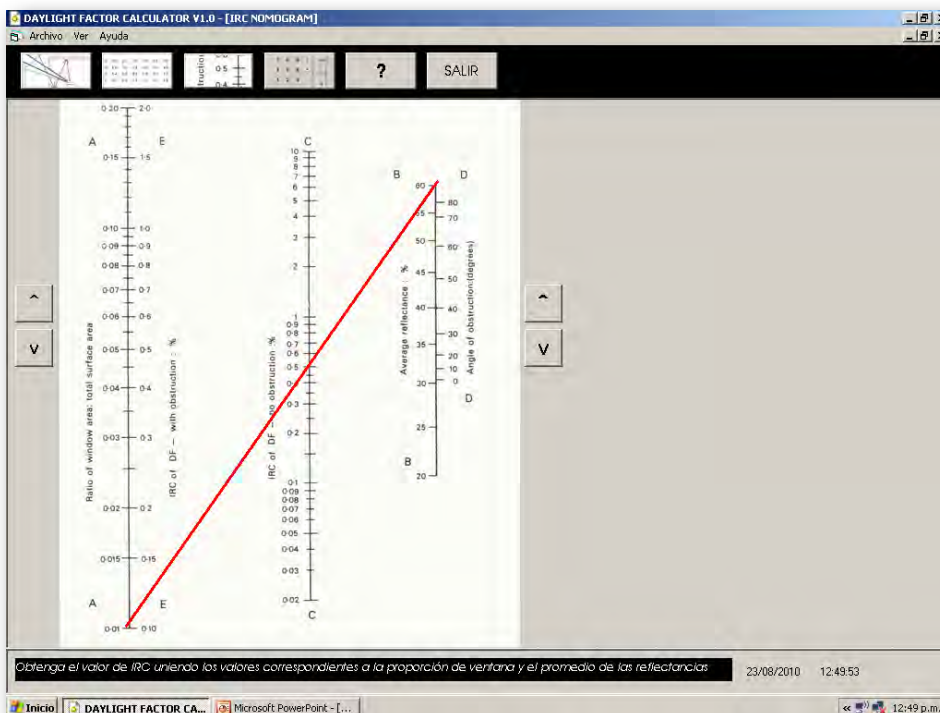
Con los valores de "H/D" y "W/D" obtenidos en la primera ventana se puede conocer el valor del CC con ayuda de la tabla que se presenta en la segunda ventana del programa (figura 47). Aquí el usuario puede desplazar un par de barras (vertical y horizontal) a través de la tabla mediante botones de acción ubicados en la parte derecha e inferior de la ventana. Así el usuario desplaza la barra horizontal hacia arriba o abajo y la barra vertical hacia la derecha o izquierda. Esta acción se tendrá que hacer para ubicar en la parte superior de la tabla el valor de "H/D" y en el extremo izquierdo el valor de "W/D". En la intersección de las dos barras se encuentra el valor de CC. Si los valores de "H/D" y "W/D" no coincidieran con los valores presentados en la tabla entonces será necesario ubicar los valores más cercanos y hacer una interpolación de valores. Esto se logra presionando un botón ubicado en la parte inferior, el cual despliega una pequeña ventana en donde se introducen los valores con los cuales se podrá hacer la interpolación.





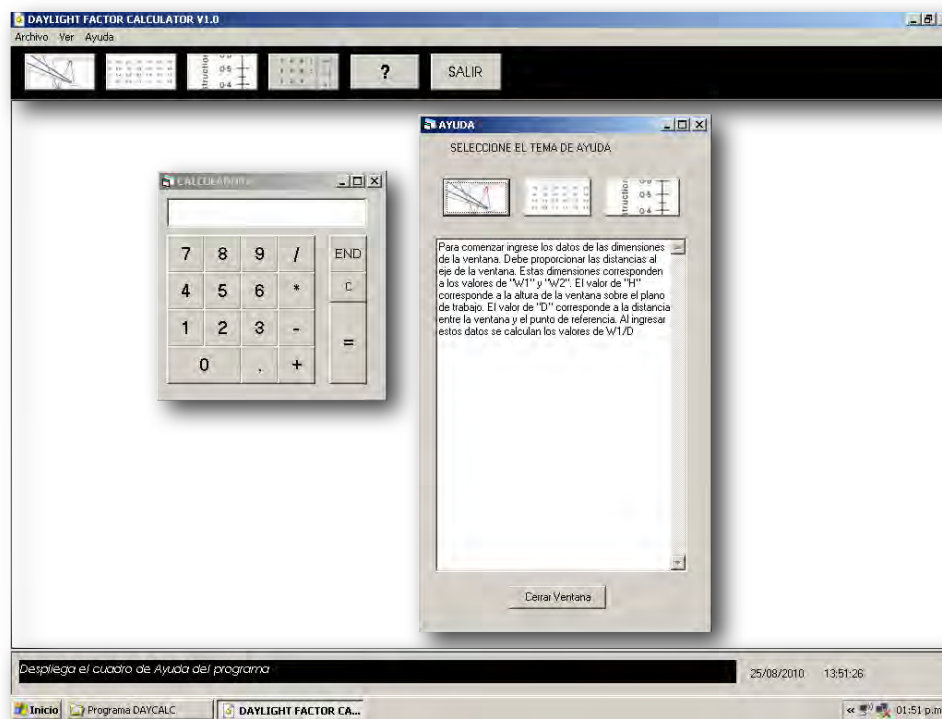
< FIGURA 47  
Ventana con tabla para la obtención del valor de CC y ventana para interpolar valores

La tercera ventana calcula el valor de CRI (figura 48). Para ello es necesario conocer dos valores: el primero es la proporción del área de la ventana con respecto al espacio (A) y el valor promedio de las reflectancias de las superficies (B). Los valores de A se presentan en la columna de lado izquierdo del nomograma y los valores del B del lado derecho. La función del nomograma es proporcionar el valor de CRI (columna central) a partir de la unión de dos puntos por medio de una línea. El usuario es capaz de mover los dos extremos de la línea para ubicar en sus columnas correspondientes los valores de A y B. En la intersección de la línea roja con la columna central se ubica el valor del CRI.



< FIGURA 48  
Ventana con nomograma para la obtención del valor de CRI

Por último encontramos una par de ventanas auxiliares al programa que son activadas presionando los iconos correspondientes a la calculadora y al signo de interrogación. La primera herramienta es una calculadora básica que puede ser abierta junto con cualquier otra ventana del programa. La segunda herramienta es la ventana que contiene un cuadro de dialogo con temas de ayuda sobre el programa, la cual contiene tres temas diferentes. El primero corresponde a la ayuda para ingresar los datos de la primera ventana del programa (ingreso de datos), la segunda opción es para mostrar ayuda con el uso de la tabla para la obtención del valor de CC y por último la tercera opción corresponde a la ayuda para utilizar el nomograma. Además de los temas particulares contenidos dentro de la ventana de ayuda, el usuario es guiado por la barra inferior que contiene una línea de texto que describe las acciones a seguir dentro la ventana o menú que fue activado.



**FIGURA 49 >**  
Ventana con submenús  
auxiliares.

## 2.7. IMÁGENES DE ALTO RANGO DINÁMICO (HDR)

Debido a que las comprobaciones que se realizaron en el transcurso de la investigación consistieron en la utilización de imágenes generadas por computadora que contienen información relativa a los niveles de iluminación en el interior de un espacio, a continuación se presentan las características de estas imágenes denominadas Imágenes de alto rango dinámico "HDR" (por sus siglas en inglés de High Dynamic Range). Las imágenes HDR son producto de una serie de procesamientos de información contenida en el archivo digital, ya sea generado por medio de la computadora o mediante la unión de varias imágenes capturadas con una cámara digital. El nombre completo de esta tecnología es *High Dynamic Range Rendering* o *renderizado* de alto rango dinámico.

Se define como una tecnología de renderizado que imita el funcionamiento de la pupila en el ojo humano.<sup>106</sup> El ojo humano se adapta de forma continua y con gran eficacia a las diferentes luminosidades de una misma imagen dilatando y contrayendo la pupila mientras se integra la información captada en el cerebro. Así el ojo es capaz de ver en una sola imagen las distintas intensidades y tonalidades de la luz, sin embargo las cámaras fotográficas no tienen esta capacidad de adaptación. Lo que hacen (por medio del fotómetro), es tomar la medida de iluminancia promedio de las diferentes zonas y toman la fotografía.

El resultado es que en las fotografías aparecen zonas oscuras y otras con mucha luz. Por medio de las técnicas de HDR se busca subsanar este defecto de la cámara fotográfica a través del procesamiento de las imágenes y consiguiendo iluminar correctamente todas las zonas, aunque contengan niveles de iluminación diferentes. Aunque esta tecnología es muy reciente, se está trabajando en desarrollar una mayor cantidad de investigaciones para ser aplicadas en el estudio del desempeño lumínico de las edificaciones.<sup>107</sup> A mayor desarrollo de metodologías de cálculo y estudios mediante la utilización de imágenes HDR será posible aumentar la precisión de los análisis. De la misma manera se pronostica que a mayor desarrollo de la tecnología de cámaras fotográficas digitales, de computadoras y programas, estos estudios se podrán realizar de forma mucho más rápida y precisa.<sup>108</sup>

### Metodología de evaluación

De forma general las imágenes HDR se utilizan en estudios de iluminación para obtener valores de luminancia en espacios arquitectónicos. Es importante diferenciar los conceptos de iluminancia e luminancia, entendiéndose esta última como la cantidad de luz que es reflejada por una superficie. Esto permite hacer estudios de forma cualitativa debido a que aun sin tener una calibración fotométrica, una imagen HDR puede otorgar con relativa exactitud, una idea de la distribución luminosa del espacio evaluado. Esto se puede utilizar para hacer las evaluaciones de forma mucho más rápida y eficiente.<sup>109</sup> Para obtener una imagen HDR a partir de cámaras digitales es necesario obtener una serie de fotografías bajo el mismo punto de enfoque pero con distintos niveles de exposición.

Así se pueden obtener hasta 10 fotografías digitales, cinco subexpuestas y otras cinco sobrepuestas. Estas imágenes finalmente se unen por medio de programas de computadora para obtener la imagen HDR. La imagen resultante contiene información de los niveles de luminancia en cada uno de los píxeles que la componen. Por ejemplo, una imagen digital de 800 x 600 píxeles, contiene 480 mil puntos de información. Posteriormente se puede procesar para

<sup>106</sup> **REINHART, E.,** Ward, G., *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann, Inglaterra, 2005. pp. 7.

<sup>107</sup> **JACOBS, A.,** *High Dynamic Range Imaging and its Application in Building Research*, Advances in Building Energy Research, 2007, vol. 1 pp. 177-202.

<sup>108</sup> **MARDALJEVIC J., Painter, B., Andersen, M.,** *Transmission illuminance proxy HDR imaging: A new technique to quantify luminous flux*, Lighting Research & Technology, 2009, vol. 41(1), pp. 27-49.

<sup>109</sup> **JACOBS, A.,** *op. cit.*

obtener la información relativa al comportamiento lumínico. La información se asocia a una escala de valores a partir de mediciones de luminancia hechas en el espacio evaluado. En estudios recientes se han hecho comparaciones entre los valores registrados por medio de instrumentos de medición y los obtenidos a partir de imágenes HDR y se ha observado que existe concordancia aceptable entre los mismo.<sup>110</sup>

#### Interpretación de los datos a partir de imágenes HDR

Aunque existen diversos programas comerciales para generar imágenes HDR, estos tienen la limitación que sólo unen las imágenes con el fin de generar efectos visuales más atractivos a la vista o para generar imágenes realistas. Para hacer uso de las imágenes en análisis de comportamiento lumínico es necesario utilizar otros programas específicos como *Radiance*<sup>111</sup> o *Photosphere*<sup>112</sup>, ambos desarrollados en la Universidad de Berkeley en California.

Estos programas son los únicos capaces de obtener información sobre los niveles de luminancia a partir de los píxeles de la imagen HDR. Con este paso final en el proceso de análisis es posible hacer estudios completos de iluminación con relativa facilidad ya que a partir de la escala de valores que proporciona el programa y de su calibración por medio de un punto de medición registrado en el espacio, se obtienen valores promedio por área o en puntos en específico.

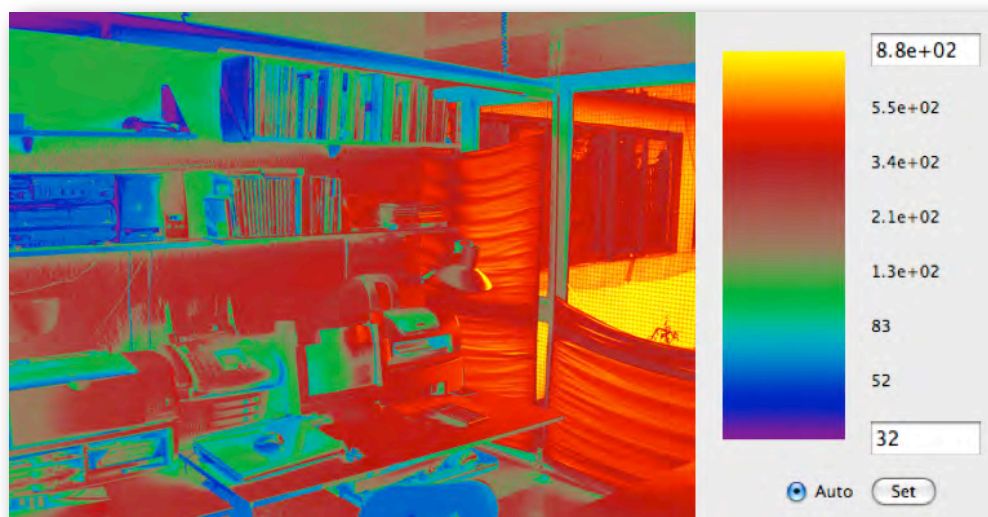


**FIGURA 50 >**  
Secuencia de fotografías digitales con diferentes niveles de exposición.  
(A. Valeriano)

<sup>110</sup> INANICI, M., *Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system*. Lighting Research & Technology, 2006, vol. 38(2) pp. 123-136.

<sup>111</sup> Radiance software - <http://radsite.lbl.gov/radiance/> - Fecha de consulta: Julio 2010

<sup>112</sup> Photosphere software - <http://anywhere.com/> - Fecha de consulta: Julio 2010



< **FIGURA 51**  
 Imagen HDR en gama de colores y su correspondiente escala de valores de luminancia.  
 (A. Valeriano)

Como se puede apreciar este método resulta mucho más útil en estudios de espacios construidos, esto se debe principalmente a que involucra el hecho de tomar fotografías en el espacio. Esto es un paso considerable para el avance del conocimiento en materia de iluminación ya que reduce la cantidad de tiempo empleado en hacer los análisis además de que se emplea menos instrumental y equipo para hacer dicho procesamiento.<sup>113</sup> Por otro lado, no es indispensable que la serie de fotografías sean tomadas en un espacio construido y por lo tanto esta metodología se puede aplicar en el análisis de modelos a escala.<sup>114</sup> De la misma manera las imágenes HDR no son exclusivas para su utilización en el interior de los espacios. También se pueden tomar fotografías de un entorno urbano con el objetivo de analizar la configuración de los edificios y procesarlas para apreciar los elementos que son capaces de reflejar o absorber la luz y que influyen en el comportamiento lumínico en el interior de un espacio. Por último esta técnica puede ser utilizada en estudios que involucran la distribución luminosa del cielo y por lo tanto permiten hacer una caracterización de las diferentes condiciones en el lugar de estudio.

Entre los estudios en los que se ha empleado la técnica de imágenes HDR encontramos el realizado recientemente por Inanici<sup>115</sup> en el que evalúa las condiciones del cielo para definir su distribución luminosa y compararla con los modelos establecidos por el CIE que se describieron en el [Capítulo 1.7](#). En el estudio se aplica la metodología para evaluar la luminosidad de los elementos que rodean a un edificio como la vegetación y el suelo que rodea el edificio. Con esta información se puede analizar la influencia de las superficies sobre la luz que incide en la ventana del espacio analizado (figura 53).

<sup>113</sup> **INANICI, M.**, *Transformation of High Dynamic Images into Virtual Lighting Laboratories*. Ann Arbor, vol. 10, 2009.

<sup>114</sup> **MARTINS Mogo de Nadal, Betina, G.**, *An experimental setup to evaluate the daylighting performance of an advanced optical light pipe for deep-plan office buildings*, Tesis de Maestría en Ciencia, Universidad de Texas, E.U.A., 2005.

<sup>115</sup> **INANICI, M.**, *Applications of image based rendering in lighting simulation: development and evaluation of image based sky models*, Proceedings Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, 2009, pp. 264-271.

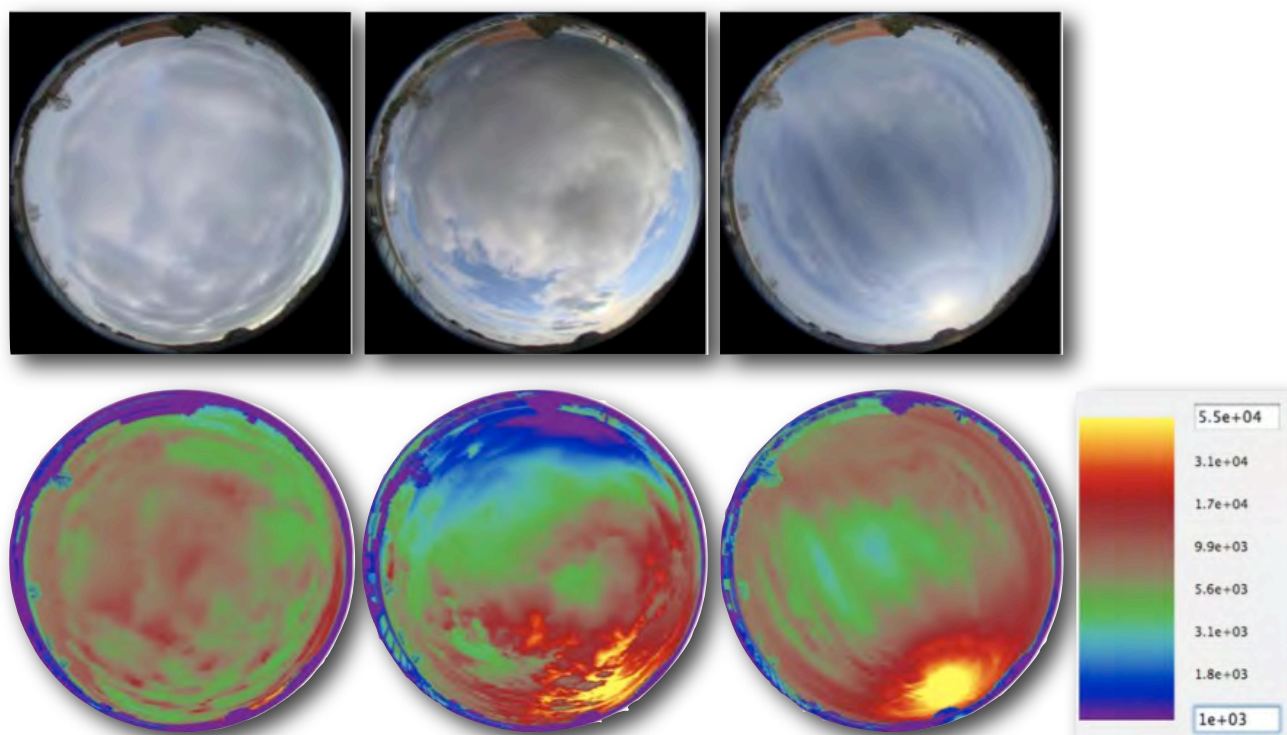


FIGURA 52. Imagen HDR de la distribución luminosa del cielo. (Inanici 2005)

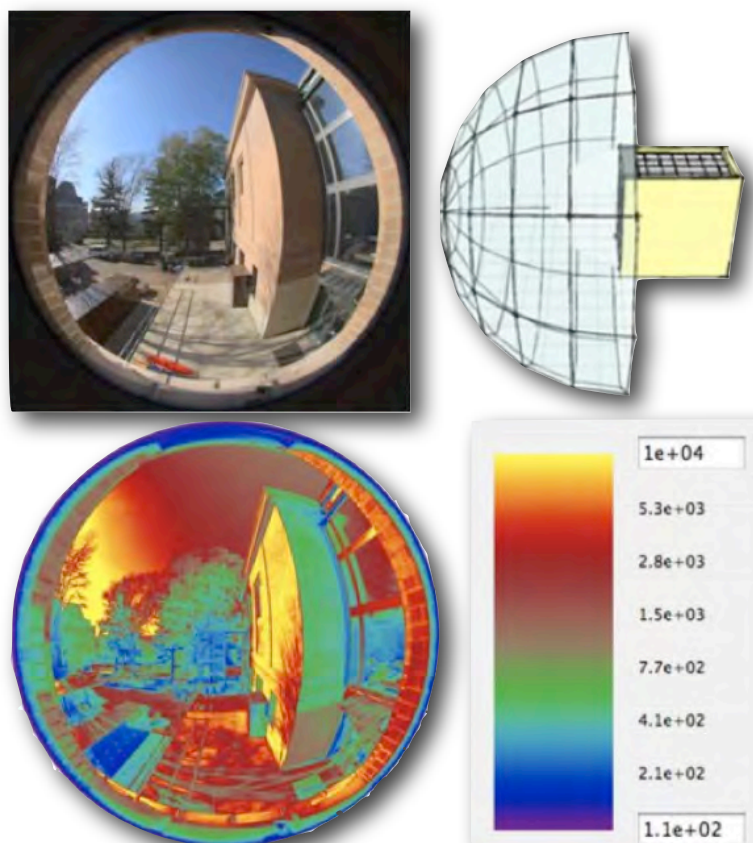


FIGURA 53 >  
Imagen HDR de la distribución  
luminosa de elementos  
colindantes a una ventana.  
(Inanici 2005)

---

## 2.8. EVALUACIONES POST-OCUPACIONALES

---

Aunque no es el tema central de la investigación, que consiste en validar los métodos de cálculo de iluminación natural; el estudio de la percepción y grado de satisfacción de lo usuarios forma una parte muy importante de este trabajo de investigación. Esto se debe a varias razones: en primer lugar la investigación tiene como objetivo establecer una metodología de trabajo para el estudio de la luz natural en los espacios interiores, estos estudios además de contemplar las condiciones físicas del espacio deben incluir el análisis de las preferencias visuales de los ocupantes. Es decir, el estudio plantea métodos para realizar análisis cuantitativos (cálculos, estimaciones, simulaciones, etc.) y cualitativos (opinión de los usuarios), como el que se presenta en esta parte del documento.

Por otro lado es común que al hacer diagnósticos de las condiciones lumínicas de los espacios arquitectónicos, los arquitectos y diseñadores únicamente se concentren en estudiar al espacio, dejando de lado la opinión de los usuarios. Este último punto es vital importancia, ya que como se verá más adelante, el estado de satisfacción de un usuario se ve afectado por otras variables (físicas y psicológicas). Es importante mencionar que durante el desarrollo de esta investigación la orientación fue muy distinta a otras afines las cuales están enfocadas al estudio del potencial de ahorro energético mediante el uso de la luz natural. Esta investigación está enfocada en el tema del uso de la luz natural como uno de muchos medios de propiciar la salud psicológica y fisiológica de las personas. Por lo tanto incluir un estudio de las preferencias y las condiciones bajo las cuales las personas se sienten satisfechas en un espacio resulta muy importante.

En capítulos anteriores se mencionó que se han realizado estudios en los cuales se evalúa y se cuantifica la productividad de los usuarios en espacios laborales ([Capítulo 1.4](#)) y el rendimiento escolar de los alumnos ([Capítulo 1.5](#)), sin embargo no existen muchos estudios en los cuales se ponga de manifiesto las preferencias visuales de los usuarios en un espacio en específico (como un salón de clase) y se comparen con otros parámetros o índices de satisfacción espacial. En la literatura disponible sobre el tema se plantean muchos estudios similares pero tienen la desventaja que únicamente se concentran en el estudio de la luz natural y no la relacionan con otras variables físicas como la flexibilidad del espacio o las visuales que se tienen hacia el exterior.

Las evaluaciones post-ocupacionales fueron desarrolladas originalmente como herramientas de las ciencias sociales (psicología, sociología) y carecía de un enfoque dirigido al estudio de la relación percepción-espacio. Esta situación se transformó en el momento en que los investigadores se percataron de que los resultados observados en las evaluaciones podían ser aplicados de forma concreta y específica, transformando algunos de los objetivos de diseño en parámetros físicos del espacio. Es decir, la opinión de los usuarios se podía materializar en el espacio.

Debido al origen de los estudios y las transformaciones que han sufrido por la adecuación a cada caso de estudio, es muy difícil establecer una definición única de lo que es una evaluación post-ocupacional. Sin embargo una de las

más aceptadas es la propuesta por Zimring y Reizenstein<sup>116</sup> y establece lo siguiente: "Una evaluación post-ocupacional esta definida como una evaluación de la efectividad para los usuarios, de los espacios diseñados que utilizan". Con esta definición se establece que son los usuarios los que evalúan a los espacios que habitan, sin embargo es muy general motivo por el cual, recientemente, el mismo Zimring<sup>117</sup> adecuó una definición de Carol Weiss para establecer lo siguiente:

***"La evaluación post-ocupacional es aquella realizada se forma sistemática enfocada en el proceso de la entrega de las edificaciones, espacios diseñados o el desempeño de dichos espacios basando en la forma en que son realmente utilizados, o ambos; comparados con una serie de estándares implícitos o explícitos. Todo lo anterior con la intención de mejorar el proceso de creación o, los espacios mismos."***

A partir de esta definición, Zimring analiza algunas de las principales características que deben contemplar las evaluaciones, entre las que se encuentran: la sistematicidad y metodología, el proceso de creación de los espacios, el uso de los espacios, los estándares y el desempeño de los espacios y el concepto de "calidad", entendida como el proceso de mejora continua. Por otro lado, el autor clasifica las evaluaciones en dos grandes categorías. La primera, enfocada a la evaluación que da soporte a un proyecto en específico y la segunda, que busca generar información para futuros proyectos. Independientemente del los objetivos que busquen las evaluaciones, vale la pena hacer la observación de la carencia de una metodología estandarizada para hacer estudio de este tipo. Esto se debe principalmente a que las evaluaciones pueden ser utilizadas para muchos fines y en muchos espacios, por lo tanto siempre habrá diferencias dependiendo de los casos de estudio.

Es así que podemos encontrar estudios enfocados únicamente a conocer las opiniones de los usuarios para medir su nivel de satisfacción con el espacio y por otro lado, estudios en los que únicamente se evalúa el desempeño de los sistemas mecánicos de un edificios (consumos de agua, luz, etc.). En otros casos los estudios brindan información sobre el nivel de aceptación de los usuarios hacia el edificio, lo que permite relacionar información del comportamiento de las personas y las actitudes que presentan hacia los ambientes en los que se desenvuelve. Existen otras evaluaciones que buscan conocer el grado de satisfacción de los usuarios con el edificio, y también permiten conocer la percepción que tienen las personas de los ambientes. Posiblemente los estudios más completos serán aquellos que conjuguen estos dos aspectos, es decir, las respuestas de los usuarios y el desempeño o rendimiento técnico de las edificaciones, así como de los sistemas que los componen. A pesar de las grandes diferencias metodológicas y sus resultados, los ejemplos anterior pueden ser considerados como estudios post-ocupacionales. Todo lo anterior ha dado como resultado la aparición de dos posturas opuestas respecto a la metodología de las evaluaciones: la primera que propone un solo método estandarizado y la segunda, que defiende la postura que las evaluaciones deben adecuarse a cada caso en específico. Independientemente de la metodología que se siga

<sup>116</sup> **ZIMRING, C., REIZENSTEIN, J.**, *Post-occupancy evaluation: an overview*, Environment and Behavior, 1980, vol. 12(4), pp. 429-450.

<sup>117</sup> **ZIMRING, C.**, *Postoccupancy Evaluation: issues and implementation*, en Bechtel, R. y Churchman, A. (comp.), *Handbook of environmental psychology*, Wiley & Sons, Nueva York, 2002, pp. 307.



para llevar a cabo las evaluaciones Zimring<sup>118</sup> estable que todo estudio debe contemplar por lo menos estas cinco fases esenciales.

1. Entrada y levantamiento inicial de datos. Que consiste en el primer acercamiento con las organizaciones a cargo de los espacios para obtener el apoyo necesario para realizar la evaluación. Esto permite conocer los aspectos relevantes a evaluar. Esta etapa permite conocer los antecedentes del caso de estudio.
2. Diseño de la investigación. Consiste en establecer los objetivos de la investigación y el diseño de los instrumentos de medición.
3. Levantamiento de datos. Esta etapa consiste en aplicar los instrumentos de medición para recolectar la información.
4. Análisis de datos. Consiste en procesar la información a partir de la elección adecuada de un método de análisis.
5. Presentación de los datos. Los resultados obtenidos del estudio se presentaran mediante diversas técnicas de representación teniendo en cuenta que la información contenida en el estudio debe ser comprendida por la personas para que se le pueda dar el uso y significado.

En este punto es importante mencionar que existen varios métodos para poder llevar a cabo el levantamiento de datos los cuales pueden ser utilizados en varias de las fases del estudios mencionadas anteriormente. Debido a que cada uno presenta sus ventajas y desventajas, se debe analizar su elección en la etapa de diseño de investigación. Entre los métodos que propone Zimring<sup>119</sup> para llevar a cabo el levantamiento de datos están los siguientes:

- Entrevistas en recorridos.
- Sesiones de taller.
- Entrevistas.
- Cuestionarios.
- Registro del uso del tiempo de los usuarios.
- Observación de la actividad ambiental.
- Métodos de registro del escenario físico.

Es aquí donde encontramos una “laguna” en cuanto a las definiciones y métodos utilizados en el tema de las evaluaciones post-ocupacionales. Esto se debe principalmente a que, en un principio, las evaluaciones fueron desarrolladas bajo algunos principios de las ciencias sociales, a partir de esto, se fueron incorporando en otras ramas del conocimiento como la arquitectura y el diseño en general. Esta situación ha provocado que hoy en día muchas evaluaciones estén demasiado orientadas a evaluar uno o varios aspectos en

<sup>118</sup> ZIMRING, C., *Evaluation of design environments: methods for post-occupancy evaluations*, en Bechtel, R., Marrans, R.W., Michelson, W., (comp.) *Methods in environmental and behavioral research*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1987, pp. 270-299.

<sup>119</sup> ZIMRING, C., *op. cit.*, 1987.

específico, lo que da como resultado que muchos de los resultados obtenidos en las investigaciones sean difícilmente aplicables a otras ramas del conocimiento que puedan sacar provecho de dicha información.

Tal es el caso de las evaluaciones que se llevan a cabo en grandes empresas en las cuales se busca conocer el desempeño funcional de los edificios con fines de "facility management" o de mantenimiento. Estos estudios buscan únicamente conocer aquellas "áreas" de los edificios que presentan conflictos funcionales o que están más propensas a padecer fallas debido al uso, de esta forma, los "mangers" o jefes de mantenimiento, puede programar de forma precisa los periodos de mantenimiento y prevenir fallas en las operaciones. Con este ejemplo se puede ver el grado de especialización al que pueden llegar las evaluaciones post-ocupacionales.

Ante este escenario, la psicología ambiental juega un papel fundamental debido a que los conocimientos que aporta, logran hacer una mediación entre las ramas de las ciencias sociales teóricas y las de diseño y edificación. Esto permite que los resultados tengan un doble potencial de análisis: por un lado, se pueden analizar las preferencias de los usuarios, sus respuestas y actitudes respecto al espacio, y por otro lado se pueden detectar aquellos aspectos funcionales y estéticos que son más significativos en los espacios y que generan las respuestas en los usuarios. Esto representa un cambio de paradigma en la forma en que se evalúan los espacios, debido a que un estudio post-ocupacional puede verse como una metodología que permita comprobar las hipótesis planteadas por los diseñadores, las cuales se expresan comúnmente como "programas arquitectónicos" y que son materializados en las construcciones. Por ejemplo, si el arquitecto diseña un espacio confortable, esta proponiendo una "hipótesis espacial", la cual puede ser comprobada o refutada mediante un estudio de las condiciones físicas del espacio. Si los resultados que arroja el estudio demuestran que los usuarios no consideran que el espacio es confortable, entonces la "hipótesis espacial" del arquitecto debe ser rechazada. En otras palabras, es posible afirmar que las evaluaciones post-ocupacionales son una herramienta de medición del acierto y la efectividad del trabajo de los arquitectos, diseñadores y constructores.

Una idea similar es la que presentan Zimmerman Y Martin<sup>120</sup> al considerar que, sin un estudio post-ocupacional que "cierre" el ciclo de creación de un espacio, no es posible llegar a la etapa de conclusión de un proyecto, por lo tanto el espacio u objeto arquitectónico puede ser considerado como un "prototipo" que espera los ajustes y modificaciones producto de un proceso de retroalimentación o "feedback". Edificios "prototipos" que contaran con espacios, materiales y sistemas con resultados potencialmente impredecibles. A partir de estas ideas los autores consideran que el propósito de las evaluaciones es proporcionar información que permita alcanzar el objetivo de mejora continua. Naturalmente esta idea nunca será bien recibida por un arquitecto y mucho menos por su cliente debido a los altos costos que representa hacer "prototipos" de edificios. Ante esta situación resulta muy importante que los arquitectos estén mejor preparados y informados sobre el desempeño de los edificios que realicen y la única forma de saberlo es, precisamente, con la ayuda de las evaluaciones post-ocupacionales.

---

<sup>120</sup> ZIMMERMAN, A., MARTIN. M., *Post-occupancy evaluation: benefits and barriers*, Building Research & Information, 2001, vol. 29(2) pp. 168-174.

En relación a este aspecto de la formación de los arquitectos, Hadjri y Crozier<sup>121</sup> reflexionan sobre el papel que deben desempeñar las escuelas y las organizaciones de profesionales, quienes no han adoptado, el estudio de estas herramientas. Esta situación ha ocasionado que en el ámbito profesional de la arquitectura, las evaluaciones no sean consideradas como parte importante del proceso de edificación, lo que representa un obstáculo importante en el desarrollo e implementación de dichos conocimientos.

Por otra lado resulta contradictorio que los avances y los conocimientos generados en los últimos 30 años en torno a las evaluaciones post-ocupacionales, no sean vistas como un elemento más en el proceso de diseño arquitectónico y edificación. La contradicción radica en que la arquitectura es una disciplina multidisciplinaria y multidimensional, de la misma forma en que lo son las evaluaciones post-ocupacionales, sin embargo sigue siendo considerada como herramientas de las ciencias sociales y que solo atañe a psicólogos y sociólogos. Esta situación, en teoría, permitiría que las evaluaciones fueran más fáciles de incorporar en otras disciplinas, pero al parecer no es así.

Por último Hadjri y Crozier atribuyen este fenómeno al hecho de que las personas involucradas en los estudios, desarrollo y aplicación de las evaluaciones no están activamente envueltas en los procesos de diseño o construcción. Esta circunstancia hace muy difícil que sus acciones, sus estudios y resultados ejerzan la influencia o propicien los cambios que son necesarios para que estas herramientas sean adoptadas por la industria del diseño y la construcción. Con estas herramientas es posible demostrar que las respuestas de los usuarios a los espacios son mucho más complejas de los que se pudiera esperar. Por lo tanto resultan muy útiles en el momento de diseñar debido a que pueden llegar a ser utilizadas como evidencias del comportamiento de las personas en un espacio en específico.

Todo lo anterior permite establecer "hipótesis espaciales" basadas en pruebas científicas, que su vez están apoyadas por un método, que en la mayoría de las ocasiones no está presente en el momento de diseñar. Esto da como resultados que los arquitectos realicen su trabajo basados en sentido común o la experiencia, sin embargo el desempeño físico los espacios reales así como el comportamiento de las personas puede llegar a ser muy distinto al que imaginó el arquitecto. Como se mencionó anteriormente, de forma general, las evaluaciones post-ocupacionales tienen como objetivo indicar o medir el grado en que un edificio está cumpliendo con las funciones para las cuales fue diseñado, además de poder medir el desempeño del edificio en diferentes aspectos, para poder detectar errores y corregirlos.<sup>122</sup> Se han encontrado estudios en los que se presentan evaluaciones de este tipo y los resultados resultan sorprendentes debido a que pueden llegar a contradecir los esquemas tradicionales de funcionamiento y ocupación de un espacio. Por mencionar un ejemplo, encontramos el estudio realizado por Wang y Boubekri<sup>123</sup>, quienes estudiaron las preferencias de los usuarios de un espacio al momento de sentarse dentro de

<sup>121</sup> **HADJRI, K., CROZIER, C.**, *Post-occupancy evaluation: purpose, benefits and barriers*, Facilities, 2009, vol. 27(1), pp. 21-33.

<sup>122</sup> **IEA, International Energy Agency** - Solar heating & cooling programme, *Post occupancy evaluation of daylight in buildings*, IEA, 1999, pp. 12.

<sup>123</sup> **WANG, N., BOUBEKRI, M.**, *Investigation of declared seating preference and measured cognitive performance*, Journal of Environmental Psychology, 2009, vol. 30(2), pp. 226-238.

una habitación con una ventana. Algunos de los resultados indicaron que existen otros factores como la "centralidad", las vistas, la privacidad y el confort visual, que fueron considerados más importantes por encima de la cantidad de luz. Esto es una prueba de que muchas veces la conducta de los usuarios no se ajusta a los esquemas tradicionales y lógicos que dicta el diseño arquitectónico, por el contrario, las personas serán las que establezcan estos esquemas de utilización del espacio.

En el caso de las evaluaciones que buscan medir el desempeño lumínico del edificios, estas son generadas a partir de una serie de instrumentos de medición que permiten conocer la opinión de los usuarios. Para realizarlos es necesario establecer el tipo de preguntas, las cuales dependerán del tipo de usuario, la edad de los mismos así como de las actividades que se llevan a cabo en el edificio, por lo tanto los cuestionarios que se apliquen a un edificio de oficinas no serán iguales a los que se apliquen en un salón de clases.

Considerando todo lo anterior y la aportación que tiene el hacer este tipo de evaluaciones, la metodología que se propone en este trabajo incluye la realización de este tipo de estudios. Con esto se puede afirmar que además de tener métodos de estudio que muestren el desempeño de un espacio, resultado de las interacciones de los fenómenos físicos que se presentan en él, podemos conocer la forma en que dichas interacciones influyen en el comportamiento, las respuestas y las actitudes de los usuarios. Por otro lado al ser un trabajo de investigación en el cual la salud física y psicológica de los usuarios, son consideradas aspectos fundamentales y que justifican la realización de este tipo de estudios; es indispensable tomar en cuenta las herramientas que permiten conocer la opinión de las personas.

## REFERENCIAS - CAPÍTULO 2

---

<sup>66</sup> **INANICI, M.**, *Application of the state-of-the-art computer simulation and visualization in architectural lighting research*, Proceedings of 7th IBPSA Conference, Brasil, 2001.

<sup>67</sup> **AIZLEWOOD, LITTLEFAIR.** *Daylight prediction methods A survey of their use*, Memorias de la conferencia nacional en iluminación, Bath, Inglaterra, CIBSE, 1994. pp. 136-140.

<sup>68</sup> **GUIMARÃES Toledo, Beatriz**, *Integração de iluminação natural e artificial: métodos e guia prático para projeto luminotécnico*, Tesis de Maestría en Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Brasília, Brasil, 2008, pp. 127-130. (En Portugués).

<sup>69</sup> **GALASIU, REINHART.** *Current daylighting design practice: a survey*, Building Research and Information, vol. 36(2), 2008, pp. 159-174.

<sup>70</sup> **Asociación Nacional de Energía Solar**, *Memoria de la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, Guadalajara, México, 2009.

<sup>71</sup> **ANDER, Greg**, *Daylighting performance and design*, John Wiley & Sons, E.U.A. 1995. pp. 12.

<sup>72</sup> **BAKER, N.**, *et al.*, *op. cit.*, 2002. pp. 64.

<sup>73</sup> **LYNES, J., LITTLEFAIR, P.**, *Lighting energy savings from daylight: estimation at the sketch design stage*, Lighting Research & Technology, 1990, vol. 22(3), pp. 129-137.

<sup>74</sup> **NG, Edward.** *A simplified daylighting design tool for high-density urban residential buildings*, Lighting Research & Technology, 2001, vol. 33(4) pp. 259-272.

<sup>75</sup> **ANDER, Greg**, *op.cit.*, pp. 13.

<sup>76</sup> **STEIN, Benjamin**, *et al.*, *op. cit.*, pp. 1123.

<sup>77</sup> **HAUSLADEN, G.**, *et al.*, *op. cit.*, pp. 81.

- <sup>78</sup> **BAKER, N.**, et al., *Daylighting in architecture: an European reference book*, James & James, Londres, 1993.
- <sup>79</sup> **SZOKOLAY, S.V.**, *Environmental science handbook for architects and builders*, Wiley & Sons., E.U.A., 1980. pp. 104.
- <sup>80</sup> **LOF Libbey-Owens-Ford Company**, *How to predict interior daylight illumination : conserve energy and increase visual performance by effective daylight design*, Toledo, Ohio, 1976.
- <sup>81</sup> **PAGE, J.K.** *op. cit.*, pp. 1505.
- <sup>82</sup> **EDMONDS, I.R.**, **GREENUP, P.J.** , *Daylight in the tropics*, Solar Energy, 2002, vol. 73(2), pp.111-121.
- <sup>83</sup> **CIE**, *op. cit.*, 2003.
- <sup>84</sup> **CIBSE**, *SLL Lighting Guide: Daylighting and Window design*, Inglaterra, 1999.
- <sup>85</sup> **STEIN, Benjamin**, et al., *op. cit.*, pp. 1123
- <sup>86</sup> **MUNEER, Tariq**, et al., *Windows in buildings: thermal, acoustic, visual and solar performance*, Oxford, Boston: Architectural, E.U.A., 2000, pp. 151.
- <sup>87</sup> **BRE, Building Research Establishment**, *Digest 41: Estimating daylight in buildings*, BRE, Inglaterra, 1970.
- <sup>88</sup> **BAKER, N.**, *op. cit.*, 2002. pp. 207.
- <sup>89</sup> **BRE, Building Research Establishment**, *Digest 42: Estimating daylight in buildings II*, BRE, Inglaterra, 1969.
- <sup>90</sup> **International Energy Agency**, *Daylight in Buildings: a Source Book on Daylighting Systems and Components*, E.U.A., 2000.
- <sup>91</sup> **RANGEL Ruiz, Rocío**, *Iluminación natural y ahorro energético en las edificaciones: un modelo computarizado para evaluar soluciones arquitectónicas*, Tesis de Maestría en Arquitectura, UNAM, México, 1999.
- <sup>92</sup> **ALPUCHE, María**, et al., *Análisis lumínico de las aulas del programa de Arquitectura UNISON*, Memoria de la 32 Semana Nacional de Energía Solar , Mérida Yucatán, 2009.
- <sup>93</sup> **REINHART, C.**, **Breton, P.F.**, *Experimental validation of 3DS MAX® Design 2009 and DAYSIM 3.0*, Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference, Escocia, 2009.
- <sup>94</sup> **CIE Technical Committee**, *4.2: Standardization of luminance distribution on clear skies*. CIE, Paris 1973.
- <sup>95</sup> **REINHART, C.**, et al., *Daylight simulation in 3ds Max Design 2009 – Getting Started*, Autodesk, E.U.A., 2008.
- <sup>96</sup> **CIE**, *CIE 171:2006 Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs*, CIE, Viena, 2006.
- <sup>97</sup> **ROCHA Carvalho, Carolina**, *Avaliação do Programa APOLUX Segundo Protocolos do Relatório CIE 171:2006 Referentes à Iluminação Natural*, Tesis de Maestría en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2009. (En portugués)
- <sup>98</sup> **US Department of Energy**, *Building Energy Software tools*, Dialux, Documento en línea, consulta Junio 2010.
- [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=497](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=497)
- <sup>99</sup> **LABAYRADE, R.**, et al., *Validation of Velux daylight visualizer 2 against CIE 171:2006 test cases*, Proceedings Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, 2009, pp. 1503-1513.
- <sup>100</sup> **Dau Design and Consulting**, *Validation of AGI32 against CIE 171:2006*, 2007, pp. 1-62
- <sup>101</sup> **GEISLER-MORODER, D** , **Dü A.**, *Validation of Radiance against CIE 171:2006 and improved adaptive subdivision of circular light sources*, 7th International RADIANCE workshop, Fribourg, 2008.
- <sup>102</sup> **LABAYRADE, R.**, *Use of CIE 171:2006 test cases to assess the scope of lighting simulation programs*, Proceedings Light and Lighting Conference with Special Emphasis on LEDs and Solid State Lighting, Budapest, 2009.
- <sup>103</sup> **IBARRA, D.**, **REINHART, C.**, *Daylight factor simulations - How close do simulation beginners 'Really' get?*, Proceedings Eleventh International IBPSA Conference, Escocia, 2009.
- <sup>104</sup> U.S. Department of Energy - [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/) - Consulta Junio 2010
- <sup>105</sup> ArchiPhysics - <http://www.archiphysics.com> - Consulta Junio 2010
- <sup>106</sup> **REINHART, E.**, **Ward, G.**, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann, Inglaterra, 2005. pp. 7.
- <sup>107</sup> **JACOBS, A.**, *High Dynamic Range Imaging and its Application in Building Research*, Advances in Building Energy Research, 2007, vol. 1 pp. 177-202.
- <sup>108</sup> **MARDALJEVIC J.**, **Painter, B.**, **Andersen, M.**, *Transmission illuminance proxy HDR imaging: A new technique to quantify luminous flux*, Lighting Research & Technology, 2009, vol. 41(1), pp. 27-49.

- <sup>109</sup> **JACOBS, A.**, *op. cit.*
- <sup>110</sup> **INANICI, M.**, *Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system*. Lighting Research & Technology, 2006, vol. 38(2) pp. 123-136.
- <sup>111</sup> Radiance software - <http://radsite.lbl.gov/radiance/> - Fecha de consulta: Julio 2010
- <sup>112</sup> Photosphere software - <http://anywhere.com/> - Fecha de consulta: Julio 2010
- <sup>113</sup> **INANICI, M.**, *Transformation of High Dynamic Images into Virtual Lighting Laboratories*. Ann Arbor, vol. 10, 2009.
- <sup>114</sup> **MARTINS Mogo de Nadal, Betina, G.**, *An experimental setup to evaluate the daylighting performance of an advanced optical light pipe for deep-plan office buildings*, Tesis de Maestría en Ciencia, Universidad de Texas, E.U.A., 2005.
- <sup>115</sup> **INANICI, M.**, *Applications of image based rendering in lighting simulation: development and evaluation of image based sky models*, Proceedings Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, 2009, pp. 264-271.
- <sup>116</sup> **ZIMRING, C., REIZENSTEIN, J.**, *Post-occupancy evaluation: an overview*, Environment and Behavior, 1980, vol. 12(4), pp. 429-450.
- <sup>117</sup> **ZIMRING, C.**, *Postoccupancy Evaluation: issues and implementation*, en Bechtel, R. y Churchman, A. (comp.), *Handbook of environmental psychology*, Wiley & Sons, Nueva York, 2002, pp. 307.
- <sup>118</sup> **ZIMRING, C.**, *Evaluation of design environments: methods for post-occupancy evaluations*, en Bechtel, R., Marrans, R.W., Michelson, W., (comp.) *Methods in environmental and behavioral research*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1987, pp. 270-299.
- <sup>119</sup> **ZIMRING, C.**, *op. cit.*, 1987.
- <sup>120</sup> **ZIMMERMAN, A., MARTIN. M.**, *Post-occupancy evaluation: benefits and barriers*, Building Research & Information, 2001, vol. 29(2) pp. 168-174.
- <sup>121</sup> **HADJRI, K., CROZIER, C.**, *Post-occupancy evaluation: purpose, benefits and barriers*, Facilities, 2009, vol. 27(1), pp. 21-33.
- <sup>122</sup> **IEA, International Energy Agency** - Solar heating & cooling programme, *Post occupancy evaluation of daylight in buildings*, IEA, 1999, pp. 12.
- <sup>123</sup> **WANG, N., BOUBEKRI, M.**, *Investigation of declared seating preference and measured cognitive performance*, Journal of Environmental Psychology, 2009, vol. 30(2), pp. 226-238.

# APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

# 3

- 3.1 CASO DE ESTUDIO 1 - "CENTRO HISTÓRICO"
- 3.2 CASO DE ESTUDIO 2 - "POSGRADO DE ARQUITECTURA - UNAM"
- 3.3 CASO DE ESTUDIO 3 - "TALLER DE ARQUITECTURA - UNIVERSIDAD MARISTA"

**3.****APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

En esta parte del estudio se presenta la aplicación de los métodos analizados en el capítulo anterior. El objetivo de esta aplicación es demostrar mediante casos de estudio (ejercicios prácticos) cómo y cuándo se puede utilizar cada una de las herramientas estudiadas. Es importante mencionar que los casos de estudio se presentan de una forma resumida debido a que no es el objetivo de este capítulo el explicar nuevamente el procedimiento para aplicar las herramientas propuestas.

Por el contrario, en este capítulo se busca presentar de forma mucho más detallada los resultados de la aplicación de la metodología. Aunado a esto, como se podrá ver al final de cada caso de estudio, se plantean conclusiones específicas a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de las herramientas.

En los tres casos de estudio que se presentan, se aplicaron los métodos propuestos con el objetivo de comparar los resultados que arrojan cada uno de ellos. Aunque los casos de estudio presenta diferencias en la función que desempeñan, las características mismas del espacio y sus cualidades arquitectónicas, se trató de seguir en los tres casos el mismo método de estudio. En primer lugar se establecen las características del espacio, se realizan los cálculos mediante los métodos propuestos, se evalúa el espacio con la ayuda de instrumentos de medición, se comparan los resultados y finalmente se plantean las conclusiones.

Dado que uno de los objetivos de la investigación es encontrar la validez de los diferentes métodos de cálculo, se hace un análisis de las ventajas y desventajas que se presentan con cada una de las herramientas, así como el nivel de precisión que puede obtenerse mediante su utilización. Esto aplica a las herramientas que pueden ser utilizadas para hacer análisis de tipo cualitativo como aquellas que proporcionan información de tipo cuantitativa.

Como se estableció en la introducción del Capítulo 2, la elección de los métodos de análisis se basó en el tipo de espacio, el tiempo disponible para realizar el estudio y los resultados que se podrían obtener de cada caso (cualitativos o cuantitativos). Basados en este criterio se tiene que en el Caso de estudio 1 (Centro Histórico) se utilizaron principalmente los métodos cuantitativos, en el Caso de Estudio 2 (Posgrado de Arquitectura) se utilizaron ambos métodos y en el último Caso de estudio (Taller de Arquitectura) se emplearon principalmente métodos cualitativos.



### 3.1. CASO DE ESTUDIO 1 - "CENTRO HISTÓRICO"

Para hacer el estudio de la concordancia entre las estimaciones hechas con el cálculo del FLD y las mediciones, se utiliza un modelo escala siguiendo la guía para el estudio de iluminación natural propuesto por Bodart<sup>124</sup> y Cheng<sup>125</sup>, donde se presentan recomendaciones en el uso de los materiales, construcción y los detalles de su fabricación. Todo lo anterior posibilita la obtención de datos confiables que puedan ser utilizados para el estudio de la iluminación natural en edificios. El modelo a escala representa un edificio histórico ubicado en el Centro Histórico de la Ciudad de México, en el cual se hicieron estudios de iluminación en el año 2007 y se determinaron los niveles de iluminación que se presentan en dicho inmueble.

#### Descripción del espacio

El espacio estudiado es un salón de 8 m. de largo por 6 m. de profundidad, con una altura de 4.5 m, los muros tienen una profundidad en promedio de 60 cms. El espacio estudiado tiene dos ventanas de 1.6 X 3 m. ubicadas en la fachada oriente (figura 54). Los materiales de las superficies son los siguientes:

- Muros: Aplanados de cal, yeso, cemento y arena, con pintura color blanco.
- Techo: Vigas de madera y ladrillo de barro.
- Piso: Duela de madera barnizada.
- 



**FIGURA 54 >**

Caso de Estudio 1  
Vista interior del espacio

<sup>124</sup> **BODART, M., et al.,** *A guide for Building Daylight Scale Models*, Architectural Science Review, 2007, vol. 50(1), pp. 31-36.

<sup>125</sup> **CHENG, C.L., et al.,** *A mini-scale modeling approach to natural daylight utilization in building design*, Building and Environment, 2007, vol. 42, pp. 372-384.

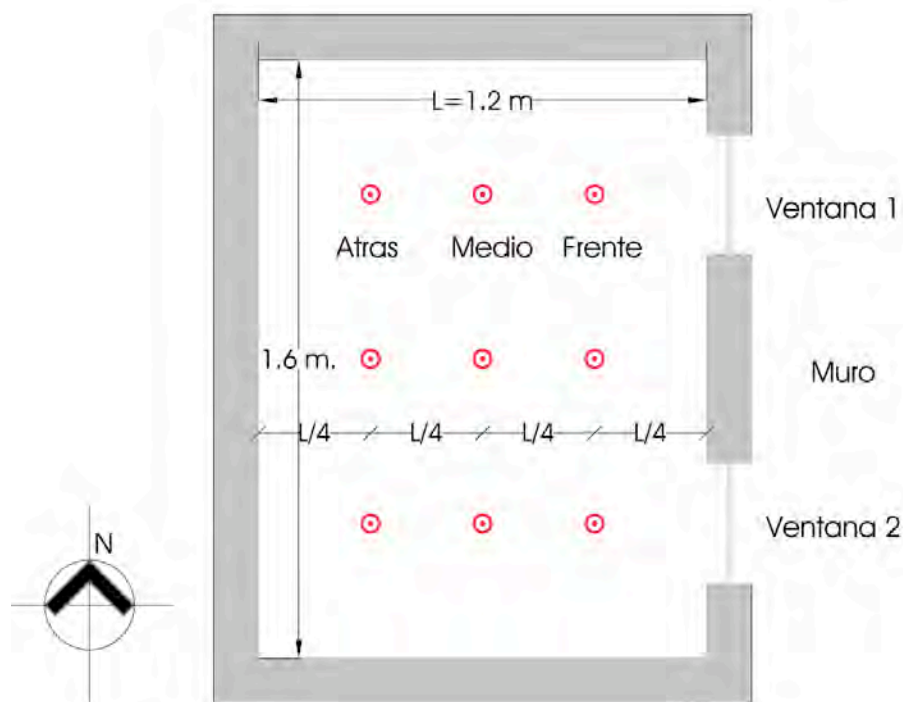
### Modelo a escala

Para representar el espacio descrito, se construyó un modelo a escala 1:5 compuesto por paneles de madera pintados en color blanco mate. La fachada se construyó con dos capas de cartón corrugado formando una "caja" para obtener el espesor del muro. Para representar las ventanas se utilizaron vidrios claros de 4 mm, montados sobre marcos de plástico y ángulos de acero.

En el interior de la maqueta se colocaron 9 fotómetros LI-COR modelo LI-210s en los ejes de las ventanas y al centro del espacio (figura 55) Se colocaron además dos fotómetros en el exterior. Uno para medir la iluminancia global horizontal (EGH) y otro montado sobre la fachada para medir la iluminancia global vertical oriente (EGV).

Los sensores se montaron sobre bases de plástico transparente para elevarlos a una altura de 16 cm. sobre el nivel de la base y poder tomar mediciones a escala 1:5 de un plano de trabajo de 80 cm. sin obstruir el paso de la luz (figura 56). Los registros se llevaron a cabo en el observatorio de radiación solar del Instituto de Geofísica de la UNAM durante 6 días comprendidos entre el Sábado 29 de Noviembre y el Jueves 4 de Diciembre del 2008.

Se tomaron mediciones a cada 4 minutos los cuales fueron registrados en un sistema de adquisición de datos Agilent modelo 34970A. Para hacer el estudio comparativo de la influencia de la iluminancia global vertical y horizontal, se tomaron mediciones simultáneas de estos valores. Al mismo tiempo se tomaron registros de los niveles de iluminación que se presentan en el interior de la maqueta.



< **FIGURA 55**  
Caso de estudio 1  
Planta del modelo a escala  
con ubicación de sensores



**FIGURA 56 >**  
Caso de Estudio 1  
Sensores sobre bases de  
plástico transparente  
.....

### Cálculo del factor de luz de Día

Para hacer la comparación entre los valores de iluminancia global, se realizó el cálculo la iluminancia en el interior del espacio por medio del método de Factor de Luz de Día. Para hacer la estimación del nivel de iluminación probable se calcularon por separado los tres componentes (Eq. 1). El factor de luz de día se divide en tres componentes: el componente de cielo (CC), el componente reflejado exterior (CRE) y el componente reflejado interior (CRI). Esto se expresa de la siguiente manera:

$$FLD = CC + CRE + CRI \quad (1)$$

Utilizando el Método de transportadores del BRE<sup>126</sup> se obtuvo el valor del CC para el punto de referencia que se encuentra al frente de la Ventana 2 (FV2). El CC inicial para una ventana de ancho infinito es de 13 %. A este valor se aplica el factor de corrección para una ventana con dimensiones finitas que es igual a 0.44. De estos valores se obtiene lo siguiente:

$$CC = 13 \times 0.44 = 5.72\% \quad (2)$$

Debido a que no existen obstrucciones que impidan el paso de luz al interior de la maqueta y tampoco hay elementos que reflejen la luz del exterior al interior de la maqueta por se consideró que el Componente Reflejado Exterior es igual a cero.

$$CRE = 0 \quad (3)$$

---

<sup>126</sup> LONGMORE, J., *BRS, Daylight Protractors*, Building Research Establishment, Department of the Environment, Inglaterra, 1967.

El Componente Reflejado Interior (CRI) depende de las reflectancias de las superficies del espacio (muros, plafón y piso). También depende de la cantidad de luz proveniente desde el cielo que incide en las superficies internas, las superficies externas y el piso. Este cálculo se vuelve complicado debido a todas las interacciones que se llevan cabo dentro del espacio, por lo tanto se puede establecer el CRI a partir de un promedio de estas interacciones.<sup>127</sup> Para obtener el valor del CRI se utilizó el procedimiento de Nomogramas del BRE<sup>128</sup> y se tomaron en cuenta los siguientes valores:

SUPERFICIE (A)	m <sup>2</sup>	REFLECTANCIAS (R)	A X R
Muros	108	0.8	86.4
Plafón	48	0.8	38.4
Piso	48	0.35	16.8
<b>TOTAL</b>	<b>204</b>		<b>141.9</b>

< **TABLA 12**  
Caso de estudio 1  
Valores para el cálculo de CRI.

Dado que en el cálculo del CRI se toma en cuenta las dimensiones de la ventana y su relación con la totalidad del espacio, se debe obtener la razón de la ventana para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$RV = \frac{A_v}{\Sigma A} \quad (4)$$

Donde  $\Sigma A$  es la suma de las áreas de las superficies y  $A_v$  es el área de la ventana, de donde se obtiene que:

$$RV = \frac{4.8}{204} = 0.02 \quad (5)$$

Con los valores de la Tabla 12 se obtiene la reflectancia promedio (RP) del espacio con la siguiente ecuación:

$$RP = \frac{\Sigma R_s}{\Sigma A} \quad (6)$$

Donde  $\Sigma A$  es la suma de las áreas de las superficies y  $\Sigma R_s$  es la suma de los productos de la áreas de las superficies por sus reflectancias, de donde se obtiene que:

$$RP = \frac{141.9}{204} = 69.6\% \quad (7)$$

<sup>127</sup> GHISI, E., TINKER J.A., *op. cit.*, pp. 51-61.

<sup>128</sup> BRE, Building Research Establishment, *Digest 42: Estimating daylight in buildings II*, BRE, Inglaterra, 1969.

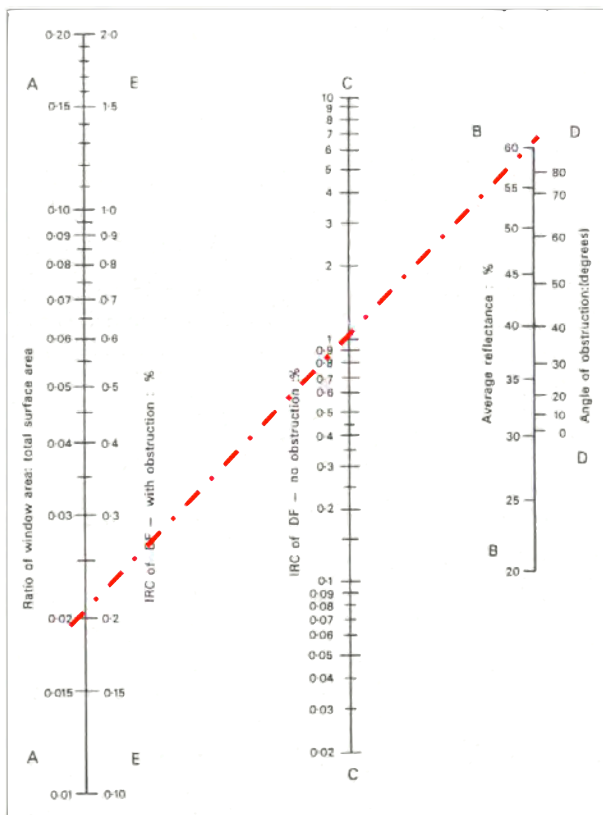
Por ultimo se toman los valores obtenidos de las ecuaciones 5 y 7. Estos valores se unen por medio de una línea recta en el Nomograma (figura 57) para obtener el valor final del Componente de Reflejado Interior que es:

$$CRI = 1.0\% \quad (8)$$

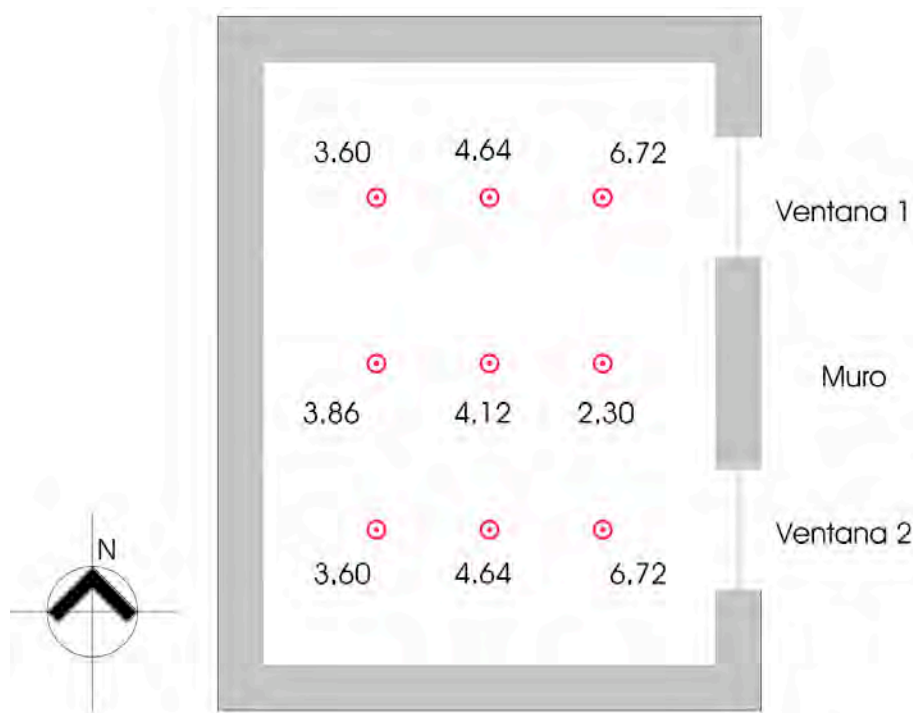
Teniendo los valores de los tres componentes (2)(3)(8) y aplicando los valores a la Ecuación 1 se obtiene el valor final de FLD para el punto de referencia FV2.

$$FLD = 5.72 + 0 + 1 = 6.72\% \quad (9)$$

Siguiendo el procedimiento anterior se repite para cada uno de los puntos de referencias y obtienen los valores de FLD. Estos valores se presentan en la figura 58. Como se podrá notar, el espacio tiene una configuración simétrica por lo tanto se puede afirmar que el los valores de Factor de Lu de Día para el puntos ubicados frente a las Ventana 1 son los mismo para la Ventana 2. Respecto a los puntos de referencia ubicados al centro del muro, se calcularon de la misma forma que los puntos de referencia ubicados frente a las ventanas, bajo la consideración de que el valor se final del FLD se duplica debido a que estos puntos reciben el doble valor de CC (uno por cada ventana). Sin embargo el valor de CRI no se duplica dado que es un valor promedio único para todos los puntos de referencia dentro del espacio.



**FIGURA 57 >**  
Caso de Estudio 1  
Nomograma para la  
obtención del CRI



&lt; FIGURA 58

Caso de estudio 1  
Valores de FLD obtenidos para los puntos de referencia.

### Resultados

En esta sección se presentan los registros de los valores de iluminancia global horizontal (EGH) y global vertical (EGV) además de los resultados de las mediciones hechas en el modelo a escala y la comparativa con los valores del Factor de Luz de Día calculados para los 9 puntos de referencia. De los registros recabados durante los 6 días de mediciones se tomarán solamente los valores del día Jueves 4 de diciembre (Día Juliano 338). Esto se debe a que en esta fecha se presentaron condiciones de cielo uniformes y sin la presencia de nubosidad. Sin embargo se puede apreciar un comportamiento atípico las primeras y esto se debe principalmente a la presencia de árboles que obstruyen el paso de la luz cuando la posición del sol es baja respecto a su altitud (al amanecer y en la puesta del sol).

Una vez que el sol alcanza una altitud suficiente ( $30^\circ$ ) para superar las obstrucciones, el comportamiento de las mediciones se estabiliza sin presentar las variaciones que provocan las sombras de los árboles. Llama la atención que el valor máximo registrado (80.3 klux) coincide con el medio día (hora local) y en la hora de la culminación del sol se presenta una ligera variación (78 klux). Los registros se estudiaron en un rango comprendido entre las 6:58 y las 17:54 hrs. que corresponden a la duración del día en esta latitud geográfica ( $19^\circ 20' 01''$  N. y  $99^\circ 11' 54''$  O., a una altitud de 2268 msnm) y en esta época del año. La gráfica de los valores de la iluminancia global horizontal (EGH) de este día se presenta en la Figura 59. Para encontrar la relación que existe entre los niveles de iluminancia global vertical y los valores interiores, se presentan los registros del fotómetro ubicado en la fachada oriente (Figura 60). Al igual que la gráfica que muestra los registros de EGH, en el caso de la EGV se pueden apreciar los efectos de las obstrucciones vegetales colindantes.

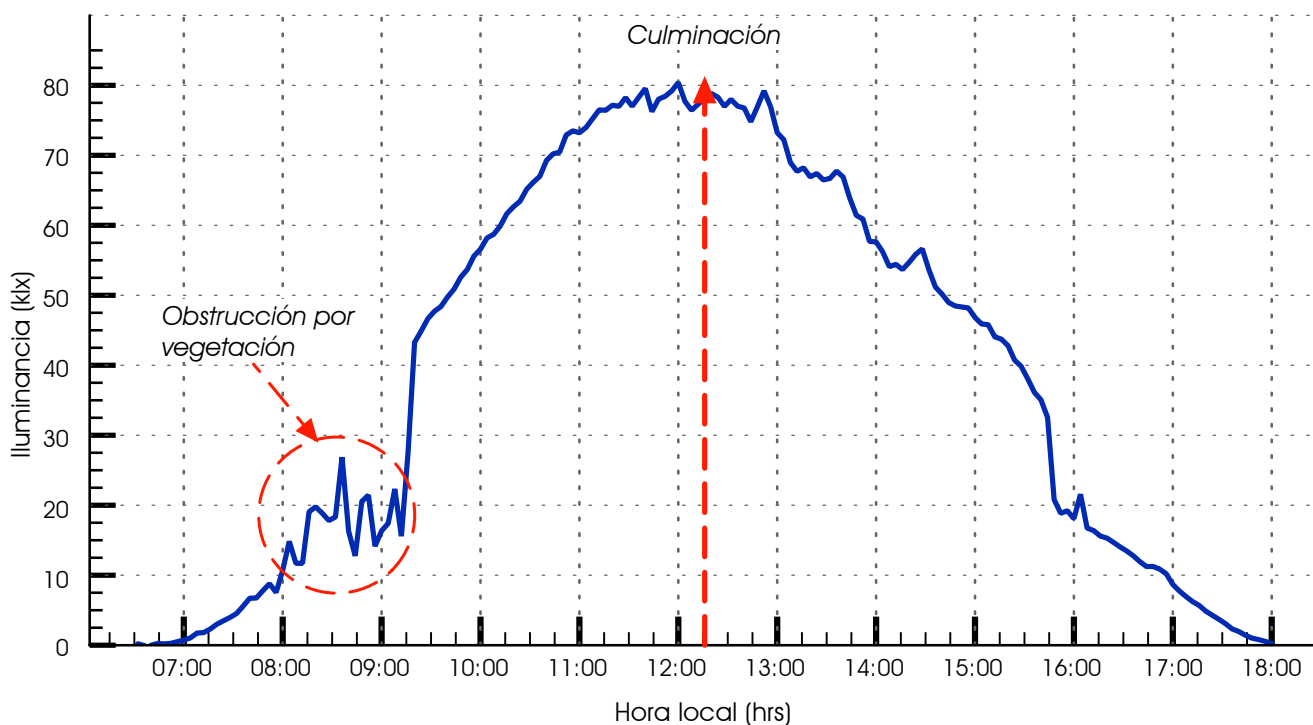


FIGURA 59. Gráfica de de iluminancia global horizontal (EGH) - Diciembre 4, Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

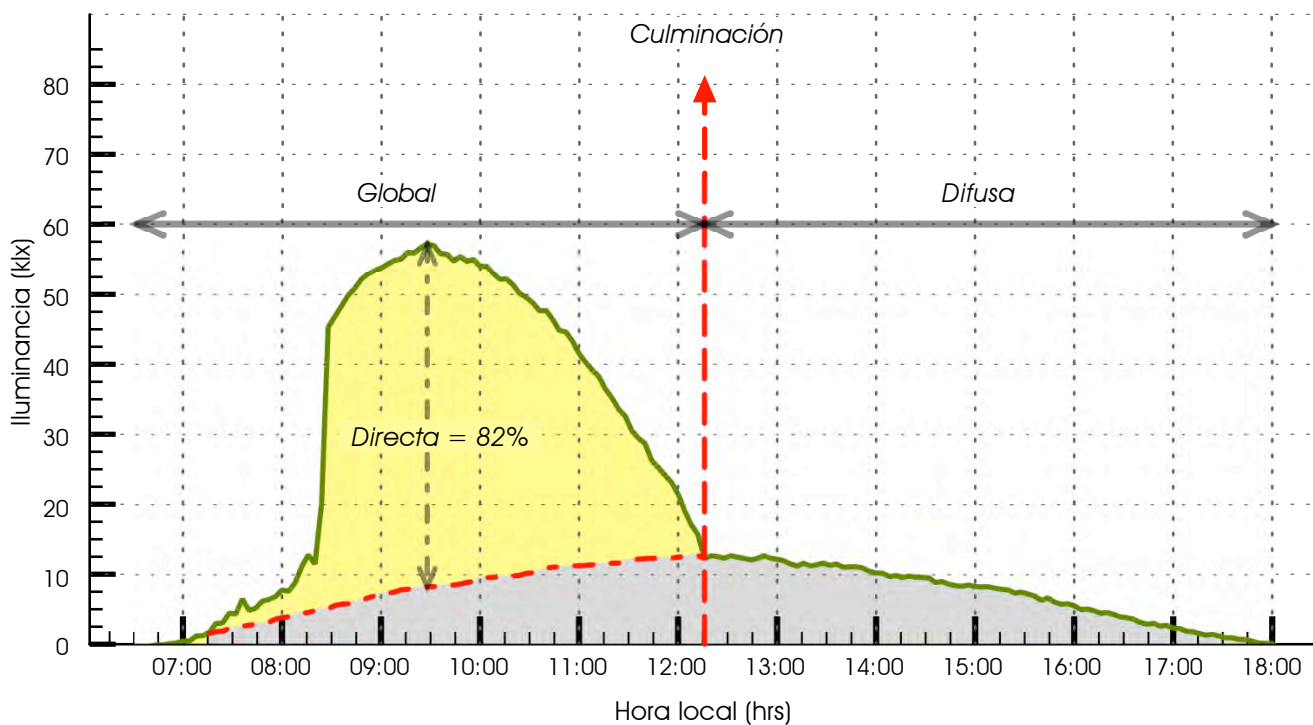
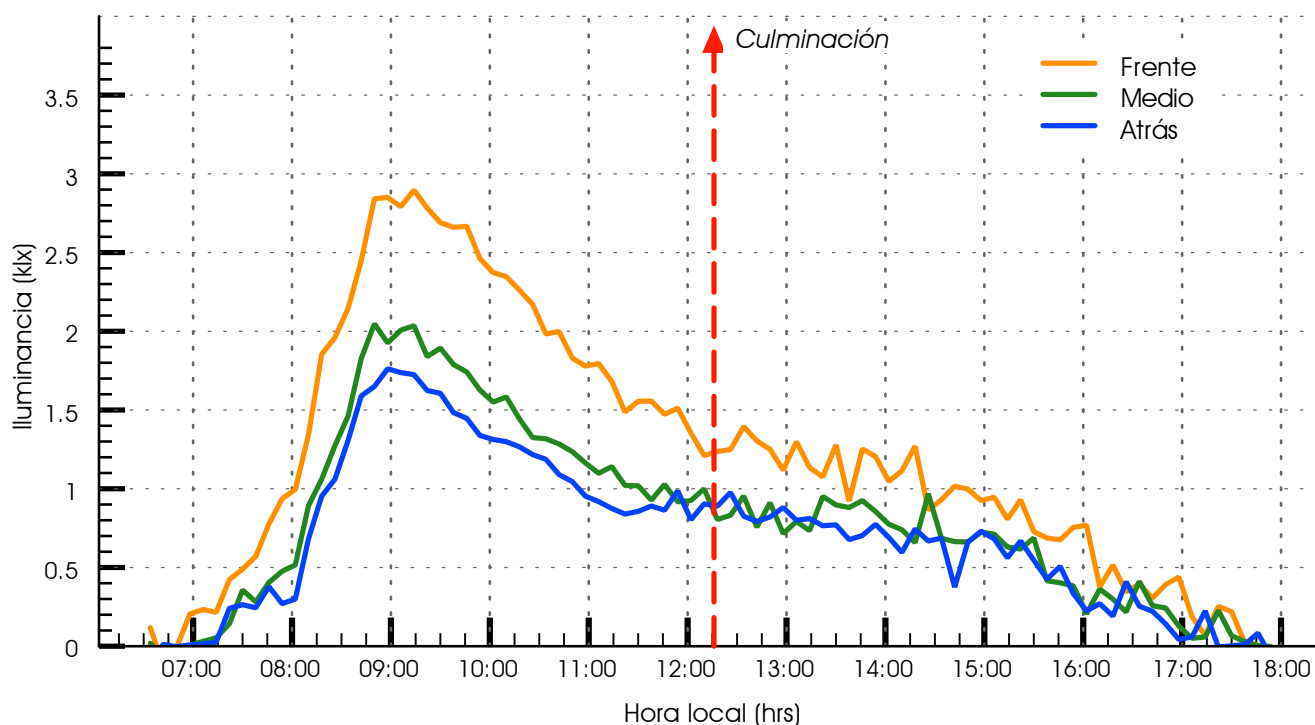


FIGURA 60. Gráfica de Iluminancia global vertical en fachada oriente (EGV) - Diciembre 4, Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

A diferencia de los valores de EGH el comportamiento variable únicamente se presenta por la mañana. En la gráfica de la figura 60 se puede apreciar el momento en el cual el fotómetro deja de recibir iluminación directa para recibir únicamente el componente difuso del cielo después de la culminación (12:15 hrs). Otro aspecto importante a destacar es que la diferencia que existe entre los valores de la iluminancia global horizontal (EGH) y el valor de la iluminancia global vertical (EGV) cuando EGH alcanza su punto máximo es de un 26.7%. En el mismo momento el valor de EGH fue de 80.3 klux y el valor de EGV fue de 21.52 klux.

#### Registros en modelo a escala

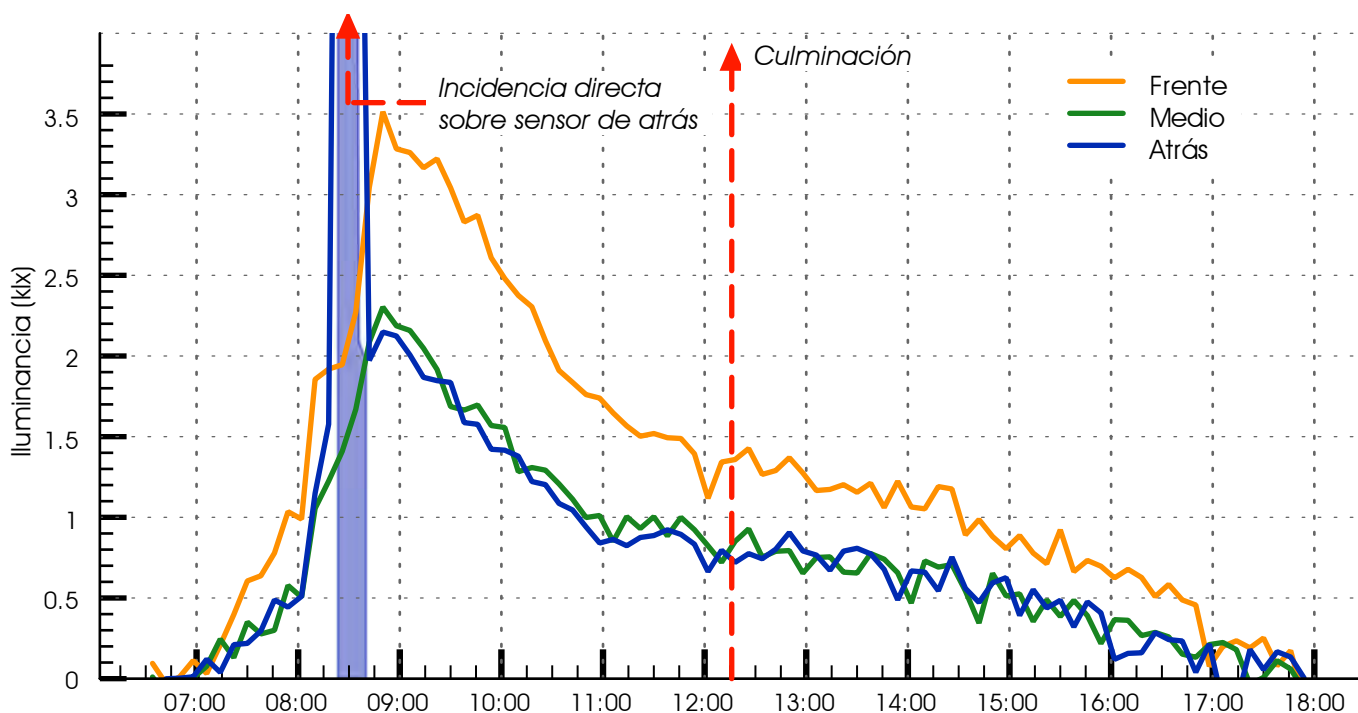
Al procesar la información obtenida de las mediciones en el modelo a escala se obtienen los valores de iluminancia para cada uno de los 9 puntos de referencia. Se puede notar que el caso de los fotómetros ubicados en el eje de la ventana, el que esta ubicado al frente recibe mayor iluminación que los ubicados en la parte media y posterior (Figuras 61-62). La mayor diferencia (1.5 klux) entre los sensores de la ventana se presenta principalmente por las mañanas cuando hay incidencia directa sobre la fachada. Una vez que el sol llega a su culminación y la fachada recibe únicamente iluminación difusa del cielo, los deferencia entre los niveles de iluminación disminuye a 0.5 klux. A pesar de esto se puede apreciar que el sensor más próximo a al fachada, siempre recibe más luz que los otros dos.



**FIGURA 61.** Gráfica de iluminancia de Fotómetros "Ventana 2" Diciembre 4 Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N, 99° 11' 54" O)



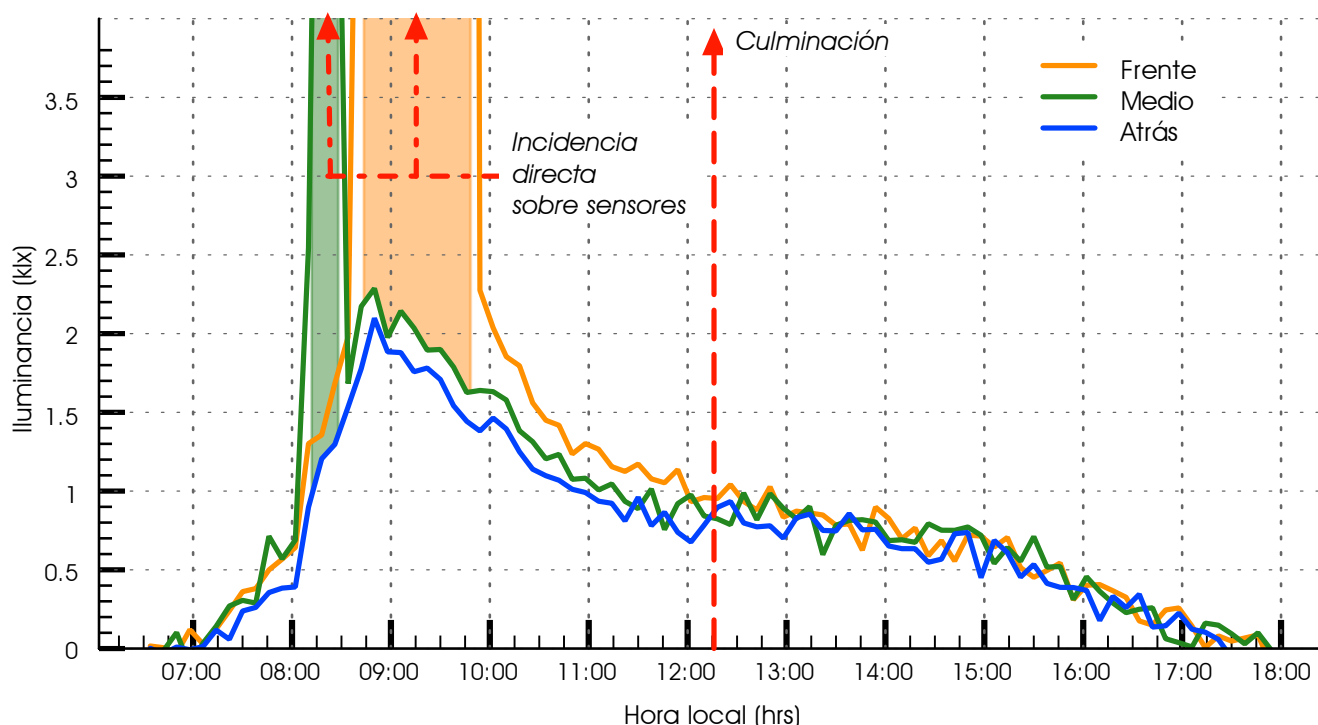
Sin embargo al analizar los registros de los sensores frente a la Ventana 1 se encontró que el fotómetro ubicado en la posición de atrás recibe iluminación directa, esto se puede apreciar en la figura 62 en donde se observa un aumento considerable del nivel de iluminación por la mañana cuando la fachada recibe luz directa y alcanza a entrar por las ventanas.



**FIGURA 62.** Gráfica de iluminancia de Fotómetros "Ventana 1" - Diciembre 4  
Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

A diferencia de los fotómetros ubicados frente a las ventanas, los que están frente al muro central del modelo presentan un comportamiento distinto (figura 63). Primeramente se puede apreciar un aumento considerable del nivel de iluminación en los fotómetros ubicados al frente del muro y a la mitad del espacio debido a que en esta época del año, estos sensores reciben incidencia solar directa en horas distintas. El sensor del frente y el medio, al recibir el componente directo del sol aumentan sus niveles hasta en 30 y 10 kluxes, respectivamente.

A partir de que dejan de recibir el componente directo, los tres sensores presentan un comportamiento muy parecido, encontrándose diferencias máximas de 600 luxes. Comparadas con los niveles de iluminación exteriores esta diferencia es mínima. Sin embargo para espacios interiores resultan diferencias considerables. A partir de la información anterior se estudiaron los puntos de referencia sobre los cuales se determinaron los valores de FLD con los registros del modelo a escala. Como se mencionó anteriormente algunos fotómetros reciben el componente directo del sol, por lo tanto se descartaron en este análisis debido a que el método de cálculo no contempla el componente directo. A partir de que dejan de recibir el componente directo, los tres sensores presentan un comportamiento muy parecido, encontrándose diferencias máximas de 600 luxes.



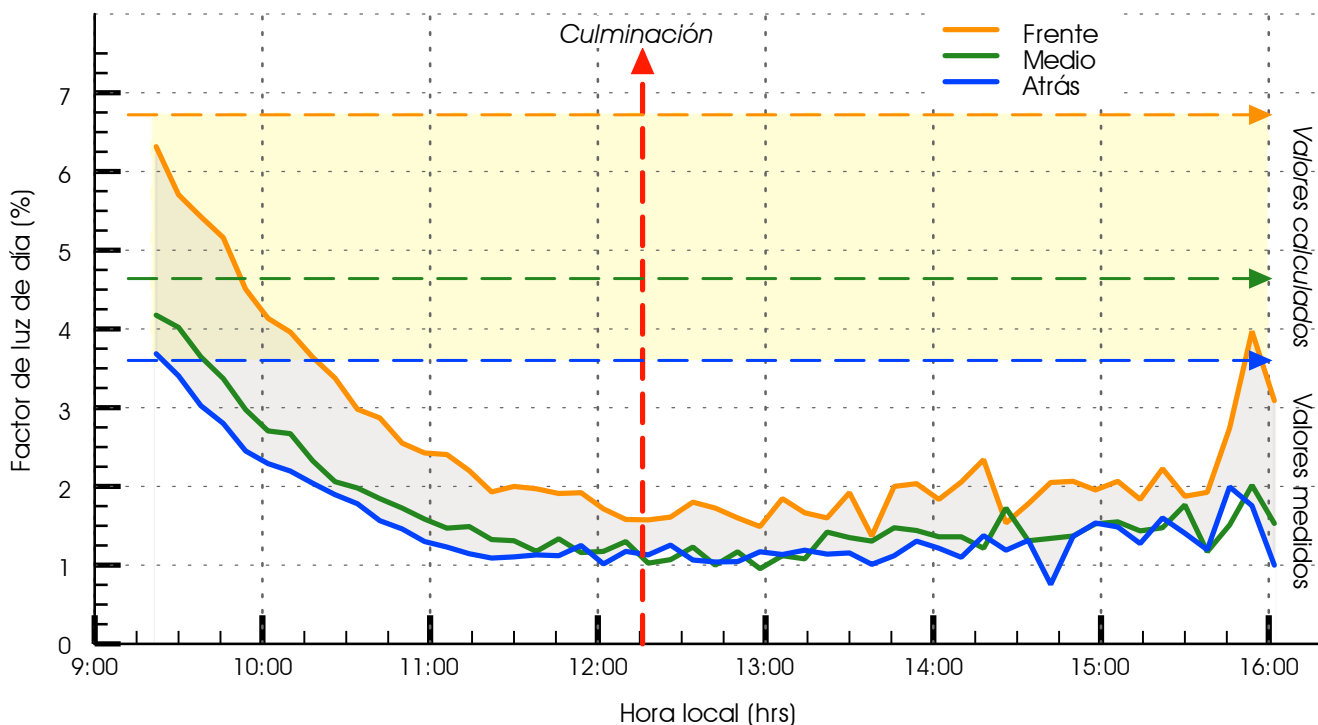
**FIGURA 63.** Gráfica de iluminancia de Fotómetros "Muro" - Diciembre 4  
Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

Comparadas con el exterior, esta diferencia es mínima. Sin embargo para espacios interiores resultan diferencias considerables. A partir de la información anterior se estudiaron los puntos de referencia sobre los cuales se determinaron los valores de FLD con los registros del modelo a escala. Como se mencionó anteriormente algunos fotómetros reciben el componente directo del sol, por lo tanto se descartaron en este análisis debido a que el método de cálculo no contempla el componente directo.

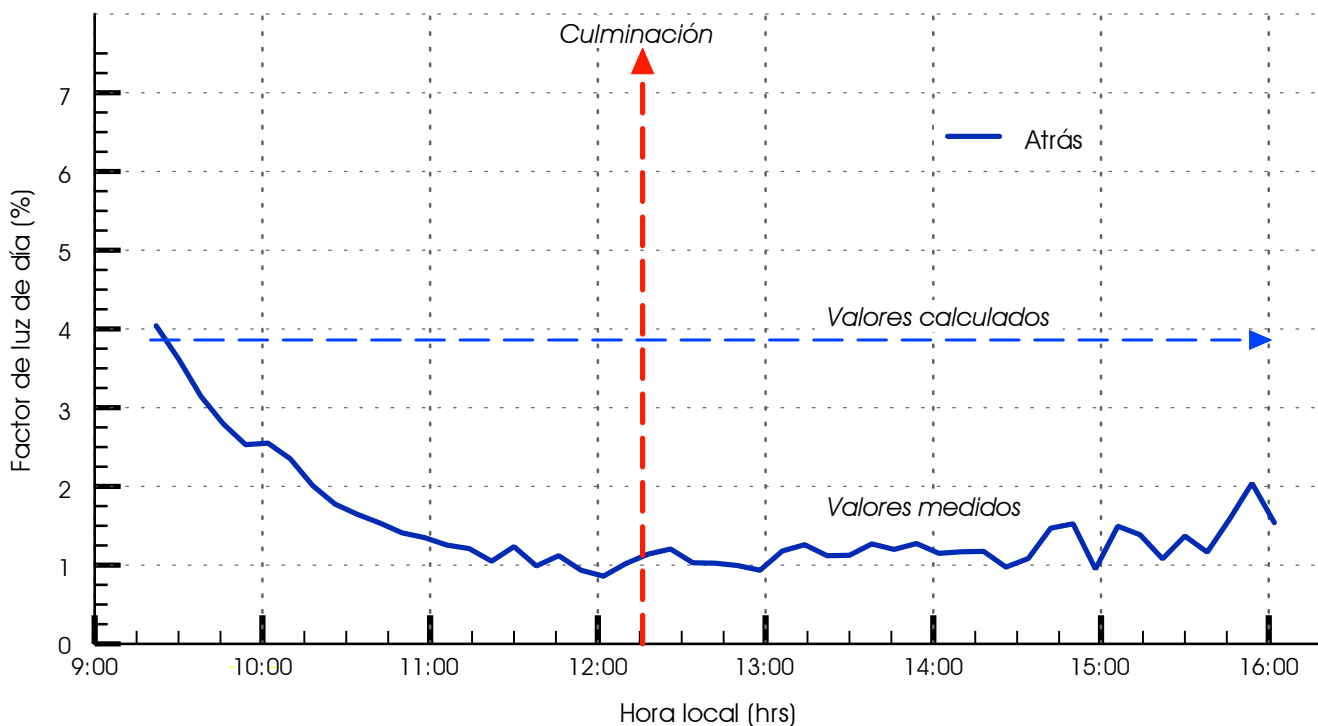
#### Factores de luz de día basados en mediciones.

A partir del modelo a escala y descartando los fotómetros que recibieron luz de forma directa, se analizaron los valores del Factor de Luz de Día. Utilizando la Ecuación 1 se obtiene la razón entre los valores de los fotómetros y los valores de la iluminancia global horizontal para el mismo momento. Los valores de FLD obtenidos a partir de las mediciones están por debajo de los valores calculados previamente (figura 58).

Se puede notar en la figura 64 que en los tres fotómetros de la Ventana 2, el valor disminuye conforme avanza el día. Este comportamiento también se presenta en los otros dos casos. En el caso del fotómetro ubicado en la parte posterior del Muro, esta caída en el valor del FLD no es tan pronunciada (figura 65).

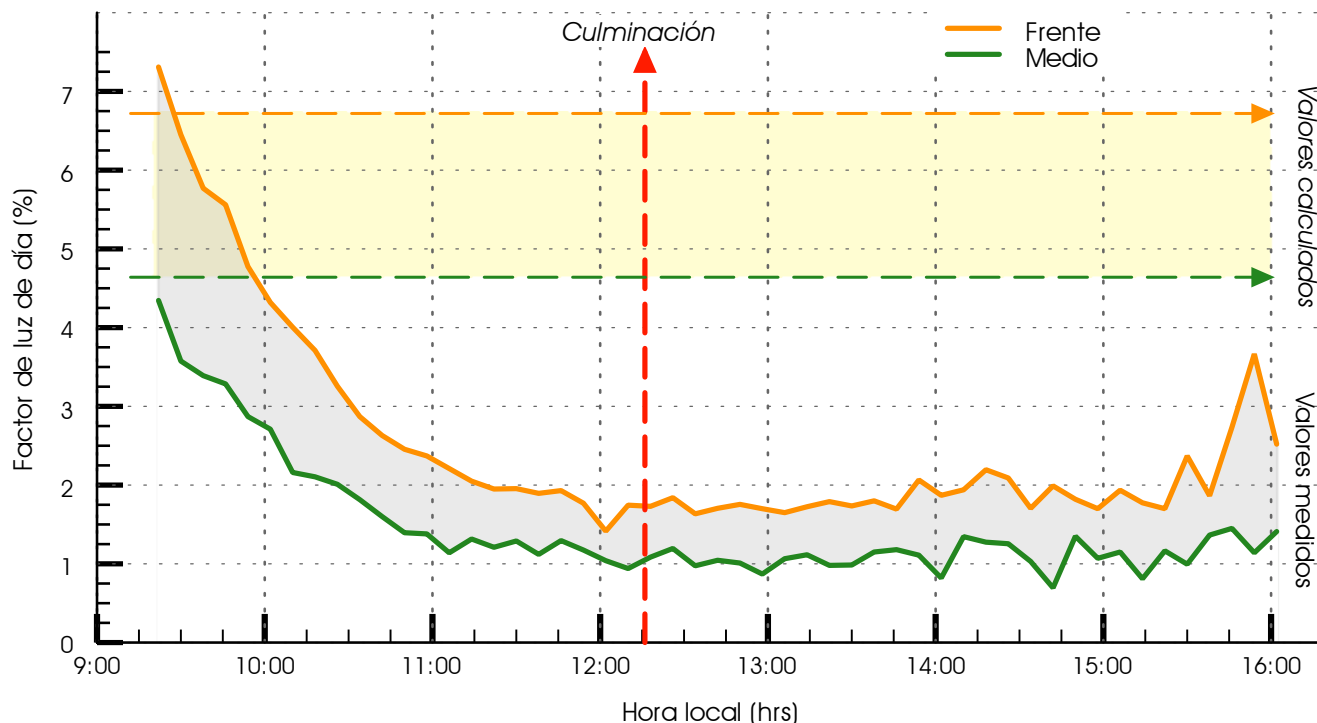


**FIGURA 64.** Valores de Factor de Luz de Día "Ventana 2" - Diciembre 4  
Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)



**FIGURA 65.** Valores de Factor de Luz de Día "Muro" - Diciembre 4  
Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

Un aspecto que sí corresponde a las estimaciones es la diferencia de los valores conforme el punto de referencia se aleja de la ventana. Esta diferencia se puede apreciar de forma más clara en la figura 66 que muestra los valores para la Ventana 1, en la cual la diferencia entre el fotómetro ubicado al frente y el de la mitad del espacio, es de 1%.



**FIGURA 66.** Valores de Factor de Luz de Día "Ventana 1" - Diciembre 4  
Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)

#### Factores de luz de día obtenidos a partir del Modelo 3D

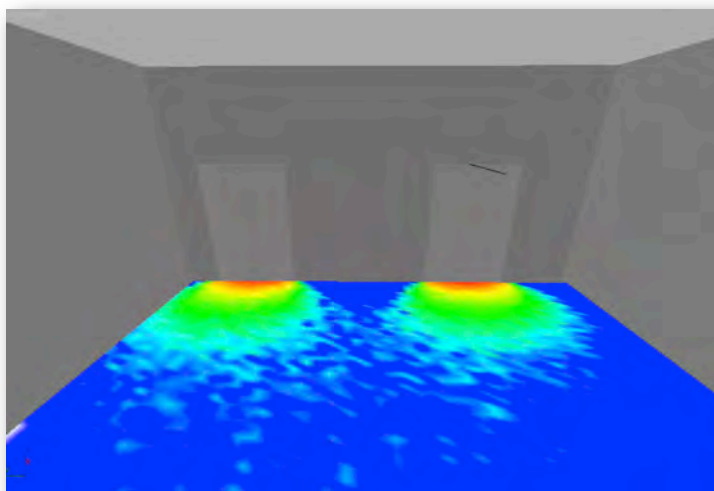
Para este caso de estudio se utilizó la metodología descrita en el [Capítulo 2.6](#) para la realización de simulación y cálculo a partir de la construcción de un modelo 3D. En este caso se presentan las imágenes resultantes de la simulación y los valores de iluminancia y de Factor de Luz de día. El modelo 3D elaborado para hacer la simulación representa las mismas condiciones que se utilizaron en modelo a escala. Se tomaron en cuenta las mismas dimensiones del espacio así como los materiales utilizados. El plano de trabajo se colocó a 80 cms. de la misma forma que se hizo en el modelo a escala.

En este caso a diferencia de la simulación que se realizó para el Caso de estudio Número 3 (donde se obtuvieron imágenes HDR), únicamente se obtuvieron los valores de iluminancia y del factor de luz de día. Esto es debido a que los materiales utilizados en el modelo son muy elementales y en general, al igual que la maqueta, no presenta un grado avanzado de detalle.

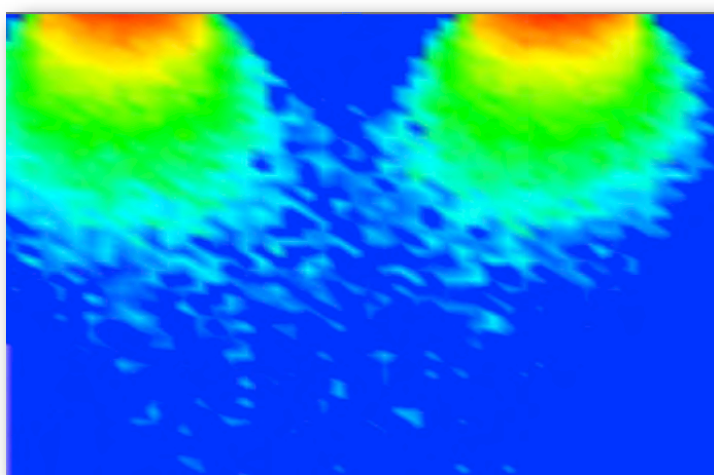
Sin embargo para cuando sea necesario hacer estudios mucho más precisos con modelos a escala es conveniente no solo poner atención en el tamaño del modelo, sino también en los detalles y sobre todo los materiales utilizados, que generalmente son maderas, cartones, plásticos y papeles de diferentes características. Para ello se puede utilizar la guía metodológica propuesta por Bodart<sup>129</sup> en la cual no solo indica los materiales más recomendables sino que también proporciona una tabla muy completa de las propiedades fotométricas de los acabados que proporcionan los diferentes tipos de papeles, metales, maderas y plásticos usados comúnmente en la elaboración de maquetas.

Los resultados obtenidos a partir del modelo 3D (figuras 67 y 68) se presentan en forma de un plano en el que se muestra los valores calculados a partir de la simulación. Sobre este mismo plano también se presenta el resultado en una imagen en escala de colores conocida como "false color", la cual permite observar de forma gráfica la distribución luminosa únicamente sobre el plano de referencia y no sobre las demás superficies. Si se desea conocer los valores de iluminancia sobre las otras superficies, ya sea en posición horizontal o vertical, se puede generar muchos más planos de referencia, tantos como se desee.

**FIGURA 67 >**  
Caso de Estudio 1  
Perspectiva 3D con plano de referencia.



**FIGURA 68 >**  
Caso de Estudio 1  
Planta de plano de referencia  
en escala de colores



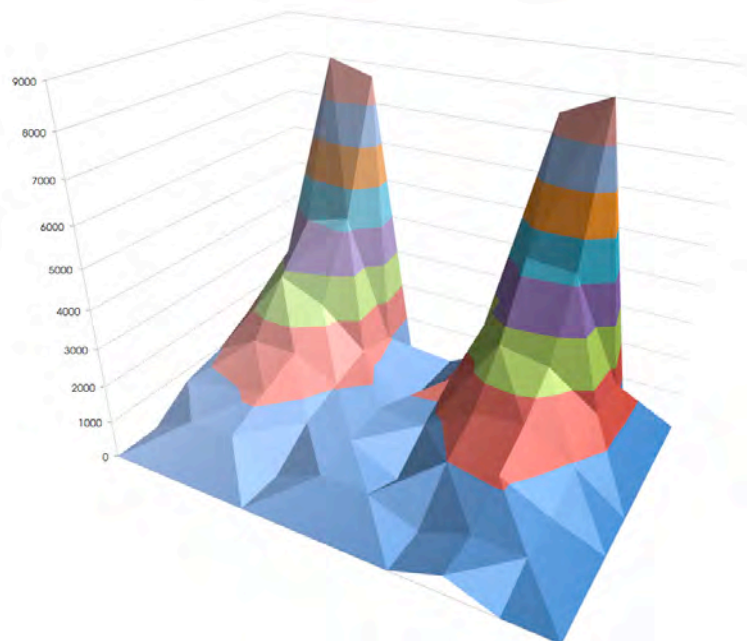
<sup>129</sup> **BODART, M., et al.,** *Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools.* Building and Environment, 2008, vol. 43, pp. 2046-2058.

Además de las imágenes generadas por el programa es posible obtener muchos más puntos de referencia y generar un archivo el cuál puede ser trabajado en cualquier programa de hoja de cálculo para ser manipulados y graficados. Aprovechando las ventajas que representa el procesamiento de una gran cantidad de datos, se realizó el ejercicio de obtener 100 puntos de referencia en el mismo modelo, sin embargo hacer el análisis de una tabla con tal cantidad de valores resulta poco práctico y a simple vista no se pueden detectar datos significativos que se vean reflejados en modificaciones a las condiciones del espacio.

Por lo tanto resulta importante contar con información que sea útil para realizar este tipo de evaluaciones como lo son las gráficas. A partir de los valores del modelo se obtuvo una gráfica en forma de superficie tridimensional que permite visualizar el comportamiento de la luz sobre el plano de referencia (figura 69).

Esta representación resulta de gran utilidad en el momento de hacer estudios en los que sea necesario evaluar los niveles de contraste y las diferencias entre valores máximos y mínimos. Al analizar el comportamiento de la luz en este espacio se puede apreciar que hay una gran concentración de luz junto a las ventanas sin embargo no es suficiente la cantidad de luz que penetra al espacio como para iluminar de forma satisfactoria la parte posterior del espacio.

Esta situación se traduce en poca calidad de luz debido a que hay zonas con niveles que pueden ocasionar una brillantez excesiva o deslumbramientos y en otras, el nivel de iluminación es tan bajo que, se requiere de un esfuerzo mayor para visualizar superficies u objetos. Esto se traduce en molestias visuales debido al esfuerzo que deben realizar los ojos para adaptarse rápidamente a estos cambios tan drásticos en los niveles de iluminación.

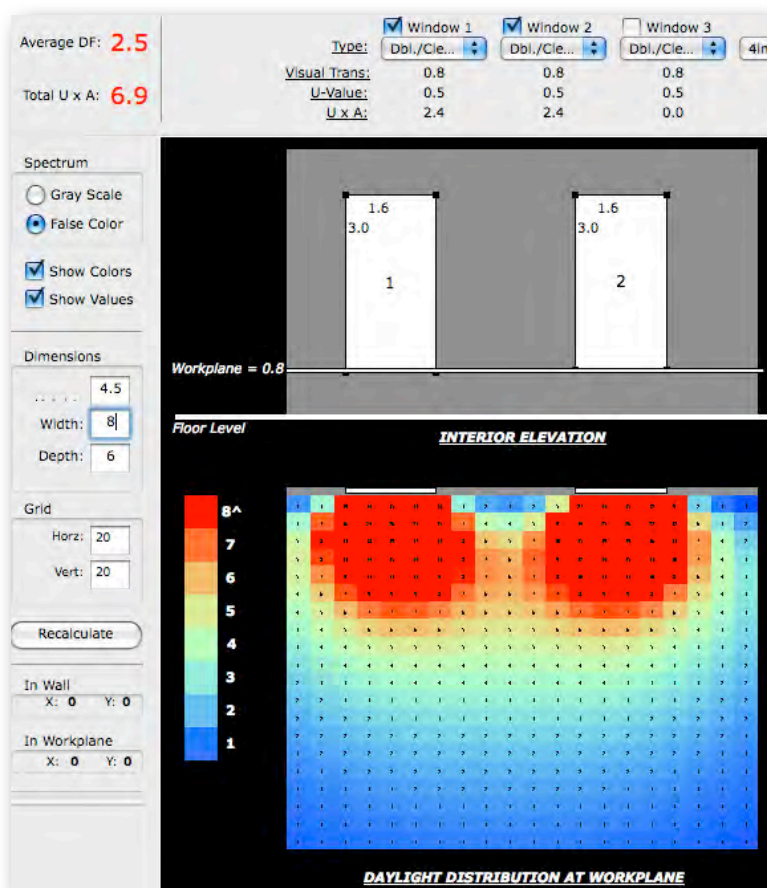


**< FIGURA 69**  
Caso de estudio 1  
Gráfica de superficie 3D con  
valores de iluminancia  
obtenidos del modelo 3D.

Factores de luz de día obtenidos a partir de programa DFcalc.

Un estudio similar al que se realizó con el modelo 3D se llevó a cabo mediante el programa DFcalc, (el cual se describió con mayor detalle en el [Capítulo 2.7](#)) obteniendo los valores de FLD para los puntos de referencia de caso de estudio. Además de los valores para los puntos de referencia se obtuvo una imagen en escala de colores que representa la distribución luminosa en el espacio sobre un plano de referencia a 80 cms. del nivel de piso (figura 70).

Al igual que con el modelo 3d mediante este procedimiento podemos realizar el análisis del comportamiento de la luz natural de forma cuantitativa y cualitativa. Nuevamente encontramos que bajo esta combinación de dimensiones de espacio y de ventanas la iluminación se comporta de forma poco uniforme a lo largo del espacio.



**FIGURA 70 >**

Caso de Estudio 1  
Calculo de Factor de luz de día mediante programa DFcalc.

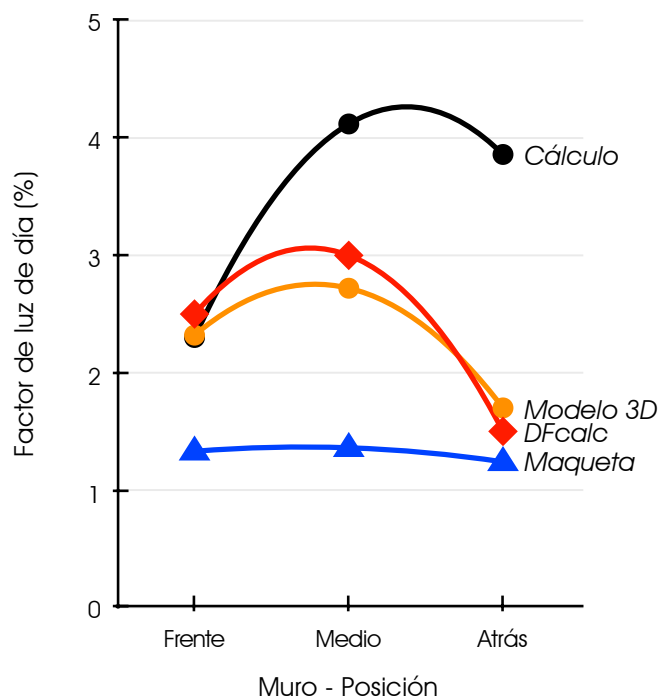
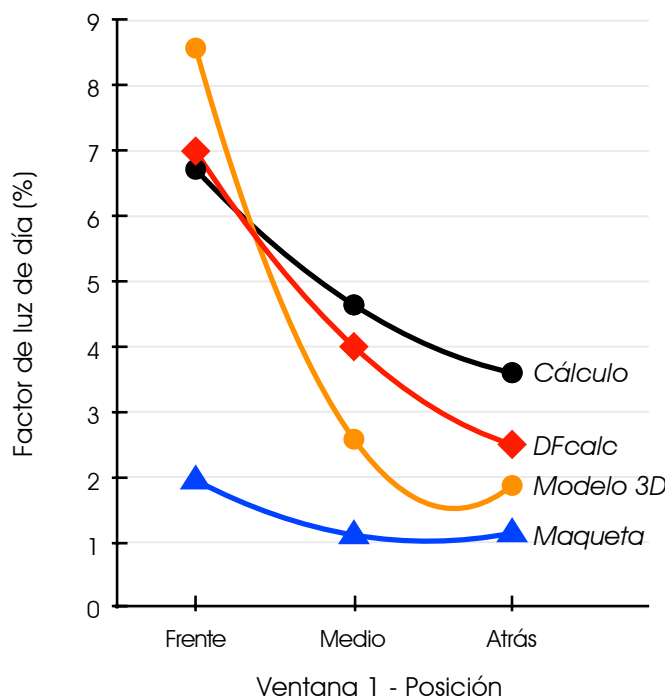
Comparación de resultados.

A partir de los resultados obtenidos por medio de la simulación 3D y el programa DFcalc, se encontró que a pesar de que los valores de FLD son aceptables, muestran discrepancias con los valores obtenidos a partir del cálculo manual y los obtenidos a partir de las mediciones en el modelo a escala. Estas diferencias en los resultados se pueden observar en la tabla 13 que muestra los valores de FLD para cada uno de los nueve puntos de referencias evaluados.

		CALCULAD	MAQUETA	MODELO	DFcalc
FRENTE	Ventana 1	6.72	1.95	8.58	7
	Muro	2.3	1.33	2.32	2.5
	Ventana 2	6.72	1.98	8.74	7
MEDIO	Ventana 1	4.64	1.11	2.58	4
	Muro	4.12	1.36	2.72	3
	Ventana 2	4.64	1.35	1.84	4
ATRÁS	Ventana 1	3.60	1.14	1.87	2.5
	Muro	3.86	1.24	1.70	1.5
	Ventana 2	3.60	1.25	1.60	2.5
<b>PROMEDIO</b>		<b>4.46</b>	<b>1.41</b>	<b>3.55</b>	<b>4.05</b>

< **TABLA 13**  
 Caso de estudio 1  
 Tabla comparativa de los valores del Factor de luz de día obtenidos por diferentes métodos..

Para apreciar mejor las diferencias entre cada uno de los métodos analizados se elaboraron las gráficas correspondientes a los puntos de referencia situados en el eje de la Ventana 1 (figura 71) y del Muro (figura 72). En las gráficas se muestran los valores de FLD obtenidos para las tres posiciones (frente, medio, atrás) mediante cada uno de los cuatro métodos descritos anteriormente. En ambos casos encontramos que los valores obtenidos a partir de las mediciones en la maqueta son los que presentan los valores más bajos. Por otro lado también se aprecia, en el caso de la Ventana 1, la drástica caída de los niveles de iluminación al alejarse de la ventana y que los valores obtenidos al partir del Modelo 3D y el programa DFcalc son los más parecidos.



**FIGURA 71.** (izquierda) Comparación de valores de FLD en Ventana 1.  
**FIGURA 72.** (derecha) Comparación de valores de FLD en Muro.



### Conclusiones del Caso de Estudio 1

La utilización de los modelos a escala para hacer estudios de iluminación natural en espacios interiores simplifica el trabajo y posibilita hacer cambios o ajustes en el espacio para adecuarlos a las necesidades específicas del experimento.

Sin embargo se debe tomar en cuenta que la ubicación del modelo a escala deberá cumplir con los requerimientos de precisión, pero sobre todo, deberá elegirse un sitio libre de obstrucciones que puedan interferir en las mediciones. En lo relativo al análisis comparativo de los factores de luz de día, a continuación se mencionan los puntos principales extraídos de este caso de estudio:

1. La incidencia del componente directo impide la obtención del valor de FLD basado en mediciones, por lo tanto se debe tener en cuenta que para posteriores estudios, la luz natural que hay en el espacio a estudiar deberá provenir únicamente del componente difuso del cielo.

2. Los valores de FLD obtenidos a partir de las mediciones disminuyen conforme avanzan las primeras horas del día cuando la fachada oriente tiene incidencia solar directa. Una vez que se presenta la culminación del sol y la fachada recibe únicamente luz difusa del cielo, el comportamiento del FLD se estabiliza y no presenta variaciones mayores a 1%.

3. En todos los fotómetros que no recibieron el componente directo, los valores de FLD resultaron ser menores a los estimados por medio del método de BRE. Esta variación puede ser ocasionada debido a que las mediciones se realizaron bajo condiciones de cielo uniforme y con la presencia del componente directo del sol.

4. A pesar de que los valores de FLD obtenidos a partir de las mediciones son bajos (1%-2%), al estudiar los valores de iluminancia en el interior del espacio se presentan valores muy altos (de 1 a 3 Kluxes) debido al nivel de iluminancia que hay en el exterior.

5. Se puede apreciar de forma muy clara la disminución de los valores de FLD y por lo tanto los valores de iluminancia conforme el punto de referencia se aleja de la fachada. Sin embargo esta disminución se presenta en porcentajes de hasta el 1% de FLD lo que significa diferencias de los valores de iluminancia de hasta 800 luxes.

6. Al comparar los resultados obtenidos a partir de las diferentes metodologías encontramos que en los tres procedimientos (cálculo, modelo 3D y programa DFcal) sobreestiman los valores del factor de luz día. De los tres métodos, el Modelo 3D simulado mediante el programa 3d Max Design es el que más se acerca a los valores obtenidos por medio de mediciones directas en la maqueta. A partir de esta observación se puede concluir que la simulación por computadora ofrece la posibilidad de obtener resultados con un nivel de confiabilidad mayor a los obtenidos por medio del cálculo manual por el método del BRE y el programa DFcal.

### 3.2. CASO DE ESTUDIO 2 - "POSGRADO DE ARQUITECTURA - UNAM"

Al estudiar las condiciones de iluminación natural dentro de un salón de clases se puede observar los factores que intervienen en el rendimiento escolar de los alumnos, de la misma manera se pueden realizar análisis sobre las posibles afectaciones a nivel fisiológico y psicológico de los usuarios. Estos resultados solo pueden darse mediante la observación y el registro de los niveles de iluminación natural que se presentan bajo condiciones habituales en el espacio. El objetivo de este caso de estudio es dar a conocer los resultados de las mediciones de iluminancia hechas en un salón de clases del Edificio del Posgrado de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Mediante la aplicación de la metodología planteada y con la información obtenida se determinaron las condiciones de iluminación presentes en el dicho espacio. Esta información permite evaluar el cumplimiento de las recomendaciones contenidas en normas y reglamentos para este tipo de espacios. El estudio se basó en los datos obtenidos de los niveles de iluminancia global vertical que inciden sobre la fachada del edificio y se determinó su influencia en la iluminación en el interior del espacio. Para hacer este estudio de las condiciones lumínicas presentes en un salón de clases se escogió uno ubicado en segundo nivel del Edificio de Posgrado de Arquitectura en la Ciudad Universitaria al sur de la Ciudad de México.

#### Descripción del Espacio

El espacio estudiado es un salón de 6.6 m. de largo por 6.1 m. de profundidad, con una altura promedio de 2.5 m. Tiene ventanas que van de piso a techo a todo lo largo del salón y están ubicadas en la fachada poniente, por el lado interior cuenta con cortinas de lona color blanco (figura 73). Todo el edificio de Posgrado en su fachada poniente cuenta con protecciones solares móviles en posición vertical hechas de lámina metálica con pintura esmalte color terracota (figura 74). Los materiales de las superficies interiores del salón son los siguientes:

- Muros: Aplanados de yeso textura color blanco y tabique vidriado aparente color ocre.
- Techo: Aplanados de yeso con textura color blanco
- Piso: Linóleo color Beige

#### Registro de niveles de iluminación en salón de clases

En el interior del salón se colocaron 9 fotómetros *LI-COR* modelo *LI-210s* de los cuales, seis se colocaron en posición horizontal en la paleta de los pupitres. Los sensores, a su vez, se instalaron sobre bases especiales hechas de material plástico con el objetivo de poder nivelar los sensores y compensar la inclinación de las

paletas de trabajo. Los tres primeros sensores se colocaron en una fila a 1.4 mts de la ventana mientras que los otros tres se colocaron en otra fila a 4.8 mts. Los tres sensores restantes se colocaron posición vertical en cada uno de los muros del salón (figura 75).

Además de estos 9 fotómetros se colocaron dos más en un espacio contiguo, ambos en posición vertical, con el objetivo de medir la iluminancia global vertical (EGV) sobre la fachada poniente. Uno de estos dos sensores se colocó por fuera del límite vertical de las protecciones solares y el otro se colocó por dentro de las protecciones. Adicionalmente se instalaron 3 cámaras de video para poder registrar de forma simultánea el comportamiento lumínico en el interior del salón de clases. Con las cámaras, además de visualizar la forma en que se distribuye la luz natural dentro del espacio se puede percibir si en algún momento los alumnos bloquean los sensores o modifican las condiciones del salón. Otro motivo por el cual se instalaron las cámaras es que permiten la observación del comportamiento de los ocupantes del salón (asistencia, grado de atención, nivel de actividad). La intención es observar la conducta de los usuarios y percibir las reacciones ante las condiciones lumínicas prevalecientes en el espacio estudiado.

**FIGURA 73 >**

Caso de Estudio 2  
Interior de salón de clases  
(A. Valeriano)

.....

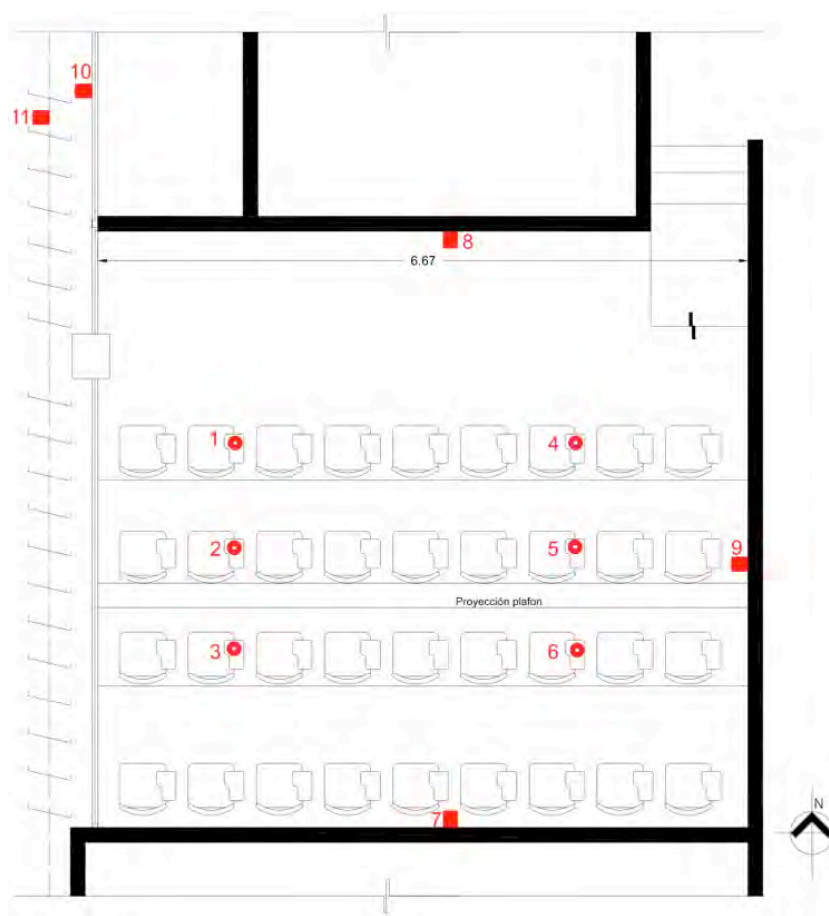


**FIGURA 74 >**

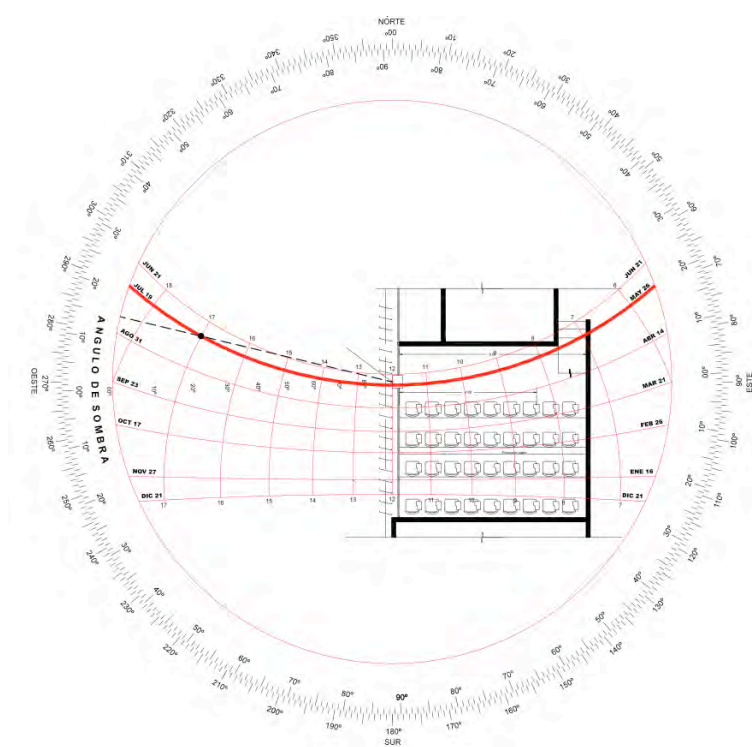
Caso de Estudio 2  
Fachada poniente del edificio  
(A. Valeriano)

.....





< **FIGURA 75**  
 Caso de estudio 2  
 Planta del salón con ubicación  
 de sensores.



< **FIGURA 76**  
 Caso de estudio 2  
 Gráfica solar (estereográfica)  
 Ciudad Universitaria.  
 (19° 20' 01" N, 99° 11' 54" O)

Los registros se llevaron a cabo durante 6 días comprendidos entre el Lunes 18 y el Sábado 23 de Mayo del 2009. Se tomaron mediciones desde las 6:00 hrs. hasta las 20 hrs. en intervalos de 4 minutos registrados en un sistema de adquisición de datos *Agilent* modelo 34970A.

Durante este periodo, las actividades del salón se llevaron a cabo de manera habitual, es decir, las mediciones se realizaron bajo condiciones de ocupación, exceptuando los días viernes 22 y sábado 23. Estos dos últimos días se tomaron como días de referencia debido a que no hay ninguna interferencia en los registros debido a modificaciones en las condiciones del espacio ocasionadas por los usuarios. Estas modificaciones son principalmente el cierre de cortinas y de las protecciones solares, así como el uso de la luz artificial y video proyectores.

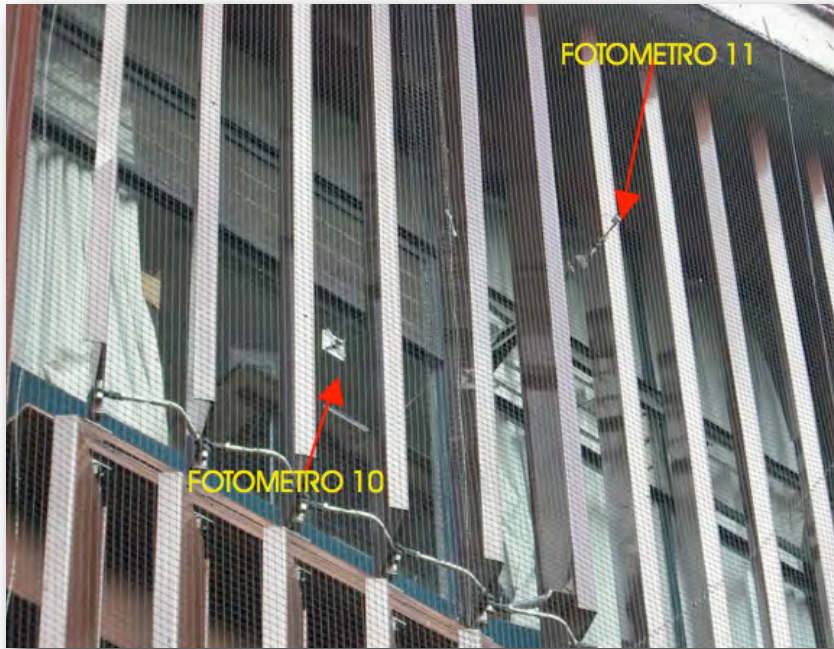
### Resultados

En esta sección se presentan los registros de los valores de iluminancia global vertical (EGV) en ambos sensores ubicados en la fachada del edificio. Además de los resultados de las mediciones hechas en el salón evaluado para cada los 9 puntos de referencia. Al analizar los registros de los seis días se pudo observar que durante el periodo de mediciones se presentaron condiciones de cielo muy variables a lo largo del día. Durante los días 18 a 22 la presencia constante de nubes provocaron registros muy variables. Esta situación no se presentó el día sábado 23, además de que este día las actividades escolares se suspenden, por lo tanto las condiciones interiores del salón no son modificadas. Debido a esto solo se presentan los resultados de las mediciones del día sábado 23 (día Juliano 143).

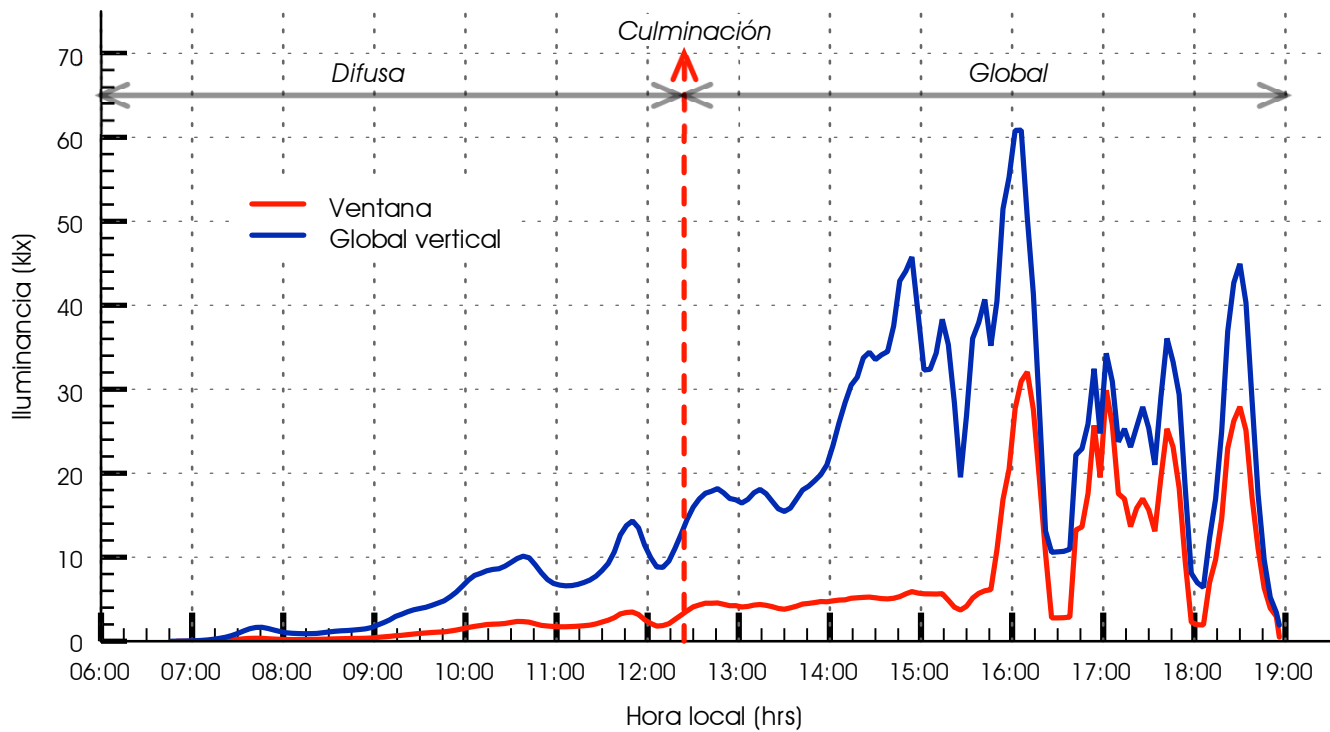
### Iluminancia vertical

El día Sábado 23 se presentaron condiciones de cielo uniformes por la mañana y con presencia de nubes por la tarde. Se puede apreciar valores sin mayor variación por la mañana, esto se debe a que la iluminación que llega a la fachada poniente en la primera mitad del día es luz difusa proveniente del cielo. Por la tarde se aprecia un comportamiento variable debido a la presencia del componente directo de la luz. Los registros se estudiaron en un rango comprendido entre las 6:04 y las 19:00 hrs. que corresponden a la duración del día en esta al sur de la Ciudad de México (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O) y en esta época del año. En la Figura 76 se presenta la gráfica solar de la ciudad de México en proyección estereográfica con la planta arquitectónica del salón evaluado.

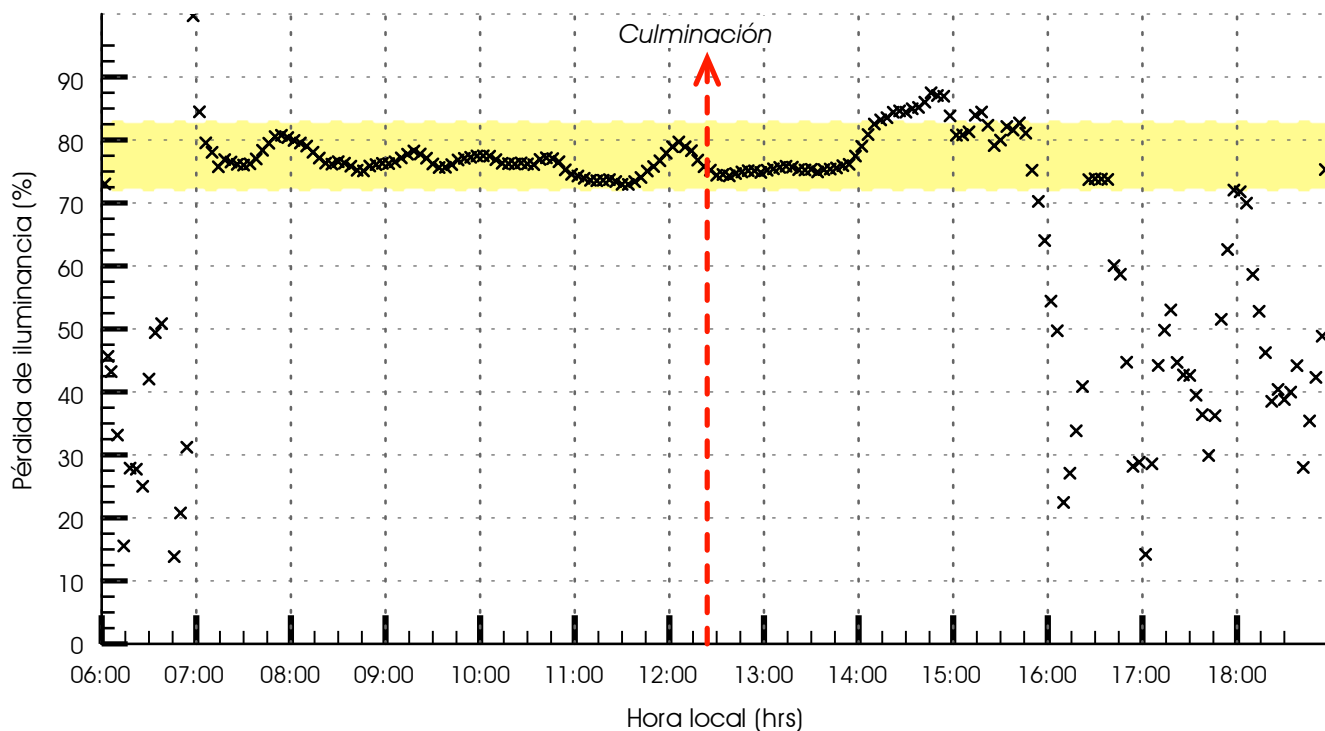
Para encontrar la relación que existe entre los niveles de iluminancia global vertical y los valores de iluminancia interiores, se presentan los registros de los fotómetros ubicados en la fachada poniente. Como se mencionó anteriormente se realizaron dos mediciones distintas sobre la fachada del edificio (Figura 77). El primero corresponde al valor de fotómetro No. 11 ubicado por fuera de las protecciones solares (Global vertical) y el segundo al fotómetro 10 colocado en la ventana del espacio por dentro de las protecciones. Al comparar los registros de estos dos fotómetros (Figura 78) se puede apreciar que durante las tres primeras cuartos partes del día, las diferencias de los niveles de iluminación son considerables llegando hasta los 45 kluxes.



< **FIGURA 77**  
 Caso de estudio 2  
 Sensores sobre instalados en la  
 fachada del salón.  
 (A. Valeriano)



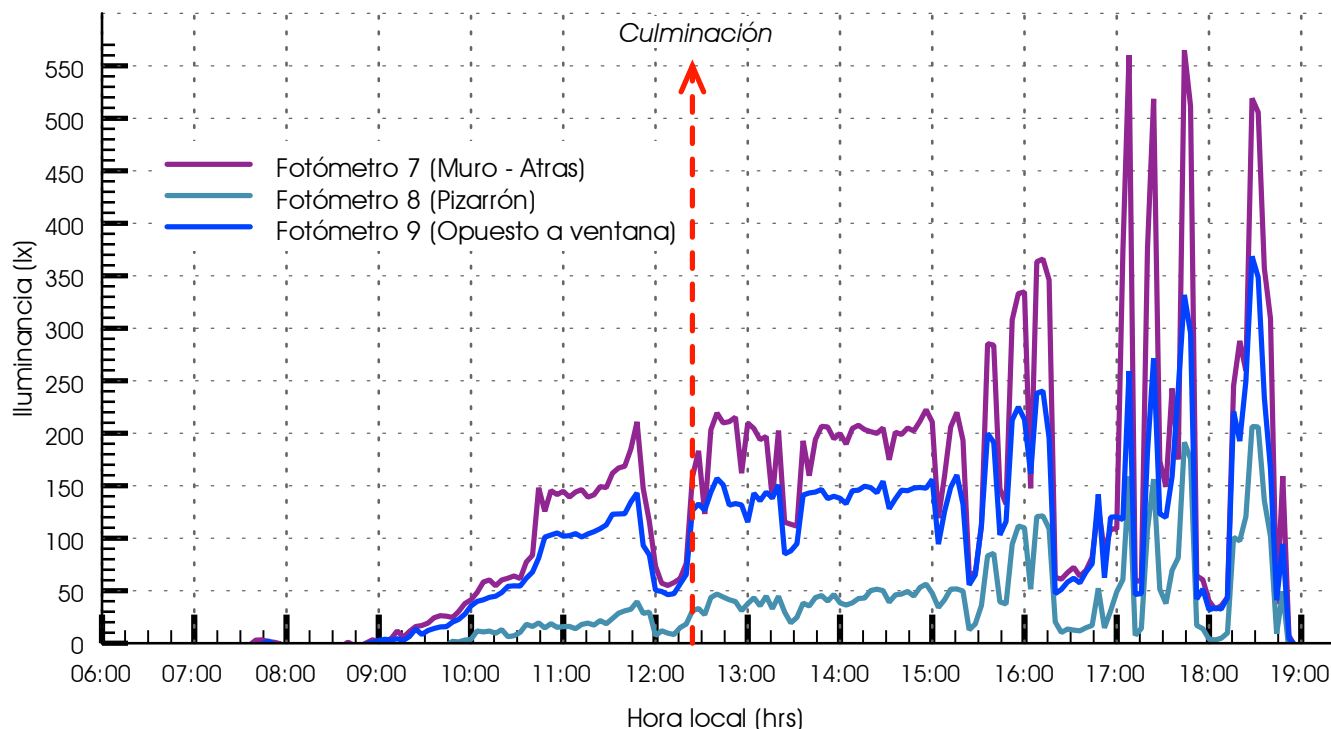
**FIGURA 78.** Iluminancia global vertical (EGV). Fachada poniente.  
 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19° 20' 01" N. 99° 11' 54" O)



**FIGURA 79.** Porcentaje de pérdida de iluminancia por protecciones.  
23-Mayo-09. Ciudad Universitaria (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)

En la figura 79 se presentan estos valores expresados en porcentaje de pérdida de luz debido a la presencia de las protecciones solares. Para fines de esta evaluación, las protecciones se colocaron en una posición que permitiera el libre paso de la luz. Bajo esta condición se puede apreciar que existen pérdidas de hasta el 80% de la iluminancia cuando la luz que proviene del cielo es completamente difusa. Este porcentaje de pérdida disminuye conforme el sol incide de forma directa sobre la fachada en la segunda mitad del día.

Al analizar los otros tres fotómetros colocados en posición vertical dentro del salón (figura 80) se puede apreciar que los valores de iluminancia son muy bajos comparados con el exterior. Expresados en porcentajes hay una pérdida por encima del 95% en el caso del fotómetro No. 9 ubicado a 6 metros de distancia de la ventana. A pesar de las enormes diferencias con respecto a los niveles exteriores se puede apreciar que hay un comportamiento uniforme en la iluminación sobre las superficies verticales presentándose las diferencias esperadas debido a las reflectancias de los materiales de las superficies verticales del salón. En el caso del fotómetro 7 es el que presenta los niveles más altos de iluminancia con respecto a los otros dos. Esto se debe a que por la época del año el sol está ubicado en una posición en la que los rayos inciden sobre las superficies orientadas hacia el norte (Figura 76). Aunado a esto la posición de las protecciones solares dirige la luz hacia el muro sur del salón de clases donde estaba ubicado el fotómetro 7. Este fenómeno se ve reflejado en la distribución luminosa del salón ya que como se verá más adelante, los fotómetros ubicados en la parte posterior del salón son los que registraron los niveles más altos con respecto a los otros 4 sensores ubicados en posición horizontal.



**FIGURA 80.** luminancia sobre las superficies verticales en el interior del salón.  
23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)

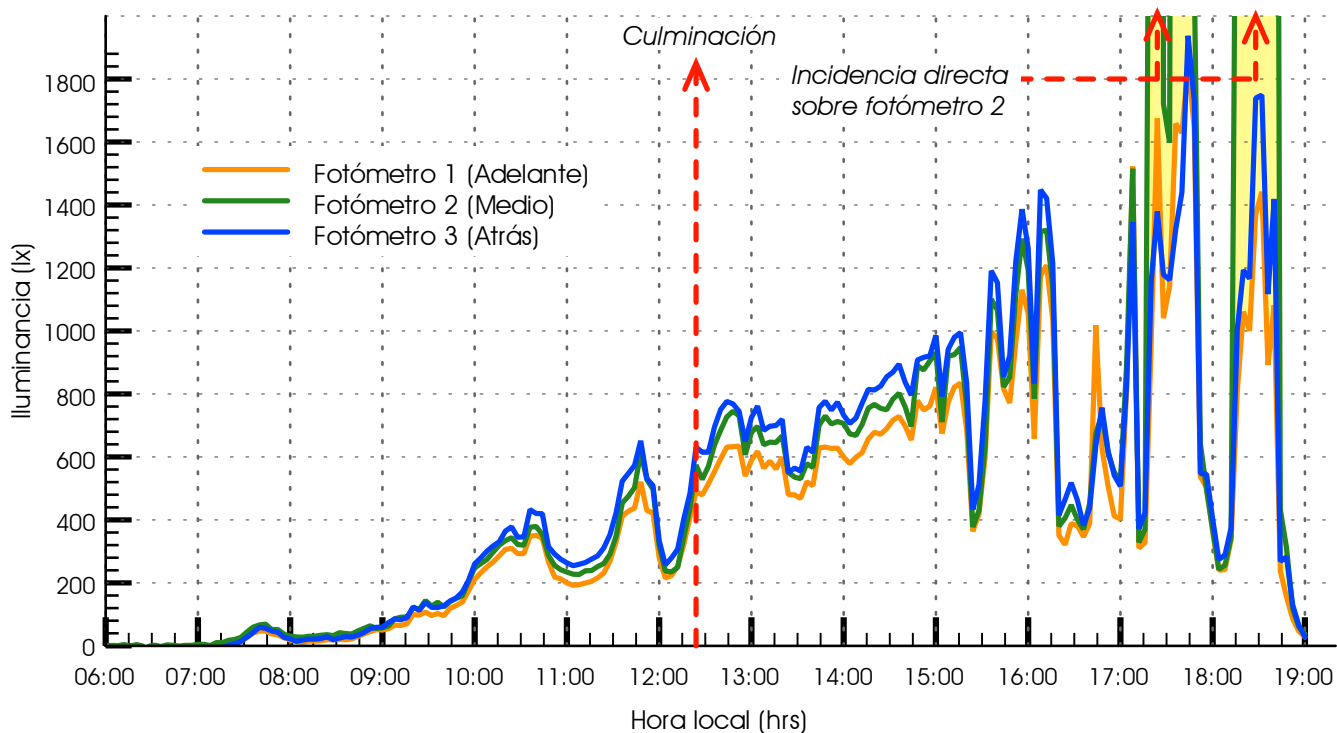
### Illuminancia horizontal

En el caso de los fotómetros ubicados en posición horizontal sobre las bancas del salón se aprecia un comportamiento similar en los seis sensores. Sin embargo al hacer la comparación de los niveles de iluminación de los sensores ubicados junto a la ventana (figura 81) y los sensores ubicados junto al muro (figura 82), se observa que hay diferencias de hasta 700 luxes, lo que representa una pérdida del 80%.

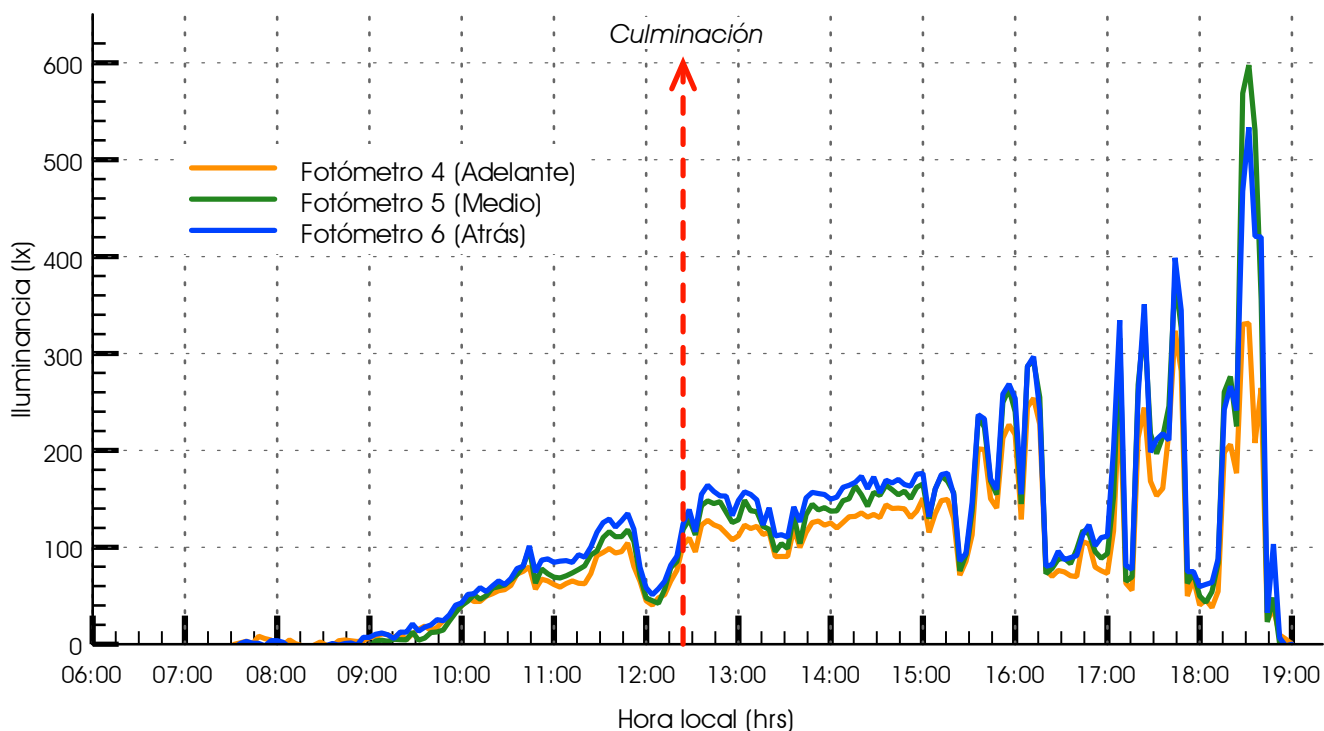
Estos valores de pérdida entre los fotómetro ubicados junto a la ventana y los que están junto al muro se puede apreciar en la figura 83 que muestra una comparación tomando como referencia el sensor ubicado en la parte de atrás. En las gráficas también se aprecia la forma en que la luz incide sobre los sensores. En la primera mitad del día cuando el salón solo recibe iluminación difusa del cielo, el comportamiento de la luz en interior presenta poca variabilidad.

Por la tarde se aprecia que al recibir el componente directo del sol, el comportamiento lumínico es más variable. Este comportamiento se debe a los reflejos e interacciones que se presentan en el interior del salón, además de los juegos de luces y sombras provocados por las protecciones en la parte exterior.

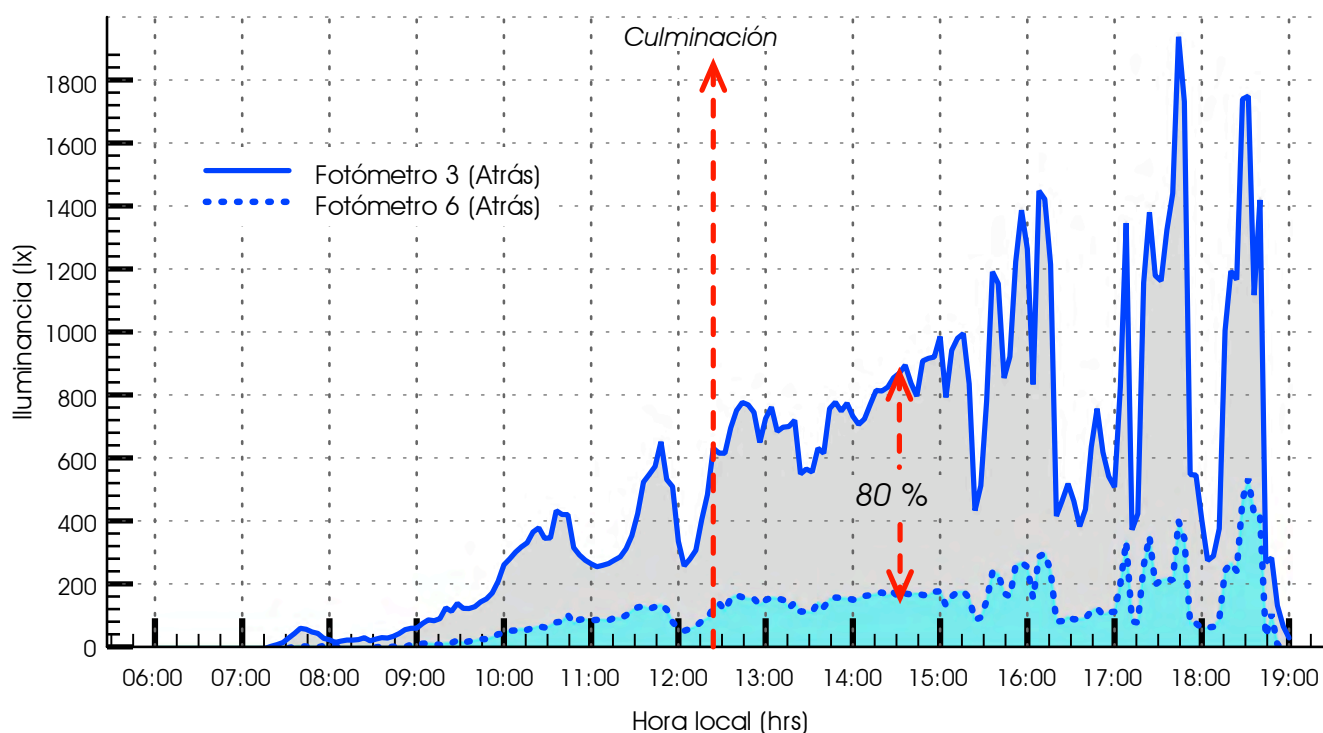




**FIGURA 81.** Iluminancia horizontal en el interior del salón - Fotómetros junto a la ventana.  
 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)



**FIGURA 82.** Iluminancia horizontal en el interior del salón - Fotómetros junto al muro.  
 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)



**FIGURA 83.** Comparación de valores de Iluminancia horizontal - Fotómetros junto a ventana y muro. 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N. 99° 11' 54" O)

Como se mencionó anteriormente, el día de las mediciones se presentaron condiciones de cielo nublado por la tarde, mismas que se ven reflejadas en la gráfica. Los aumentos y disminuciones de los niveles de iluminancia indican que esta nubosidad no se presentó de forma uniforme. En el caso particular del fotómetro número 2 se puede observar que por momentos recibió luz directa proveniente del sol. Para corroborar este comportamiento de las gráficas se estudiaron las videograbaciones. Se observó que efectivamente hay una incidencia de luz directa de forma intermitente a partir de las 15 horas y hasta el momento de la puesta del sol. Como se puede apreciar en la figura 84 el sol incide de forma directa sobre los fotómetros 1,2 y 3, lo que provoca aumentos considerables en el nivel de iluminación registrado.

Al analizar los niveles de iluminación en los tres primeros fotómetros se dan condiciones mínimas para poder realizar actividades escolares. A partir de las 10 horas los niveles de iluminación están por encima de los 230 luxes. A partir de las 15 horas, estos niveles aumentan hasta 1000 luxes, lo que resulta excesivo y molesto para los ocupantes. Por lo tanto eso nos deja un horario de funcionamiento adecuado y confortable desde el punto de vista lumínico de solo 5 horas. En el horario fuera de este rango (10-15 hrs) se tiene que utilizar otro tipo de estrategias para poder brindar de iluminación adecuada al espacio. Lo anterior se puede dar mediante el encendido de la luz artificial o por la tarde con el cierre de las protecciones solares. Bajo esta lógica se encontró que en las bancas ubicadas junto al muro opuesto a la ventana, este horario óptimo se desplaza de las 15 a las 19 horas cuando se presentan niveles de iluminancia por encima de los 250 luxes.



**FIGURA 84 >**  
Caso de Estudio 2  
Captura de video – Interior del salón 17 horas.  
(A. Valeriano)

Obtención del Factor de luz de día.

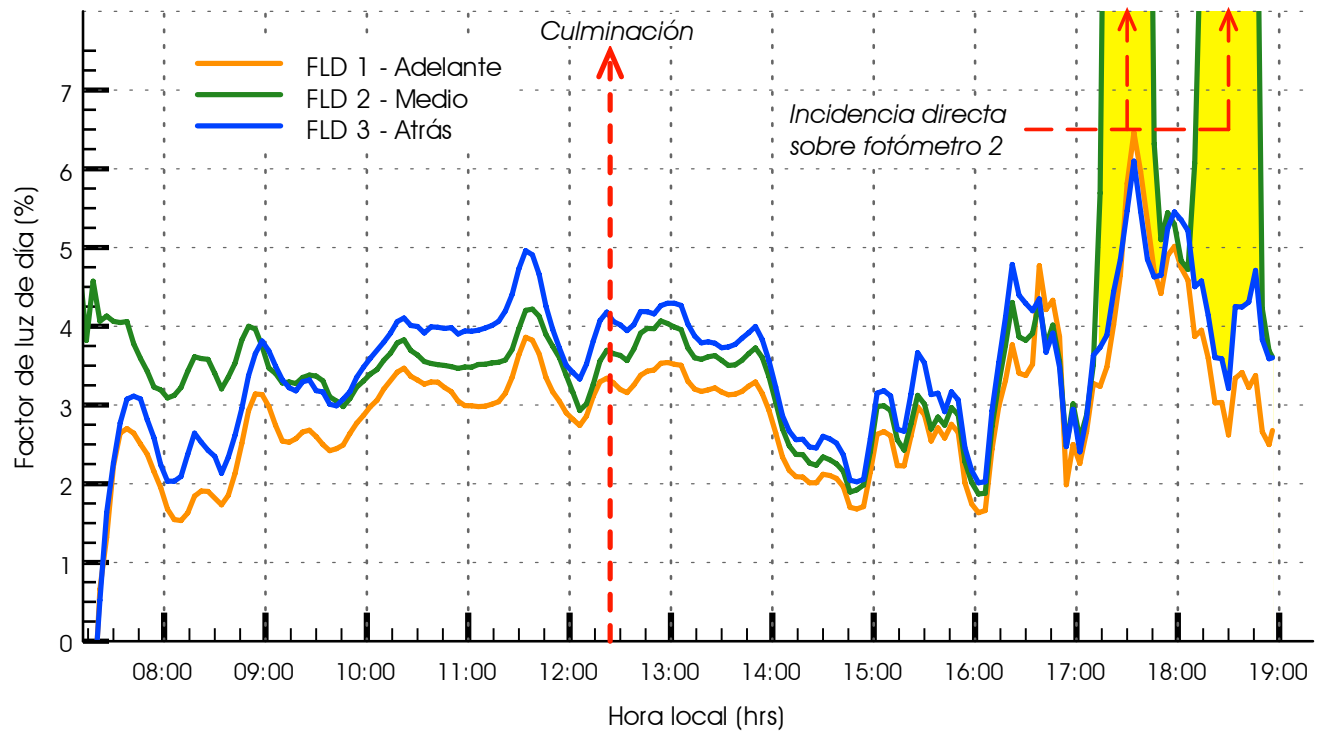
Con los valores de iluminancia vertical y los registrados en cada uno de los fotómetros se puede obtener el valor del factor de luz de día para cada una de las posiciones evaluadas. En las figura 85 y 86 se muestran los valores de FLD para cada uno de los sensores. En ella se puede observar que el comportamiento de los factores es poco variable durante las horas del día en que los sensores únicamente reciben iluminación difusa.

Al igual que en el caso de la figura 78, el comportamiento de los valores se vuelve menos estable por el atardecer cuando la fachada recibe el componente directo del sol. Por lo anterior los valores de FLD obtenidos cuando esta presente el componente directo del sol no son válidos. Con los valores validos obtenidos durante la primera mitad del día se puede observar que aquellos fotómetros ubicados junto a la ventana (1, 2 y 3) oscilan entre el 2 y 4%, valores que cumplen con los mínimos recomendados. Los fotómetros ubicados junto al muro posterior (5, 6 y 7) presentan valores en entre el 0.5 y 1.5%.

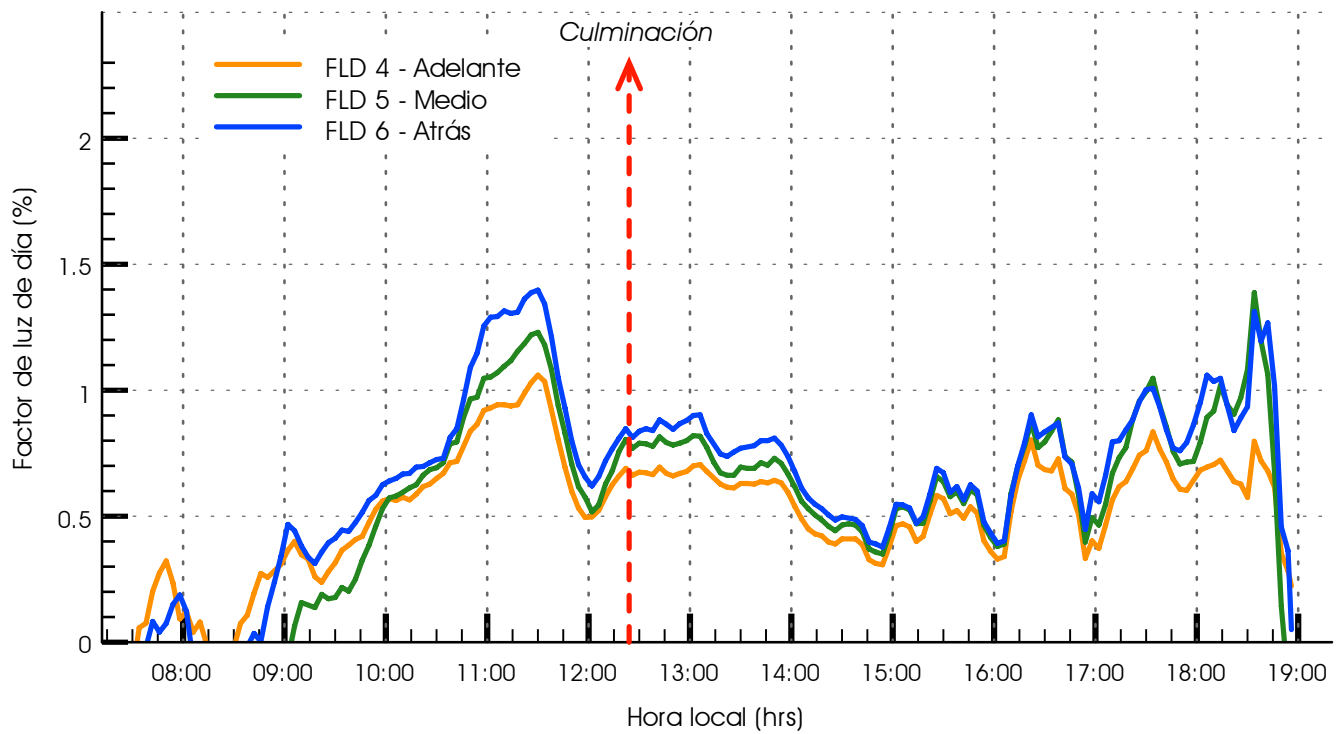
A diferencia de los fotómetros junto a la ventana, aquellos que están junto al muro no reciben el componente directo del sol por lo que el factor de luz de día se mantiene relativamente constante a lo largo de todo el día. Aunque esto pueda parecer un aspecto positivo, el factor de luz de día en esta mitad del salón están muy por debajo de los niveles requeridos para salones de clase ([Tabla 5](#)). Para hacer otra evaluación del comportamiento del salón en su totalidad se obtuvieron los promedios del factor de luz de día para cada uno de los fotómetros y se encontraron los siguientes valores:

**TABLA 14 >**  
Caso de Estudio 2  
Valores promedio de Factor de luz de día para cada uno de los fotómetros.

FOTÓMETROS	F. 1	F. 2	F. 3	F. 4	F. 5	F. 6	PROMEDIO
PORCENTAJE	2.99%	4.23%	3.55%	0.53%	0.47%	0.64%	<b>2.07%</b>



**FIGURA 85.** Valores de Factor de luz de día - Fotómetros junto a la ventana.  
 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N, 99° 11' 54" O)



**FIGURA 86.** Valores de Factor de luz de día - Fotómetros junto al muro.  
 23-Mayo-09. Ciudad Universitaria. (19°20'01" N, 99° 11' 54" O)

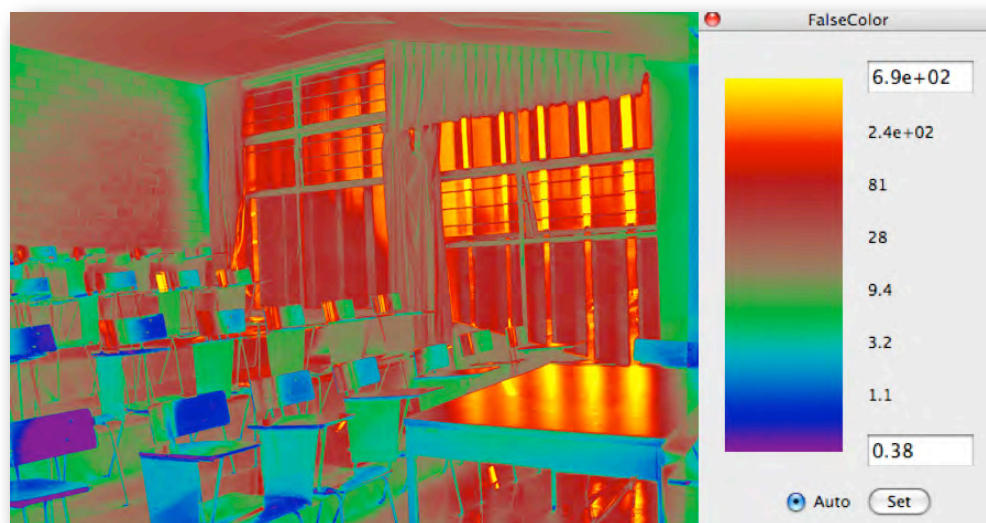
Obtención de la distribución lumínica a partir de imágenes HDR

Como se describió en el [Capítulo 2.6](#) correspondiente al procesamiento de imágenes con formato HDR, se obtuvo la distribución luminosa del salón de clases a partir de una serie de fotografías digitales. Sin obtener los valores absolutos de luminancia dentro del espacio, se puede apreciar el efecto que provocan las protecciones solares. Al hacer la comparativa de los valores relativos por medio de la escala de colores se puede observar que las protecciones en el exterior disminuyen los niveles de luminancia hasta en un 90% con respecto al que se presenta en las áreas visibles del exterior entre las protecciones. Otro fenómeno que se observa en la imagen HDR es el efecto de las diferentes superficies que existen en el espacio. En el caso del piso del salón presenta un alto nivel de luminancia que está muy cerca de igualar los valores presentes en la parte exterior de las ventanas. Este mismo fenómeno se puede observar en el escritorio del salón, el cual, por su acabado (formaica) refleja casi en un 90% la luz que llega a su superficie.



**FIGURA 87 >**

Caso de Estudio 2  
Secuencia de fotografías digitales del salón de clases para la obtención de la imagen HDR.  
(A. Valeriano)



**FIGURA 88 >**

Caso de Estudio 2  
Imagen HDR de salón de clases en gama de colores y su escala de valores de luminancia.  
(A. Valeriano)

### Conclusiones del Caso de Estudio 2

Las protecciones solares son un elemento que puede resultar contraproducente y problemático desde el punto de vista lumínico. Por un lado, aún estando abiertas en su totalidad se observó que las pérdidas de iluminación ocasionadas por su presencia pueden ser de hasta 90% con relación a la luz proveniente del exterior. Esta situación se presenta cuando la luz que incide sobre la fachada del edificio proviene únicamente del componente difuso del cielo.

Cuando los rayos del sol inciden de forma directa sobre la fachada (por las tardes) las protecciones solares son una solución parcial al problema lumínico. Esto se debe a que al cerrarlas se evita la incidencia directa de los rayos del sol pero también se puede evitar que la luz llegue a las bancas ubicadas al otro extremo de la ventana. Como se puede apreciar en las figuras 81 y 82 los valores de iluminancia son muy bajos aun con las protecciones abiertas, situación que se agrava con el cierre de estos elementos. Con lo anterior se tendría que hacer uso de los sistemas de iluminación artificial, aun cuando en el exterior la disponibilidad de luz natural sea de hasta 50 Kluxes en promedio.

Los elementos de protección solar ya no deben considerarse únicamente para la función de protección, sino que, como lo han sugerido estudios recientes en México<sup>130-131</sup> y en el extranjero<sup>132-133</sup>, pueden ser elementos que contribuyan a mejorar las condiciones de iluminación y no solo disminuirla. El diseño de estos elementos deber ser tal que permitan por un lado, bloquear la incidencia directa al interior del espacio y por otro, servir como un difusor de luz que propicie que la distribución luminosa de un espacio sea más uniforme, además que posibilitar la incidencia de la luz hacia el lado opuesto de las ventanas.

Por lo anterior el análisis de las posibles soluciones de elementos de protección deben considerarse más allá de una simple incorporación de elementos que bloquean la luz y la radiación solar directa, inclusive como lo sugiere un grupo de investigadores en Taiwan<sup>134</sup>; puede ir más allá de simplemente colocar elementos de protección horizontales contiguos a las ventanas. Las soluciones óptimas pueden ser mucho más elaboradas incorporando dobles o hasta triples "capas" de protecciones a las fachadas, en diferentes posiciones e inclinaciones, con distintos materiales y acabados, interiores o exteriores, etc.

---

<sup>130</sup> **CABROLIER Sanhueza, Henry J.A.**, *Iluminación natural en la arquitectura: dos estudios de caso para la Ciudad de México*. Tesis de maestría en Arquitectura, UNAM, México, 2010.

<sup>131</sup> **GUTIÉRREZ Mandujano, Lourdes, María de**, *Aprovechamiento eficiente de la luz diurna en las aulas tipo CAPFCE de la universidad de Colima*, Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad de Colima, México, 2005.

<sup>132</sup> **KÖSTER Helmut.**, *Dynamic daylighting architecture: basic, systems, projects*, Birkhäuser, Berlin, Alemania, 2004.

<sup>133</sup> **YENER, A.K.**, *Daylight analysis in Classrooms with Solar Control*, *Architectural Science Review*, 2002, vol. 45, pp. 311-316.

<sup>134</sup> **HO, Ming-Chin, et al.**, *Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms*, *Energy & Buildings*, 2008, vol. 40(10), pp. 1844-1855.

Todo lo anterior amplía la gama de posibles soluciones que cumplan la función de elementos de control lumínico y que además puedan manejarse como elementos arquitectónicos atractivos a la vista. Los valores de iluminancia registrados sobre las bancas del salón de clases están por debajo de los valores recomendados en horas que pueden ser hábiles. Esto reduce el tiempo de operación de salón de clases utilizando luz natural a 5 horas, por lo tanto, realizar actividades fuera de este rango horario implicaría el uso de fuentes artificiales para iluminar el salón. Desde el punto de vista de operatividad y funcionalidad del espacio, el salón de clases presenta problemas, los cuales se podrían resolver mediante modificaciones físicas al espacio o adecuar los horarios de clases a las horas de mayor eficiencia lumínica.

De manera contraria existen zonas que reciben una gran cantidad de iluminación y provocan efectos negativos en los usuarios como reflejos y deslumbramientos, es decir, no hay uniformidad en la iluminación del espacio. Conforme a las recomendaciones internacionales de los valores mínimos de factor de luz día, el salón evaluado presenta valores promedio de 2%, que está por debajo del valor recomendado de 5%. Los efectos negativos que puede provocar esta carencia de iluminación se pueden percibir la conducta observada en los usuarios de salón de clases.

Para contrarrestar los efectos negativos de la iluminación deficiente del salón de clases, los usuarios tienen que recurrir a acciones de modificación de las condiciones lumínicas. Sin embargo aunque se den soluciones provisionales a la problemática, estas acciones a su vez provocan otro tipo de incomodidades desde el punto de vista térmico y de ventilación del espacio. Para hacer un análisis completo sobre las condiciones de confort que propician el bienestar de los usuarios en el salón de clases es necesario hacer evaluaciones del desempeño térmico y acústico.

Como han establecido estudios similares<sup>135-136</sup> al hacer evaluaciones completas de las condiciones de un espacio se puede relacionar las variables presentes en el mismo y vincularlas con estudios psicológicos que permitan evaluar la funcionalidad del espacio. Las repercusiones en la salud psicológica de los usuarios de espacios destinados a la educación debe ser un factor determinante en el momento de diseñar espacios.<sup>137</sup> Los efectos negativos de la mala iluminación en los salones deben ser tomados con mucha seriedad debido a que pueden afectar de forma significativa el aprendizaje de las personas. Por lo anterior se recomienda continuar con las evaluaciones lumínicas para evitar posibles afectaciones a la salud de los usuarios.

---

<sup>135</sup> KRUGER, E. ZANNIN, T., *Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms*, Building and Environment, 2004, vol. 39, pp. 1055-1063.

<sup>136</sup> WANG N. , BOUBEKRI, M. *op. cit.*, 2010.

<sup>137</sup> WINTERBOTTOM, M., WILKINS, A., *Lighting and discomfort in the classroom*, Journal of Environmental Psychology, 2009, vol. 29(1), pp. 63-75.

---

### 3.3. CASO DE ESTUDIO 3 - "TALLER DE ARQUITECTURA UNIVERSIDAD MARISTA"

---

El tercer caso de estudio tuvo como objetivo aplicar y analizar las distintas metodologías de cálculo y técnicas de simulación. Para hacer lo anterior se buscó un espacio que tuviera una configuración arquitectónica sencilla, con mobiliario móvil y sistemas de control de iluminación (cortinas, persianas). Con el objetivo de hacer más eficiente la recopilación de la información relativa a las condiciones lumínicas, se plantea un espacio educativo en donde también se pudieran hacer una evaluación post-ocupacionales (ver [capítulo 2.8](#)) para conocer la opinión de los usuarios.

El espacio evaluado fue un salón de clases denominado "Taller de Arquitectura" de la Universidad Marista Campus Xochimilco-Tlahuac. En este espacio se imparten clases de dibujo técnico, representación gráfica, elaboración de maquetas y proyectos, además de realizar exposiciones y reuniones de maestros y alumnos. El caso de estudio, dadas las actividades que se realizan, necesita de altos niveles de iluminación (500 lx mínimo) para actividades de dibujo de precisión, cortes y ensamble de maquetas. Por lo tanto resulto ser de gran ayuda para fines de la investigación, ya que las tareas visuales requieren buenas condiciones de iluminación desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo. Otro aspecto que pudo observar en este caso de estudio, fue la actitud que tienen los alumnos ante el espacio. Se ha observado que dadas las condiciones de iluminación que prevalecen en el espacio se hace uso de la iluminación artificial a pesar de que las condiciones de iluminación natural en el exterior permiten la realización de las actividades anteriormente descritas.

#### Descripción del Espacio

El taller de arquitectura se encuentra ubicado en el semisótano del Edificio "D" de la Universidad Marista Campus Tlahuac. Esta delimitado, en su fachada sur por el pasillo que conduce al atrio del conjunto de edificios y por la fachada norte por el área de jardín exterior. Cuenta con 116 m<sup>2</sup>, y sus dimensiones son 12.5 metros de largo por 9.3 metros de ancho, con una altura a la losa de 2.6 metros. Cuenta con dos accesos por el lado sur y ventanas en ambas fachadas (sur y norte). El taller cuenta con dos puertas, una en la parte media anterior y otra en la parte media posterior, hechas de madera, con recubrimiento de formaica color azul y zoclo de aluminio.

El mobiliario del taller consta de 22 sillas con dimensiones aproximadas de 1.0 x 0.80 m, hechos con madera de pino, con una superficie laminada plástico color blanco mate. La estructura metálica del esta pintada con esmalte blanco brillante. La losa a base del sistema "losacero" es aparente y al igual que la estructura tiene un recubrimiento de pintura. Los muros tienen tres distintos materiales de los cuales se hace una descripción detallada a continuación debido a que estos materiales fueron reproducidos de forma precisa en el programa de simulación para hacer los análisis correspondientes.



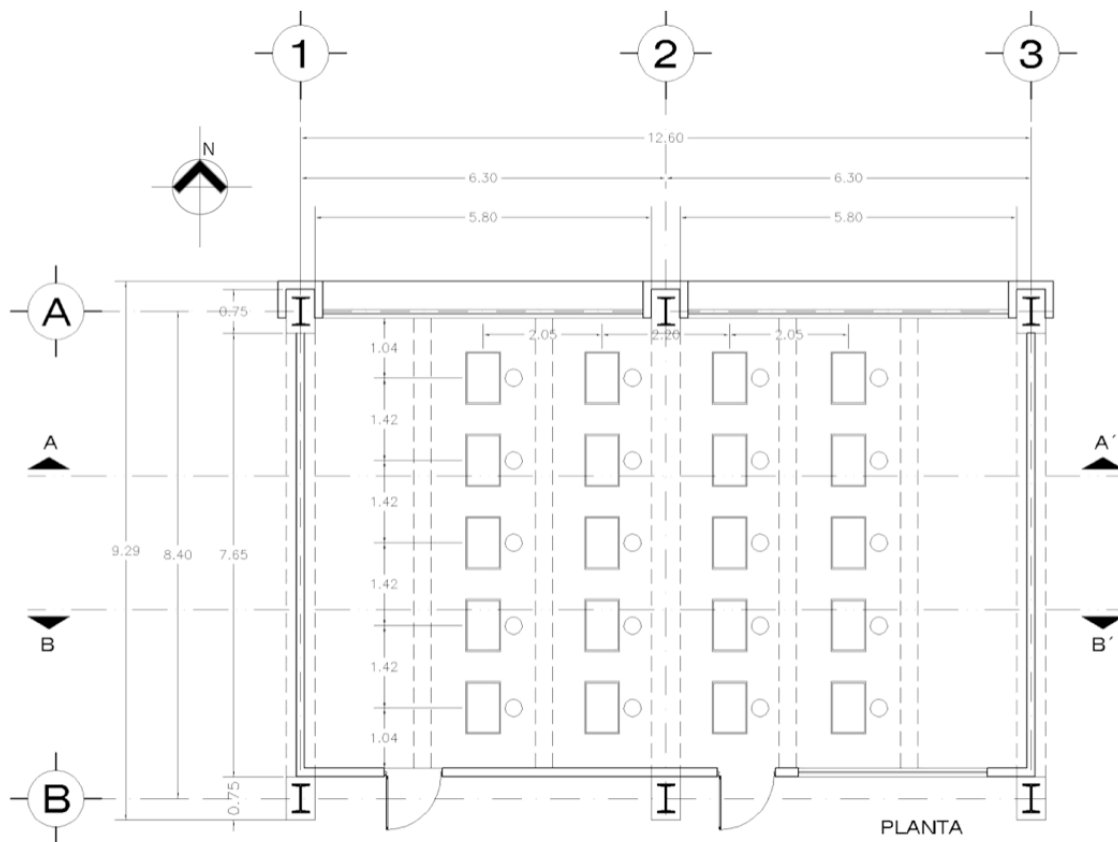


FIGURA 89. Planta del Taller de Arquitectura Universidad Marista. (S/E)

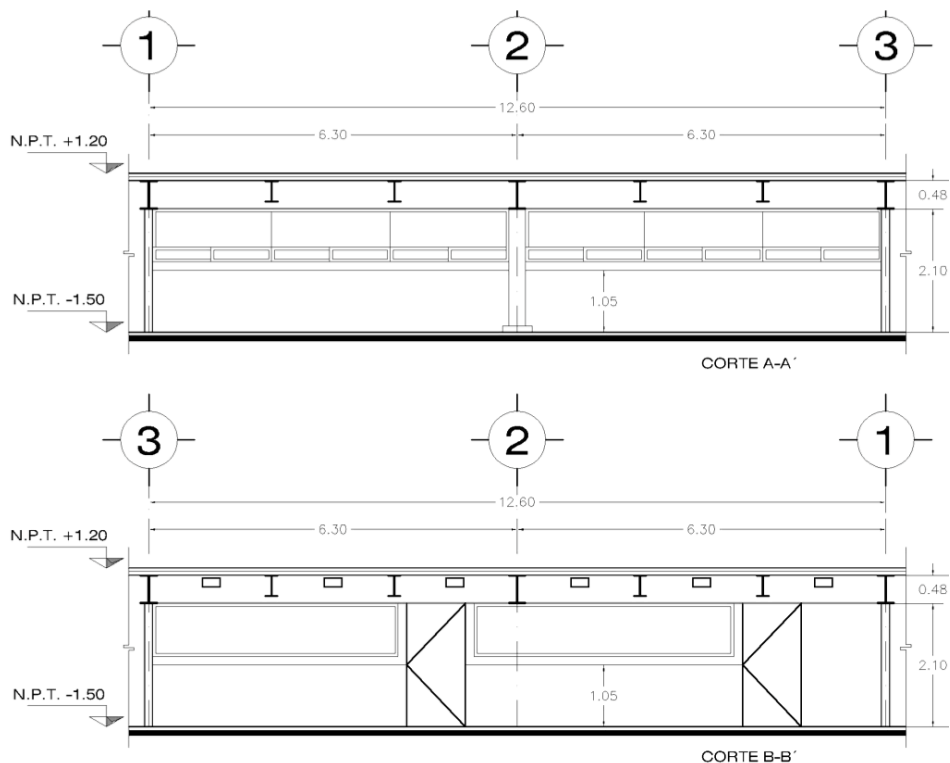


FIGURA 90 >

Caso de Estudio 3  
 Cortes longitudinales del Taller de Arquitectura Universidad Marista (S/E)



< **FIGURA 91**  
Caso de estudio 3  
Vista Norte del Taller de  
(A. Valeriano)



< **FIGURA 92**  
Caso de estudio 3  
Vista Sur del Taller de  
(A. Valeriano)

### Materiales y acabados

El acabado del tabique vidriado liso y brillante, a pesar de esas características presenta una superficie irregular y genera un textura perceptible a la vista y al tacto. Presenta los bordes redondeados en todas sus aristas, siendo mas evidentes en las aristas verticales. El muro esta pegado con mortero cuyo color es gris claro el cual tiene variaciones en el tamaño, la profundidad y el color (figura 93).

El piso es de concreto pulido color gris, sin embargo el color del piso no es uniforme llegando a tonos de blanco y en otras partes al gris oscuro. A pesar de tener un acabado pulido no presenta una superficie uniforme. No es completamente lisa ya que presenta oquedades y pequeñas grietas.

En unas partes es rugoso debido a exceso de material que no fue pulido. Tiene juntas a cada 2.5 metros de aproximadamente de 5 mm. de ancho por 5 mm. de profundidad (figuras 94).

En el fondo del Taller se encuentra una mampara que está recubierta por una tela gruesa color azul. Esta tela es suave pero la textura de su tejido es gruesa, por lo tanto se alcanza a distinguir en entramado de sus fibras. Por debajo de la tela y cubriendo el material base que son hojas de madera contrachapada, hay una capa de un material suave de poliuretano. Este material hace que la superficie no sea completamente rígida y lisa (figura 95).

**FIGURA 93 >**

Caso de Estudio 3  
Acabado No. 1  
Tabique vidriado

.....



**FIGURA 94 >**

Caso de Estudio 3  
Acabado No. 2  
Piso de concreto pulido

.....



**FIGURA 95 >**

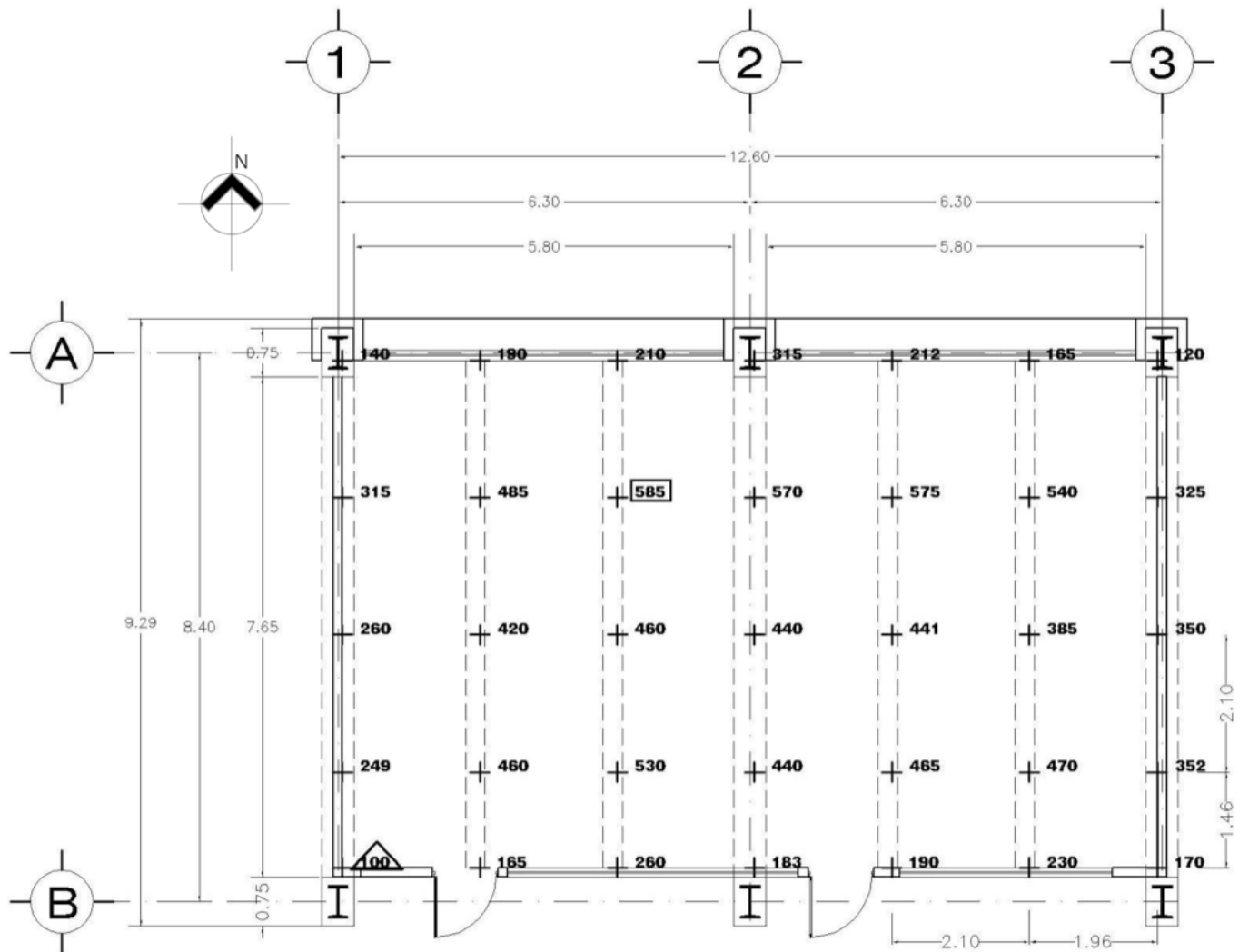
Caso de Estudio 3  
Acabado No. 3  
Tela

.....



## Estudio preliminar

De forma paralela a las actividades de levantamiento del lugar se tomaron algunas mediciones en el espacio (figura 96) para conocer las condiciones de iluminación de forma general. Se debe aclarar que estas mediciones fueron realizadas con un fotómetro manual, lo que deja un margen de error debido a que los registros no se tomaron de forma simultánea en el espacio. A pesar de esto se puede observar que los niveles de iluminación están por debajo de los recomendados.



**FIGURA 96.** Planta del Taller de Arquitectura Universidad Marista con valores de iluminancia (lux).

### Análisis mediante Fotografías e Imágenes HDR

Con el objetivo de obtener la mayor cantidad de información sobre las condiciones de iluminación se hicieron análisis a partir de fotografías digitales e imágenes HDR generadas a partir de estas últimas. Se tomaron una serie de fotografías (55) con distintos niveles de exposición. Se controlaron algunas variables como la apertura de las persianas que tienen las ventanas por ambos lados del taller.

A partir de una primera serie de fotografías y mediciones hechas de forma simultánea se pudo observar que el espacio presenta una distribución luminosa muy irregular. Las mesas de trabajo que están más próximas a las ventanas presentan valores por encima de los 500 lx y las mesas de la parte central tienen valores que difícilmente alcanzan los 200 lx.

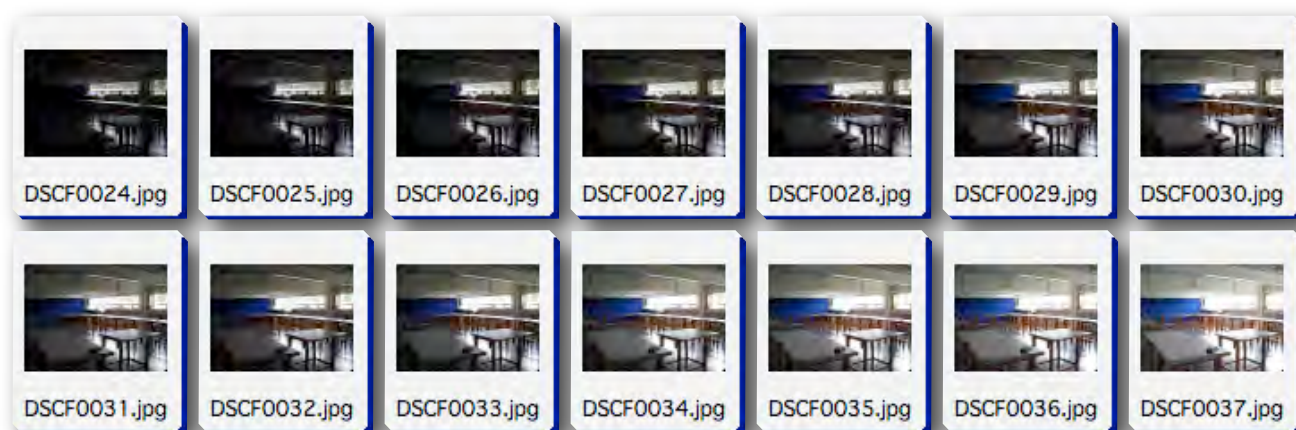


FIGURA 97. Serie de fotografías para la obtención de la imagen HDR

Con las fotografías se realizó el procesamiento y generación de la imagen HDR para hacer los análisis y obtener los valores estimados de luminancia e iluminancia. Cabe mencionar que la imagen HDR resultante puede ser procesada nuevamente por medio de los programas *Photosphere* y *Radiance Desktop*.

En el caso del primero como ya se ha mencionado se obtienen imágenes en escala de colores que representan los valores de luminancia. En el caso de *Radiance Desktop*, además de hacer el mismo procesamiento de luminancia, es posible obtener imágenes en las que se presentan los mismos valores pero mediante una representación diferentes. Esto lo hace por medio de líneas o contornos que establecen valores ya sea de luminancia o iluminancia, como la figura 98 que se muestra a continuación.



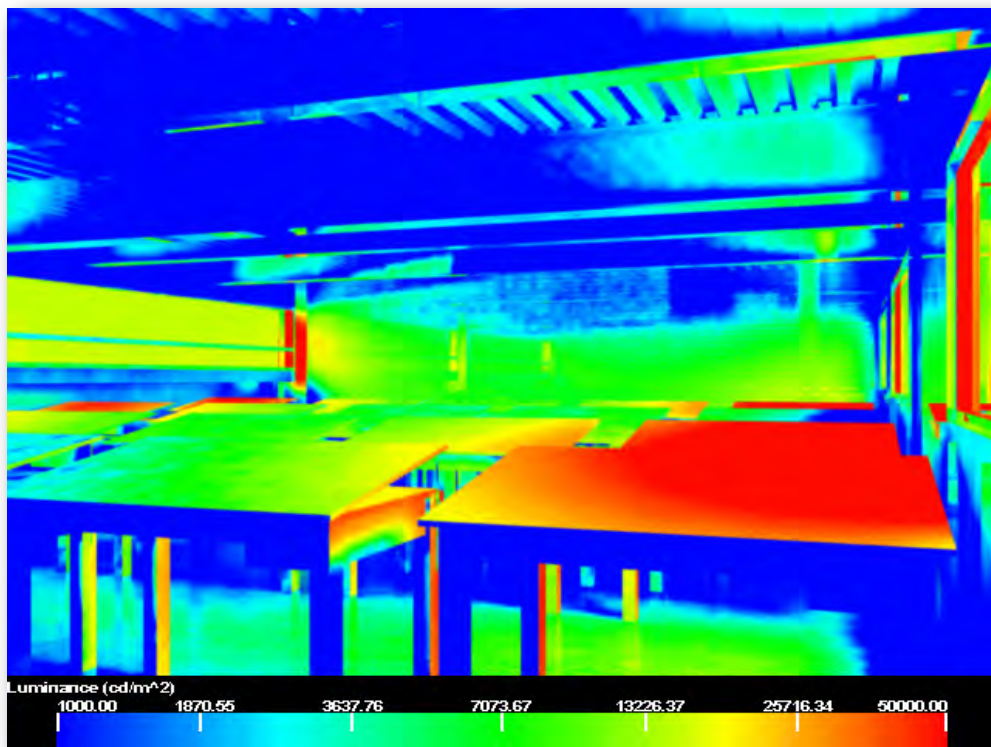
< **FIGURA 98**  
 Caso de estudio 3  
 Taller de arquitectura en  
 Imagen HDR con curvas de  
 iluminancia y sus valores  
 correspondientes.

### Análisis mediante Modelo 3D

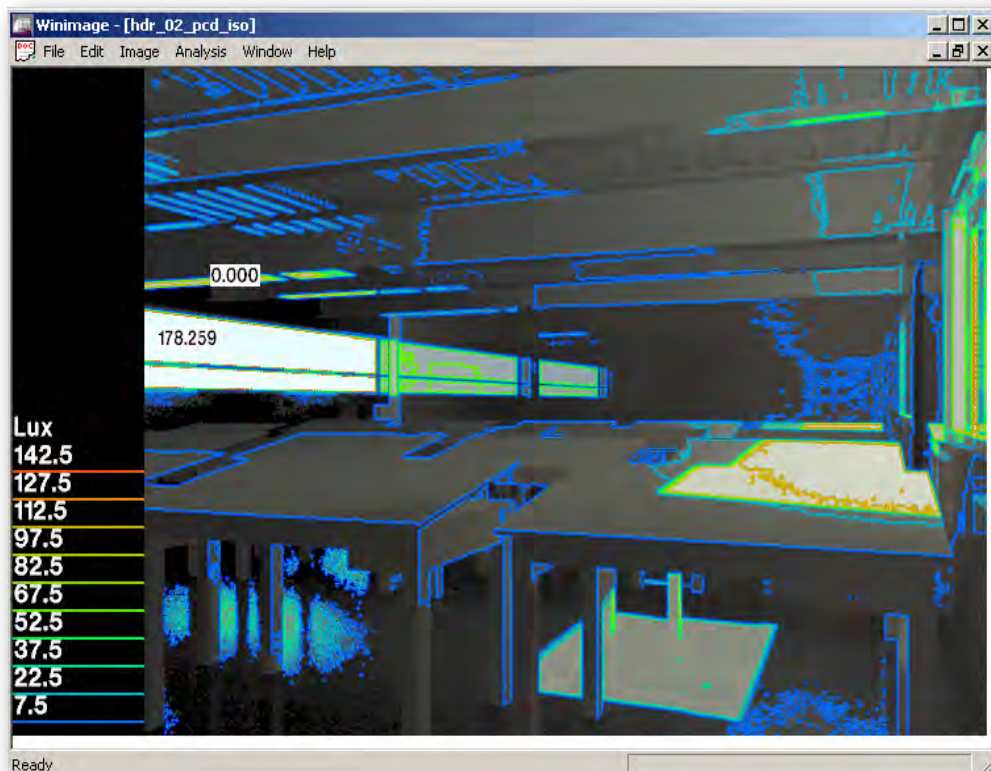
Para este caso de estudio también se construyó el modelo tridimensional para generar imágenes HDR a partir de los renders generados por el programa 3ds max. Uno de los objetivos de este ejercicio es simular de la forma más precisa posible, las condiciones físicas del lugar. Por ello se puso especial atención en las características de los materiales utilizados, ya que como se mencionó anteriormente, de estos depende en gran medida la precisión de la simulación y por lo tanto la validez de los resultados. En otras palabras, se busca que por medio de la simulación por computadora se tenga información válida desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo.

Como se puede ver en la figura 99, el programa 3ds Max genera imágenes en las cuales se pueden hacer estudios de la distribución luminosa bajo diferentes condiciones. La gran ventaja de utilizar esta metodología es que permite hacer los análisis manipulando las variables como los materiales, la posición del sol y en general las condiciones de iluminación.

Una vez que se generan los renders, es posible hacer un segundo procesamiento de la imagen por medio del programa Radiance Desktop, con la cual se generan imágenes como la Figura 100, en la cual a partir del modelo 3d se pueden obtener los contornos con sus escala de valores. Es así que se puede hacer una comparación de la información generada a partir de una serie de fotografías y el modelo 3d.



**FIGURA 99 >**  
Caso de Estudio 3  
Render con distribución  
luminosa y valores de  
luminancia.



**FIGURA 100 >**  
Caso de Estudio 3  
Render con contornos de  
iluminancia

En esta imagen es posible observar el fenómeno que se presenta en este caso de estudio, que consiste en que la superficie de las mesas de trabajo actúa como un reflector de la luz, permitiendo que la iluminación se aproveche de mejor manera al centro del espacio. También se puede apreciar el efecto que tiene la superficie de las mesas de trabajo al reflejar la luz sobre el plafón del espacio. De la misma forma es posible observar que los materiales juegan un papel muy importante en el comportamiento del espacio,. En este caso el piso presenta valores muy altos debido a que por su propiedades de reflexión actual como un espejo y refleja una gran cantidad de luz.

A pesar de esta situación también se puede apreciar que las mesas que están al centro del taller no se presentan los mismos niveles de iluminación. Esto se debe principalmente a la profundidad que tiene el espacio con relación a la altura de las ventanas. Con esta imagen es posible obtener información que a simple vista no es posible detectar y que puede ser utilizada para fines de modificaciones a las condiciones actuales del espacio. En este caso en particular se puede apreciar que mediante una modificación al acomodo del las mesas de trabajo, sería posible lograr condiciones de iluminación optimas en la mayor parte del espacio. Otros aspectos como el reflejo excesivo que se produce en el piso y el deslumbramiento de las ventanas, pueden ser tomados en cuenta para posibles adecuaciones y mejoras en las condiciones lumínicas del espacio.

Al observar las imágenes generadas por medio del programa 3ds max es posible observar el mismo comportamiento lumínico que se observa en las imágenes HDR. En ambos casos es muy clara la presencia de zonas con altos niveles de luminancia. Estas zonas están ubicadas junto a las ventanas en ambos lados del salón, aunque estas áreas pueda parecer en un principio, las mejor iluminadas, gracias a este análisis es posible observar que se pueden presentar reflejos excesivos y que pueden ser molestos. Todo esto se ve reflejado en el grado de satisfacción de los usuarios con las condiciones lumínicas y por otro lado son un impedimento para desarrollar correctamente las tareas visuales que se desarrollan en el taller.

#### Evaluación Post-ocupacional

Como se mencionó anteriormente, gran parte de los estudios que evalúan el grado de satisfacción de los usuarios con las condiciones de iluminación de un espacio, únicamente se concentran en la cantidad de luz y dejan de lado muchas otras variables que pueden resultar mas significativas y que afectan la forma en que los usuarios perciben el espacio.

A partir de esta idea se estableció el siguiente objetivo general de la evaluación post-ocupacional:

***Conocer el grado de satisfacción que tienen los estudiantes con las condiciones de luz natural del salón de clases y la forma en esta influye en sus actitudes respecto al espacio.***

y los siguientes objetivos específicos:



- Conocer la opinión que tienen los estudiantes sobre las condiciones de iluminación de su salón de clases y de forma paralela, la opinión sobre otras variables espaciales.
- Evaluar las preferencias de los usuarios en aspectos de iluminación y compararlas con otras variables físicas.

### Estrategia

Para cumplir con estos objetivos y evaluar las condiciones de iluminación, así como el grado de satisfacción se elaboró un cuestionario el cual consta 22 de reactivos en los que el usuario evalúa por medio de una escala de valoración, distintos aspectos del espacio, entre ellos la iluminación natural. Todo lo anterior con el objetivo de conocer su satisfacción y el nivel de confort que se tiene en el interior del salón. La primera parte del cuestionario evalúa el grado de satisfacción del usuario respecto a su salón de clases en aspectos generales. Con esto se busca conocer si el espacio en general, cumple con sus expectativas de calidad ambiental y confort. Esta información resulta importante ya que al hacer la comparación del nivel de satisfacción general con el nivel de satisfacción de la luz natural, se puede relacionar esta última variable con la satisfacción "global" y conocer si la luz natural es una variable que influye en la percepción del usuario.

Esta información es relevante debido a que se puede dar el caso que los usuarios no estén nada satisfechos con las condiciones espaciales en general de salón de clases y por lo tanto la mejora de una sola variable, no sea suficiente para mejorar la percepción general en los usuarios. Para hacer este análisis en primer lugar se pidió que escogieran 3 de 16 cualidades del espacio en orden de importancia, que toman en cuenta para determinar que un salón de clases es un espacio agradable para trabajar. En segundo lugar se pidió que las 16 cualidades espaciales fueran evaluados mediante una escala de valores para saber el grado de satisfacción con cada una de ellas. Estas cualidades se enlistan a continuación:

- Iluminación
- Nivel de ruido
- Olores
- Ventilación
- Temperatura
- Tamaño de las ventanas
- Privacidad
- Amplitud
- Vistas
- Mobiliario
- Decoración
- Acabados
- Funcionalidad
- Flexibilidad
- Limpieza
- El ambiente en general

La segunda parte del cuestionario se concentra en la evaluación de las condiciones de iluminación dentro del salón de clases. Mediante 18 reactivos de escala se evalúa la satisfacción de los usuarios en tres diferentes condiciones de trabajo. Se busca conocer a su vez las actitudes que tendrían en el espacio, es decir, si ante determinadas condiciones de iluminación los usuarios realizarían cambios, y de ser así, qué tipo de cambios realizarían. Otro aspecto que se evalúa en esta segunda parte del instrumento es la posible influencia que tienen las condiciones de iluminación que percibe el usuario en su forma de trabajar dentro del salón de clases. Por último se busca conocer la forma en que afectan a los usuarios los efectos nocivos de la luz (reflejos y brillantez).

#### Metodología y descripción de la muestra

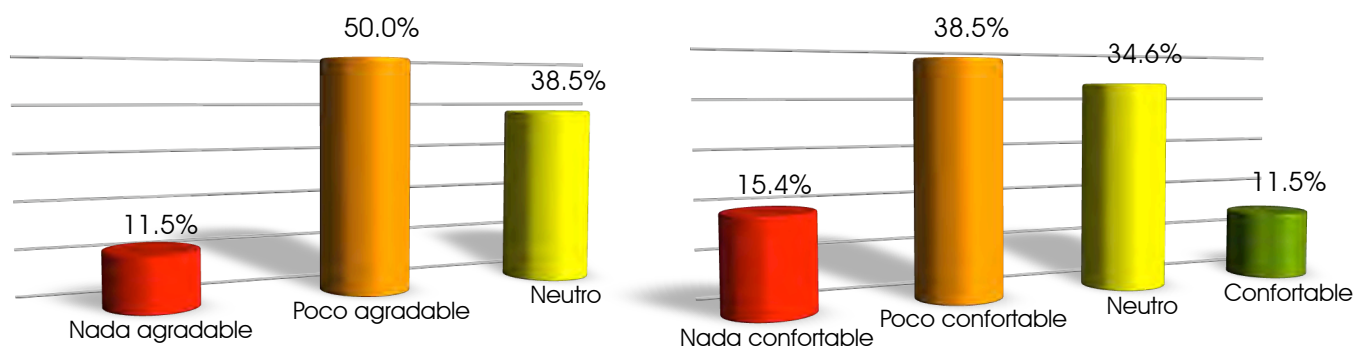
Este estudio fue principalmente de tipo descriptivo debido a que en primera instancia mide y reporta el nivel de satisfacción de los alumnos en los 16 aspectos que se plantean así como sus preferencias espaciales y nivel de confort. De forma similar se presentan los resultados de la evaluación de las condiciones lumínicas del espacio. El estudio es también de tipo correlacional porque busca responder a la pregunta planteada sobre la relación entre la luz natural, la satisfacción de los usuarios y su nivel de confort, además de cuantificar esta relación.

El estudio se llevó a cabo con 26 alumnos de los semestres 4º y 6º de la licenciatura en Arquitectura de la Universidad Marista campus Ciudad de México. De los cuales 10 fueron del sexo femenino y 16 del sexo masculino. En este caso la muestra se limitó a estos alumnos debido a que en los primeros semestres, los alumnos aun no están familiarizados con los conceptos de espacialidad, confort y funcionalidad, por lo cual, algunas de las preguntas resultan confusas o no son comprensibles. Por otro lado los alumnos de semestres superiores (8º y 10º) ya han cursado materias en las cuales se hace énfasis en la importancia que tiene el uso de la luz como medio de ahorro de energía y las condiciones favorables que propicia su uso adecuado, por lo tanto, se podría generar un sesgo en los resultados debido al conocimiento previo de los aspectos evaluados en el cuestionario.

El instrumento de medición compuesto por 22 reactivos ([Anexo 6.3](#)) cuenta en primer con una sección en donde se vacía la información referente a las condiciones en las cuales se aplicó el instrumento, como fecha, hora, la clave o folio, sexo del estudiante, las condiciones del espacio en cuanto a la posición de persianas o cortinas. En esta parte también hay un plano del salón de clases para ubicar la posición del usuario. Los primeros 5 reactivos buscan determinar el nivel de satisfacción y confort del usuario con el espacio en general. Los reactivos del número 6 al 22 evalúan la satisfacción con respecto a las condiciones de iluminación. El instrumento se aplicó durante el mes de Mayo de 2010 bajo condiciones de cielo despejado, esto se menciona debido a que estas condiciones afectan de forma directa la iluminación del espacio evaluado. Cada cuestionario se entregó al usuario y en el momento se anotó el número de folio y además se registró la ubicación en el plano. Una vez que se aplicaron los instrumentos los resultados fueron capturados y analizados con la ayuda del programa estadístico SPSS versión 17. Estos resultados fueron agrupados en dos grandes categorías: en primer lugar, la satisfacción y confort del usuario con el espacio en general y en segundo lugar, la satisfacción del usuario con las condiciones de iluminación.

### Resultados y discusión del estudio post-ocupacional

En primer lugar se presentan los resultados del nivel de satisfacción general del espacio en donde se puede ver mediante la gráfica en la figura 101 que el 11.5% consideran que el salón no es nada agradable, 50% de los usuarios considera el espacio poco agradable y el 38.5% esta en una posición neutral. Esto da una suma de 61.5% de evaluación negativa del espacio. Por otro lado encontramos resultados muy similares cuando evalúan las condiciones de confort (figura 102). La tendencia negativa es predominante con un 15.4% que manifiesta que el espacio es nada confortable aunado a un 38.5% que dicen que es poco confortable. Solo el 11.5% afirmó estar confortable el 34.6% restante esta en una posición neutral. Con lo anterior se puede afirmar que la impresión general del espacio es negativa, ya que la mayoría de los usuarios están en un espacio al que consideran no confortable y por lo tanto les resulta desagradable en términos generales. Esta información resulta significativa debido a que tales condiciones de inconformidad reflejan un posible rechazo al espacio, mismo que se ve reflejado en las respuestas relacionadas con las condiciones de iluminación.



**FIGURA 101.** (Izquierda) Gráfica de la impresión general del espacio.  
**FIGURA 102.** (Derecha) Gráfica de condiciones de confort del espacio.

Al estudiar los resultados sobre los tres aspectos más importantes que consideran los usuarios para calificar a un espacio de agradable en primer lugar, se encuentra la temperatura, en segundo lugar; la iluminación y en tercer lugar esta la funcionalidad. En la figura 103 se puede observar este resultado, en donde destaca que la funcionalidad es un aspecto importante únicamente en la primera opción. Caso contrario a lo que sucede con la temperatura y la iluminación que son considerado en las tres opciones.

Por último en la primera parte del estudio, en donde se mide la satisfacción de los 16 aspectos a evaluar se puede observar en la gráfica de la figura 104 que los alumnos, en promedio, están más satisfechos con las condiciones de flexibilidad que permite el salón de clases (3.6 p. promedio), en segundo lugar encontramos a la amplitud del salón (3.5 p. promedio), en tercer lugar están las condiciones de temperatura junto con la sensación de privacidad que brinda el espacio (3.1 y 3.0 p. promedio respectivamente). La iluminación se encuentra en cuarto lugar de calificación (2.3 p. promedio). Por último el aspecto peor evaluado fueron los acabados con los que cuenta el salón de clases al registrar una evaluación de 1.5 puntos en promedio.

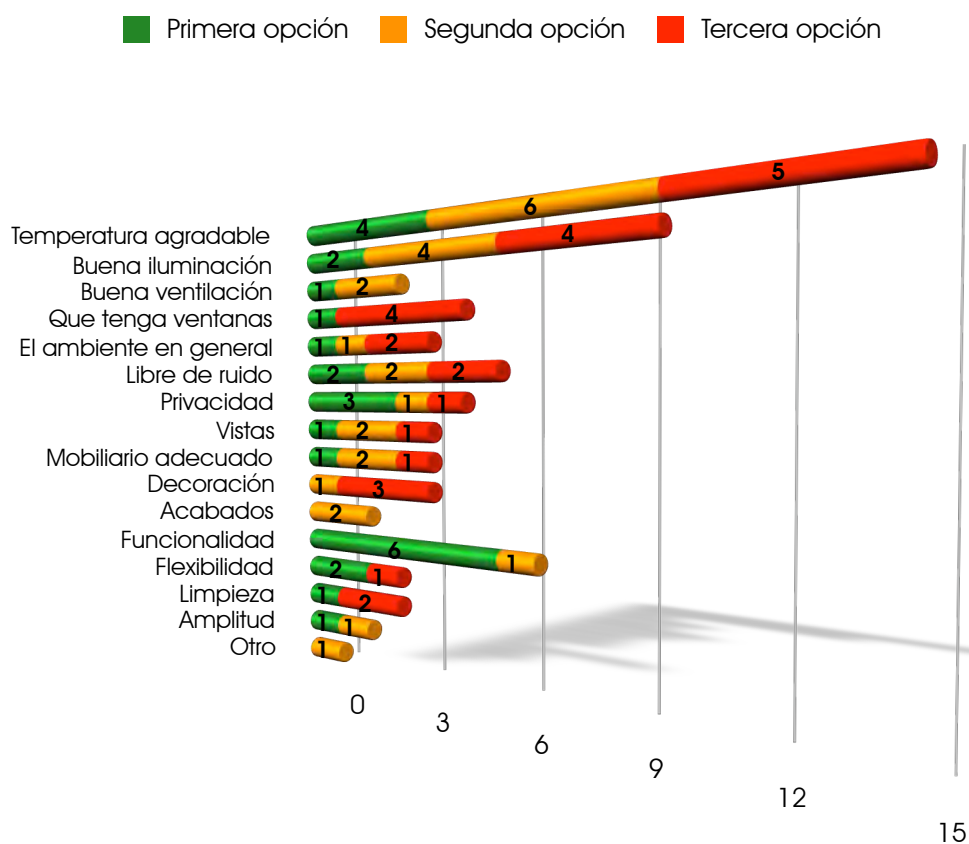


FIGURA 103. Gráfica de los aspectos para considerar un espacio agradable.

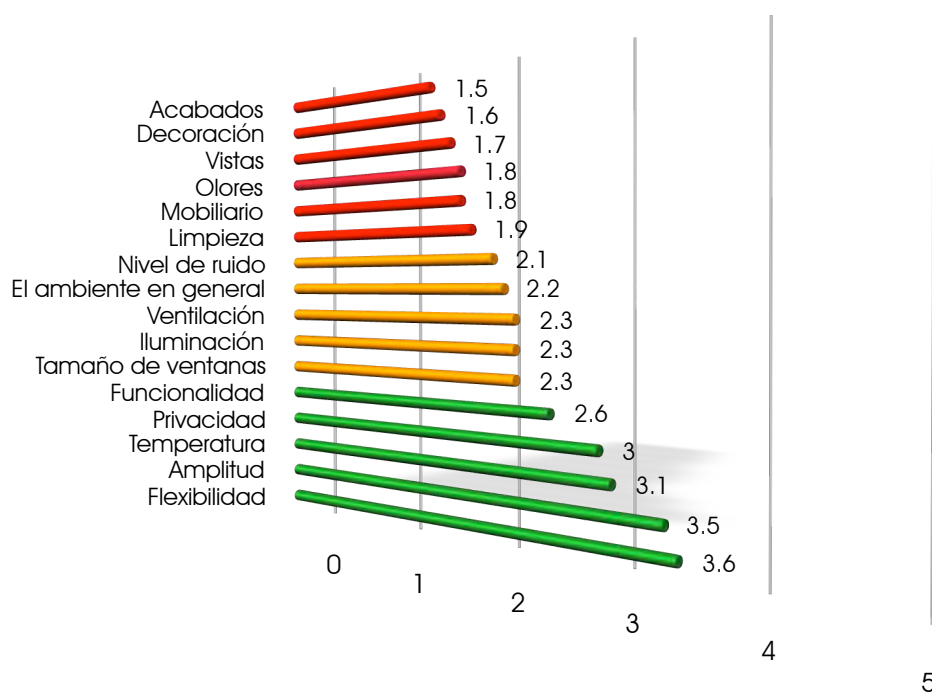
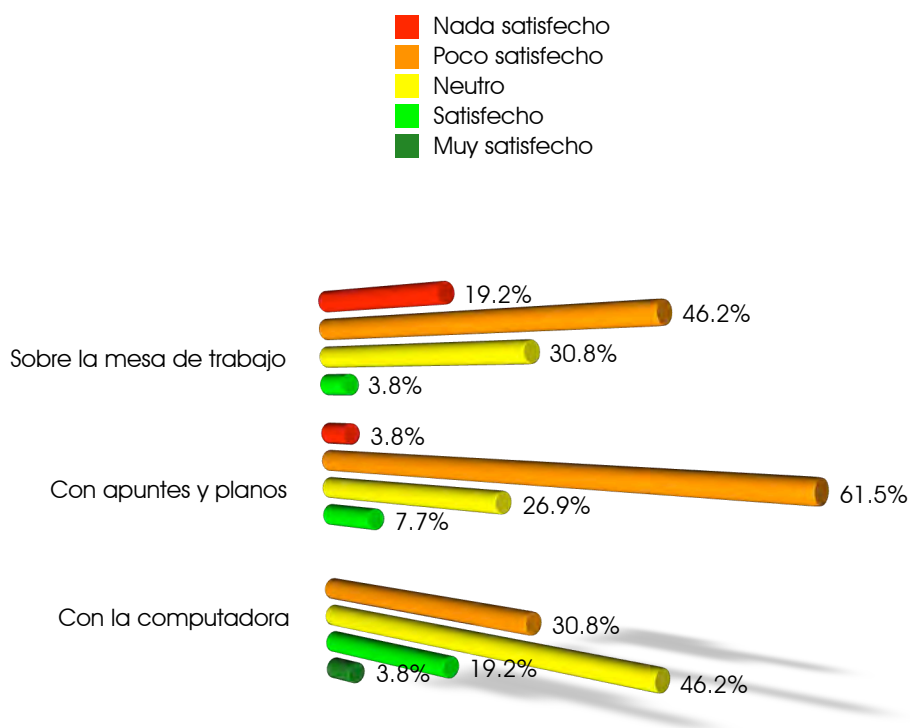
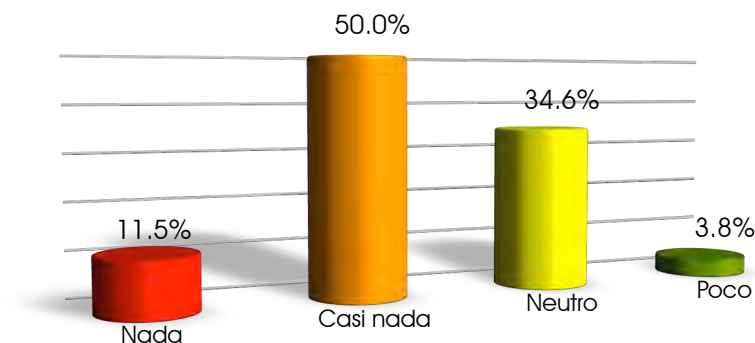


FIGURA 104. Gráfica de los niveles de satisfacción para cada uno de los puntos evaluados.

Al analizar la segunda parte que corresponde al tema de la iluminación y la relación con el nivel de satisfacción de los usuarios se encontró que para las tres situaciones distintas (mesa de trabajo, apuntes y trabajo con computadora) la tendencia es negativa manifestaron estar poco o nada satisfechos con las condiciones de iluminación (figura 105). Por otro lado es importante mencionar que la mayoría de los alumnos (61.5%) coinciden en que las malas condiciones de iluminación no les facilitan el trabajo que desarrollan en el salón de clases. (figura 106).

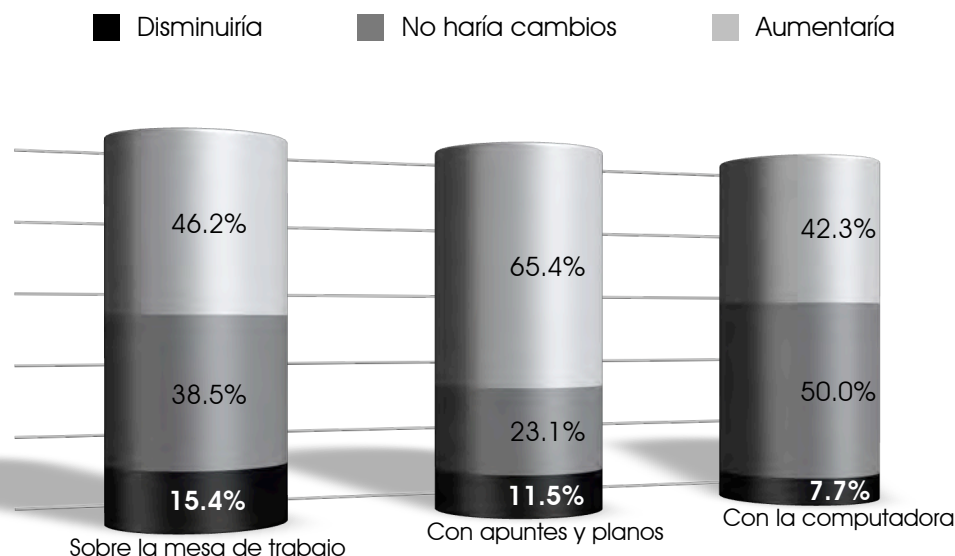


**FIGURA 105 >**  
Caso de Estudio 3  
Gráfica de los niveles de satisfacción de iluminación



**FIGURA 106 >**  
Caso de Estudio 3  
Gráfica de opinión. Si las condiciones de iluminación facilitan las condiciones de trabajo.

Al momento de preguntar si realizarían cambios para modificar las condiciones de iluminación presentes en el espacio, tanto en el primer caso (sobre la mesa de trabajo) y el segundo (trabajo con apuntes y planos) la mayoría estuvo de acuerdo en aumentar las condiciones de iluminación para mejorar su forma de trabajo. Solo en el tercer caso (trabajo con la computadora) el 50% de los alumnos manifestó que no harían cambios en los niveles de iluminación (figura. 107).



**< FIGURA 107**  
Caso de estudio 3  
Gráfica de modificaciones a las condiciones del nivel de iluminación bajo tres condiciones distintas de trabajo.

### Correlaciones entre variables

De forma general estos resultados muestran que existe una opinión negativa sobre el espacio donde los alumnos desarrollan sus actividades escolares, por lo tanto, están conscientes que las modificaciones a esas condiciones de iluminación mejorarían su grado de satisfacción y confort, esto a su vez, les facilitaría la realización de sus tareas visuales. A partir de los resultados anteriores se pudo observar que era posible correlacionar las condiciones de iluminación con la satisfacción general del espacio. Es por eso que se puede establecer que:

***Al aumentar el nivel de satisfacción de los usuarios con las condiciones de iluminación mejoraría la percepción negativa que tienen los alumnos y aumentaría su nivel de satisfacción general del espacio.***

Sin embargo esta afirmación fue tomada como una hipótesis debido a que, según los resultados de la evaluación, la iluminación es uno de los aspectos medianamente importantes ya que como se mencionó con anterioridad, los resultados demostraron que existen otras variables espaciales que hacen que los alumnos estén más satisfechos en el salón de clases. Estas variables espaciales "primarias" son: la temperatura, la amplitud, privacidad y la flexibilidad del espacio.

Para corroborar esta hipótesis se realizaron análisis estadísticos de tipo paramétrico, en específico, se obtuvieron mediante el programa SPSS los coeficientes de correlación de Pearson. Este coeficiente se define como una prueba estadística para analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por intervalos o de razón, representado por el símbolo  $r$ .<sup>138</sup>

Por medio de este valor es posible correlacionar dos variables y corroborar una hipótesis del tipo: "A mayor  $X$ , mayor  $Y$ ". En este caso  $X$ =satisfacción con las condiciones de iluminación y  $Y$ =nivel de satisfacción general. En esta prueba no se considera a una como variable independiente y a la otra como dependiente debido a que no evalúa la causalidad. Este valor de correlación se calcula por medio de las puntuaciones que se obtienen de una muestra en las dos variables que se busca correlacionar. Para ello es necesario que se haga una relación entre los valores obtenidos para la variable  $X$  con los valores de la variable  $Y$ , para los mismos casos.

El coeficiente de correlación de Pearson puede variar de -1.00 a +1.00, donde los valores positivos indican una correlación directamente proporcional y valores negativos indican una correlación inversamente proporcional. Un valor de  $r=0$  significa que no existe una correlación alguna entre las variables y un valor  $r=+/-1.00$  significa que existe una correlación perfecta. Por último, cuando el valor de  $r$  se eleva al cuadrado ( $r^2$ ) se obtiene el coeficiente de determinación y el resultado indica la varianza de factores comunes. Este valor es el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra, es decir, cuánto explica o determina una variable la variación de la otra.

Además del valor de correlación  $r$ , el programa SPSS obtiene el valor de significancia de la correlación, representado por el símbolo  $s$ . Este valor indica si el coeficiente es significativo en el nivel 0.05 (95% de confianza en que la correlación sea verdadera y 5% de probabilidad de error) o, si  $s$  es menor a 0.01, el coeficiente es significativo al nivel de 0.01 (99% de confianza de que la correlación sea verdadera y 1% de probabilidad de error).

En el caso de la correlación de las variables "satisfacción con las condiciones de iluminación" y "satisfacción general" (compuesto por las 16 variables físicas del espacio) se obtuvieron los siguientes valores:

**TABLA 15 >**

Caso de Estudio 3  
Valores de correlación de Pearson, significancia y casos para las variables: "satisfacción con las condiciones de iluminación" y "satisfacción general"

Correlación de Pearson ( $r$ )	0.078
Significancia ( $s$ )	0.704
Casos ( $N$ )	26

<sup>138</sup> HERNÁNDEZ Sampieri, Roberto, et al., *Metodología de la investigación*, 4ª Ed., Mc Graw Hill, México, 2006, pp. 453.

Como lo demuestran los valores de la Tabla 15, la correlación es casi nula, por lo tanto la hipótesis planteada resulta ser igualmente nula, debido a que el coeficiente no es significativo porque 0.704 es mayor a 0.05, nivel mínimo para aceptar la hipótesis.

Siguiendo este criterio se analizaron otras relaciones de las variables de la evaluación y se correlacionaron los siguientes valores: "satisfacción con las condiciones de iluminación" y "confort percibido por los usuarios" y se obtuvieron los siguientes valores:

Correlación de Pearson ( $r$ )	0.625
Significancia ( $s$ )	0.001
Casos ( $N$ )	26

< **TABLA 16**

Caso de estudio 3  
Valores de correlación de Pearson, significancia y casos para variables "satisfacción con las condiciones de iluminación" y "confort percibido por los usuarios"

Con los valores contenidos en la tabla 16 es posible afirmar que existe una correlación positiva de media a considerable entre la satisfacción con las condiciones de iluminación y el nivel de confort percibido por los usuarios. Esta correlación es significativa debido a que el valor  $s=0.001$  que es menor del 0.01. Por último el valor de  $r^2=0.39$  lo que significa que el aumento del nivel de satisfacción con la iluminación explicaría el 39% de los casos de aumento en el nivel de confort.

A partir de este análisis de correlaciones y de los datos proporcionados por el instrumento de medición, se establece la siguiente afirmación:

***A mayor nivel de satisfacción con las condiciones de iluminación, mayor será el nivel de confort percibido por los usuarios.***

Al relacionar los resultados obtenidos en esta parte del estudio con los presentados en las Figuras 103 y 104 se puede complementar la hipótesis anterior con las siguientes reflexiones: en primer lugar se observa que según las respuestas de los alumnos, estos consideran a la temperatura como el factor más importante para considerar un espacio como agradable, entendiendo este concepto como un adjetivo que involucra la satisfacción, el confort y además cumple con las expectativas espaciales de cada individuo.

Por lo tanto, si este factor es evaluado de manera positiva, como lo fue en este estudio (valor promedio de 3.1 puntos de 5 posibles) y como se muestra en la figura 103, su aumento en el nivel de satisfacción no representa un aumento significativo en el nivel de satisfacción general. Esta situación también se presenta con los factores de funcionalidad, privacidad, amplitud y flexibilidad, cuyas calificaciones fueron positivas (arriba de 2.5 puntos en promedio).



En el caso de la iluminación (contrario al caso de la temperatura), en este estudio es considerado el segundo factor de importancia y tuvo una calificación regular (2.3 puntos promedio). Por lo tanto, como lo demuestra la correlación arriba presentada, su aumento permite a su vez incrementar el confort de los usuarios. Es prudente en este caso hacer la aclaración de que no deben confundirse los conceptos de confort con satisfacción general, debido a que este último, implica la suma de 16 las variable espaciales analizadas. El confort en este caso se entiende como un estado de bienestar global que implica factores físicos, contrario a la satisfacción que implica el cumplimiento a las preferencias individuales.

### Conclusiones del Caso de Estudio 3

Al observar los resultados se encontró que el espacio no cumple con las expectativas de los usuarios ya que la mayoría lo considera poco confortable y por lo tanto no les resulta satisfactorio trabajar en él. Como se mencionó en la introducción, el estudio trata de presentar un panorama más amplio sobre aquellas variables espaciales que satisfacen a lo alumnos poniendo énfasis en la iluminación, sin embargo como se pudo ver en el apartado referente a los resultados, existen muchas variables consideradas prioritarias y que están por encima de las condiciones de iluminación. Llama la atención que uno de los aspectos que consideran como importantes, como lo es la temperatura, muestra valores altos en los índices de satisfacción, lo que hace que las demás variables sean menospreciadas. Si se analiza, las condiciones de confort térmico son determinantes para la gran mayoría de las personas, de hecho cuando se habla de un espacio confortable, la mayoría de la gente lo asocia a condiciones térmicas favorable en los espacios.

Se puede afirmar que el objetivo general de este caso de estudio se cumplió, ya que se pudo conocer el nivel de satisfacción de los usuarios con las condiciones de iluminación y se pudo comparar con las otras 15 variables planteadas en el estudio. Lo que dejó ver que el tema de la luz, no resultó prioritario para este grupo de alumnos en particular. Sin embargo, como lo demostró la prueba estadística de correlaciones, el aumento en el nivel de satisfacción con la iluminación permitiría un aumento medianamente considerable del nivel de confort en un 39% de los usuarios. Sin embargo estos resultados no pueden ser considerados como absolutos debido a el tamaño de la población con la que se elaboró el estudio (26 personas).

Por otro lado, es muy difícil establecer que las condiciones físicas del espacio y en particular, las condiciones de iluminación, favorecerían el desempeño académico de los alumnos. Esto se debe a que el instrumento de medición no fue diseñado para correlacionar mejores condiciones de iluminación al rendimiento de los alumnos. Sin embargo, algunas respuestas de los usuarios permiten ver que están dispuestos a modificar las condiciones de iluminación, es decir, aumentarían la iluminación y por lo tanto estarían más satisfechos con las condiciones lumínicas el espacio. Ahora bien, esta afirmación no se puede hacer con respecto las condiciones de satisfacción globales debido a que existen mucho más factores que intervienen en la percepción del espacio.

Es recomendable hacer estudios similares en los que se hagan comparaciones de las condiciones de iluminación en el espacio y aplicar instrumentos equivalentes con el objetivo de recopilar la opinión de los usuarios en dos o más condiciones distintas. Pero a diferencia del estudio aquí presentado, los posteriores tendrán que llevarse a cabo con una población mayor, preferentemente mayor a 30 personas. Esto permitiría a su vez, correlacionar rendimiento y condiciones de iluminación, siempre y cuando fueran asignadas tareas específicas a resolver por parte de los alumnos.

La primera con condiciones desfavorables, como las que se presentaron en este estudio y la segunda, al manipular las condiciones del espacio y así mejorar los niveles de iluminación. Al haber detectado aquellas variables que son consideradas importantes (temperatura, funcionalidad y flexibilidad) y con las cuales están satisfechos los alumnos, estas pueden convertirse en condiciones fijas (aislarse del estudio) y ser descartadas en los instrumentos que se apliquen posteriormente y concentrarse en el tema de iluminación natural.

Aunque el estudio estuvo enfocado en el tema de la iluminación natural se pudo observar que la gran cantidad de variables físicas que interactúan en el espacio lo hacen de forma simultánea y afectan la percepción de los usuarios, igualmente de forma simultánea. A pesar de esto, si se mejoraran las condiciones de una de estas variables, esto puede contribuir a mejorar el nivel de confort, pero no contribuir a mejorar el nivel de satisfacción general con el espacio. Todo lo anterior permite concluir que la realización de este tipo de estudios y en particular, sobre las preferencias de los usuarios, son indispensables para la creación o adecuación de los espacios.

Estudios como este se pueden replicar para diferentes tareas y grupos de personas previos a la realización de algún tipo de proyecto o construcción, ya que con esta información el diseñador puede ser capaz de enfocar sus esfuerzos en satisfacer las expectativas espaciales de los usuarios. Este permitiría la generación de las condiciones espaciales que promuevan la realización de sus actividades de una manera funcional, permitiendo también la generación de emociones y actitudes positivas en las personas.

Por último, la consideración del aspecto emocional, es muchas veces menospreciado por los arquitectos, sin embargo resulta fundamental en cualquier tipo de diseño. De estas reflexiones se desprende la siguiente afirmación, la cual esta basada en la ideas de Donald A. Norman<sup>139</sup> y sus conceptos de diseño emocional:

***Espacios atractivos, funcionales, confortables y emocionalmente positivos, hacen sentir bien a las personas, esto a su vez, las hace pensar de forma más creativa. Bajo estas circunstancias, es más fácil para las personas encontrar soluciones a los problemas que se les plantean, especialmente hablando de espacios donde el aprendizaje y/o el rendimiento sean premisas del diseño.***

---

<sup>139</sup> **NORMAN, A. Donald**, *Emotional design: why we love (or hate) everyday things*, Basic books, Nueva York, 2004, pp. 19.

## REFERENCIAS - CAPÍTULO 3

---

<sup>124</sup> **BODART, M., et al.**, *A guide for Building Daylight Scale Models*, Architectural Science Review, 2007, vol. 50(1), pp. 31-36.

<sup>125</sup> **CHENG, C.L., et al.**, *A mini-scale modeling approach to natural daylight utilization in building design*, Building and Environment, 2007, vol. 42, pp. 372-384.

<sup>126</sup> **LONGMORE, J.**, *BRS, Daylight Protractors*, Building Research Establishment, Department of the Environment, Inglaterra, 1967.

<sup>127</sup> **GHISI, E., TINKER J.A.**, *op. cit.*, pp. 51-61.

<sup>128</sup> **BRE, Building Research Establishment**, *Digest 42: Estimating daylight in buildings II*, BRE, Inglaterra, 1969.

<sup>129</sup> **BODART, M., et al.**, *Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools*. Building and Environment, 2008, vol. 43, pp. 2046-2058.

<sup>130</sup> **CABROLIER Sanhueza, Henry J.A.**, *Iluminación natural en la arquitectura: dos estudios de caso para la Ciudad de México*. Tesis de maestría en Arquitectura, UNAM, México, 2010.

<sup>131</sup> **GUTIÉRREZ Mandujano, Lourdes, María de**, *Aprovechamiento eficiente de la luz diurna en las aulas tipo CAPFCE de la universidad de Colima*, Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad de Colima, México, 2005.

<sup>132</sup> **KÖSTER Helmut.**, *Dynamic daylighting architecture: basic, systems, projects*, Birkhäuser, Berlin, Alemania, 2004.

<sup>133</sup> **YENER, A.K.**, *Daylight analysis in Classrooms with Solar Control*, Architectural Science Review, 2002, vol. 45, pp. 311-316.

<sup>134</sup> **HO, Ming-Chin, et al.**, *Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms*, Energy & Buildings, 2008, vol. 40(10), pp. 1844-1855.

<sup>135</sup> **KRUGER, E. ZANNIN, T.**, *Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms*, Building and Environment, 2004, vol. 39, pp. 1055-1063.

<sup>136</sup> **WANG N. , BOUBEKRI, M.** *op. cit.*, 2010.

<sup>137</sup> **WINTERBOTTOM, M., WILKINS, A.**, *Lighting and discomfort in the classroom*, Journal of Environmental Psychology, 2009, vol. 29(1), pp. 63-75.

<sup>138</sup> **HERNÁNDEZ Sampieri, Roberto, et al.**, *Metodología de la investigación*, 4ª Ed., Mc Graw Hill, México, 2006, pp. 453.

<sup>139</sup> **NORMAN, A. Donald**, *Emotional design: why we love (or hate) everyday things*, Basic books, Nueva York, 2004, pp. 19.



CONCLUSIONES Y FUTURAS  
LÍNEAS DE INVESTIGACION

4

#### 4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La arquitectura hoy en día esta pasando por un proceso de transformación en la cual se incorporan una gran cantidad de conocimientos que hace 50 años no se consideraban en la creación de objetos arquitectónicos. Las herramientas, producto de los avances en la investigación y la tecnología, hacen posible que los arquitectos puedan abordar los proyectos de una forma más objetiva y permiten que las decisiones que se tomen se alejen de criterios subjetivos. Sin embargo la falta de conocimiento sobre estas técnicas proyectuales y herramientas tecnológicas impiden su utilización de forma correcta. El resultado de esto se ve reflejado en el desempeño de las edificaciones donde se manifiestan estos errores en la carencia de funcionalidad. Los errores de los arquitectos serían imperceptibles siempre y cuando no existan usuarios que los detecten y a su vez los manifiesten en su salud física y psicológica.

Como se presentó en este documento, la salud de los usuarios es afectada por las condiciones en las cuales desarrollan sus actividades cotidianas dentro de los espacios. Es por ello que el estudio de las condiciones físicas que interactúan dentro de la envolvente arquitectónica es un requisito indispensable para poder garantizar que cualquier espacio cumpla con los requerimientos mínimos de habitabilidad. Todos los fenómenos físicos que se originan en la naturaleza influyen sobre las edificaciones y los usuarios, por lo tanto pueden y deben ser objeto de análisis por parte del arquitecto.

Aunque en esta investigación solo se estudió el fenómeno de la luz natural, es posible afirmar que la influencia que tiene sobre las personas es enorme. Tan enorme como el cúmulo de información que hay disponible sobre el tema y que difícilmente es abordada por los arquitectos y los estudiantes de arquitectura. Precisamente, parte de la intención de esta investigación es mostrar el volumen de información que se ha desarrollado en poco mas de 50 años de investigaciones en todo el mundo y en nuestro país. Por este motivo resulta ilógico que en la Ciudad de México el tema de la luz natural sea abordado con tan poco interés por parte de la comunidad de profesionales dedicados a la construcción. Esto se ve reflejado en el ya comentado Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, en el cual, el tema de la iluminación natural es regulado únicamente por un par de artículos.

Esto es el resultado de la falta de conexión entre la investigación y la aplicación, entre la academia y el mundo profesional; las aulas, laboratorios y bibliotecas, con las edificaciones. Este documento es solo un pequeño esfuerzo de acercar el tema de la iluminación natural y mostrar aquellas herramientas que puede utilizar el arquitecto para no incurrir en errores mayores y omisiones.

Como quedó de manifiesto en esta investigación, hasta las herramientas mas sencillas en su metodología y aplicación, involucran cierto grado de preparación por parte del arquitecto. El problema radica en la confianza excesiva que se tiene en la experiencia y la intuición, por encima del conocimiento basado en hechos que proporciona la investigación científica. Todo esto nos lleva a reflexionar sobre el papel de las escuelas y facultades de arquitectura en donde se forman los arquitectos, quienes deben recibir el entrenamiento para afrontar los proyectos arquitectónicos con una visión holística y multidisciplinaria.

Para lograr lo anterior se tendría que cambiar la forma de enseñar y aprender arquitectura o en su caso, como lo mencionó el Mtro. L. Zeevaert:<sup>140</sup>

**"[...] es esencial desarrollar habilidades de diseño especiales. Esto requerirá de la reexaminación de los sistemas tradicionales de enseñanza y de los cursos técnicos"**

Como se mostró al analizar las herramientas de cálculo de iluminación natural, estas pueden ser aplicadas en los proyectos arquitectónicos como auxiliares al proceso de diseño, lo que permitirá que el arquitecto fundamente sus decisiones en una metodología de análisis objetiva. Esto a su vez, le da la posibilidad de confrontar sus propias soluciones y optar por la que satisfaga las premisas de diseño. Sin embargo, para llegar a esta etapa, el arquitecto deberá haber contemplado la mayor cantidad de variables posibles, por lo tanto la complejidad de los estudios aumenta de forma directamente proporcional al número de variables que se incorporen en los proyectos. Esto no representa un obstáculo a la aplicación de los métodos de cálculo, únicamente es el reflejo de la complejidad que tiene la resolución de cualquier proyecto como para basarse en la experiencia, la intuición y el sentido común.

Es posible afirmar que día con día aparecen en todo el mundo nuevas herramientas que contribuyen al trabajo de los profesionistas. En el caso de la iluminación natural en la arquitectura se ha dado de forma constante y, conforme el avance en el desarrollo tecnológico de los instrumentos de medición, dará pie a un mayor número de investigaciones. La apuesta de la comunidad científica que estudia el comportamiento de la luz natural y su relación con las edificaciones y las personas, esta en la utilización de programas de cómputo. De hecho hoy en día todos los esfuerzos a nivel mundial están enfocados en el desarrollo de nuevos algoritmos que serán incorporados a los programas, con el objetivo de hacer mucho más precisas las simulaciones y los cálculos. Esto permitiría que los resultados que se obtienen por medio de las computadoras se acerquen lo más posible a lo que sucede en la naturaleza.

En nuestro país esta situación más allá de ser una gran ventaja, representa un enorme reto por dos razones principales. En primer lugar se necesita del conocimiento para utilizar estas herramientas y por otro lado es necesario contar con toda la información referente al comportamiento del fenómeno físico que se esta estudiando. Como se mencionó al principio de este documento, en México hay una enorme carencia de información sobre las características básicas de la luz natural, su comportamiento y disponibilidad. Esto se convierte un obstáculo para la utilización de los nuevos programas de cómputo que existen hoy en día así como los que se generen en un futuro. Mientras no sea posible contar con esta información difícilmente podremos beneficiarnos de los avances en materia de desarrollo de programas de cómputo que posibilitan y agilizan los estudios de iluminación natural en las edificaciones. Esta circunstancia le da un mayor valor a las herramientas que no dependen de las computadoras para poder utilizarse, por lo tanto, los métodos de cálculo manuales como los presentados en esta investigación, pueden ser una gran apoyo en este sentido, ya que toman como punto de partida las variables elementales de los programas de cómputo.

---

<sup>140</sup> ZEEVAERT Alcántara, Leonardo B., *Passive approaches to solar architectural design for Mexico*, Tesis de maestría en Artes, Facultad de Estudios de Arquitectura, Departamento de Ciencias de la Construcción, Universidad de Sheffield, Inglaterra, 1982, pp. 136.

De forma concreta, esta investigación dio la pauta para obtener las siguientes conclusiones:

1. La salud de los usuarios puede ser influida tanto de forma positiva como negativa mediante la presencia de la luz natural dentro o fuera de los espacios arquitectónicos. Esto pone de manifiesto la importancia de considerar este aspecto como una parte fundamental de cualquier diseño urbano-arquitectónico como un proceso integral en donde la luz contribuya al desarrollo de las actividades de los usuarios. De no ser así, es posible que las condiciones en las cuales se desarrollan las actividades de las personas no propicien el rendimiento óptimo al disminuir las capacidades visuales o que se ponga en riesgo la salud física y mental de las personas; en los casos más extremos.

2. A pesar de que la luz natural juega un papel muy importante en el estado físico y mental del ser humano, es posible que este no sea considerado con la misma importancia por parte de los usuarios. Puede darse el caso en que otros factores físicos presentes dentro de los espacios arquitectónicos sean percibidos con mayor fuerza y por lo tanto la luz natural pase a un segundo plano. Desde el punto de vista del diseño de iluminación, se puede afirmar que un buen diseño es aquel en el que las personas pueden desarrollar sus actividades cotidianas sin percibir por un lado, la carencia de luz y por otro, su presencia excesiva y los efectos nocivos de estas dos circunstancias. Los estudios post-ocupacionales permiten conocer de una forma cuantitativa la manera en que los usuarios perciben la calidad de un espacio desde un punto de vista subjetivo. Estos estudios permiten al diseñador ser capaz de conocer la respuesta al ambiente así como las preferencias visuales de los usuarios. Con esta información de carácter subjetivo, aunada a los estudios objetivos que proporcionan los métodos de cálculo, el arquitecto puede ser capaz de encontrar mejores soluciones a los espacios arquitectónicos hablando en términos de iluminación natural.

3. Los métodos de cálculo analizados pueden ser utilizados como una herramienta auxiliar al proceso de diseño de los espacios arquitectónicos debido a que proporcionan resultados que pueden ser analizados de forma objetiva y pueden ser a su vez, comparados entre ellos. Es importante mencionar que estas herramientas fueron desarrolladas en otras regiones del mundo distintas a la Ciudad de México, sin embargo, todas ellas toman como base principios elementales que existen en cualquier parte del mundo. Estas son las llamadas variables geométricas y arquitectónicas. Las variables climáticas cambian dependiendo de la región, pero esto no es un impedimento para utilizar los métodos de cálculo como herramientas para generar una amplia gama de posibles soluciones. Para esto es importante considerar que existen diferencias entre los resultados que se presentan en la realidad y los resultados de los cálculos, generados precisamente por las variables climáticas del sitio.

4. Concretamente el método del Factor de luz de día presenta diferencias al compararlo con los datos generados por mediciones directas. A pesar de esto, no es motivo para descartarlo como uno de muchos parámetros a considerar en el diseño de iluminación. Es difícil que un modelo pueda simular de forma precisa un fenómeno natural y más aun cuando el fenómeno esta tan cambiante debido a su naturaleza como lo es la luz. A pesar de todo lo anterior, el Método de factor de luz de día puede ser utilizado como un parámetro en el diseño en las edificaciones. Para aumentar su confiabilidad y validez es necesario ajustar los algoritmos basados en las condiciones en las que se presenta el fenómeno de la luz natural en la Ciudad de México. Al establecer el origen de las diferencias entre los algoritmos y la realidad, es posible detectar la variables que ejercen mayor influencia sobre los resultados. Muestra de ello es el estudio de la eficacia luminosa presentado en el [Capítulo 1.9](#) en el cual, un modelo desarrollado con datos de otras latitudes puede ser ajustado a las condiciones climáticas de la Ciudad de México.

5. No se puede negar la validez y confiabilidad de los modelos únicamente porque fueron desarrollados en otra parte del mundo, es necesario llevar a cabo estudios como los que se presentan en esta investigación porque de otra forma se cometería el error de emitir un juicio basado en el sentido común y la intuición sin tener bases científicas sólidas. Por otro lado sin estos ejercicios, no sería posible determinar el grado de validez y confiabilidad de las herramientas que se están desarrollando no solo en México sino en todo el mundo. El hecho de que en esta investigación se haya determinado que el método de factor de luz de día presenta diferencias con la realidad es un paso importante debido a que permite concluir que no es válido al 100%. Motivo por el cual el necesario realizar un mayor numero de investigaciones que conduzcan a encontrar o, en el mejor de los casos, desarrollar un nuevo método de cálculo que sea exclusivo para la Ciudad de México.

6. Los programas de computo presentan diferencias al compararlos con las mediciones y los métodos de cálculo manuales. Además de esta diferencia, una desventaja de la utilización de programas radica en que casi todos ellos impiden conocer los algoritmos a partir de los cuales se generan los resultados. Esto pone en duda la validez y confiabilidad de los resultados. A pesar de esta situación es posible considerar a los programas como una herramienta útil por la forma en que presentan los resultados. Al generarse imágenes que pueden ser interpretadas de forma más directa, es posible observar otro tipo de información que sería difícil de apreciar mediante los métodos manuales los cuales únicamente arrojan cifras como resultados. Al trabajar con programas de computo es importante mencionar que estos son actualizados, mejorados o en el peor de los casos, descontinuados, motivo por el cual hay que considerar que los resultados presentaran variaciones dependiendo de las versiones del programas en los que se generen. Por este motivo los programas de computo y otras técnicas emergentes como las imágenes de Alto rango dinámico (HDR) se deben utilizar bajo la consideración de que su validez y confiabilidad no es de un 100%. Con todo esto y como se mencionó anteriormente, los cálculos por computadora presentan una tendencia a la mejoría. Se puede concluir por el momento que programas como 3D Max Design, Photosphere, DFcalc, son herramientas que son mas útiles para realizar estudios de tipo cualitativo (distribución luminosa, ubicar deslumbramientos y



brillantez excesiva) por encima de estudios cuantitativos (cálculo de los niveles de iluminación).

7. Para realizar todo lo anterior es indispensable contar con una base de datos confiables en la que se encuentren los registros de iluminancia e irradiancia de forma simultánea por un periodo mínimo de un año. Con esta información sería posible generar aquellos archivos digitales que utilizan los programas de computo, además de que la información sobre la disponibilidad y característica de la luz natural en un región en específico permite validar los métodos de calculo manuales similares a los analizados en esta investigación. Por otro lado, la base de datos permitirá hacer análisis estadísticos de mayor rigor que sean el apoyo de un mayor número de estudios entre los que encuentra la generación de un nuevo modelo de eficacia luminosa y el Valor de "cielo de diseño" para la Ciudad de México.

#### Futuras líneas de investigación:

1. Hacer estudios de la validez y confiabilidad de los nuevos métodos de calculo que se están generando sobre todo en regiones del mundo con alta densidad de construcción como Hong-Kong entre los que se encuentra el método denominado Factor de luz de día vertical y el método de iluminancia natural útil, UDI (por sus siglas en ingles) y analizar su posible utilización en la Ciudad de México.

2. Realizar investigaciones sobre los efectos de las obstrucciones y el entorno urbano, así como su posible aprovechamiento para iluminar los espacios mediante la reflexión de sus superficies.

3. Hacer estudios en los cuales se plantee la integración de la luz natural con sistemas de iluminación artificial. Esto incluye la incorporación de sistemas automatizados de control solar y pantallas adyacentes a las ventanas, todos ellos controlados por sensores y actuadores. Todo esto con la intención de conocer el potencial de ahorro energético que tienen las edificaciones al utilizar de forma adecuada la luz natural como fuente primaria de iluminación.

4. Estudiar los métodos de cálculo para ventanas cuya superficie y vano, se encuentren en una posición inclinada y bajo diferentes orientaciones.

5. Relacionar los estudios del comportamiento lumínico de las ventanas con el comportamiento térmico para tratar de establecer criterios de diseño en los que se incorporen ambas variables de forma simultánea. Esto se tendría que hacer considerando diferentes orientaciones de ventana así como la inclinación de la superficie.

6. Investigar a fondo las relaciones que existen entre la luz natural y la salud (física y psicológica) de las personas. Relacionar estos estudios con las investigaciones en psicología ambiental, rendimiento escolar y productividad laboral, así como la realización de evaluaciones post-ocupacionales, tratando de incorporar la mayor cantidad posible de variables físicas presentes en los espacios arquitectónicos. Con esto se pueden construir nuevos instrumentos de medición (cuestionarios, encuestas) que permitan conocer las preferencias visuales de los usuarios y establecer una metodología de evaluación "holística" en la cuál se realicen de forma paralela estudios de tipo cualitativo y cuantitativo.

7. Evaluar y comparar otros modelos para el cálculo de la eficacia luminosa tratando de incorporar un mayor número de variables como la nubosidad y la concentración de partículas suspendidas en el aire para determinar cuál es el que se ajusta mejor a las condiciones de la Ciudad de México. Esto se deberá hacer tratando de abarcar la mayor cantidad posible de condiciones climáticas. A partir de esto es posible descartar aquellos modelos que presenten mayor nivel de error o en el mejor de los casos, se podría generar un nuevo modelo para la Ciudad de México. Esto daría la pauta a la elaboración de una metodología de estudio que pudiera ser replicada en toda la República Mexicana.

8. Realizar de forma constante una revisión a los nuevos programas de cómputo que realicen cálculos y simulaciones de iluminación natural con el objetivo de evaluar su confiabilidad y validez.

9. Investigar las nuevas aplicaciones de la tecnología de Imágenes de alto rango Dinámico (HDR) ya que pueden ser una alternativa muy viable y económica para el estudio del comportamiento lumínico de los espacios. Dado que es una tecnología de reciente aparición y aplicación en el estudio de la iluminación natural en los espacios arquitectónicos, al igual que cualquier otro método de análisis, requiere ser evaluada para establecer el grado de confiabilidad y validez que presenta.

10. Realizar investigaciones para tratar de obtener una caracterización del cielo de la Ciudad de México para compararlo con los establecidos por el CIE. Con esto será posible determinar un cielo o varios cielos de diseño, que sean utilizados con fines de cálculo y diseño, ya sea mediante métodos manuales o por medio de programas de cómputo. Con esto también será posible conocer el comportamiento y la distribución luminosa del Cielo de la Ciudad de México bajo distintas condiciones climáticas lo que permitirá aprovechar los métodos de análisis que utilizan este parámetro como base para determinar los efectos de la luminancia en los espacios interiores de las edificaciones.

11. Estudiar la incorporación de los conocimientos sobre iluminación natural en guías y manuales de diseño, así como en normas y reglamentos. Esto se deberá hacer mediante la investigación entre los efectos de la luz natural y la habitabilidad de los espacios, buscando hacer énfasis en la potencial que tiene su uso para el ahorro energético y propiciar la salud de los usuarios.



REFERENCIAS

5

## 5.1. BIBLIOGRÁFICAS

**ANDER, Greg**, *Daylighting performance and design*, John Wiley & Sons, E.U.A. 1995. pp. 12.

**Asociación Nacional de Energía Solar**, *Memoria de la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar*, Guadalajara, México, 2009.

**BAKER, N.**, et al., *Daylight design of buildings*, James & James, Inglaterra, 2002.

**BAKER, N.**, et al., *Daylighting in architecture: an European reference book*, James & James, Londres, 1993.

**BECHTEL, R.**, Marrans, R.W., Michelson, W., (comp.) *Methods in environmental and behavioral research*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1987.

**BECHTEL, B. y Churchman, A.** (comp.), *Handbook of environmental psychology*, Wiley & Sons, Nueva York, 2002.

**BECKETT, H.E.**, *Ventanas: Función, diseño e instalación*, Gustavo Gili; España, 1978.

**BLANCO, Manuel J.**, *Psicofísica*, Universitas, España, 1996.

**BOUBEKRI M.**, *Daylighting, architecture and health*, Architectural Press, Inglaterra, 2008.

**BRE, Building Research Establishment**, *Digest 41: Estimating daylight in buildings*, BRE, Inglaterra, 1970.

**BRE, Building Research Establishment**, *Digest 42: Estimating daylight in buildings II*, BRE, Inglaterra, 1969.

**CETTO, Ana María**, *La luz: en la naturaleza y en el laboratorio*, Fondo de Cultura Económica, 3a. Edición, México, 2003.

**CIBSE**, *SLL Lighting Guide: Daylighting and Window design*, Inglaterra, 1999.

**CIE Technical Committee**, *4.2: Standardization of luminance distribution on clear skies*. CIE, Paris 1973.

**CIE**, *Guide to recommended practice of daylight measurement*, CIE, Viena, 1994.

**CIE**, *Spatial distribution of daylight*, CIE central bureau, Viena, 2003.

**CIE**, *CIE 171:2006 Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs*, CIE, Viena, 2006.

**HAUSLADEN, G.**, et al., *Climate skin: building-skin concepts that can do more with less energy*, Birkhäuser, Berlin, 2006.

**HERNÁNDEZ Sampieri, Roberto**, et al., *Metodología de la investigación*, 4ª Ed., Mc Graw Hill, México, 2006.

**HOPKINSON, R.G., Peterbridge, P., Longmore, J.,** *Daylighting*. Heinemann, Reino Unido, 1966.

**International Energy Agency,** *Daylight in Buildings: a Source Book on Daylighting Systems and Components*, E.U.A., 2000.

**KÖSTER Helmut.,** *Dynamic daylighting architecture: basic, systems, projects*, Birkhäuser, Berlin, Alemania, 2004.

**LERNER, Steve,** *Eco-Pioneers: Practical Visionaries Solving Today's Environmental Problems*, MIT Press, E.U.A., 1998.

**LOF Libbey-Owens-Ford Company,** *How to predict interior daylight illumination : conserve energy and increase visual performance by effective daylight design*, Toledo, Ohio, 1976.

**LONGMORE, J., BRS,** *Daylight Protractors*, Building Research Establishment, Department of the Environment, Inglaterra, 1967.

**MOORE, Fuller,** *Concepts and practice of architectural daylighting*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, E.U.A. 1991.

**MUHLIA V., Agustín,** *Notas del curso: Solarimetría*, 30 Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Veracruz, Ver., México, 2006.

**MUNEER, Tariq,** *Solar radiation & daylighting models*, Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2ª ed., Reino Unido, 2004.

**MUNEER, Tariq, et al.,** *Windows in buildings: thermal, acoustic, visual and solar performance*, Oxford, Boston: Architectural, E.U.A., 2000.

**NORMAN, A. Donald,** *Emotional design: why we love (or hate) everyday things*, Basic books, Nueva York, 2004.

**PHILLIPS, Derek,** *Daylighting: natural light in architecture*, Elsevier, Boston, E.U.A. 2004.

**REINHART, E., Ward, G.,** *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann, Inglaterra, 2005.

**SZOKOLAY, S.V.,** *Environmental science handbook for architects and builders*, Wiley & Sons., E.U.A., 1980.

**STEIN, Benjamin, et al.,** *Mechanical and electrical equipment for buildings*, 9ª ed., John Wiley and Sons, E.U.A., 2000.

**TREGENZA, P. & Loe, D.** *The design of lighting*, E & FN Spon, Londres, 1998.

**VITRUVIO, Marco Lucio,** *Los diez libros de Arquitectura*, Alianza Editorial, España, 2006.

**WMO, World Meteorological Organization,** *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: WMO No. 8*, World Meteorological Organization, Suiza, 2008. Disponible en línea, Fecha de consulta Junio 2010, [http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO\\_Guide-7th\\_Edition-2008.html](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.html)

---

## 5.2. TESIS

---

**ARANDA Molina, Ana**, *Diseño de sistemas de iluminación biológico - dinámica: en áreas de oficinas en México*, Tesis de Maestría en Arquitectura, UNAM, México, 2009.

**CASTELLANOS Bala, Elvia**, *Efectos de radiación solar sobre el ojo Humano*, Tesis de Especialidad en Oftalmología, Facultad de Medicina, UNAM, México, 2001.

**CABROLIER Sanhueza, Henry J.A.**, *Iluminación natural en la arquitectura: dos estudios de caso para la Ciudad de México*. Tesis de maestría en Arquitectura, UNAM, México, 2010.

**GUIMARÃES Toledo, Beatriz**, *Integração de iluminação natural e artificial: métodos e guia prático para projeto luminotécnico*, Tesis de Maestría en Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Brasília, Brasil, 2008, pp. 127-130. (En Portugués).

**GUTIÉRREZ Mandujano, Lourdes, María de**, *Aprovechamiento eficiente de la luz diurna en las aulas tipo CAPFCE de la universidad de Colima*, Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad de Colima, México, 2005.

**MARTINS Mogo de Nadal, Betina, G.**, *An experimental setup to evaluate the daylighting performance of an advanced optical light pipe for deep-plan office buildings*, Tesis de Maestría en Ciencia, Universidad de Texas, E.U.A., 2005.

**OLIVA Mendoza, Felix**, *Efectos del medio físico sobre el rendimiento escolar*, Tesis de maestría en Psicología Ambiental, UNAM, México, 2006.

**PÉREZ Pérez, Marina**, *Validación de la iluminancia de los métodos experimentales CIE e IES en un modelo real con ventanas en dos orientaciones*, Tesis de Doctorado en Arquitectura, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, España, 2007.

**RANGEL Ruiz, Rocío**, *Iluminación natural y ahorro energético en las edificaciones: un modelo computarizado para evaluar soluciones arquitectónicas*, Tesis de Maestría en Arquitectura, UNAM, México, 1999.

**ROCHA Carvalho, Carolina**, *Avaliação do Programa APOLUX Segundo Protocolos do Relatório CIE 171:2006 Referentes à Iluminação Natural*, Tesis de Maestría en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2009. (En portugués)

**ZEEVAERT Alcántara, Leonardo B.**, *Passive approaches to solar architectural design for Mexico*, Tesis de maestría en Artes, Facultad de Estudios en Arquitectura, Departamento de Ciencias de la Construcción, Universidad de Sheffield, Inglaterra, 1981, pp. 136

---

### 5.3. HEMEROGRÁFICAS

---

**AIZLEWOOD, LITTLEFAIR.** *Daylight prediction methods A survey of their use*, Memorias de la conferencia nacional en iluminación, Bath, Inglaterra, CIBSE, 1994. pp. 136-140.

**ALPUCHE, María, et al.,** *Análisis lumínico de las aulas del programa de Arquitectura - UNISON*, Memoria de la 32 Semana Nacional de Energía Solar - ANES, Mérida Yucatán, 2009.

**CHEUNG H.D.; Cheng T.M.,** *Calculation for the Vertical Daylight Factor on Window Façades in a Dense Urban Environment*. *Architectural Science Review*, 2005, vol. 48, pp. 81-92.

**BETCHEL, R.** y Churchman, A. (comp.), *Handbook of environmental psychology*, Wiley & Sons, Nueva York, 2002.

**BETMAN, E.,** *Eficacia luminosa en Mendoza*, Avances en energía y medio ambiente, 2001, vol. 5, pp. 19-24.

**BIERMAN, A., Klein, Read.** *The daysimeter: a device for measuring optical radiation as a stimulus for the human circadian system*, *Measurement Science and Technology*, 2005, vol. 16, pp. 2292-2299..

**BODART, M., et al.,** *A guide for Building Daylight Scale Models*, *Architectural Science Review*, 2007, vol. 50(1), pp. 31-36.

**BODART, M., et al.,** *Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools*. *Building and Environment*, 2008, vol. 43, pp. 2046-2058.

**BOUBEKRI, Haghghat.,** *Windows and environmental satisfaction: A survey study of an office building*, *Indoor and Built Environment*, 1993; vol. 2(3), pp. 164-172.

**BOYCE, PR.,** Hunter, C., Howlett, O., *The Benefits of daylighting through Windows*, US Department of Energy, EUA, 2003.

**CALDERÓN Vázquez, Roberto, et al.,** *Modelos de iluminancia global para cielos claros en zonas áridas de México*, Memoria de la XX Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Jalapa, Veracruz, México, 1996, pp. 399-402.

**CHENG, C.L., et al.,** *A mini-scale modeling approach to natural daylight utilization in building design*, *Building and Environment*, 2007, vol. 42, pp. 372-384.

**DAU Design and Consulting Inc,** *Validation of AGI32 against CIE 171:2006*, 2007, pp. 1-62.

EBERHARD, John, *Applying Neuroscience to Architecture*, *Neuron*, 2009, vol. 65, pp. 753-756.

**EDMONDS, I.R., GREENUP, P.J. ,** *Daylight in the tropics*, *Solar Energy*, 2002, vol. 73(2), pp.111-121.

**EVANS, JM., TORRES S.**, *El recurso de iluminación natural en Buenos Aires: Resultados de un año de Mediciones*, ASADES, 2001.

**GALASIU, REINHART.** *Current daylighting design practice: a survey*, Building Research and Information, vol. 36(2), 2008, pp. 159-174.

**GEISLER-MORODER, D , DÜ A.**, *Validation of Radiance against CIE 171:2006 and improved adaptive subdivision of circular light sources*, 7th International RADIANCE workshop, Fribourg, 2008.

**GELLER, R., et al.**, *Safe and healthy school environments*, The Pediatric Clinics of North America, 2007, vol. 54, pp. 351-373.

**GHSI EneDir, Tinker John A.** *An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings*. Building and environment. 2005, vol. 40, pp. 51-61.

**HADJRI, K., CROZIER, C.**, *Post-occupancy evaluation: purpose, benefits and barriers*, Facilities, 2009, vol. 27(1), pp. 21-33.

**HE, Ng.** *Using satellite-based methods to predict daylight illuminance for subtropical Hong Kong*, Lighting Research & Technology, 2010, vol. 42(2), pp. 135-147.

**HERSCHONG MAHONE GROUP**, *Daylighting in schools: an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, California Board for Energy Efficiency third party program, E.U.A., 1999.

**HO, Ming-Chin, et al.**, *Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms*, Energy & Buildings, 2008, vol. 40(10), pp. 1844-1855.

**IBARRA, D., REINHART, C.**, *Daylight factor simulations - How close do simulation beginners 'Really' get?*, Proceedings Eleventh International IBPSA Conference, Escocia, 2009.

**INANICI, M.**, *Application of the state-of-the-art computer simulation and visualization in architectural lighting research*, Proceedings of 7th IBPSA Conference, Brasil, 2001.

**INANICI, M.**, *Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system*. Lighting Research & Technology, 2006, vol. 38(2) pp. 123-136.

**INANICI, M.**, *Transformation of High Dynamic Images into Virtual Lighting Laboratories*. Ann Arbor, vol. 10, 2009.

**IEA, International Energy Agency** - Solar heating & cooling programme, *Post occupancy evaluation of daylight in buildings*, IEA, 1999, pp. 12.

**JACOBS, A.**, *High Dynamic Range Imaging and its Application in Building Research*, Advances in Building Energy Research, 2007, vol. 1 pp. 177-202.

**JOSHI, M., et al.**, *Estimation of Luminous efficacy of daylight and exterior illuminance for composite climate of Indore city in Mid Western India*, Renewable energy, 2007, vol. 32, pp. 1363-1378.



**KESSLER, R., et al.,** *Prevalence and effects of mood disorders on work performance in a nationally representative sample of U.S. worker*, American Journal of Psychiatry, 2006; vol. 163(9), pp. 1561-1568.

**KITTLER, R., et al.,** *A new generation of sky standards*. Proc. Conf. Lux Europa, 1997, pp. 359-373.

**KOTA, S., et al.,** *Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and Their Use in Energy Performance Simulations*. Proceedings of the Ninth International Conference for Enhanced Building Operations, Austin, Texas, E.U.A. 2009.

**KRUGER, E. ZANNIN, T.,** *Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms*, Building and Environment, 2004, vol. 39, pp. 1055-1063.

**LABAYRADE, R.,** *Use of CIE 171:2006 test cases to assess the scope of lighting simulation programs*, Proceedings Light and Lighting Conference with Special Emphasis on LEDs and Solid State Lighting, Budapest, 2009.

**LABAYRADE, R., et al.,** *Validation of Velux daylight visualizer 2 against CIE 171:2006 test cases*, Proceedings Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, 2009, pp. 1503-1513.

**LI, Danny H.W., Tsang, Ernest K.W.,** *An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong*. Building and Environment, 2008, vol. 43, pp. 1146-1458.

**LI D.H.W., Wong S.L., Tsang C.L., Gary H.W. Cheung.** *A study of the daylighting performance and energy use in heavily obstructed residential buildings via computer simulation techniques*. Energy and Buildings, 2006, vol. 38, pp.1343-1348.

**LI, H.W. Danny, et al.,** *Simple method for determining daylight illuminance in a heavily obstructed environment*. Building and Environment, 2009, vol. 44(5), pp. 1074-1080.

**LI, H.W. Danny, et al.,** *A simplified procedure for determining indoor daylight illuminance using daylight coefficient concept*, Building and Environment, 2006, vol. 41, pp. 578-589.

**LI D.H.W., Cheun Gary H.W.** *Average daylight factor for the 15 CIE standard skies*. Lighting Research and Technology, 2006, vol. 38(2), pp.137-152.

**LI D.H.W., Lau Chris C.S., Lam Joseph C.** *Predicting daylight illuminance on inclined surfaces using sky luminance data*. Energy, 2005, vol. 30, pp.1649-1665.

**LÓPEZ Montelongo, Areli,** *Niveles de iluminancia en los cubos de luz de la comarca lagunera, (ABC-01)*, Memoria de la XXXI Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Zacatecas, México, 2007.

**LYNES, J., LITTLEFAIR, P.,** *Lighting energy savings from daylight: estimation at the sketch design stage*, Lighting Research & Technology, 1990, vol. 22(3), pp. 129-137.

**MARDALJEVIC J., Painter, B., Andersen, M.,** *Transmission illuminance proxy HDR imaging: A new technique to quantify luminous flux*, Lighting Research & Technology, 2009, vol. 41(1), pp. 27-49.

**LURIE, S., et al.,** *Seasonal affective disorder*, American Family Physician, 2006; vol. 74(9), pp. 1521-1524.

**NABIL Azza, Mardeljevic John.** *Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors.* *Energy and Buildings*, 2006, vol. 38, pp. 905-913.

**NAEEM M., Wilson M.,** *A study of the application of the BRE Average Daylight Factor formula to rooms with window areas below the working plane.* Proceedings of 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete island, Greece.

**NG, Edward, et al.,** *Defining standard skies for Hong Kong.* *Building and Environment*, 2007, vol. 42(2), pp. 866-876.

**NG. Edward.** *A simplified daylighting design tool for high-density urban residential buildings,* *Lighting Research & Technology*, 2001, vol. 33(4) pp. 259-272.

**PEREZ, R. et al.,** *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance.* *Solar Energy*, 1990, vol. 44(5), pp. 271-289.

**REINHART, C., et al.,** *Daylight simulation in 3ds Max Design 2009 – Getting Started,* Autodesk, E.U.A., 2008.

**REINHART, C., Breton, P.F.,** *Experimental validation of 3DS MAX® Design 2009 and DAYSIM 3.0,* Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference, Escocia, 2009.

**ROBLEDO, L., SOLER, A.,** *Luminous efficacy of direct solar radiation for clear skies,* *Energy*, 2000, vol. 25(8), pp. 689-701.

**ROSENTHAL, Norman, et al.,** *A Description of the Syndrome and Preliminary Findings With Light Therapy,* *Archives of General Psychiatry*, 1984; vol. 41(1), pp. 72-80.

**SLINEY, D.,** *Photoprotection of the eye–UV radiation and sunglasses,* *Journal of Photochemistry & Photobiology*, 2001; vol. 64, pp. 166-175.

**SOUZA, R., PEREIRA F.,** *Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento,* *Ambiente Construído*, 2004, (en portugues).

**SOUZA, R., ROBLEDO, L.,** *Testing diffuse luminous efficacy models for Florianópolis, Brazil,* *Building and Environment*, 2004, vol. 39, pp. 317-325.

**TERMAN, et al.,** *Light therapy for seasonal affective disorder: A review of efficacy,* *Neuropsychopharmacology*, 1989; vol. 2(1), pp. 1-22.

**THANACHAREONKIT A., Scartezzin J.L. i, Andersen M,** *Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and test modules.* *Solar Energy*, 2005, vol. 79, pp.168-182.

**TREGENZA, P.,** *Tropical daylighting,* *Lighting Research & Technology*, 20003, vol. 35(1), pp. 1-2.

**TORRINGTON, J., Tregenza, P.**, *Lighting for people with dementia*, Lighting Research & Technology, 2007, vol. 39(1), pp. 81-97.

**TSIKALOUDAKI, K.**, *A study on luminous efficacy of global radiation under clear sky conditions in Athens, Greece*, Renewable energy, 2005, vol. 30, pp. 551-563.

**PAGE, J.K.**, *First conference on measurement and modeling of solar radiation and daylight "Challenges for the 21st Century"* Energy, 2005, vol. 30(9), pp. 1501-1515.

**US Department of Energy**, *Building Energy Software tools*, Dialux, Documento en línea, consulta Junio 2010. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=497](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=497)

**VALERIANO Flores, Arturo**, *Estudio comparativo de los valores del Factor de Luz de Día a partir de mediciones hechas en un modelo a escala y su cálculo mediante el método del BRE*, Memoria de la 33 Semana Nacional de Energía Solar ANES, Guadalajara, Jal., México, Octubre 2009.

**VALERIANO Flores, Arturo**, *Evaluación y análisis de la iluminación natural: Caso de estudio salón de clases del edificio de posgrado de arquitectura, Ciudad Universitaria, México, D.F.*, Memoria de la 34 Semana Nacional de Energía Solar ANES, Guanajuato, México, Octubre 2010.

**VAN DER ROHE, Mies**, *Architecture and Technology*, Arts and Architecture, 1950, No.10.

**VARTIAINEN, A.**, *A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements*, Renewable energy, 2000, vol. 20, pp. 265-277.

**WANG, N., BOUBEKRI, M.**, *Investigation of declared seating preference and measured cognitive performance*, Journal of Environmental Psychology, 2009, vol. 30(2), pp. 226-238.

**WINTERBOTTOM, M., WILKINS, A.**, *Lighting and discomfort in the classroom*, Journal of Environmental Psychology, 2009, vol. 29(1), pp. 63-75.

**YENER, A.K.**, *Daylight analysis in Classrooms with Solar Control*, Architectural Science Review, 2002, vol. 45, pp. 311-316.

**ZAIN-AHMED, A., et al.** *The availability of daylight from tropical skies--a case study of Malaysia*, Renewable energy, 2002, vol. 25, pp. 21-30.

**ZIMMERMAN, A., MARTIN. M.**, *Post-occupancy evaluation: benefits and barriers*, Building Research & Information, 2001, vol. 29(2) pp. 168-174.

**ZIMRING, C., REIZENSTEIN, J.**, *Post-occupancy evaluation: an overview*, Environment and Behavior, 1980, vol. 12(4), pp. 429-450.

---

#### 5.4. NORMAS Y REGLAMENTOS

---

**Gobierno del Distrito Federal**, *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*, México, D.F., 2004.

**Hong Kong Buildings Department**, *Lighting and Ventilation Requirements: Performance-based Approach*, Hong Kong, 2005.

**Secretaría del trabajo y previsión social**, *Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*, México, D.F., 2008.

---

#### 5.5. PÁGINAS DE INTERNET

---

**IDMP (International Daylight Measurement Programme)**

Fecha de consulta: Abril 2008.

<http://idmp.entpe.fr/>

**Windows and Daylighting Website**. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)

Fecha de consulta: Mayo 2008.

<http://windows.lbl.gov>

**Radiance** - Simulation software.

Fecha de consulta: Noviembre 2009.

<http://radsite.lbl.gov/radiance/>

**Anywhere software - Photosphere.**

Fecha de consulta: Noviembre 2009

<http://anywhere.com/>

**The Daylight site.**

Fecha de consulta: Marzo 2010.

<http://www.thedaylightsite.com/>

**Archiphysics** - Software DLFcalc.

Fecha de consulta Junio 2010

<http://www.archiphysics.com>

**World Meteorological Organization.**

Fecha de consulta Junio 2010.

<http://www.wmo.int>

**U.S. Department of Energy.**

Fecha de consulta Junio 2010.

[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/)



- 6.1 LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS
- 6.2 REPORTE DE CALIBRACIÓN DE SENSORES DE ILUMINACION
- 6.3 CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN POST-OCUPACIONAL
- 6.4 LECTURAS SUGERIDAS

## 6.1. LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

**3D** - Tridimensional

**BRE** - Building Research Establishment - Instituto de investigación en edificios (Reino Unido)

**BREEAM** - BRE Environmental Assessment Method - Método de evaluación ambiental BRE (Reino Unido)

**CC** - Componente de Cielo

**CIBSE** - Chartered Institution of Building Services Engineers - Institución colegiada de ingenieros en servicios de edificación. (Reino Unido)

**CIE** - Comisión Internacional d' Eclairage - Comisión Internacional de Iluminación (Austria)

**CRE** - Componente Reflejado Exterior

**CRI** - Componente Reflejado Interior

**FLD** - Factor de luz de día - (**DF** - Daylightfactor en inglés)

**HDR** - High Dynamic Range - Alto rango dinámico

**IDMP** - International Daylight Measurement Programme - Programa internacional de medición de luz natural.

**IESNA** - Illuminating Engineering Society of North America - Sociedad de ingeniería en Iluminación en Norte América

**IGV** - Radiación global horizontal

**EGH** - Iluminancia global horizontal

**EGV** - Iluminancia global vertical

**LOF** - Libbey-Owens-Ford Company

**NM** - Nanómetro

**NOM** - Norma Oficial Mexicana (México)

**NRC** - National Research Council - Consejo Nacional de Investigación (Canadá)

**SAD** - Seasonal affective disorder - Desorden afectivo estacional

**UDI** - Useful daylight illuminances - Iluminancia natural útil

**UNAM** - Universidad Nacional Autónoma de México

**USGBC** - United States Green Building Council - Consejo Estadounidense de la construcción verde. (Estados Unidos de América)

**UV** - Ultra Violeta

**VDF** - Vertical Daylight Factor - Factor de luz de día vertical

## 6.2. REPORTE DE CALIBRACIÓN DE SENSORES DE ILUMINACIÓN

En el laboratorio de Interacción con el medio de Posgrado de Arquitectura de Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se utilizan fotómetros LI-COR modelo LI-210 para realizar mediciones de iluminación natural y experimentos sobre el mismo tema. Desde Junio de año 2006 en que se adquirieron los sensores se han realizado mediciones de forma intermitente. A partir de esta fecha se han utilizado las constantes de calibración originales o iniciales, las cuales son determinadas por el fabricante en los certificados de calibración de cada uno de los 26 fotómetros. Después de tres años de mediciones y experimentos, por recomendación del fabricante, es necesario hacer una calibración para determinar el nivel de precisión de los fotómetros, tomado como parámetro el fotómetro numero 26 o de referencia ( $Fr$ ), el cual no ha sido utilizado en los experimentos realizados con anterioridad y cuya principal función es precisamente ser el parámetro de comparación de los 25 fotómetros restantes.

### Objetivo

A partir de las medición de la iluminancia global en el plano horizontal de los 25 fotómetros y el fotómetro de referencia ( $Fr$ ), se desea obtener las variaciones de cada uno de los fotómetros para saber si es necesario utilizar nuevas constantes de calibración, mismas que se obtienen de la razón de la variación del registro ( $Rv$ ) de un fotómetro cualquiera contra el registro de la referencia, para el mismo instante.

### Metodología

Para realizar las mediciones es necesario contar con las constantes de calibración para cada uno de los 26 fotómetros. (Tabla A-1) Este dato es el factor de multiplicación para el valor medido en milivolts ( $mv$ ), que es registrado por el sistema de adquisición de datos. Para realizar la medición de la iluminancia global en el plano horizontal con todos los fotómetros a la vez, fue necesario fabricar una base (Figura A-1) en la cual se pudieran colocar los 25 fotómetros que serán comparados con el de referencias. Esta base fue colocada y sujeta a una mesa especial ubicada en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM.



**FIGURA A-1 >**  
Base para calibración de  
fotómetros.





< **FIGURA A-2**  
Fotómetro de referencia (*R<sub>f</sub>*)

Numero de serie	Fotómetro	Constante
PH 8089	1	5.29293
PH 8090	2	5.04150
PH 8091	3	4.71824
PH 8092	4	4.42918
PH 8093	5	4.55469
PH 8094	6	4.31153
PH 8095	7	4.81988
PH 8096	8	4.81148
PH 8097	9	4.53597
PH 8098	10	5.07706
PH 8099	11	4.60153
PH 8100	12	4.90848
PH 8101	13	4.90993
PH 8102	14	5.50226
PH 8103	15	4.85949
PH 8104	16	4.66769
PH 8105	17	5.02162
PH 8106	18	4.78229
PH 8107	19	4.70750
PH 8108	20	4.70349
PH 8109	21	5.05227
PH 8110	22	4.93481
PH 8111	23	4.99888
PH 8112	24	4.80729
PH 8113	25	4.92454
PH 8114	26	4.98533

< **TABLA A-1**  
Constantes de calibración

Una vez colocados los fotómetros en su posición se colocó el fotómetro de referencia (figura A-2) en un lugar que permitiera que la base especial, no proyectara sombras sobre el sensor de la referencia. Se configuró el sistema de adquisición de datos para realizar registros cada 4 minutos. Estos registros se realizarían con las constantes de calibración iniciales. Las mediciones se iniciaron el día 12 de septiembre, es decir que a partir de esta fecha se tienen registros de los niveles de iluminación global. Con el objetivo de facilitar la interpretación de la información, en este informe solo se presenta el análisis del día 22 de Septiembre. Los registros se "bajaron" del sistema de adquisición de datos y se almacenaron en archivos de Excel que permitiera su fácil manejo y análisis.

### Resultados

Al hacer el análisis de los registros de los fotómetros se puede observar que el día 22 de septiembre fue un día nublado. (figura A-3). Las notables variaciones en los registros de iluminancia muestran que la presencia de nubes fue importante y se mantuvo a lo largo de todo el día. Una vez que se analizaron estos datos se obtuvieron los cocientes o razones entre los fotómetros y la referencia para cada uno de los registros.

$$Rv = E_n / E_{ref}$$

Utilizando la ecuación anterior donde  $Rv$  es la razón de variación,  $E_n$  es el registro del fotómetro que se analiza y  $E_{ref}$  es el registro de la referencia. Se obtuvieron las razones de variación, con las cuales se obtuvo el promedio para cada fotómetro (tabla A-2). Al revisar estos datos promedio se encontró que el valor para el fotómetro No. 6, excede la tolerancia permisible establecida por el fabricante de los fotómetros que es de +/- 5% del valor de la constante de calibración inicial ( $Ki$ ), es decir que el valor de  $Rv$  no puede ser menor a 0.95 ni mayor a 1.05. (figura A-4)

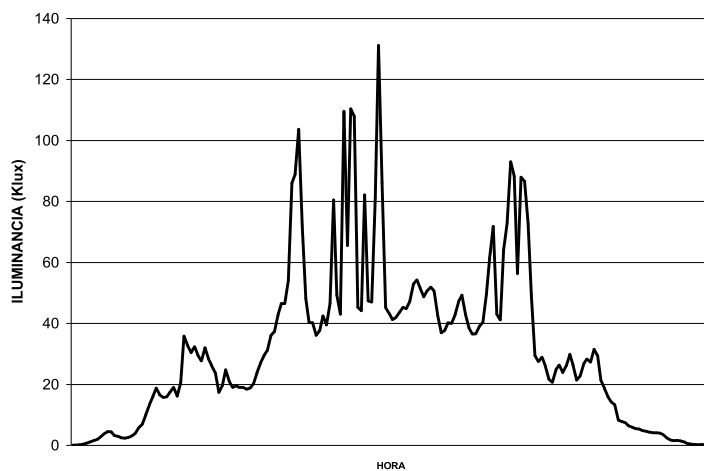
$$0.95 < Rv < 1.05$$

Todos los demás fotómetros tienen un  $Rv$  que se encuentra entre los valores anteriores, por lo que se puede afirmar que sus constantes de calibración iniciales todavía son válidas para su utilización en mediciones posteriores.

Una vez que se pudo determinar cuáles fotómetros son los que necesitan una nueva constante de calibración que se encuentre dentro del rango de variación permisible, (5%) con ayuda de los valores de  $Rv$  se pueden obtener las constantes de calibración nuevas ( $Kn$ ) las cuales sustituyen a las iniciales ( $Ki$ ). (Tabla A-2)

$$K_n = K_i \cdot Rv$$

Donde  $Kn$  es el valor de la constante nueva,  $Ki$  es el valor de la constante inicial y  $Rv$  es el promedio de la razón de variación para cada fotómetro.



< **FIGURA A-3**  
 Iluminancia Global Horizontal  
 Referencia (No. 26)  
 22 Septiembre de 2008

Conclusiones

A partir de los registros del día 22 de Septiembre se pudo determinar que el fotómetro no. 6 tiene una constante de calibración inicial ( $K_i$ ) que ocasionaba que el promedio de la Razón de Variación del fotómetro entre la referencia ( $R_v$ ) quedara fuera del rango permisible. A partir de este análisis se proponen las constantes de calibración nuevas ( $K_n$ ). Aunque los valores de  $R_v$  son muy claros, se sugiere hacer este mismo análisis en otro día en el cuál no existan variaciones significativas provocadas por las condiciones de nubosidad presentes en el día de la medición.

Fotómetro	$V_r$	$K_n$
1	0.974	5.153
2	0.973	4.904
3	0.967	4.561
4	1.004	4.447
5	1.010	4.599
6	<b>0.936</b>	4.036
7	0.979	4.720
8	0.990	4.764
9	0.998	4.527
10	1.008	5.116
11	0.995	4.581
12	0.968	4.751
13	0.996	4.888
14	0.971	5.343
15	0.979	4.757
16	0.969	4.414
17	0.999	5.019
18	0.965	4.614
19	0.988	4.649
20	1.012	4.762
21	0.995	5.027
22	0.975	4.813
23	1.004	5.020
24	1.013	4.872
25	1.019	5.016
26	1.000	4.985

< **TABLA A-2**  
 Constantes de calibración  
 iniciales  
 a. Promedio de razones de  
 variación  
 b. Constantes de calibración  
 nuevas

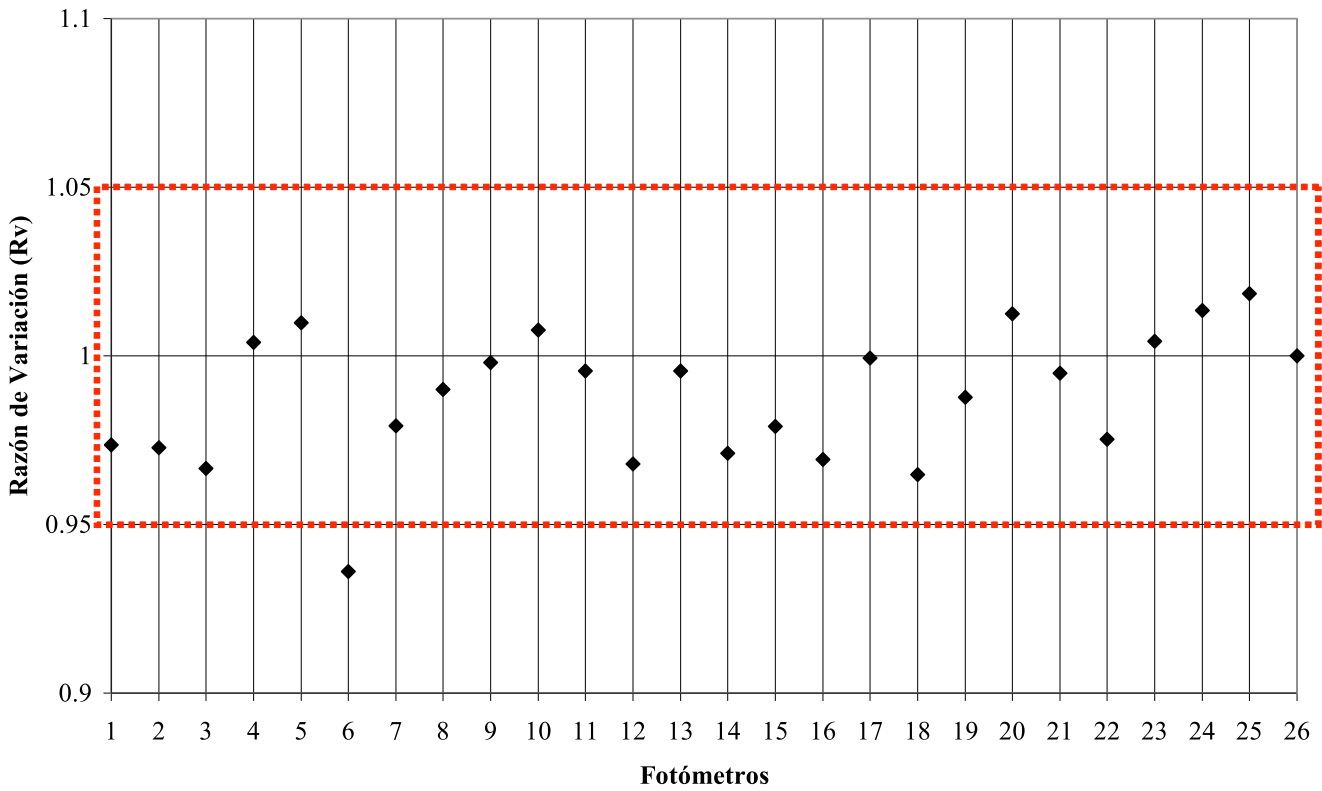


FIGURA A-4. Promedio de razones de variación.

### 6.3. CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN POST-OCUPACIONAL

NOTA: SOLO PARA SER LLENADO POR LA PERSONA QUE APLICA EL CUESTIONARIO

Clave del espacio: \_\_\_\_\_ Clave del usuario: \_\_\_\_\_ Niv. Ilum \_\_\_\_\_  
Fecha \_\_\_\_\_ Hora \_\_\_\_\_

Condiciones climáticas (despejado, parcialmente nublado o nublado) \_\_\_\_\_

Numero de personas que ocupan el lugar \_\_\_\_\_

Ubicación del usuario en el espacio de trabajo (solo una):

- A) Al centro del espacio
- B) A lo largo de la pared opuesta a la ventana
- C) A lo largo de una pared lateral
- D) A lo largo de la ventana

Condiciones del lugar en este momento:

- Existen persianas o cortinas: completamente abiertas / parcialmente abiertas / cerradas
- El ángulo aproximado de apertura de la persianas es de : por debajo de los 45° / cerca de 45° / 90°/
- Posición de la puerta: abierta / cerrada

Las siguientes enunciados proporcionan información de las condiciones de iluminación para las diferentes tareas que se llevan acabo en distintas circunstancias. Para cada actividad, por favor conteste cada bloque y aporte los comentarios que usted desee.

1. Su impresión general del espacio en este momento es:

Muy confortable      nada confortable

2. Su impresión general del espacio en este momento es:

Muy agradable      Muy desagradable

Explique brevemente por qué.

3. De las siguientes opciones marque tres aspectos físicos que son importantes para usted y que hacen de un espacio un lugar agradable para trabajar. (Marque del 1 al 3, donde 1 es lo más importante)

- Temperatura agradable
- Buena iluminación
- Buena ventilación
- Que tenga ventanas
- El ambiente general (colores, acabados, diseño)
- Libre de ruido
- Privacidad
- Amplitud
- Vistas
- Otra (especifique) \_\_\_\_\_

4. ¿Qué tan satisfecho está usted con los siguientes aspectos de su lugar de trabajo?

	Muy satisfecho				Nada satisfecho
a. Iluminación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
b. Nivel de ruido	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
c. Olores	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
d. Ventilación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
e. Temperatura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
f. Tamaño de ventanas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
g. Privacidad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
h. Amplitud	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
i. Vistas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
j. El ambiente general	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Al momento de trabajar ¿cual es su fuente de iluminación?

- Luz natural
- Luz artificial
- Combinación

6. Al momento de trabajar ¿usted prefiere la luz natural, la luz artificial o una combinación de las dos?

- Luz natural
- Luz artificial
- Combinación

7. Su impresión general de las condiciones de iluminación del espacio es:

- Muy iluminado      Muy Oscuro

8. Estas condiciones de iluminación le resultan:

Placenteras      Molestas

9. La luz con la que cuenta para trabajar en este momento es:

Excesiva      Insuficiente

10. ¿Qué tan satisfecho está usted con las condiciones de iluminación bajo las siguientes circunstancias ?

Muy satisfecho

Nada satisfecho

- a. Sobre su mesa de trabajo
- b. Al momento de trabajar con apuntes, planos, dibujos o maquetas.
- c. Al trabajar con su computadora

11. ¿Las condiciones de iluminación influyen en su forma de trabajar?

Mucho      Nada

12. Las condiciones de iluminación en este momento satisfacen sus preferencias visuales

Totalmente      Nada

13. Las condiciones de iluminación del espacio le facilitan la realización de sus actividades

Mucho      Nada

14. ¿Tomando en cuenta las condiciones de iluminación actuales y sus preferencias ¿usted aumentaría, disminuiría o dejaría iguales los niveles de iluminación bajo las siguientes condiciones ?

Aumentaría

No haría cambios

Disminuiría

- a. Sobre su mesa de trabajo
- b. Al momento de trabajar con apuntes, planos, dibujos o maquetas.
- c. Al trabajar con su computadora.

15. ¿Existen reflejos visibles en la superficie de trabajo? SI / NO

¿Si existen estos reflejos que tan molestos le resultan?

Muy molestos      nada molestos

16. ¿Existen reflejos en el momento de trabajar con su computadoras ? SI / NO

¿Si existen estos reflejos qué tan molestos le resultan?

Muy molestos                   nada  
molestos

17. La brillantez en su área de trabajo en relación con el resto del cuarto es:

Muy brillante                   Muy oscura

18. Desde donde se encuentra ubicado puede apreciar algún elemento que tenga mucha brillantez y de ser así ¿ qué es ?

19. ¿La brillantez de este elemento le distrae?:

Mucho                   Nada

20. Si tiene algún otro comentario acerca de las condiciones de iluminación del espacio, por favor escríbalas a continuación.

*Gracias por completar el cuestionario.*



## 6.4. LECTURAS SUGERIDAS

En esta sección se presenta un recopilación de lecturas relacionadas con este trabajo de investigación y que fueron consultadas para la realización de la tesis. Estas lecturas fueron recopiladas durante el desarrollo de la investigación sin embargo no fueron incluidas como referencias debido a que abordaban temas afines pero que a su vez son muy específicos. Esto no quiere decir que su contenido sea de irrelevante o de poca utilidad. Por este motivo se decidió incluirlas como un capítulo anexo donde el lector pueda consultarlas para futuras referencias y ampliar el estudio de los temas presentados en esta tesis. A diferencia del documento impreso, la versión electrónica tiene la capacidad de facilitar la consulta de las lecturas mediante las ligas a las fuentes de información para ello solo se tendrá que hacer click en la liga URL proporcionada al final de la referencia. Si por algún motivo el lector no pudiera acceder o descargar el documento solicitado en línea y requiere su consulta, puede solicitarlo enviando sus datos y la referencia deseada a la siguiente dirección de correo electrónico: valeriano\_arq@yahoo.com.mx

### ILUMINACIÓN NATURAL

*A daylight criterion on solar controls for comparing sky radiance models.*

Jorge, J, Puigdomenech, J.

Building and Environment (1996) vol. 31 (3) pp. 225-232

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Kwgr7bcXU9YJ:scholar.google.com/&output=search>

*A daylight simulation tool for urban and architectural spaces—application to transmitted direct and diffuse light through glazing.*

Miguet, F, Groleau, D.

Building and Environment (2002) vol. 37 (8-9) pp. 833-843

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:c\\_5mM9AnvHIJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:c_5mM9AnvHIJ:scholar.google.com/&output=search)

*A daylight simulation tool including transmitted direct and diffuse light: Application to the evaluation of daylighting inside glazed intermediate spaces*

Groleau, D, Miguet, F.

Seventh International IBPSA Conference

[http://www.inive.org/lbase\\_Search/search-detail-airbase-001.asp?ID=101944](http://www.inive.org/lbase_Search/search-detail-airbase-001.asp?ID=101944)

*A general model for the calculation of daylighting in interior spaces.*

Modest, MF.

Energy & Buildings (1982) (5) pp. 69-79

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:ErGOsj\\_auGMJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:ErGOsj_auGMJ:scholar.google.com/&output=search)

*A new & better Way to Calculate Daylight.*

Saxena, M.

Buildings (2008)

<http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=200810210089874CE>

*A new daylight glare evaluation method Introduction of the monitoring protocol and calculation method.*

Nazzal, AA.

Energy & Buildings (2001) vol. 33 (3) pp. 257-265

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Xlz\\_TxADNOQJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Xlz_TxADNOQJ:scholar.google.com/&output=search)

*A New Method for the Analysis of Daylight Access and View Out.*

Hellinga, H, de Bruin-Hordijk, T.

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:fKxc6VMOzF8J:scholar.google.com/&output=search>

*A photometric characterization Methodology for Daylighting Fixtures.*

Carrington, K D, 2006.

<http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-03292006-201611/>

*A review of the development of daylighting in schools.*

Wu, W, Ng, E.

Lighting Research & Technology (2003) vol. 35 (2) pp. 111

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:it-R6WJkDc8J:scholar.google.com/&output=search>

*A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight.*

Reinhart, C F, LoVerso, V M.

Lighting Research & Technology (2010)

<http://lrt.sagepub.com/cgi/content/abstract/1477153509104765>

*A simplified daylighting design tool for high-density urban residential buildings.*

Ng, E.

Lighting Research & Technology (2001) vol. 33 (4) pp. 259

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:kZyM6AHs\\_MJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:kZyM6AHs_MJ:scholar.google.com/&output=search)

*A simplified procedure for calculating the effects of daylight from clear skies.*

Bryan, H J.

Journal of the Illuminating Engineering Society (1980)

<http://btech.lbl.gov/papers/9048.pdf>

*A simplified Procedure Using Daylight Coefficient Concept for Sky Component prediction.*

Li, D HW, Lau, C CS, Lam, J C.

Architectural Science Review (2004)

<http://www.uestia.com/PM.qst?a=o&se=gglsc&d=5007208047>

*Algorithms for calculation of daylight factors in streets.*

Matusiak, B, Aschehoug, O.

Lighting Res. Technol. 34,2 (2002) pp. 135-147

<http://lrt.sagepub.com/cgi/content/abstract/34/2/135>

*An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong.*

DHW Li, EKW Tsang

Building and Environment (2008)

<http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=08296386EN>

*An analysis of measured and simulated daylight illuminance and lighting savings in a daylit corridor.*

Li, DHW HW, Tsang, EKW.

Building and Environment (2005) vol. 40 (7) pp. 973-982

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:aSjgK06wUJgJ:scholar.google.com/&output=search>

*An experimental setup to evaluate the daylighting performance of an advanced optical light pipe for deep-plan office buildings.*

DE NADAL,

BGMM. (2005)

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:MnJeHbclgNJ:scholar.google.com/&output=search>

*An investigation of daylighting performance and energy saving in a daylit corridor.*

Li, DHW HW, Lam, JC.

Energy & Buildings (2003) vol. 35 (4) pp. 365-373

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:y1GkXmhiGNOJ:scholar.google.com/&output=search>

*An overview of daylighting systems.*

Kischkoweit-Lopin, M.

Solar Energy (2002)

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X02000361>

*Anidolic daylighting systems.*

Scartezzini, JL, Courret, G.

Solar Energy (2002) vol. 73 (2) pp. 123-135

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Tjdi8xBF2HgJ:scholar.google.com/&output=search>

*Applicability of daylighting computer modeling in real case studies: comparison between measured and simulated daylight availability and lighting consumption.*

Galasiu, AD, Atif, MR.

Building and Environment (2002) vol. 37 (4) pp. 363-377

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:hn0sW8Cy3ZlJ:scholar.google.com/&output=search>

*Assessing a rapid technique for estimating the daylight transmittance of atrium roofs.*

Lash, D, Sharples, S.

PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006

[http://www.unige.ch/cuepe/html/plea2006/Vol1/PLEA2006\\_PAPER197.pdf](http://www.unige.ch/cuepe/html/plea2006/Vol1/PLEA2006_PAPER197.pdf)

*Attitudes of school children to daylight and fenestration.*

Stewart, D M.

Building and Environment 16:44, 267-77, 1981.

<http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=8220790AN>

*BRS Daylight Protractors.*

Dufton, A F, Longmore..., J.

Survey Simple Design Tools

<http://btech.lbl.gov/pub/iea21/documents/cdrom/Appendix8.09/8.9.2.pdf#page=32>

*Challenges of daylighting with the luminosity and variability of the tropical sky.*

Chirarattananon, S, Chaiwiwatworakul, P.

Lighting Res. Technol. 35,1 (2003) pp. 3-10

<http://irt.sagepub.com/cgi/content/abstract/35/1/3>

*Climate-Based daylight modelling for evaluation and education.*

Mardaljevic, John.

VELUX Daylight Symposium, Bilbao, Spain (2007) pp. 6-7

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:NKqNPWp1u1J:scholar.google.com/&output=search>

*Computer Simulation of Daylight: a comparison for architect's utilization.*

Christakou, D E, Amorim, C ND.

<http://www.unb.br/fau/qualilumi/artigos/PA075.pdf>

*Daylight 1-2-3—a state-of-the-art daylighting/energy analysis software for initial design investigations.*

Reinhart, Christoph, Bourgeois, D, Dubrous, F, Laouadi, A, Lopez, P, Stelescu, O.

Proc. of the 11th IBPSA Buildings Simulation Conference in Beijing, China (2007)

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:lbRuSOcl\\_j8J:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:lbRuSOcl_j8J:scholar.google.com/&output=search)

*Daylight analysis in Classrooms with Solar Control.*

Yener, A K.

Architectural Science Review (2002)

<http://www.questia.com/PM.qst?a=o&se=gglsc&d=5002505982>

*Daylight and energy implications for CIE standard skies.*

Li, DHW HW.

Energy Conversion and Management (2007) vol. 48 (3) pp. 745-755

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:l-Psuczopoj:scholar.google.com/&output=search>

*Daylight availability as a Function of Atmospheric Conditions.*

Ne'eman, E, Selkowitz, S.

(1988)

<http://irt.sagepub.com/cgi/content/abstract/20/4/177>

*Daylight availability data for San Francisco.*

Nawab, M, Karayel, M, Ne'eman, E, Selkowitz, S.

btech.lbl.gov (1983)

<http://btech.lbl.gov/papers/15623.pdf>

*Daylight calculations using constant luminance curves.*

Betman, E.

Renewable energy (2005)

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096014810400182X>

*Daylight design and regulation for high density cities.*

Edward, NG, Cheng, V.

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:lyd0Og5kR8J:scholar.google.com/&output=search>

*Daylight factor prediction in atria building designs.*

Calcagni, B, Paroncini, M.

Solar Energy (2004)

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X04000155>

*Daylight factor: Internal Reflectec Component.*  
Hopkinson, R G, Longmore, J, Petherbridge, P.  
Survey Simple Design Tools Nomograms 14 2.3. 1,  
Waldram diagrams Survey Simple Design Tools  
[http://btech.lbl.gov/pub/iea21/documents/cdrom/  
Appendix8.09/8.9.2.pdf#page=20](http://btech.lbl.gov/pub/iea21/documents/cdrom/Appendix8.09/8.9.2.pdf#page=20)

*Daylight in buildings, collaborative research in the  
International Energy Agency (IEA task 21).*  
Johnsen, K.  
Renewable energy 15:1-41  
[http://cat.inist.fr/?  
aModele=afficheN&cpsid=1623362](http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=1623362)

*Daylight in urban canyons: planning in Europe.*  
Brotas, L, Wilson, M.  
Switzerland, 6-8 September  
Proceedings of PLEA2006 (2006)  
[http://www.unige.ch/cuepe/html/plea2006/Vol2/  
PLEA2006\\_PAPER735.pdf](http://www.unige.ch/cuepe/html/plea2006/Vol2/PLEA2006_PAPER735.pdf)

*Daylight measurement error.*  
Hayman, S.  
Lighting Research & Technology (2003) vol. 35 (2)  
pp. 101  
[http://scholar.google.com/scholar?  
hl=en&lr=&q=info:  
2m1e3DTimLMJ:scholar.google.com/  
&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:2m1e3DTimLMJ:scholar.google.com/&output=search)

*Daylight metrics and energy savings.*  
Mardaljevic, J, Hescong, L, Lee, E.  
Lighting Research & Technology (2009) vol. 41 (3)  
pp. 261  
[http://scholar.google.com/scholar?  
hl=en&lr=&q=info:m3nFc02Kx-  
oJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:m3nFc02Kx-oJ:scholar.google.com/&output=search)

*Daylight optimization of multifunctional solar  
facades.*  
Vartiainen, E, Peippo, K, Lund, P.  
Solar Energy (2000)  
[http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/  
S0038092X99000729](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X99000729)

*Daylight performance of anidolic ceiling under  
different sky conditions.*  
Wittkopf, S K.  
Solar Energy (2007)  
[http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/  
S0038092X06001058](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X06001058)

*Daylight prediction in atrium buildings.*  
Littlefair, P.  
Solar Energy (2002)  
[http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/  
S0038092X02000385](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X02000385)

*Daylight simulation: Validation, Sky Models and  
Daylight Coefficients*  
Mardaljevic, John.  
(1999)  
[http://scholar.google.com/scholar?  
hl=en&lr=&q=info:Yja7FxYoykAJ:scholar.google.co  
m/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Yja7FxYoykAJ:scholar.google.com/&output=search)

*Daylight Transmittance of Real Atria Roofs:  
Assessing a Novel Photoanalysis*  
Sharples, S, Lash, D.  
Architectural Science Review (2006)  
[http://www.emeraldinsight.com/Insight/  
viewContentItem.do?  
contentId=1577183&contentType=Abstract](http://www.emeraldinsight.com/Insight/viewContentItem.do?contentId=1577183&contentType=Abstract)

*Daylight, sunlight and solar gain in the urban  
environment.*  
Littlefair, P.  
Solar Energy (2001)  
[http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/  
S0038092X00000992](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X00000992)

*Daylighting analysis in a public school in Curitiba,  
Brazil.*  
Krueger, EL, Dorigo, AL.  
Renewable energy (2008) vol. 33 (7) pp. 1695-1702  
[http://scholar.google.com/scholar?  
hl=en&lr=&q=info:e\\_JOLXdRufkJ:scholar.google.co  
m/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:e_JOLXdRufkJ:scholar.google.com/&output=search)

*Daylighting and its implications to overall thermal  
transfer value (OTTV) determinations.*  
Li, DHW HW, Lam, JC, Wong, SL.  
Energy (2002) vol. 27 (11) pp. 991-1008  
[http://scholar.google.com/scholar?  
hl=en&lr=&q=info:zPtijCArMTYJ:scholar.google.com/  
&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:zPtijCArMTYJ:scholar.google.com/&output=search)

*Daylighting estimation under real skies: a  
comparison of full-scale photometry*  
Love, J A, Nawwab, M.  
Journal of the Illuminating Engineering Society (1991)  
[http://aesl.hanyang.ac.kr/class/aes805/paper/  
a05-22.pdf](http://aesl.hanyang.ac.kr/class/aes805/paper/a05-22.pdf)

*Daylighting impacts on human performance in school.*

Heschong, L, Wright, RL, Okura, S.  
Journal of the Illuminating Engineering Society (2002)  
vol. 31 (2) pp. 101-111  
[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:va\\_AAjzLCc4J:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:va_AAjzLCc4J:scholar.google.com/&output=search)

*Daylighting in atria: The effect of atrium geometry and reflectance distribution.*

Samant, S, Yang, F.  
Lighting Research & Technology (2007)  
<http://irt.sagepub.com/cgi/content/abstract/39/2/147>

*Daylighting in Schools: An Investigation into the Relationship between Daylighting and Human Performance. Detailed Report.*

Heschong, L. (1999)  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:WKUq3hORz1sJ:scholar.google.com/&output=search>

*Daylighting in schools: Improving student performance and health at a price schools can afford: Preprint.*

Plympton, P, Conway, S, Epstein, K.  
Conference: American Solar Energy Society Conference, Madison, WI (US), 06/16/2000 (2000)  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:R8hsxdRa4tgJ:scholar.google.com/&output=search>

*Daylighting monitoring protocols & Procedures for Buildings.*

Atif, M R, Love, J A, Littlefair, P.  
- A report of IEA Task (1997)  
<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc41369/nrcc41369.pdf>

*Daylighting performance of buildings: monitoring procedure.*

Fontoynt, M, Berrutto, V.  
Right Light (1997)  
[http://www.iaeel.org/iaeel/archive/Right\\_light\\_proceedings/Proceedings\\_body/BOK4/RL42fyws.pdf](http://www.iaeel.org/iaeel/archive/Right_light_proceedings/Proceedings_body/BOK4/RL42fyws.pdf)

*Daylighting simulation: methods, algorithms, and resources.*

Carroll, W L.  
osti.gov (1999)  
[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=861173](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=861173)

*De-Light: a software tool for the evaluation of direct daylighting illuminances both indoors*

Bellia, L, Cesarano, A, Minichiello, F, Sibillo, S.  
Building and Environment (2000)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132399000268>

*Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control systems with an example from Istanbul.*

Onaygil, S, Güler, Ö. Building and Environment (2003)  
vol. 38 (7) pp. 973-977  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:9fpYT6ZlZPAJ:scholar.google.com/&output=search>

*Determination of vertical daylight illuminance under non-overcast sky conditions.*

Li, DHW HW, Cheung, GHW, Cheung, KL, Lam, TNT.  
Building and Environment (2009)  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Z9DCcFMc19kJ:scholar.google.com/&output=search>

*Development of a substitutive light source for indoor daylight calculations.*

Kobav, M B, Bizjak, G.  
Building and Environment (2005)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132304003737>

*Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments.*

Osterhaus, W KE.  
Solar Energy (2005)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X04003536>

*Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design.*

Reinhart, Christoph, Mardaljevic, J, Rogers, Z.  
Leukos (2006) vol. 3 (1) pp. 1-25  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:nigZjIHwmDsJ:scholar.google.com/&output=search>

*Effect of daylight saving time on lighting energy use: A literature review.*

Aries, M BC, Newsham, G R.  
Energy Policy (2008)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421507002273>

*Effect of daylight saving time on lighting energy use: A literature review.*

Aries, M BC, Newsham, G R.

Energy Policy (2008)

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421507002273>

*Effect of the surfaces enclosing atria on the daylight in adjacent spaces.*

Cole, R J.

Building and Environment 25:11, 37-42, 1990.

<http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=9018985AN>

*Effects of window size in daylighting and energy performance in buildings.*

Melendo, JMA, Mercedes, AR, La Roche, P.

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:QLLz81yjbUJ:scholar.google.com/&output=search>

*Estimating depth of daylight zone and PSALI for side lit office spaces using the CIE Standard General Sky.*

Shahriar, ANM, Mohit, MA.

Building and Environment (2007) vol. 42 (8) pp. 2850-2859

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:dbboKjb9A4sJ:scholar.google.com/&output=search>

*Evaluating lightscape's accuracy for predicting daylighting illuminance compared to an actual space.*

Shalaby, M AS.

cgarchitect.com (2002)

<http://www.cgarchitect.com/resources/lightingDesign/Lightscape.pdf>

*Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight*

Wienold, J, Christoffersen, J.

Energy & Buildings (2006)

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778806000715>

*Examples of climate-based daylight modelling.*

Mardaljevic, John.

CIBSE National Conference 2006

Engineering the Future (2006) pp. 21-22

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:pb9U43CjlngJ:scholar.google.com/&output=search>

*Experimental analysis for Madrid, Spain, of a simple graphic daylight calculation method based on the CIE standard overcast sky.*

Oteiza, P, Soler, A.

Building and Environment (1997) vol. 32 (4) pp. 363-366

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:kWPfb\\_bOUYYJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:kWPfb_bOUYYJ:scholar.google.com/&output=search)

*Fabric membranes as Daylighting Control Systems in buildings.*

Hernandez, M, Judith, J.

etheses.nottingham.ac.uk (2006)

<http://etheses.nottingham.ac.uk/196/>

*Fast and accurate simulation of long-term daylight availability using the radiosity method.*

Geebelen, B, Van der Voorden, M, Neuckermans, H.

Lighting Research & Technology (2005) vol. 37 (4) pp. 295

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:OpUjdBfKBTkJ:scholar.google.com/&output=search>

*Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design.*

Reinhart, Christoph, Fitz, A.

Energy & Buildings (2006)

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778806000600>

*Glazing daylight transmittances: a field survey of windows in urban areas.*

Sharples, S, Stewart, L, Tregenza, PR.

Building and Environment (2000) vol. 36 (4) pp. 503-509

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:LImGf0WvUIQJ:scholar.google.com/&output=search>

*Healthy-daylighting design for the living environment in apartments in Korea.*

Kim, G, Kim, JT. Building and Environment (2009)

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:iSuOd\\_XwR3MJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:iSuOd_XwR3MJ:scholar.google.com/&output=search)

*Implementing the partial daylight factor method under a scanning sky simulator.*

Michel, L, Scartezini, JL.

Solar Energy (2002) vol. 72 (6) pp. 473-492

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:n8uQQATM78gJ:scholar.google.com/&output=search>

*INLUX: A calculation code for daylight illuminance predictions inside buildings and its experimental validation.*

De Rosa, A, Ferraro, V, Igawa, N, Kaliakatsos, D, Marinelli, V.

Building and Environment (2009) vol. 44 (8) pp. 1769-1775

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:n32R2h7QH-UJ:scholar.google.com/&output=search>

*Interior Illuminance, Daylight Controls and Occupant Response.*

Schiller, ME, Japee, SA.

Vital Signs Curriculum Materials Project (1997)

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Nrfotg6BX7gJ:scholar.google.com/&output=search>

*Light wells in residential building as a complementary daylight source.*

Kristl, Z, Krainer, A.

Solar Energy (1999)

<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=1766883>

*Low cost data acquisition module for evaluating the quantitative performance of daylight systems.*

Ciampini, F, Scarazzato, PS, Neves, AAR, Pereira, DCL, Yamanaka, MH.

Solar Energy (2007) vol. 81 (9) pp. 1187-1190

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:sG7w6biDuPYJ:scholar.google.com/&output=search>

*Mean daylight illuminance in rooms facing sunlit streets.*

Tregenza, P R.

Building and Environment (1995)

<http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=26439AN>

*Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications.*

Li, DHW, Lam, JC.

Renewable energy (2000) vol. 20 (4) pp. 389-404

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:wqVjPr5WTJ8J:scholar.google.com/&output=search>

*Modeling Daylight for Interior Environments.*

Inc, LA.

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:ONi-2bDlhAAJ:scholar.google.com/&output=search>

*Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance.*

Perez, R, Ineichen, P, Seals, R, Michalsky, J, Stewart, R.

Solar Energy (1990)

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X9090055H>

*Modelling light-pipe performances—a natural daylighting solution.*

Jenkins, D, Muneer, T.

Building and Environment (2003) vol. 38 (7) pp. 965-972

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:8ngQIPtGDDgJ:scholar.google.com/&output=search>

*Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment.*

Kim, JT, Kim, G.

Building and Environment (2009)

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:ClnBCIIVKoAJ:scholar.google.com/&output=search>

*Passive solar systems for heating, daylighting and ventilation for rooms without an equator-facing facade.*

Garcia-Hansen, V, Esteves, A, Pattini, A.

Renewable energy (2002) vol. 26 (1) pp. 91-111

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:EMZPxiW6lrsJ:scholar.google.com/&output=search>

*Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools.*

Bodart, M, de Peñaranda, R, Deneyer, A.  
Building and Environment (2008)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132307002466>

*Predicting daylight availability dynamically based on forecasts of a weather observatory.*

Ng, E, Gadi, A, Wong, F, Mu, J, Lee, M.  
Lighting Research & Technology (2007) vol. 39 (1) pp. 69  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:qAgMROVHgEEJ:scholar.google.com/&output=search>

*Predicting daylight illuminance by computer simulation techniques.*

Li, DHW HW, Lau, CCS, Lam, JC. Lighting Research & Technology (2004) vol. 36 (2) pp. 113  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:xRqLpxqxOPwJ:scholar.google.com/&output=search>

*Re-Analysis Report: Daylighting in Schools, Additional Analysis. Tasks 2.2. 1 through 2.2. 5.*

Heschong, L, Elzeyadi, I, Knecht, C. (2002)  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:oZjNChBlfBYJ:scholar.google.com/&output=search>

*Reflectance distributions and atrium daylight levels.*

Samant, S, Medjdoub, B.  
International Journal of Low-Carbon (2006)  
<http://ijlct.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/1/2/177>

*Reflectance distributions and vertical daylight illuminances in atria.*

Sharples, S, Lash, D.  
Lighting Research & Technology (2004) vol. 36 (1) pp. 45  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Hym6tY15JNYJ:scholar.google.com/&output=search>

*Shafts for daylighting underground spaces: sizing guidelines.*

Gugliermetti, F, Grignaffini, S.  
Lighting Research & Technology (2001) vol. 33 (3) pp. 183  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:hXcfG5gXHHKJ:scholar.google.com/&output=search>

*Simple method for determining daylight illuminance in a heavily obstructed environment.*

Li, DHW HW, Cheung, G HW, Cheung, K L, Lam, J C.  
Building and Environment vol. 44 (5) (2009)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132308001893>

*Simplified procedure for calculating the effects of daylight from clear skies.*

Bryan, H J.  
Annual IES technical conference (1979)  
[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=6069268](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6069268)

*Simulation of natural daylight illumination determined by a high dynamic range and Computer Software*

Voloboi, A G, Galaktionov, V A, Kopylov, E A. (2006)  
<http://www.springerlink.com/index/AT7520010P4204T6.pdf>

*Spreadsheet-based calculation tool for direct daylight illuminance adaptable for different glazing properties and sky models.*

Lowry, Gordon, Thomas, Shaun.  
Building and Environment (2009) pp. 1-6  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.017>

*Standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations.*

Bourgeois, D, Reinhart, Christoph, Ward, G.  
Building Research and Information (2008) vol. 36 (1) pp. 68-82  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:TKIR6hYJogcJ:scholar.google.com/&output=search>

*Studies on daylight design and regulation of high-density residential housing in Hong Kong.*

Ng, E.  
Lighting Res. Technol. 35,2 (2003) pp. 127-139  
<http://lrt.sagepub.com/cgi/content/abstract/35/2/178-a>

*Sunlight control and daylight distribution analysis: the KOMTAR case study.*

Fairuz Syed Fadzil, S, Sia, SJ.  
Building and Environment (2004) vol. 39 (6) pp. 713-717  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:z1qvq0UQ1EJ:scholar.google.com/&output=search>



*Surface Reflectance Distributions and Their Effect on Average Daylight Factor*

Samant, S, Sharples, S.

Architectural Science Review (2004)

<http://www.questia.com/PM.qst?a=o&se=gglsc&d=5006184927>

*Taking daylight modelling out of the dark ages.*

Mardaljevic, J. (2001) pp. 1-3

<http://www.thedaylightsite.com/filebank/Taking%20daylight%20modelling%20out%20of%20the%20dark%20ages.pdf>

*The approach to daylighting by scale models and sun and sky simulators: A case study for different shading systems.*

Aghemo, C, Pellegrino, A, LoVerso, VRM.

Building and Environment (2008) vol. 43 (5) pp. 917-927

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:vvk5eh\\_yQ\\_wj:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:vvk5eh_yQ_wj:scholar.google.com/&output=search)

*The average total daylight factor.*

Brotas, L, Wilson, M.

Illumination XII National Conference on Lighting Light'2007 10 – 12 June 2007, Varna, Bulgaria

[http://www.learn.londonmet.ac.uk/about/doc/brotas\\_paper\\_varna2007.pdf](http://www.learn.londonmet.ac.uk/about/doc/brotas_paper_varna2007.pdf)

*The characteristics of photosensors and electronic dimming ballasts in daylight responsive dimming systems.*

Choi, AS, Song, KD, Kim, YS.

Building and Environment (2005) vol. 40 (1) pp. 39-50

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:9DRAMK\\_AmFEJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:9DRAMK_AmFEJ:scholar.google.com/&output=search)

*The daylight benefit Conferred Upon Adjoining Rooms by Specular Surfaces in ....*

Lau, B, Duan, Z.

Architectural Science Review (2008)

<http://www.ingentaconnect.com/content/earthscan/asre/2008/00000051/00000003/art00002>

*The design and assessment of Advanced Daylighting Systems Integrated with Typical Interior Layouts in Multi-Story Office Buildings.*

Hu, J. (2003)

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:hLELU4HxY-oj:scholar.google.com/&output=search>

*The simulation of annual daylight illuminance distributions—a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods.*

Reinhart, Christoph, Herkel, S.

Energy & Buildings (2000) vol. 32 (2) pp. 167-187

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:ha4q75EgkOMJ:scholar.google.com/&output=search>

*The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy.*

Hunt, DRG.

Building and Environment (1979) vol. 14 (1) pp. 21-33

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Zwx-RhbuRKEJ:scholar.google.com/&output=search>

*Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office.*

Lee, ES, DiBartolomeo, DL, Selkowitz, SE.

Energy & Buildings (1998) vol. 29 (1) pp. 47-63

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:AEI89yHPYQIJ:scholar.google.com/&output=search>

*Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings.*

Nabil, A, Mardaljevic, John.

Lighting Research & Technology (2005) vol. 37 (1) pp. 41

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:EPeRscIiGc4J:scholar.google.com/&output=search>

*Validation of the Algorithms Developed for Preliminary Prediction of Daylight Distribution in a Toplighted Atrium.*

Boubekri, M, Atif, MR, Boyer, LL.

Proceedings 5th Symposium on Improving Building Energy Efficiency in Hot and Humid Climates (1988)

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:YqKGh5C3tmcJ:scholar.google.com/&output=search>

*Zenith luminance and sky luminance distributions for daylighting calculations.*

Karayel, M, Navvab, M, Ne'eman, E.

Energy & Buildings (1984)

<http://pat.lbl.gov/papers/15622.pdf>

## PRODUCTIVIDAD LABORAL Y RENDIMIENTO ESCOLAR

*A literature review of the effects of natural light on building occupants.*

Edwards, L, Torcellini, P.  
National Renewable Energy Laboratory (2002)  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.122.3165&rep=rep1&type=pdf>

*A room with a view: a review of the effects of windows on work and well.*

Farley, K MJ, Veitch, J A.  
NRC-CNRC Technical Report IRC-RR-136 (2001)  
<https://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/rr/rr136/rr136.pdf>

*An evaluation method for school building design at the preliminary phase with optimisation of f aspects of environmental comfort for the school system of the State Sao Paulo in Brazil*

Da Graca, V AC, Kowaltowski, D CCK.  
Building and Environment (2007)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132305004610>

*Effects of variable lighting intensities and colour temperatures on sulphatoxymelatonin and subjective mood in an experimental office workplace.*

Hoffmann, G, Gufler, V, Griesmacher, A, Bartenbach, C, Canazei, M, Staggl, S, Schobersberger, W.  
Applied Ergonomics (2008) vol. 39 (6) pp. 719-728  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:T2f6T08DzWJ:scholar.google.com/&output=search>

*Environmental Psychology in Classroom Design.*

Hunter, K.  
Social and Psychophysical Measurement. 2005  
[http://etd.ohiolink.edu/send-pdf.cgi/HUNTER%20KATIE.pdf?acc\\_num=ucin1131581482](http://etd.ohiolink.edu/send-pdf.cgi/HUNTER%20KATIE.pdf?acc_num=ucin1131581482)

*Job performance deficits due to depression.*

Adler, DA, McLaughlin, TJ, Rogers, WH, Chang, H, Lapitsky, L, Lerner, D.  
American Journal of Psychiatry (2006) vol. 163 (9) pp. 1569  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:8OmwpqjbE6QJ:scholar.google.com/&output=search>

*Mood disorders and workplace performance: half a loaf.*

Goldman, H H, Drake, R E.  
American Journal of Psychiatry (2006)  
<http://ajp.psychiatryonline.org/cgi/reprint/163/9/1490.pdf>

*Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work.*

Van Bommel, WJM.  
Applied ergonomics (2006) vol. 37 (4) pp. 461-466  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:rjXe2OaqRjoJ:scholar.google.com/&output=search>

*Prevalence and effects of mood disorders on work performance in a Nationally Representative Sample of U.S. Workers.*

Kessler, R C, Akiskal, H S, Ames, M.  
American Journal of Psychiatry (2006)  
<http://ajp.psychiatryonline.org/cgi/content/abstract/ajp;163/9/1561>

*Safe and healthy school environments.*

Geller, R J, Rubin, I L, Nodvin, J T, Teague, W G.  
The Pediatric Clinics of North America (2007)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031395507000223>

*The influence of controllable task-lighting on productivity: a field study in a factory.*

Justen, H, Wouters, M, Tenner, A.  
Applied Ergonomics (2007) vol. 38 (1) pp. 39-44  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:OUONW75S3F4J:scholar.google.com/&output=search>

*Seasonal affective disorder: Lighting research and Environmental psychology.*

Tonello, G.  
Lighting Research & Technology (2008) vol. 40 (2) pp. 103  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:OFRJ243Uf2WJ:scholar.google.com/&output=search>

*Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort.*

Aries, M BC, Veitch, J A, Newsham, G.  
Journal of Environmental Psychology (2010)  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272494409001078>

## EVALUACIONES POST-OCUPACIONALES

*A review of the leading performance measurement tools for assessing buildings.*

McDougall, G, Kelly, J R, Hinks, J.

Journal of Facilities Management (2002)

<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1528523&show=abstract>

*Assessing building performance in use 1: the Probe process.*

Cohen, R, Standeven, M, Bordass, B, Leaman, A.

Building Research & Information (2001) vol. 29 (2) pp. 85-102

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:e2-oMdsJW2AJ:scholar.google.com/&output=search>

*Assessing building performance in use 2: technical performance of the Probe buildings.*

Bordass, B, Cohen, R, Standeven, M, Leaman, A.

Building Research & Information (2001) vol. 29 (2) pp. 103-113

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:7JiwK22Wqa0J:scholar.google.com/&output=search>

*Assessing building performance in use 3: energy performance of the Probe buildings.*

Bordass, B, Cohen, R, Standeven, M, Leaman, A.

Building Research & Information (2001) vol. 29 (2) pp. 114-128

[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:8l\\_zNqQtehsJ:scholar.google.com/&output=search](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:8l_zNqQtehsJ:scholar.google.com/&output=search)

*Assessing building performance in use 4: the Probe occupant surveys and their implications.*

Leaman, A, Bordass, B.

Building Research & Information (2001) vol. 29 (2) pp. 129-143

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:Vsadx17OtckJ:scholar.google.com/&output=search>

*Assessing building performance in use 5: conclusions and implications.*

Bordass, B, Leaman, A, Ruyssevelt, P.

Building Research & Information (2001) vol. 29 (2) pp. 144-157

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:3Ksd-yOTDHoJ:scholar.google.com/&output=search>

*How do post-occupancy evaluation and the facilities manager meet?.*

Eley, J.

Building Research & Information (2001) vol. 29 (2) pp. 164-167

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:72hS1NaKHZwJ:scholar.google.com/&output=search>

*Perceived performance of daylighting systems: lighting efficacy and agreeableness.*

Fontoynt, M.

Solar Energy (2002)

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X0200035X>

*Post occupancy evaluation of daylight in buildings.*

Agency, International E.

(1999) pp. 1-56

[http://www.iea-shc.org/task21/publications/D\\_POE\\_procedures\\_and\\_results/Task21POE.pdf](http://www.iea-shc.org/task21/publications/D_POE_procedures_and_results/Task21POE.pdf)

*Post-occupancy evaluation-where are you?.*

Cooper, I.

Building Research & Information (2001) vol. 29 (2) pp. 158-163

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:8GwXuFTZ4Voj:scholar.google.com/&output=search>

*The luminance differences index: a new indicator of user preferences in daylight spaces.*

Parpaïri, K, Baker, NV, Steemers, KA, Compagnon, R.

Lighting Research & Technology (2002) vol. 34 (1) pp. 53

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=info:ZIOJhMIObSQJ:scholar.google.com/&output=search>

## IMÁGENES HDR (High Dynamic Range)

*A High Dynamic Range digital LinLog CMOS image sensor architecture.*

Encoder, X, Array, P.

imagesensors.org

<http://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2007%20Workshop/2007%20Papers/009%20Guilvard%20et%20al.pdf>

*Applications of image based rendering in lighting simulation: development and evaluation of image based sky models.*

Inanici, M.

ibpsa.org

[http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09\\_0264\\_271.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0264_271.pdf)

*Assessment of luminance distribution using HDR*

Beltrán, L O, Mogo, B M.

archone.tamu.edu

[http://archone.tamu.edu/faculty/LBeltran/Pubs/LBeltran\\_ISES\\_2005.pdf](http://archone.tamu.edu/faculty/LBeltran/Pubs/LBeltran_ISES_2005.pdf)

*Per-Pixel Lighting Data Analysis.*

Inanici, M.

osti.gov (2005)

[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=891345](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=891345)

*Reflectance, illumination and edges.*

McCann, J, Parraman, C, Rizzi, A.

[http://web.me.com/mccanns/McCannImaging/Home\\_files/09CIC%203DMond.pdf](http://web.me.com/mccanns/McCannImaging/Home_files/09CIC%203DMond.pdf)

*Rendering high dynamic range images.*

Kim, M H, MacDonald, L W. (2000)

cs.ucl.ac.uk

[http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/m.kim/publications/EVA2006\\_HDR\\_Proceeding.pdf](http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/m.kim/publications/EVA2006_HDR_Proceeding.pdf)