

**LUZ NATURAL**  
**Sistema de Captación, Transmisión y Distribución.**

**Arq. Miriam García Alcántara**

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura



**UNAM**  
**POSGRADO**  
Arquitectura

Ciudad Universitaria, Noviembre de 2012



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.

**LUZ NATURAL**  
**Sistema de Captación, Transmisión y Distribución.**

**Tesis que para obtener el título de:**  
**Maestra en Arquitectura**  
**Presenta:**

**Miriam García Alcántara**

**Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura**  
**2012**

---

Director de Tesis:  
Mtro. Leonardo B. Zeevaert Alcántara

Sinodales:

Dr. Mauro Valdés Barrón  
Dra. M. Azucena Escobedo Izquierdo  
Dr. Miguel Arzate Pérez  
Dra. Gemma Verduzco Chirino

---



**LUZ**  
**CAPTACIÓN, TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN**  
**NATURAL**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
FACULTAD DE ARQUITECTURA

Tesis que para obtener el grado de  
Maestra en Arquitectura

PRESENTA:

**Arq. Miriam García Alcántara**

Tutor: Mtro. Leonardo Zeevaert Alcántara



**UNAM**  
**POSGRADO**  
arquitectura



## TABLA DE CONTENIDO

	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
	<b>OBJETIVOS</b>	<b>9</b>
	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>9</b>
<b>I</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>10</b>
	1.1 LUZ COMO FENÓMENO FÍSICO	12
	1.2 LUZ COMO PROCESO FISIOLÓGICO	14
	1.3 LUZ COMO RECURSO NATURAL	17
	1.4 SISTEMAS Y ESTRATEGIAS DE ILUMINACIÓN NATURAL COMÚNMENTE UTILIZADOS	25
	<b>1.5 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE LUZ NATURAL (STLN)</b>	<b>28</b>
	MATRIZ COMPARATIVA DE STLN ANALIZADOS	42
	1.6 LENTES FRESNEL	43
	1.7 ALUMINIO	45
	1.8 FIBRA ÓPTICA	46
	1.9 DISTRIBUCIÓN DE LA LUZ EN EL INTERIOR	50
	1.10 NIVELES DE ILUMINACIÓN RECOMENDADOS	52
	<b>CONCLUSIONES DE MARCO TEÓRICO</b>	<b>56</b>
<b>II</b>	<b>RENDIMIENTO DE UN PATIO DE ILUMINACIÓN</b>	<b>57</b>
<b>III</b>	<b>METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LUMIDUCTOS</b>	<b>70</b>
<b>IV</b>	<b>CASO DE ESTUDIO. CENTRO HISTÓRICO CIUDAD DE MÉXICO.</b>	<b>78</b>
<b>V</b>	<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO</b>	<b>86</b>
<b>VI</b>	<b>MEDICIONES EN CASO DE ESTUDIO ANTERIOR A EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>102</b>
<b>VII</b>	<b>CÁLCULOS</b>	<b>118</b>
<b>VIII</b>	<b>RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>130</b>
	FASE 1_ COMPARACIÓN DE DUCTOS	132
	FASE 2_ MONTAJE EN 1ER NIVEL	136
	FASE 3_ SISTEMA COMERCIAL	162
	CONCLUSIONES DE FASE EXPERIMENTAL	175
<b>IX</b>	<b>ENERGÍA ELÉCTRICA Y AHORRO ENRGÉTICO</b>	<b>176</b>
	CONCLUSIONES GENERALES Y PROPUESTA	193
	BIBLIOGRAFÍA	194
	ANEXOS	200

# INTRODUCCIÓN



La luz es el medio que nos permite conocer nuestro entorno y realizar nuestras actividades cotidianas, la luz también hace posible la arquitectura, a través de ella percibimos los espacios, los recorremos y los conformamos.

En nuestros días contamos con dos fuentes de Iluminación: la proveniente del Sol y la de medios artificiales a base de electricidad.

Aún cuando la iluminación artificial es necesaria para poder prolongar nuestras actividades hasta la noche y se han tenido grandes avances tecnológicos que disminuyen el consumo eléctrico, efectos innovadores y que generan gran confort, es evidente que no podemos remplazar bajo ninguna circunstancia la luz natural, diversos estudios médicos y psicológicos nos han demostrado cómo influye la luz cambiante del día en el comportamiento humano y en los procesos biológicos<sup>1</sup>. La luz del día, influye principalmente de dos maneras a nuestro organismo: primero a través de la visión se ven controlados nuestro metabolismo y nuestro sistema hormonal y endócrino; y segundo interactúa con nuestra piel a manera de fotosíntesis para la creación de la vitamina D en la piel, con la exposición a los rayos ultravioleta B<sup>2</sup>. La producción de las hormonas serotonina y melatonina, que controlan los ciclos vigilia-sueño respectivamente se encuentran determinados por las horas del día y necesitan ser controlados cotidianamente por la cantidad y tipo de luz que recibimos, por lo que la ausencia de ésta altera nuestro reloj biológico, creando diversas alteraciones en nuestro organismo.

El problema surge, cuando no tenemos acceso a la luz natural en los espacios en donde habitamos, laboramos o pasamos gran parte de nuestro tiempo, por diversas circunstancias del contexto en donde se emplazan nuestros edificios, no es posible obtener luz natural, por lo que la presente investigación pretende analizar soluciones a través de la tecnología, en edificaciones ya construidas y cuyos casos podrían ser los siguientes:

- a) Edificios que se orientan con el único paramento que quedó libre de colindancias, como ocurre frecuentemente en la Ciudad de México, en donde no hay espacio disponible para la edificación.
- b) Niveles inferiores en los edificios y cuyo contexto produce sombras incidentes en él.
- c) Edificios mal orientados desde la etapa de diseño y sin el espacio necesario entre construcciones para generar patios de iluminación o en los cuales las técnicas

---

<sup>1</sup> Ander, Gregg D. Daylight Performance and Design. Ed. John Wiley and Sons. Estados Unidos, 2003, p. 26.

<sup>2</sup> Boubekri, Mohamed. Daylight, Architecture and Health. Building Design Strategies. Ed. Elsevier. Gran Bretaña 2008, p. 63.

tradicionales de iluminación (ventanas laterales) no son suficientes para la obtención de los niveles adecuados para el desempeño de actividades.

Hoy en día, contamos con el avance tecnológico para proveer de los beneficios que la luz natural nos ofrece, y como arquitectos tenemos el deber profesional de brindar bienestar a la sociedad para la que proyectamos, generando la mayor cantidad posible de soluciones que favorezcan el uso apropiado de nuestras edificaciones y que optimicen los recursos naturales con que cuentan.

En este proyecto de investigación, un Sistema para la Captación, Transmisión y Distribución de la luz natural, es el eje rector del análisis, de acuerdo con la Real Academia de la Lengua Española, por sistema se entiende como el “Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto”<sup>3</sup> por lo que este tipo de sistema debe entenderse como un conjunto o un medio cerrado, aún cuando para su análisis se realizó un desmembramiento, sólo es para llegar a comprender si algún punto del proceso o de sus componentes son perfectibles al interactuar con otros materiales, formas o medios.

Como captación se define “Recibir, recoger sonidos, imágenes, ondas, emisiones radiodifundidas”<sup>4</sup>, en el presente proyecto se hace referencia a los actuales dispositivos, técnicas o materiales para recoger los rayos solares directos (ondas electromagnéticas en la banda del espectro visible) para su re-direccionamiento al interior de los espacios arquitectónicos.

Para el término Transmitir se encuentran dos definiciones adecuadas al objetivo de investigación, de acuerdo en la Lengua Española se refiere como “Trasladar, transferir” y “Conducir o ser el medio a través del cual se pasan las vibraciones o radiaciones”<sup>5</sup>. Como parte del sistema de tratamiento de iluminación natural, se define como transmisión, los materiales y técnicas de conducir la luz natural del exterior por medio de reflexiones, a través de los espacios arquitectónicos hasta el interior del objeto de estudio.

Finalmente distribuir es entendido como “Dar a algo su oportuna colocación o el destino conveniente”<sup>6</sup>, y se referirá a la manera en que se da tratamiento a la luz en el interior de los espacios, componiéndose de varias partes como son: difusor, colores de elementos arquitectónicos y texturas, basándose en los niveles de iluminación recomendados para las actividades que se llevan a cabo.

Es necesario determinar también los conceptos básicos que se manejarán a lo largo del documento, para definir los parámetros de mediciones realizadas, entendiendo como *Radiación Solar directa* al flujo de radiación que proviene directamente del sol, mientras que *Radiación Solar Difusa* el flujo de radiación que viene del sol pero que es esparcido por las nubes y los diferentes componentes de la atmósfera. Finalmente se entenderá por *Radiación Solar Global* a la suma de las dos anteriores.<sup>7</sup>

<sup>3</sup>Diccionario de la Real Academia Española. [www.rae.es](http://www.rae.es). Consultado: 9.diciembre. 2010. 20:30 Hrs.

<sup>4</sup> Ídem

<sup>5</sup> Ibídem

<sup>6</sup> Ibídem

<sup>7</sup> Muhlia V., Agustín. *Notas del curso: solarimetría*. 30 Semana Nacional de Energía Solar. Veracruz, Veracruz. ANES 2 a 6 de octubre de 2006.

Por Iluminancia se entenderá a la densidad de flujo luminoso incidente en un punto sobre una superficie. Su unidad de medida es el lux.<sup>8</sup> Y se divide de igual manera en Iluminancia Directa a la que proviene del sol; Iluminancia Difusa a la que es esparcida por la atmósfera, por lo tanto es considerada que viene del cielo; y por Iluminancia Global a la suma de las dos anteriores.

La metodología que se siguió para obtener resultados que se presentan es la siguiente:

1. Se llevaron a cabo mediciones en diferentes meses del año hechas en sitio para obtener datos de radiación solar global y difusa, con el objetivo de conocer el comportamiento solar en el sitio de estudio, además de la relación directa que existe entre la radiación y la iluminación natural disponible en un punto dado, como se verá más adelante. Se utilizaron Piranómetros Kipp and Zonen CMP21.
2. Se tomaron mediciones de Iluminancia Global y Difusa con el objetivo de conocer la cantidad y tipo que estará disponible para ser transportada por los sistemas de iluminación natural como los ductos o la fibra óptica. Para las mediciones de iluminancia se instalaron fotómetros Li-cor 210 SA. Todo el equipo utilizado en la parte experimental es parte de la infraestructura del Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio, del Programa de Maestría y Doctorado de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.
3. A través del Software alemán "Dialux" se hace un modelo tridimensional del espacio arquitectónico interior estudiado y se obtienen cálculos de iluminancia interior brindada por el sistema comercial "Solatube", con una sola fotometría generada por el proveedor y se compara con la iluminancia real medida en la fase experimental.
4. Se adquirió un Sistema de Transmisión de Luz Natural (STLN) de 53 cm de diámetro, que se distribuye de manera comercial en nuestro país, y se sometió a experimentación para conocer su rendimiento en invierno, estación del año que es la más desfavorable en términos de radiación solar y lumínicos, para poder llegar a conclusiones que determinen si este tipo de sistemas se pueden proponer como alternativas de iluminación en los espacios arquitectónicos de la Ciudad de México.

Se concluye en las mediciones de irradiancia e iluminancia que existen suficientes niveles de luz en el sitio de estudio que favorecen el uso de sistemas de luz natural, pero deberá contemplarse un sistema de luz artificial debido a la variabilidad del recurso natural, que en los meses de mayor nubosidad afectan de manera considerable su disponibilidad.

En tanto que, a los resultados obtenidos a través del software con fotometría considerada y al ser contrastada con las mediciones hechas en sitio, se observa que es posible obtener niveles superiores en nuestra latitud, que son suficientes para iluminar sólo con este medio el espacio analizado, pero que estos niveles solo son mantenidos durante horas cercanas al mediodía solar.

Finalmente de la parte experimental se genera material en cuanto a base de datos y gráfico, que ayudan a comprender el desempeño de los STLN en nuestra latitud y se abren líneas de investigación futuras, que incluyen la posible manufactura de estos sistemas en nuestro país o su realización directamente en obra. En este documento se presentan los resultados para la generación de alternativas de luz natural en espacios ya construidos.

---

<sup>8</sup> IESNA. Lighting Handbook. 9ª edición. Estados Unidos 2000. P 1000

## II. OBJETIVOS

### 2.1 GENERAL

Analizar maneras de captar, transmitir y distribuir la luz proveniente del sol para que, a través de dispositivos tecnológicos, se implementen sistemas en edificios de la Ciudad de México, que actualmente no tienen acceso a la luz natural.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Demostrar que es posible satisfacer las necesidades lumínicas de un espacio utilizando en mayor proporción luz natural.
- Conocer los sistemas tecnológicos contemporáneos de transmisión de luz natural, estudiando los principios físicos y los materiales en los que se basan.
- Impulsar la implementación de dispositivos tecnológicos que concienticen a los diseñadores y usuarios de la necesidad de espacios arquitectónicos correctamente iluminados a través de los beneficios que nos brinda la luz natural.

## III. HIPÓTESIS

**Es posible satisfacer las necesidades lumínicas de manera cualitativa y cuantitativa, por medio de luz natural, a través de la tecnología, reduciendo la demanda eléctrica en los espacios arquitectónicos de la Ciudad de México.**

En este capítulo se analiza la literatura correspondiente al tema de luz natural, sus componentes, las condiciones de su disponibilidad en el exterior y su medición.

También se revisan las estrategias utilizadas comúnmente en las edificaciones para el aprovechamiento de la luz de día, sus formas, tipos y materiales.

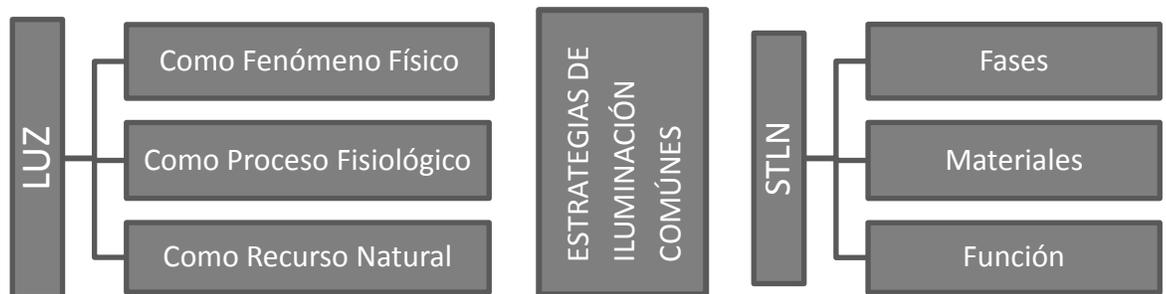
Así mismo, se realiza un estudio extenso sobre los sistemas contemporáneos de transmisión de luz natural, revisando materiales y principios físicos básicos de funcionamiento, por lo que se realizan las definiciones de estos métodos, así como una clasificación en pasivos y activos, y se establecen los objetivos en el uso de los mismos.

Finalmente se describen algunas variaciones importantes a los principales sistemas activos y pasivos descritos en esta sección, analizando los materiales o principios, que buscan optimizar su funcionamiento o su costo.



Cuando hablamos de Luz, debemos entenderla desde tres perspectivas para comprender de manera integral su manejo: 1. Como fenómeno físico; 2. Como fenómeno fisiológico y; 3. Como recurso natural. En el primer caso en donde la luz se entiende como fenómeno físico, se definen conceptos generales como Energía Radiante y espectro electromagnético; desde la segunda vertiente como un proceso fisiológico, se describe el término de sensibilidad visual y se explica el proceso de visión de un ser humano; Finalmente en la tercer vertiente como recurso natural y desde un punto de vista más arquitectónico, se profundiza en la luz proveniente del sol, su interacción con nuestra atmósfera y con el contexto urbano- arquitectónico, para estudiar su disponibilidad. Estos tres aspectos, físico, fisiológico y recurso natural, nos ayudarán a conocer las propiedades de la luz para poder determinar su importancia en los espacios construidos y derivar en la propuesta de integración de un sistema de captación, transmisión y distribución de la luz solar.

De la misma manera se analizan las estrategias de iluminación natural que comúnmente son utilizadas, haciendo referencia a ventanas, tragaluces y variaciones de estas dos con el objeto de conocer sus ventajas y limitaciones, para llegar así a la introducción de los Sistemas de Transmisión de Luz Natural (STLN) que, para su comprensión se estructura de la siguiente manera, inicialmente se da una definición general, se exponen los objetivos específicos de su uso, se brinda una clasificación de estos sistemas y finalmente se profundiza en su conocimiento analizándolos por fases, materiales que los componen y funcionamiento en cada etapa, concluyendo en una matriz que resume y clasifica los STLN para su consideración por la aportación que pueden generar en innovación y mejoramiento en el diseño de iluminación natural.



### 1.1 La luz como fenómeno físico

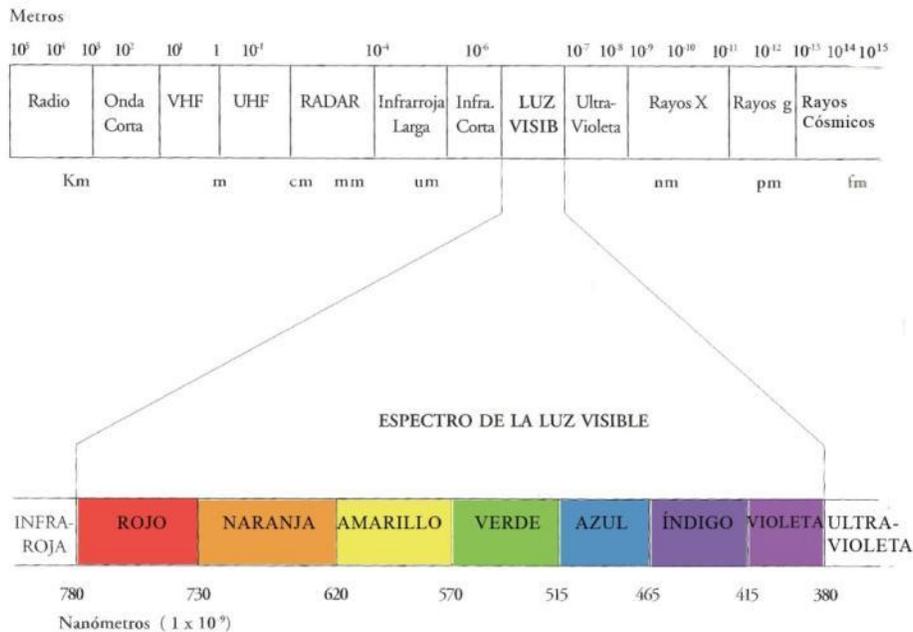
De acuerdo con Sven Szokolay, arquitecto investigador de la Universidad de Queensland, Australia y de la Universidad Central de Londres, “el término ‘luz’ se refiere a la sensación causada por una banda de longitud de onda relativamente pequeña del espectro electromagnético de la energía radiante, que abarca longitudes alrededor de 380 a 780 nanómetros (un nanómetro =  $10^{-9}$ )”<sup>1</sup>.

La luz tiene una característica dual pues tiene propiedades de partículas de energía y de movimiento de onda, en un medio homogéneo la luz viaja a través de él de forma recta, su

<sup>1</sup> Szokolay, Sven V. Environmental Science Handbook for Architects and Builders. Ed. The Construction Press Ltd. Estados Unidos 1980, pp. 79-81.

velocidad es aproximadamente 300 000 Km/s, aunque esta velocidad se ve modificada de acuerdo al medio en el que viaja.<sup>2</sup>

### Imagen 1. Espectro electromagnético.



FUENTE DE IMAGEN: Rodríguez Viqueira, Manuel. *Et al.* Introducción a la arquitectura bioclimática. Ed. Limusa-UAM Azcapotzalco. P 126

### Comportamiento de los materiales expuestos a la luz.

Es importante conocer las propiedades físicas de la luz, puesto que los materiales expuestos a ella tienen diferentes comportamientos. Podemos decir que de manera general cualquier superficie conduce la luz por medio de los fenómenos ópticos: Reflexión, transmisión, absorción y refracción.

**Reflexión.** De acuerdo con los investigadores Alemanes Rüdiger Ganslandt y Harald Hofmann<sup>3</sup> las superficies reflejan la luz incidente y de acuerdo al tipo de superficie que se trate, la reflectancia puede ser total o parcial. Así mismo según la manera en que la luz sea dispersada al reflejarse, pueden definirse cuatro tipos básicos: reflexión especular, reflexión semi-difusa, reflexión difusa y reflexión dispersa. Para los objetivos de esta investigación, es de especial importancia las superficies brillantes o también denominadas especulares, que reflejan una gran cantidad de luz incidente y sobre la cual no se produce ninguna dispersión, para estas superficies la ley básica es que el ángulo de reflexión es el mismo que el ángulo de incidencia.

**Transmisión.** En este caso, los rayos de luz pasan a través del objeto, de tal manera que existe cierto grado de transparencia, igual que en el caso de la reflexión, la luz obtenida a través de un

<sup>2</sup> Idem

<sup>3</sup> Rüdiger Ganslandt y Harald Hofmann. Traducción Ranveig Winteg. Manual. Cómo planificar con luz. Ed. ERCO-Vieweg. Versión en español. España 2008, pp. 85- 87

cuerpo transparente puede ser directa también llamada regular o difusa.<sup>4</sup> Determinando directamente el grado de difusión de la luz transmitida, se habla de una dispersión total si se entrega completamente luz difusa, mientras que en materiales transparentes no se produce ninguna dispersión.<sup>5</sup> De acuerdo con la Sociedad de Ingenieros en Iluminación la transmitancia luminosa de un material queda definida por la relación del total de luz emitida por una superficie y el total de luz incidente en dicha superficie.<sup>6</sup>

**Refracción.** En este caso el rayo de luz que pasa a través de un objeto cambia de dirección, debido a que sufre una modificación en la velocidad de propagación, pues pasa de un medio transparente a otro con diferente densidad.

**Absorción.** El rayo de luz es absorbido por el cuerpo, re-emitiéndolo con una longitud de onda diferente, que en caso de re-emitirlo con una longitud de onda larga entonces se transforma la luz en calor.

En general, se puede concluir que la luz incidente en la superficie de un objeto puede ser conducida de tres maneras: reflejada (*r*), absorbida (*a*) o transmitida (*t*), pero en todos los casos:

$$r + a + t = 1^7$$

La reflexión, absorción, refracción y dispersión resultan fenómenos importantes puesto que las nubes presentan este comportamiento ante la luz del sol, obteniendo luz indirecta y siendo de gran aporte en el diseño de iluminación cenital, tema que se desarrollará posteriormente en la sección de tipos de cielo y estrategias de diseño.

## 1.2 La luz como proceso fisiológico

El proceso de visión, es uno de los aspectos más importantes al hablar de la luz, pues es principalmente para los seres humanos para quienes se diseñan los espacios arquitectónicos, por lo que debemos conocer las características de los órganos que intervienen en este proceso, de no cuidar este aspecto, no podríamos hablar de confort lumínico.

El ojo humano tiene gran capacidad de adaptación y de acuerdo al proceso, es el tiempo de respuesta, sin embargo, el tener grandes variaciones en niveles de iluminación en la transición de un espacio a otro, podría causar agotamiento y en ocasiones daños permanentes por deslumbramiento. La fatiga visual, el deslumbramiento, la agudeza visual y la sensibilidad, son factores asociados a niveles de iluminación, que al no cumplir con los requerimientos para la actividad desarrollada podrían causar problemas en el desempeño de las personas.<sup>8</sup>

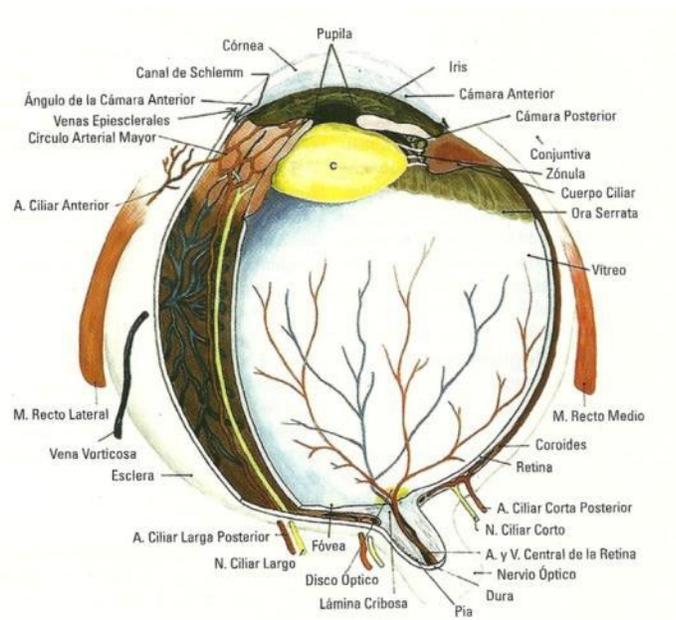
<sup>4</sup> Tornquist, Jorrit. Traducción de Rosa María Oyarbide Color y luz. Teoría y Práctica. Ed. Gustavo Gili. Barcelona 2008, pp 40- 47.

<sup>5</sup> Rüdiger Ganslandt y Harald Hofmann. *Op. Cit.* p. 85 y 87

<sup>6</sup> IESNA. Lighting Ready Reference. Capítulo 4 Light, Óptics and Luminaire Performance. 4a edición. Estados Unidos 2003, p 41

<sup>7</sup> Szokolay Sven V. *Op. Cit.* p 80.

<sup>8</sup> Holahan, Charles J. Psicología Ambiental. Un enfoque general. Ed. Limusa. México 2005, pp. 159- 161.



## Imagen 2. Sección longitudinal del Ojo humano.

Fuente de imagen: Argento, Carlos. Oftalmología General. Introducción para el especialista. Editorial Corpus. Argentina 2007. p 25. Figura: Dr. Jorge Ludueña.

De acuerdo a la Sociedad de Ingenieros en Iluminación Sección Norteamérica (IESNA, por sus siglas en inglés)<sup>9</sup> el ojo humano se puede dividir en tres estructuras básicas:

- a) El Motor-ocular. Representado por los músculos que componen el ojo
- b) Los componente ópticos. Que son la córnea, el cristalino, la pupila y el humor vítreo.
- c) Los componentes neurológicos. La retina y el nervio óptico.

María Elena Díaz en su libro “Óptica Aplicada”, explica la función de los órganos que intervienen en el proceso visual, destacando:

**Cristalino.** Es el encargado de la ‘acomodación’, proceso que consiste en enfocar objetos lejanos y cercanos. Se establece que los objetos cercanos deberán estar mínimo a 25 cm de distancia respecto al ojo para no presentar fatiga ocular. El tiempo necesario para enfocar objetos de lejos a cerca es de 0.605 seg., mientras que el tiempo necesario para enfocar objetos de cerca a lejos es de 1.05 seg.

**Retina.** Tiene como función primordial la formación de imágenes, además es la única parte del cuerpo en que pueden observarse directamente los vasos sanguíneos, es en donde se localizan las células de la visión, llamadas fotorreceptores, receptores o sensores visuales que son dos: los bastones y los conos.

<sup>9</sup> IESNA Lighting Handbook. Reference and Application. 9ª Edición.

Los **bastones** actúan en la visión con baja iluminación y en la detección periférica, por lo que a niveles bajos de iluminación la pupila se dilata, lo que da lugar a la visión nocturna, también llamada visión escotópica. Responden a grados de iluminación tan bajos de casi un fotón, el cuál debe percibirse al menos por dos células para evitar la sensación de relámpagos luminosos. Responden cuatro veces más lentamente que los conos. Son sensibles a la banda espectral entre el azul y el naranja, con un máximo hacia el verde de 550nm (ver imagen 1). La adaptación a la obscuridad se produce también por interacción con las células nerviosas, si la luz es débil, aumenta el diámetro pupilar y se incorporarán más células a la detección de luz, aumentando la agudeza. Los bastones son las primeras células que sufren daños permanentes cuando se exponen a niveles excesivos de luz, en particular a ultravioleta.

Los **conos** detectan niveles más altos de iluminación, color, contraste, y tienen un poder resolutivo mayor (visión fotópica). El diámetro medio de los conos es de una micra, equivalente a dos longitudes de onda visibles. Los conos contienen tres tipos de moléculas fotosensibles, llamadas iodopsinas de color púrpura rojizo, estos tres grupos de conos se dividen de acuerdo a su sensibilidad a la luz roja, azul o verde. Cuando el nivel de iluminación es suficientemente alto, se estimulan los conos, siendo más sensibles a la luz verde amarillenta. La adaptación a la luz brillante se hace necesaria cuando el flujo de fotones satura los bastones, por lo que están sobreestimulados. Por esto la pupila se contrae y se estimulan los conos. El número total de conos es aproximadamente de 10 millones, y los bastones de cerca de 100 millones. El rango práctico de percepción oscila entre la luz de un fotón correspondiente a una intensidad de  $10^{-10}$  W por metro cuadrado hasta 100 W por metro cuadrado. Así los ajustes del ojo se realizan automáticamente sin que el sujeto los perciba. Según la ley de Weber, la sensibilidad disminuye a medida que crece la intensidad, pero sólo hasta cierto límite, porque las células sensoriales no pueden ganar sensibilidad indefinidamente; esto es importante por los contrastes, ya que en el proceso retinal éstas células intentan ajustar la sensibilidad de los ojos según el contraste, permitiendo que se pueda discriminar más de 10 niveles de grises.<sup>10</sup>

De manera general, la retina, lugar en donde se encuentran los fotorreceptores, capta la luz y transforma en estímulo nervioso para ser interpretado en el cerebro, mientras que los demás componentes del ojo, le ayudan para su correcto funcionamiento, protegiendo al ojo se encuentra la córnea, la cámara anterior, los párpados y la conjuntiva; ayudando en el proceso de acomodamiento de acuerdo a los niveles de iluminación están el iris y la cámara ciliar, dilatando o contrayendo la pupila. Finalmente los músculos que conforman el ojo ayudan a dirigir la mirada a los objetos que deseamos ver.<sup>11</sup>

Acorde con lo que la Sociedad de Ingenieros en Iluminación reporta en su “Manual de Iluminación”<sup>12</sup>, la capacidad de respuesta del ojo humano varía según la longitud de onda que estimula al sistema visual, esta sensibilidad espectral relativa se representa en una curva fotométrica, en ella se observa que para la visión fotópica el ojo es más sensible a la longitud de 550nm correspondiente al color verde- amarillo y menos sensible a longitudes 380nm-415 nm (violeta) y 650nm-780nm (naranja-rojo). Para la visión escotópica o nocturna la mayor sensibilidad

<sup>10</sup> Díaz Enciso, María Elena. Óptica Aplicada Programada. Instituto Politécnico Nacional. México 1999, pp.27-29, 33-35 y 61-63.

<sup>11</sup> Argento, Carlos. Oftalmología General. Introducción para especialistas. Ed. Corpus. Rosario, Argentina 2007. Pp. 23-27.

<sup>12</sup> IESNA, Lighting Handbook. p. 94

se registra a los 520 nm. Es necesario conocer estos datos, pues bajo iluminación natural el ojo es capaz de percibir y diferenciar toda la gama de colores. La mayor parte de los instrumentos de medición de luz, como fotómetros o luxómetros, tienen la corrección de acuerdo a la gráfica de sensibilidad espectral, para que los registros se asemejen a la percepción del ojo y las decisiones tomadas en base a esos valores puedan ser los adecuados, de otra manera, los espacios arquitectónicos no cumplirán en gran parte los requerimientos del usuario.

### 1.3 La luz natural como recurso.

La fuente principal de energía para nuestro planeta, proviene del sol. Esta energía llega a la tierra por medio de ondas electromagnéticas (oem), una oem es un campo eléctrico y un campo magnético de formas sinusoidales y perpendiculares, cuyas propiedades de velocidad de traslación y frecuencia dependen del medio que atraviesan y con ello determinan su longitud de onda. De toda la radiación de energía proveniente del sol el rango de longitud de onda que cubre va de los 250 nm a los 2500 nm<sup>13</sup>, en donde el 9.3% corresponde a la radiación ultravioleta, el 41.5% a la porción de luz visible y el 49.2% a la radiación infrarroja<sup>14</sup>, y la mayor parte de esta energía pasa la atmósfera como radiación de onda corta<sup>15</sup>. Cabe señalar además que la radiación ultravioleta es dividida en tres UV-A que va de los 320nm a los 400 nm y es la que provoca manchas en la piel; la UV-B de los 290nm a los 315nm crea la Vitamina D en nuestro organismo, y la UV-C con longitud menor a los 280nm es la más dañina a nuestro organismo, sin embargo es completamente absorbida por la capa de ozono<sup>16</sup>. Por lo tanto esta radiación solar estará interactuando con la atmósfera, los materiales arquitectónicos y principalmente con nuestro organismo, por lo que la comprensión de el efecto de cada porción del espectro electromagnético es importante para la generación de espacios arquitectónicos más saludables para el ser humano.

En el tope de la atmósfera la constante de iluminación solar o iluminancia solar total en un plano normal al flujo luminoso es de 128 Klx, pero la cantidad de energía y su distribución espectral en la porción de luz visible proveniente del sol y que alcanza la superficie terrestre varía dependiendo de las condiciones atmosféricas del sitio y de la posición del sol<sup>17</sup>.

La atmósfera es una mezcla física de gases, compuesta principalmente de oxígeno y nitrógeno, contiene vapor de agua, aerosoles y otros gases. Los aerosoles son partículas suspendidas de sal de mar, polvo mineral, material orgánica y smog, que incluso en los lugares con mayor pureza en el aire presentan alrededor de 100 partículas por cm cúbico<sup>18</sup>

<sup>13</sup> Chiron de la Casinière, Alain y Cachorro Revilla, Victoria E. La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera. Universidad de Valladolid.

<sup>14</sup> Galindo, Ignacio. Irradiación solar global en la República Mexicana: Valores horarios medios. UNAM. México 1999

<sup>15</sup> Barry, Roger G. y Chorley, Richard J. Atmosphere, Weather and Climate. Ed. Routledge. Gran Bretaña 2003, p. 33

<sup>16</sup> Boubekri, Mohamed. Daylight, Architecture and Health. Building Design Strategies. Ed. Elsevier. Gran Bretaña 2008, p. 64 y 65.

<sup>17</sup> IESNA Lighting Handbook. p.335

<sup>18</sup> Häckel, Hans. Nubes. Ediciones Omega. Barcelona 2006, p. 7

Las capas de la atmósfera se encuentran divididas principalmente por la variación en la temperatura en un corte vertical de la misma, estas temperaturas son analizadas en las investigaciones en ondas de radio, radares y recientemente por los sistemas de sonido de vuelos y satélites, pero las variaciones térmicas en las diferentes latitudes y los cambios estacionales complican las propuestas de modelos, sin embargo, puede observarse y determinarse la siguiente división:

**Tropósfera.** Es la capa más baja de la atmósfera y en ella se dan la mayor parte de los fenómenos climatológicos, contiene el 75% de la masa gaseosa de la atmósfera y en ella se encuentra todo el vapor de agua y aerosoles. Se da un notable cambio de temperatura con la altura, presentando un decremento de  $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , este decremento se debe a que con la altura la presión del aire disminuye y por lo tanto se expande provocando que la temperatura descienda. Debido a que esta capa absorbe el calor proveniente de la superficie, se da la inversión térmica, por lo que el aire caliente se encuentra encima del aire frío, lo que facilita la delimitación superior de esta capa, en donde arriba se encuentra la denominada tropopausa.

**Estratósfera.** Capa que se encuentra arriba de la tropopausa y representa el 10 por ciento de la masa total de la atmósfera, en ella se encuentra grandes cantidades de ozono, sin embargo la mayor parte de la absorción de los rayos ultravioleta ocurre en la Estratopausa. En la estratósfera ocurren grandes cambio de temperatura con los cambios de estación de acuerdo a la latitud.

**Mesósfera.** Encima de la estratopausa, la presión atmosférica es muy baja y con ello también las temperaturas  $-133^{\circ}\text{C}$ , por lo que se genera nuevamente una inversión térmica, lo que da lugar al reconocimiento de la mesopausa. En esta capa se da el fenómeno de formación de nubes que se forman por el polvo estelar y que sólo son visibles en latitudes altas durante las noches de verano.

**Termósfera.** La densidad atmosférica es extremadamente baja. La ionósfera es la última capa de la atmósfera terrestre y en ella impactan los rayos X solares, la radiación cósmica y la radiación ultravioleta, así como la generación de la Aurora Boreal y Austral.

El comportamiento de la luz solar es distinto en las diferentes longitudes de onda, debido a las propiedades ópticas de absorción, reflexión, difusión y esparcimiento. La absorción y reflexión se ven principalmente modificados por formaciones nubosas y dióxido de carbono, mientras que la difusión definida como “una desviación de la radiación que incide en las moléculas del aire. La banda azul del espectro (ondas cortas) experimenta una difusión mucho más intensa que la banda roja del espectro (ondas largas)”<sup>19</sup> o esparcimiento definido como “un fenómeno que se manifiesta cuando el rayo de luz se topa con las nubes y se desvía en todas direcciones y se puede decir que las nubes no son más que acumulaciones gigantescas de minúsculas gotitas de agua condensadas que se tornan visibles por efecto del esparcimiento de la luz solar”<sup>20</sup>

---

<sup>19</sup> Günter D. Roth. Meteorología. Formaciones nubosas y otros fenómenos meteorológicos. Ed. OMEGA. Barcelona 2003, 21-33

<sup>20</sup> Barry, Roger G. y Chorley, Richard J. *Op. Cit.* pp. 37-38

## Tipos de Nubes

En la meteorología y climatología, las nubes son clasificadas por familia, género, clases, subclases y particularidades. Para fines de este estudio solo se precisan familias y géneros de nubes. La Familia determina la altura a la que se encuentra la nube, a su vez que el género indica su forma. Para nombrar el tipo de nubes se utilizan prefijos designando la familia a la que corresponden y sufijos para el género.

**Tabla 1 Familias de nubes** <sup>21</sup>

Nubes	Altura de desarrollo	Prefijo
Altas	De 6 km a 13 Km	Cirr
Medias	De 2 km a 6 km	Alto
Bajas	Entre el suelo y los 2 Km	----

En cuanto al género, las nubes se dividen en tres:

**CIRROS** (*cirr*). Sólo son nubes altas y delgadas como plumas, que revelan movimientos de aire y vapor de agua hacia las capas superiores de la atmósfera, que en su condensación forman hielo. En ocasiones preceden o traen consigo a cirrocúmulos y a cirrostratos.

**CÚMULOS** (*cumulus*). Pequeños glóbulos de nubes que van creciendo rápidamente, cuando se enfrenta una corriente de aire caliente y una fría se dan rápidos desplazamientos de aire hacia arriba, lo que genera cúmulos verticales. Los cúmulos pueden presentarse a diferentes alturas, de ahí su nombre:

- Cúmulos altos. Cirrocúmulos (cc) Nubes altas superiores a 6000 metros, pequeños glóbulos que se repiten en serie.
- Cúmulos medios: Altocúmulos (ac) entre 2000 y 6000 metros, también conocidas como borregos o algodones. Cumulonimbos (cb) entre 1000 y 5000 m torres de nubes que contienen gotas y hielo. Son símbolo de precipitaciones de granizo y vientos racheados
- Cúmulos bajos: estratocúmulos (sc) alturas inferiores a 2000 m, nubes bajas de color blanco o grisáceo con partes oscuras.

“Los cúmulos, más densos que las nubes de hielo (cirros), alteran el balance radiativo en la atmósfera y en la superficie terrestre, porque reducen la transparencia de la parte superior de la atmósfera tanto para la radiación solar como para la radiación infrarroja, de longitud de onda larga. En cambio, la elevada capacidad reflectora de las nubes favorece la radiación solar. Las nubes muy densas y altas vuelven a irradiar el 80% de la radiación solar incidente La relación entre el grosor de las nubes y su extensión horizontal es relevante para las propiedades de la radiación. Los laterales de las ‘torres de nubes’ actúan como superficies adicionales de absorción y emisión. Por eso crean tanta oscuridad las nubes de tormenta. La mayoría de la radiación escapa de la nube por las partes laterales”<sup>22</sup>.

<sup>21</sup> Häckel, Hans. *Op. Cit.* p. 27- 35.

<sup>22</sup> Günter D. Roth. *Op. Cit.* p. 88

**ESTRATOS** (*stratus*). Se generan cuando una masa de aire caliente se acerca a un área predominada por aire frío, generando nubes que hacen palidecer el cielo y el sol se aprecia con un halo. Con el tiempo el cielo se vuelve gris. La nube es de aspecto estratificado o estriado, predominantemente horizontal y es símbolo de precipitaciones. También de acuerdo a la altura en la que se encuentran se clasifican:

- Estratos altos: cirrostratos (cs) alturas superiores a los 6000 m, su aspecto es de velo nuboso y blanquesino que en su presencia se genera el efecto de halo en el sol.
- Estratos medios: altostratos (as) entre 2000 y 6000 m, de forma estriada o sin estructura, de color gris.
- Estratos bajos: nimbostratos (ns) o estratos (st) a menos de 2000 m de altura, son nubes de color gris oscuro que indican lluvia en verano y nevadas en invierno. También representa a la niebla.

“con estratos bajos dispuestos en horizontal, su capacidad reflectora (albedo) tiene un efecto más intenso que la disminución por pérdida de radiación de onda larga en el espacio”<sup>23</sup>.

## TIPOS DE CIELO

Debido a la importancia que tiene la nubosidad y las condiciones climáticas en la determinación de la disponibilidad de luz natural de un sitio, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en francés *Commission Internationale de l'Eclairage*) ha desarrollado diversos modelos matemáticos de tipos cielo, en el que generalmente se utilizan tres como estándar: Cielo despejado, cielo cubierto o nublado y cielo parcialmente nublado. Esta clasificación fue generada a partir del trabajo de diversas personas, desde 1942 los investigadores estadounidenses Parry Moon y Domina Eberle Spencer propusieron el modelo de cielo nublado, mientras que en 1967 el investigador Eslovaco Richard Kittler desarrolló el modelo de cielo despejado y finalmente en 1988 los investigadores japoneses Matsuura y Nakamura prepararon el reporte técnico TC 3-09 para la CIE, que proponía un nuevo tipo de cielo denominado parcialmente nublado o cielo intermedio, el cual era resultado de analizar y promediar los dos modelos anteriormente aceptados (despejado y nublado).<sup>24</sup> Finalmente en el 2002 Stanislav Darula y Richard Kittler con el objetivo de motivar a los diseñadores a tomar el cielo como una fuente primaria de luz, presentan un artículo en el que desarrollan 15 diferentes tipos de cielo, cinco modelos de cielo despejado, cinco de cielo cubierto y cinco de cielo parcialmente nublado, pues de acuerdo a su postura los modelos extremos de cielo despejado y nublado no representan completamente lo que ocurre en la realidad.<sup>25</sup>

La Asociación de Ingenieros en Iluminación (IESNA) establece que existen dos escalas o métodos para clasificar al cielo: 1) Relación de Cielo (Sky ratio) y; 2) Modelo de Cielo Cubierto (sky-cover)<sup>26</sup>.

<sup>23</sup> Günter D. Roth. *Op. Cit.* p. 96

<sup>24</sup> Baharuddin, Stephen; S.Y. Lau y Ramli Rahim. “Daylight availability in Hong Kong: classification into three sky conditions”. Revista: *Architectural Science Review*. No. 53 (2010), pp.396 y 397.

<sup>25</sup> Darula Stanislav y Kittler, Richard. “CIE general sky standard defining luminance distributions” Instituto de Construcción y Arquitectura de Eslovaquia . Consultado en [www.google.com](http://www.google.com) el día 29 de septiembre de 2011.

<sup>26</sup> IESNA Handbook, p. 342

El primer método llamado Relación de Cielo es un coeficiente obtenido al dividir:

$$RC = \frac{\text{Irradiancia difusa horizontal}}{\text{Irradiancia global horizontal}}$$

Y su escala es:

- Si  $RC \leq 0.3$  entonces se considera cielo despejado
- Si  $0.4 \leq RC \leq 0.7$  se considera Cielo parcialmente nublado
- Si  $0.8 \leq RC \leq 1.0$  se considera Cielo nublado o cubierto

El segundo método es por apreciación y consiste en dividir el cielo en 10 partes o en décimos y observar la porción de cielo que se encuentra cubierta por nubes, por lo que su escala va de 0.0 cielo despejado a 1.0 cielo cubierto. De manera más precisa se puede decir:

- De 0.0 a 0.3 se considera Cielo despejado
- De 0.4 a 0.7 se considera Cielo parcialmente nublado y;
- De 0.8 a 1.0 se considera Cielo nublado

De acuerdo con la CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers), Institución de Estandarización británica, la clasificación es la siguiente:

- Cielo cubierto: Si existe presencia de nubes superior a 90% y el sol no está visible.
- Cielo parcialmente despejado: presencia estacional del sol, alternada por períodos de nubosidad variable.
- Cielo despejado: Un cielo no obstruido por nubes. En todos los clasificaciones para cielo despejado el sol no está obstruido por las nubes.<sup>27</sup>

En México el Servicio Meteorológico Nacional, también utiliza un método de apreciación y divide el cielo en octantes por lo que su escala es:

- Si las nubes cubren máximo 2/8 partes del cielo, se considera Cielo despejado
- Nubes que cubre de 2/8 a 6/8 partes, se considera Cielo Medio Nublado
- Y un cielo cubierto por nubes en más de 6/8 partes es considerado Cielo nublado.<sup>28</sup>

Existe una estrecha relación entre nubosidad y la luminancia o distribución luminosa en el cielo. Sobre esto es que se han presentado los modelos matemáticos anteriormente señalados. De manera general para los tipos de cielo estándar (despejado, nublado y parcialmente nublado) la distribución luminosa se describe de la siguiente manera:

En un **Cielo cubierto** se define que el cenit es tres veces más brillante que el horizonte. Y su representación matemática es:

<sup>27</sup> Pattini, Andrea. Capítulo 11. *Luz natural e iluminación de interiores*. p 7. <http://www.herrera.unt.edu.ar>. Consultado: 27 de enero de 2011.

<sup>28</sup> Servicio Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mx> en la sección de glosario para la definición de 'Estado del Cielo según la cobertura de nubosidad'. Consultado: 23 de agosto de 2012.

$$L_A = L_Z \left( \frac{1 + 2\text{sen } A}{3} \right)$$

En donde:

$L_A$ = luminancia en un punto del cielo a  $A^\circ$  por encima del horizonte; y

$L_Z$ = Es la luminancia en el cenit.

Para conocer la luminancia en el horizonte  $A= 0^\circ$  y por tanto  $L_A= (L_Z/3)$

Durante un **cielo despejado** la distribución luminosa depende principalmente de la posición solar, pues el punto más brillante de la bóveda celeste estará en el área circundante del sol y la parte más oscura será la opuesta, la que se encuentra a  $90^\circ$  en el mismo plano vertical. En el resto de la bóveda se propone un modelo inverso al del cielo cubierto, por lo que se afirma que el horizonte es tres veces más brillante que el cenit.<sup>29</sup>

En los cielos intermedios, la distribución lumínica en el cielo dependerá del tipo de nubes y de su posición relativa al sol, se harán variaciones rápidas de luminancia en la bóveda celeste y alternará rápidamente entre un sol despejado a cubierto por nubes.<sup>30</sup>

Para poder hacer uso efectivo de la luz natural en las edificaciones, es necesario saber que es un recurso cuya característica principal es la variabilidad, por lo que es importante conocer cómo se comporta y principalmente cuáles son las causas de sus variaciones, por lo que se hace una definición de los componentes de la luz natural o, mejor dicho, de cómo se descompone la luz proveniente del sol en su interacción con la atmósfera debido los fenómenos meteorológicos que en ella se dan, principalmente la presencia de nubes.

### Componentes de la luz natural

Una vez explicada la manera en que la energía proveniente del sol interactúa con nuestra atmósfera, se pueden establecer tres componentes principales de luz natural: luz directa, luz difusa y luz reflejada o indirecta. Cada una de ellas es una fuente de iluminación.

Se denomina **luz directa** (sunlight) a la porción de luz visible que llega directamente a la superficie de la tierra desde el flujo de radiación del sol. La dirección y la intensidad varían de acuerdo a la posición solar.

La **luz difusa** (skylight) es la porción de luz visible que proviene de la bóveda celeste, sin considerar el rayo solar directo. Que como se explicó anteriormente es la porción de luz visible proveniente del sol que se dispersó o descompuso en la atmósfera y por reflexión de las nubes.

La **luz solar indirecta** es la que llega por reflexión a través de las superficies del contexto o del interior de los espacios.<sup>31</sup>

<sup>29</sup> McGuiness, Stein y Reynolds. Mechanical and Electrical Equipment for Buildings. Ed. John Wiley and Sons. Estados Unidos 2003, pp. 1114 y 1115.

<sup>30</sup> Ander, Gregg D. Daylighting Performance and Design. Ed. John Wiley and Sons. Estados Unidos 2003, p. 6

<sup>31</sup> Pattini, Andrea. *Op. Cit.* p. 6

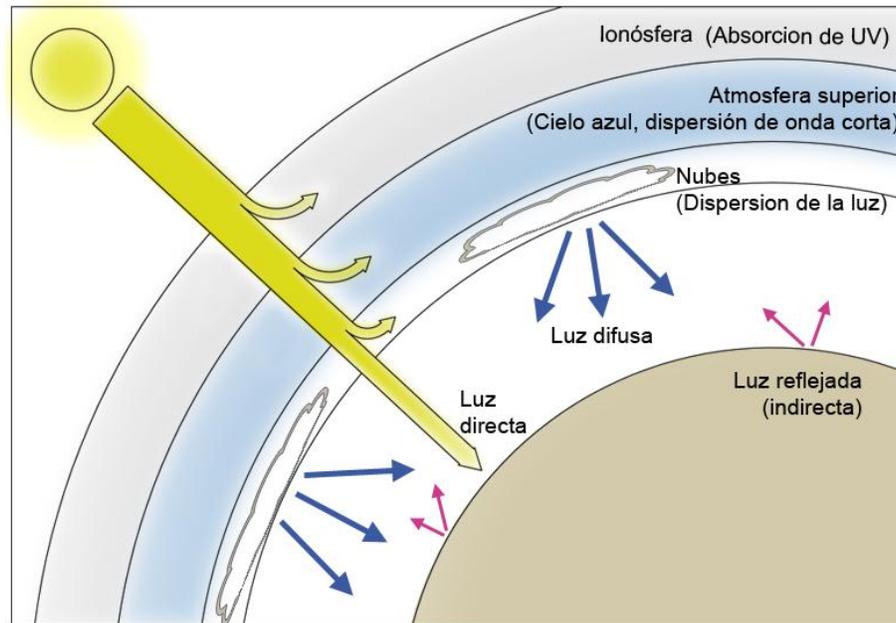


Ilustración 1. Componentes de la luz natural.

Otros autores agregan que es muy importante tomar en cuenta el contexto inmediato de la edificación, pues la vegetación y las construcciones aledañas podrían beneficiar o ser obstrucciones que afecten los niveles de iluminación en los espacios arquitectónicos interiores, es por ello que se la componente de luz solar indirecta en dos vertientes:

**Componente de Reflejo del suelo.** Que es la radiación por reflejo de las superficies del contexto debajo de la línea de horizonte del observador.

**Componente de obstáculos reflejados.** Radiación reflejada proveniente de una superficie de obstrucciones opacas, solidas o permeables, arriba de la línea de horizonte del observador.

Se vuelve entonces necesario hacer un análisis específico del sitio, para determinar la porción de cielo que se encuentra libre de obstrucciones; las superficies potencialmente reflejantes tanto en el plano vertical como horizontal, es decir, que se trate de pavimentos o de muros cercanos, especialmente en las áreas urbanas; los obstáculos lumínicos opacos (edificaciones) o permeables (vegetación) y considerar si son obstáculos estacionales; finalmente observar los objetos cercanos que puedan convertirse en fuentes de reflexión secundaria<sup>32</sup>.

A continuación se definen algunos términos que serán utilizados a lo largo de la investigación, por lo que conviene precisarlos en esta fase del documento.

Se entenderá por **Radiación Solar directa** al flujo de radiación que proviene directamente del sol, mientras que **Radiación Solar Difusa** el flujo de radiación solar que es esparcido por las nubes y los diferentes componentes de la atmósfera. Finalmente se entenderá por **Radiación Solar Global** a

<sup>32</sup> Alejandro Mesa, Mariela Arboit y Carlos de Rosa. "Disponibilidad de luz natural en el exterior de una edificación". Revista: Architectural Science Review. Volumen 53. No. 2 (2010). pp. 224-237.

la suma de las dos anteriores.<sup>33</sup> A la potencia de radiación solar que se recibe en un instante determinado sobre un metro cuadrado de superficie se conoce como **Irradiancia**<sup>34</sup>.

Por **Flujo luminoso** se entenderá como la potencia de la luz dada por una fuente luminosa, su unidad de medida es el lumen (lm), podría medirse en Watt por tratarse de potencia pero esta unidad no considera la sensibilidad espectral ocular, aspecto que el lumen si considera<sup>35</sup>. La **luminancia** es la densidad superficial del flujo luminoso, o intensidad luminosa, que surge, atraviesa o refleja una superficie en una dirección dada, ya sea que esta superficie produzca ese flujo luminoso o sólo lo re-emita; la unidad de luminancia es la candela sobre metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ). La **Iluminancia** será la densidad del flujo luminoso que incide sobre una superficie, en ocasiones se utiliza el término **niveles de iluminación** como sinónimo de iluminancia, cuya unidad de medida es el lux (lx) que es un lumen sobre metro cuadrado:  $\text{lx}=(\text{lm}/\text{m}^2)$ .<sup>36</sup>

A lo largo de la investigación se referirá como iluminancia a la iluminancia solar, es decir sin considerar fuentes alternas de iluminación como la artificial.

A manera de conclusión de la sección de luz natural como recurso, debe comprenderse que los componentes de la luz natural (el sol, el cielo y el contexto inmediato de un espacio arquitectónico) pueden tomarse como fuentes de iluminación primaria, pues aún cuando no sea posible tener el rayo de luz incidiendo directamente en los espacios (y que en ciertos casos es mejor), puede utilizarse la aportación de luz del cielo de acuerdo a la condición climatológica que determinará su luminancia y con ello se precisará la iluminancia o los niveles de iluminación que estarán disponibles en un punto de la tierra y en el interior de los espacios arquitectónicos, así como también se deberá explorar la aportación de luz indirecta al ser reflejada en elementos cercanos al área de estudio. Finalmente, es necesario comprender que los objetos sólo son perceptibles cuando la luz incide en ellos y de manera recíproca, la luz entra y se modela en los espacios arquitectónicos incidiendo en sus superficies.

---

<sup>33</sup> Muhlia V., Agustín. Notas del curso: solarimetría. 30 Semana Nacional de Energía Solar. Veracruz, Veracruz. ANES 2 a 6 de octubre de 2006.

<sup>34</sup> Ibañez Plana, M. *Et al.* Energías Renovables. Tecnología Solar. Ed. Mundi- Prensa. Madrid 2004, p. 23.

<sup>35</sup> Rüdiger Ganslandt y Harald Hofmann. *Op. Cit.* p. 40- 42

<sup>36</sup> IESNA, Lighting Handbook. p. 1006

## 1.4 Sistemas y estrategias de iluminación natural utilizados comúnmente

De acuerdo con la Real Academia de la Lengua Española, por ‘Sistema’ se entiende al “Conjunto de cosas que entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto”<sup>37</sup>, mientras que ‘Estrategia’ es definido como el “conjunto de reglas que aseguran una decisión óptima en cada momento”<sup>38</sup>. Es por lo anterior que un sistema y estrategia de iluminación natural serán el conjunto de elementos y métodos que tienen por objetivo llevar luz natural al interior de los espacios arquitectónicos, pero como se verá más adelante buscarán objetivos más específicos que sólo entregar luz puesto que, como su definición lo dice, buscarán que ésta tenga las cualidades y sea óptima para lo cual es requerida.

Básicamente existen tres estrategias de aprovechamiento de luz natural<sup>39</sup>: iluminación cenital, iluminación lateral y combinada que gracias a los avances tecnológicos en la arquitectura contemporánea, las soluciones han sido tan variadas que formalmente no se limita al plano horizontal o vertical.

En cuanto a **iluminación cenital** se refiere el ejemplo más representativo es el tragaluz o domo, pero de manera general es básicamente cualquier abertura en un plano predominantemente horizontal, en donde la luz es traída desde arriba de la edificación. De manera ideal en un plano horizontal sin obstrucciones la iluminación cenital se beneficiará de la luz proveniente del cielo ya que tiene disponible toda la bóveda celeste por arriba del horizonte mientras que una abertura en el plano vertical solo tiene la mitad<sup>40</sup>. En un sentido más poético Elías Torres, Doctor por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, refiere que la luz cenital es una relación abstracta con el exterior, pues su único objetivo es la iluminación, una luz íntima y enigmática, no nos interesa entonces el contacto visual con lo que sucede en el exterior<sup>41</sup>.

La **iluminación lateral** es la más común y la ventana es el ejemplo más claro. La luz es recibida en una abertura en el plano vertical y llevada al interior. Algunos de las consideraciones para saber dónde debe colocarse la abertura son la orientación, la altura a la que debe situarse y la dimensión. Sobre esta última existen varias condiciones que pueden definirla, tales como reglamentación para salidas en caso de emergencia, ventilación o climatización (NOM-008). En lo que iluminación se refiere las Normas Técnicas Complementarias al Reglamento de Construcción del Distrito Federal establecen

El dimensionamiento de ventanas debe relacionar la iluminancia requerida, que es determinada por la actividad a desempeñarse en el interior y las condiciones del cielo predominantes en el sitio. Uno de los modelos matemáticos propuestos<sup>42</sup> en zonas donde el cielo nublado ocurre de manera frecuente es:

$$V = \frac{FLD_{PROM} \cdot A \cdot (1 - R^2)}{X \cdot T \cdot M}$$

<sup>37</sup> Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española. [www.rae.es](http://www.rae.es) Consultado el 27 de agosto de 2012.

<sup>38</sup> Ídem.

<sup>39</sup> Pattini, Andrea. *Op. Cit.* p. 13

<sup>40</sup> McGuiness, Stein y Reynolds. *Op. Cit.* P. 1117

<sup>41</sup> Torres Tur, Elías. Luz Cenital. Tesis Doctoral. COAC Publicaciones. Barcelona 2004, p. 15

<sup>42</sup> Baker, Nick y Steemers, Koen. Daylight design of buildings. Ed. James y James. Hong Kong 2002, pp.63- 65

En donde:

$FLD_{PROM}$  = Factor Luz de Día promedio, que se calcula al dividir la iluminancia interior entre la iluminancia exterior, por lo que el resultado es un porcentaje (%).

A= área de todas las superficies interiores ( $m^2$ )

R= reflectancia interior promedio, y se calcula:

$$R = (a_1r_1 + a_2r_2 + \dots + a_n r_n) / (a_1 + a_2 + \dots + a_n)$$

a= área de superficie ( $m^2$ )

r= reflectancia de la superficie

X= Ángulo vertical de porción de cielo sin obstrucciones desde el centro de la ventana (grados)

T= transmitancia del vidrio que se utilizará

M= es el factor de mantenimiento del vidrio, que es calculado a partir de el lugar en donde se emplazará el proyecto.

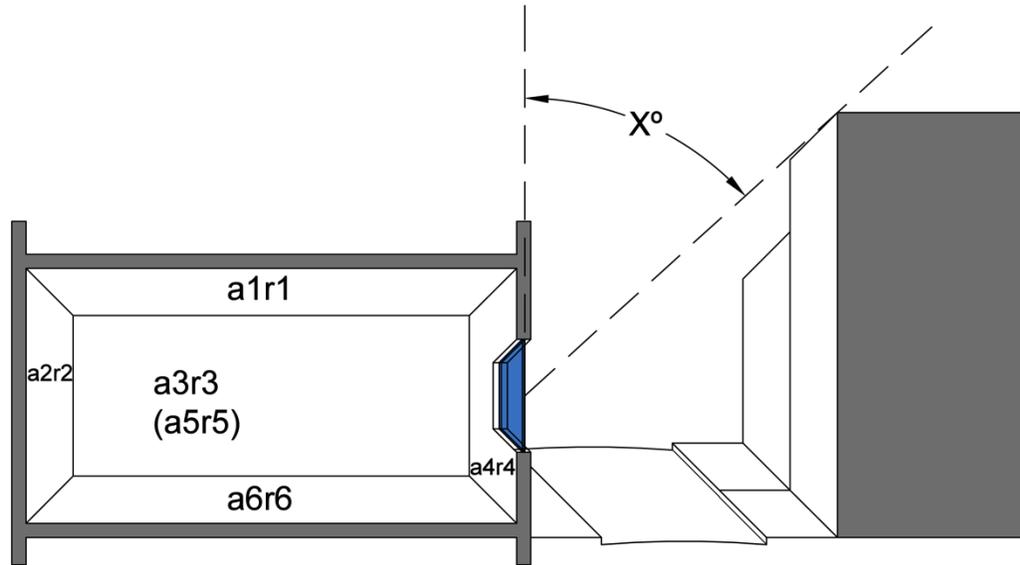


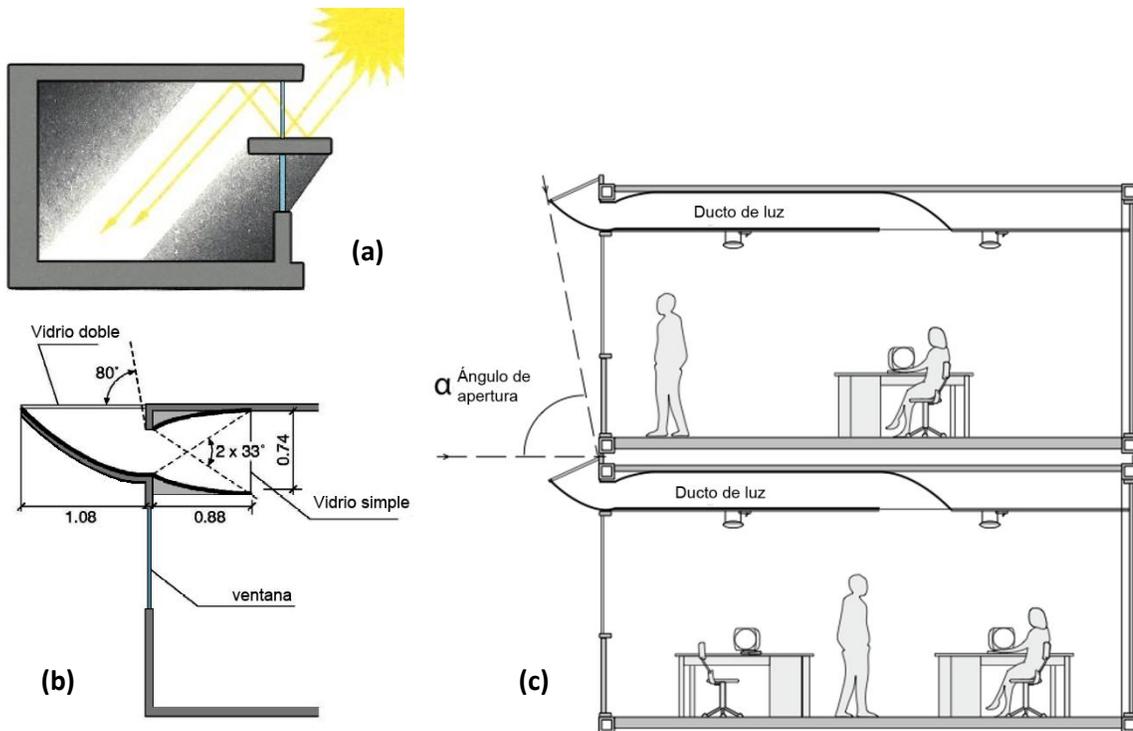
Ilustración 2. Reflectancias y ángulo a considerar para el cálculo de FLD y dimensionamiento de ventanas. Reproducido de Baker, Nick y Steemers, Koen. 2002

Tabla 2. Factor a considerar en el dimensionamiento de ventanas por mantenimiento. Fuente: Baker, Nick y Steemers, Koen. 2002

Ubicación de la edificación	Inclinación de la ventana	Tipo de trabajo a desarrollarse en la edificación	
		Limpio	Sucio
Área no industrial	Vertical	0.9	0.8
	Inclinada	0.8	0.7
	Horizontal	0.7	0.6
Área industrial	Vertical	0.8	0.7
	Inclinada	0.7	0.6
	Horizontal	0.6	0.5

Una de las características de la iluminación lateral que podría tornarse en desventaja si no se toma en cuenta, es que las áreas próximas a la ventana tienen niveles de iluminación muy altos y los

niveles decrecen rápidamente a medida que nos alejamos en distancias relativamente cortas, lo que genera que la distribución de la luz no sea uniforme.<sup>43</sup> Debido a ello se han realizado diversas propuestas para solucionar este problema, una de ellas es la utilización de repisas reflectantes<sup>44</sup>, que no son más que aleros colocados en las ventanas para enviar la luz captada hacia el techo, lo que permite que la luz llegue al fondo del espacio arquitectónico y que se distribuya la luz de una manera más uniforme. Otra aportación es el uso de vidrios dobles que intermedio tienen rejillas metálicas en sentido horizontal para redirigir la luz hacia el techo<sup>45</sup>. Las soluciones son diversas, pero debe partir del análisis del sitio para que las propuestas respondan a las exigencias particulares del proyecto.



### Imagen 3. Estrategias de iluminación natural

#### (a) Repisa reflectante para que la luz llegue al fondo de la habitación.

Fuente: Un Vitruvio ecológico. Principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible. Editorial Gustavo Gili. 2010, p. 84.

#### Imágenes (b) y (c). Fachadas Anidólicas que buscan una mejor distribución y niveles de iluminación.

Fuente: Revista Solar Energy Volúmenes 73 (p.126) y 84 (p.1091).

**Iluminación combinada.** Es aquella solución en que se juega con los elementos laterales y cenitales para aprovechar al máximo la entrada de luz natural. En este sistema como en los otros

<sup>43</sup> Valeriano Flores, Arturo. Iluminación natural en la arquitectura. Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México 2010, pp. 45- 48.

<sup>44</sup> Un Vitruvio ecológico. Principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible. Gustavo Gili. Barcelona 2010, p. 84.

<sup>45</sup> Manual del vidrio Saint-Gobain. Ed. Plazola. México 2002, p. 30.

se debe evitar la radiación solar directa en los sitios en que no se desee la acumulación de calor en los espacios arquitectónicos, la componente indirecta o reflejada es en este sentido la solución más adecuada.

Estas estrategias son diseñadas para aprovechar la máxima ganancia de iluminación natural, sin embargo no todas logran beneficiarse de la luz directa y la luz difusa al mismo tiempo, por lo que describe el desempeño óptimo observado bajo diversas circunstancias de cielo.

**Tabla 3. Desempeño óptimo de las estrategias de iluminación natural<sup>46</sup>**

ESTRATEGIA	TIPO DE CIELO PARA EL QUE SE DISEÑA	DESEMPEÑO
<b>Lateral</b>	Parcialmente cubierto o nublado	Aprovechamiento de luz difusa. El cielo cubierto proporciona entrada a mayor profundidad en la habitación de luz difusa, sin embargo el deslumbramiento puede ocurrir con más frecuencia por tener un cielo brillante.
<b>Cenital</b>	Cielo claro o despejado	Aprovechamiento de luz directa. Buscan que la luz entre en vertical al espacio, por lo que el sol deberá tener altura suficiente, de acuerdo a las dimensiones es que se puede aprovechar también la luz proveniente del cielo.

La selección de la estrategia dependerá de las condiciones particulares del sitio de emplazamiento, pero la selección es aún más compleja, pues en el caso de ventanas por ejemplo, existe un número mayor de variables además de la dimensión y la orientación, pues debe definirse también las propiedades del vidrio (en caso de requerirlo), las características de los elementos de sombra y la manera en que operan<sup>47</sup>. El objetivo es lograr un sistema de iluminación que cumpla de manera cuantitativa (niveles de iluminación) y de manera cualitativa (distribución, uniformidad, color, sin generar deslumbramiento, etc.) los requerimientos visuales de los usuarios.

## 1.5 Sistemas de Transmisión de Luz Natural [STLN]

Existe una preocupación alrededor del mundo entorno al impacto ambiental derivado de las actividades humanas, por lo que cada vez toman mayor relevancia temas como el ahorro energético, el confort y la sustentabilidad, lo que ha generado que naciones, instituciones e instancias gubernamentales y particulares inviertan recursos en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para el mejor aprovechamiento de los recursos naturales disponibles. Tal es el caso de la iluminación natural, que desde finales del siglo pasado se ha ocupado del desarrollo de soluciones tecnológicas más eficientes, llegando a aportaciones que años atrás no habrían sido posibles, pues de la mano de la creatividad van los avances científicos de materiales y tecnologías.

Una de las principales limitantes de la iluminación natural con las estrategias anteriormente señaladas (ventanas y tragaluces), es que sólo pueden beneficiarse de ella los espacios interiores

<sup>46</sup> Boubekri, Mohamed. *Op. Cit.* p. 111-114.

<sup>47</sup> Santa Maurice, Matt (editor). *Advances in Passive Cooling*. Universidad de Atenas. p. 94

que tienen la posibilidad de contacto directo con el exterior, como las áreas próximas a las fachadas o a la azotea, por lo que lugares como la planta baja de un edificio de varios niveles en ocasiones queda sujeta únicamente a la iluminación por medios artificiales, pues como se ha mencionado anteriormente el contexto especialmente en áreas densamente edificadas, también influye en que no se tenga aportación de la componente directa o que la porción de cielo libre de obstrucciones sea menor en los planos verticales, lo que deriva en que este tipo de espacios presenten niveles de iluminación por debajo de lo necesario para realizar cualquier tipo de tarea visual. Ocurre lo mismo en edificios de mucha profundidad, en donde la luz natural ganada de manera unilateral por medio de ventanas, no es suficiente para iluminar el total del área ocupada.

En la búsqueda de medios que solucionen las deficiencias de iluminación natural en los espacios que no la reciben de manera autónoma, se encuentran las propuestas de transmisión o conducción de luz, que llevan el flujo lumínico desde un punto exterior en que se encuentra disponible y lo transportan al interior de los espacios arquitectónicos. Estos sistemas cerrados y altamente reflexivos, tienen por objetivo la transmisión de luz natural, el confort visual y pueden representar un importante ahorro de energía eléctrica si son correctamente diseñados, para lo que es necesario un análisis profundo de la disponibilidad de luz en el exterior, de la colocación de los sistemas de acuerdo a la geometría del espacio a iluminar, y de la selección correcta de los materiales en cada fase del proceso.

### Definición de Sistemas de transmisión de luz natural

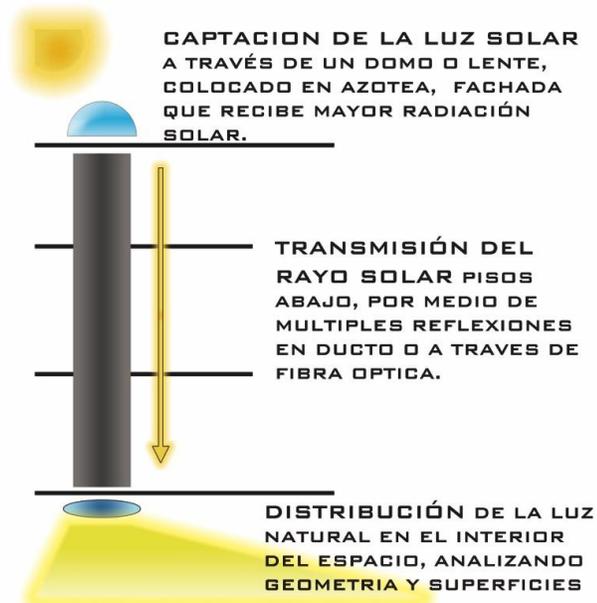
Los Sistemas de Trasmisión de Luz Natural (STLN), para fines de esta investigación, son dispositivos tecnológicos que captan la luz natural disponible en el exterior del edificio y la redirigen hasta el lugar en que es requerido, más allá de lo que las ventanas o tragaluces pueden llevarla. Leandro Ferrón y colaboradores quienes son diseñadores industriales argentinos y que han realizado diversas investigaciones sobre los STLN, definen que son adaptaciones arquitectónicas aplicadas en la envolvente arquitectónica de manera lateral o cenital para optimizar la distribución de la luz natural en el interior, en esta categoría se encuentran los *lumiductos* y los sistemas de transporte de luz por fibra óptica, así mismo establece que para su estudio o análisis se puede dividir cada sistema en tres sub- sistemas: colector (captador), transportador y extractor (difusor). El colector es el encargado de captar toda la luz disponible y de manera común es conformado por un lente fresnel, un heliostato o de una simple cúpula transparente. El transportador consta de una superficie interna altamente reflexiva y pueden ser desde tubos metálicos, tubos de acrílico sólido hasta fibra óptica.<sup>48</sup> Finalmente el difusor es la terminación y salida lumínica del dispositivo, cuyo objetivo es distribuir lo mejor posible la luz en el espacio a iluminar<sup>49</sup>, por lo que en el difusor existe una gran variedad diseños y materiales utilizados.

Esta división en fases o etapas permite hacer un análisis más profundo en los principios de funcionamiento y en los materiales que utiliza cada sistema, permitiendo la posibilidad de apreciar las variaciones en cada diseño y sus resultados en la cantidad y calidad de la luz entregada. Una de las principales diferencias es que podemos encontrar tubos de aluminio altamente reflexivos sin sistemas móviles en su captación, cuyo único principio es un domo que capta la luz en la azotea o

<sup>48</sup> “Disponibilidad comercial de sistemas de transporte de luz natural”. Revista: Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9, 2005. Impreso en la Argentina.

<sup>49</sup> Swift, P.D.; et. al. “Hotspots in cylindrical mirror light pipe description and removal”. Revista: Lighting Research and Technology. Vol. 38. No. 1 (2006), p.19

fachada y la redirige haciendo múltiples reflexiones niveles abajo o en profundidad, con grandes recorridos en transporte vertical y horizontal, este sistema es nombrado por los argentinos en español como **Lumiducto**, mientras que en inglés tiene variedad de nombres como *sun ligh pipe*, *daylight pipe*, *sun o solar pipes*, *tubular daylight guidance*, *hollow light guides*, *optical daylight systems* etc<sup>50</sup>. Otro tipo de sistemas funcionan a través de la captación de la luz por medios ópticos como lentes Fresnel, que concentran el rayo del sol y lo transmiten a través de una fibra óptica, estos sistemas cuentan con elementos móviles de seguimiento solar.



**Ilustración 3. Diagrama de funcionamiento de un STLN**

En años recientes se han desarrollado numerosas investigaciones de STLN así como variaciones en su forma y novedosos materiales, el objetivo es hacer nuevas propuestas que mejoren su funcionamiento y minimicen el costo. Los dos sistemas y sus variaciones serán descritos y evaluados en las siguientes secciones de la investigación.

Cabe señalar, que algunos sistemas nos están disponibles en México, lo que genera una línea de investigación posterior al analizar los costos económicos y energéticos por importación, así como el estudio de una posible fabricación nacional.

### **Objetivos en el uso de sistemas de transmisión de luz natural**

Como se mencionó anteriormente, el principal objetivo es elevar los niveles de iluminación en aquellos lugares que no tienen acceso a la luz natural en su estado actual por diversos factores como la alta densidad constructiva que presenta la Ciudad de México, así como también mejorar

<sup>50</sup> Jeong Tai Kim y Gon Kim. "Overview and new developments in optical daylight systems for building a healthy indoor environment". Revista Building and Environment. Vol. 45 (2010), p. 256.

la calidad espacial a través de una adecuada distribución lumínica con un recurso inagotable, renovable y gratuito como es el Sol.<sup>51</sup>

Comparado con domos o ventanas convencionales, el uso de lumiductos ofrece una mejora por su flexibilidad de uso en el interior de las edificaciones. Otro de los objetivos en este tipo de sistemas es de ahorro energético, al evitar el uso de energía eléctrica durante el día.<sup>52</sup>

Finalmente, como se establece en la hipótesis de esta tesis, es mejorar la calidad de vida de los usuarios, a través de fomentar el uso de la luz natural en los espacios que habitamos y con ello favorecer los procesos físicos y psicológicos del ser humano que dependen de la exposición a la luz solar y el confort visual, como la favorable percepción del color debido a la composición espectral de la luz natural, la percepción de la variación temporal y espacial en el interior debido a la brillantez y al dinamismo de la luz natural.<sup>53</sup>

### Clasificación de sistemas

De acuerdo a los sistemas comerciales que se han estudiado y que se presentarán más adelante, se realiza la clasificación en dos vertientes:

#### 1. Activos y Pasivos.

**Activos.** Para fines de esta investigación se definen como activos, todos aquellos STLN que tienen medios móviles en la fase de captación como seguidores solares, sin considerar la fuente energética requerida para llevar a cabo el movimiento, puesto que existen algunos sistemas alimentados por celdas fotovoltaicas y otros de energía eléctrica generada por medios convencionales como combustibles.

**Pasivos.** Se denominan Pasivos a los sistemas que son fijos, es decir, que no contienen elementos móviles de seguimiento solar o para su funcionamiento.

#### 2. Horizontales y verticales

**Horizontales.** Son aquellos dispositivos que captan la luz solar desde alguna fachada o plano vertical y su transmisión es principalmente en sentido horizontal.

**Verticales.** Captan la luz solar desde la azotea o plano horizontal y su recorrido es principalmente en sentido vertical.

En esta tesis, se analizan únicamente sistemas de transmisión vertical, puesto que como se ha mencionado, la característica principal de la Ciudad de México es su alta densidad constructiva, por lo que el principal factor de la ausencia de luz natural en los interiores se presenta porque las fachadas se encuentran bloqueadas por las construcciones vecinas, dejando como única alternativa la captación desde la azotea, además de ser también ésta la fachada que recibe mayor

<sup>51</sup> Sánchez Maza, Miguel Ángel (coordinador). Energía solar fotovoltaica. Ed. Limusa. México 2008, p. 9

<sup>52</sup> Oakley, G. "Daylight performance of lightpipes". Revista: Solar Energy. Vol. 69. No. 2 (2000), p. 89

<sup>53</sup> Carter, D.J. y Marwaee, M. Al. "User attitudes toward tubular daylight guidance systems". Revista: Lighting Research and Technology. Vol. 41 (2009), p. 71.

radiación solar, pues como se mencionó anteriormente el plano horizontal libre de obstrucciones tiene acceso a la mitad de la bóveda celeste mientras que cualquier plano vertical solo la cuarta parte.<sup>54</sup>



<sup>54</sup> McGuiness, Stein y Reynolds. Op. Cit. P. 1114

## Sistemas activos

### A. Himawari (La Forêt Engineering Co., Ltd\_Mori Building Group)<sup>55</sup>

Inventado por el Dr. Kei Mori profesor de la Universidad de Tokio, este sistema Japonés cuyo nombre significa “Girasol”, es caracterizado porque la captación solar es a través de lentes que concentran el rayo solar y lo hacen llegar a un cable de fibra óptica. Para este estudio es clasificado como un sistema activo porque cuenta con un seguidor solar que puede ser alimentado por celdas fotovoltaicas o de energía eléctrica de bajo voltaje.

En su estudio por fases, se encuentra:

- La captación es a través de lentes convexas, que redirigen y concentran el rayo solar, la curvatura del lente fue diseñada para que en la distancia entre el lente y la fibra óptica se eliminen las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo y al ultravioleta. Esta fase cuenta con un motor que es controlado por computadora, cuya programación fue calculada para seguir al sol desde la mañana hasta el atardecer y desde el verano hasta el invierno. El número de salidas de luz está determinado por el número de lentes, por lo que el tamaño se va incrementando.
- La transmisión es a través de fibra de vidrio de 1mm de diámetro, cada cable está compuesto por seis fibras ópticas, por lo que cada salida de luz requiere de seis lentes que concentren los rayos.
- La distribución es a través de salidas o terminaciones de manera puntual o de mayor apertura buscando una luz más difusa, simulan luminarios de energía eléctrica y pueden ser dirigibles, fijos, para montar en falso plafón o en techo, de acuerdo a la necesidad del espacio a iluminar.



De acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante, para un sistema de doce lentes se tendrán dos terminaciones o salidas de luz, cada salida puede tener una altura máxima de 3.0m, en donde el diámetro de apertura máxima en ese punto es de 3.33m, con un ángulo máximo de 58°. El flujo luminoso es de 1, 920 lm, para comprender este valor se compara con un foco incandescente de 100W que emite 1,560 lm según catálogo de fabricante<sup>56</sup>, por lo que este sistema podría remplazar un foco de mayor potencia. También es importante señalar que de acuerdo a la IESNA(Sociedad

Norteamericana de Ingenieros en Iluminación, organismo que regula estándares de iluminación ) el nivel de iluminación para llevar a cabo tareas de oficina en un plano de trabajo es de 300 lx, por lo que este sistema cumple con ese requerimiento.

<sup>55</sup> [www.himawari-net.co.jp](http://www.himawari-net.co.jp) Consultado el 30 de agosto de 2012.

<sup>56</sup> Philips Lighting México. Catálogo General de Lámparas 2010- 2011, p.78.

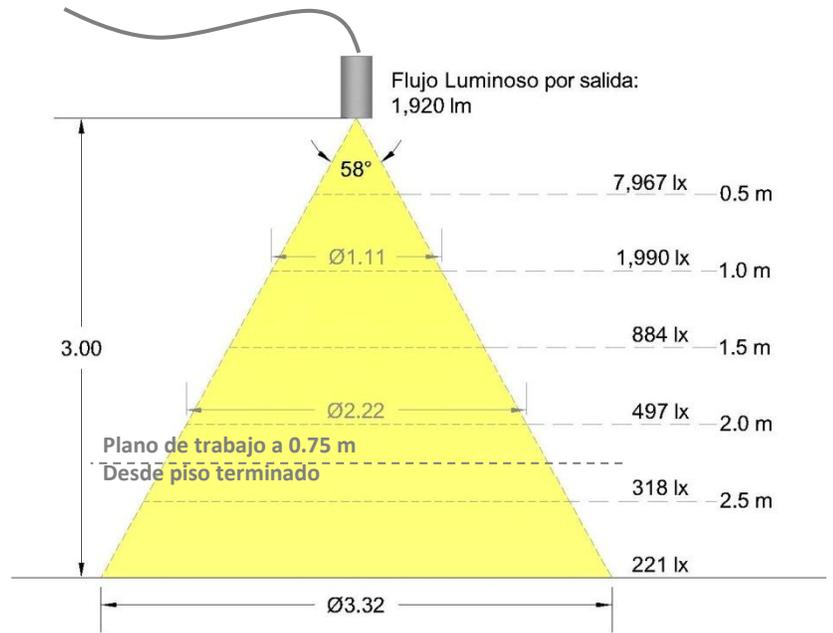
**Comparación:**

Flujo luminoso de un foco de 100w=1560 lm



Niveles de iluminación requerido en plano de trabajo a 0.75 m respecto a piso terminado: 300 lx (IESNA)

**Ilustración 4. Datos de Fabricante de Sistema Himawari con una disponibilidad de lux exterior de 98,000 lx**

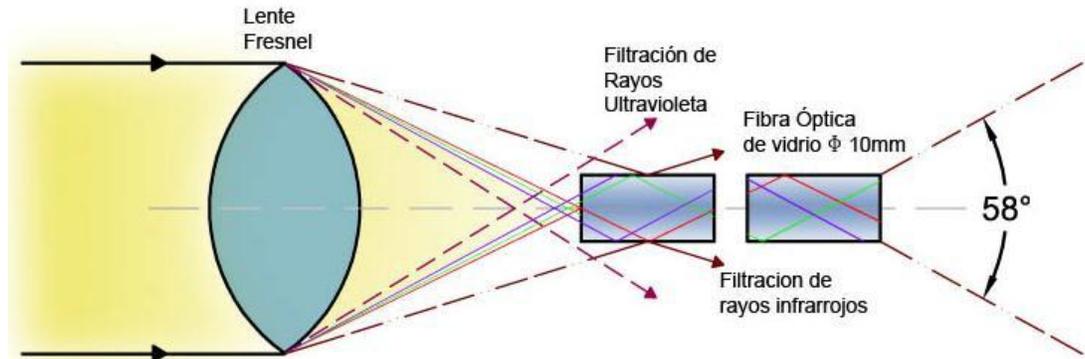


**Ventajas del sistema:**

- i) No requiere de gran espacio para alojar el medio de transmisión por tratarse de un cable conformado por seis hilos de fibra óptica de 1mm de diámetro cada uno.
- ii) Se pueden tener mínimo dos salidas de luz en un solo sistema.

**Desventajas del sistema:**

- i) No está disponible en México
- ii) Alto costo por la tecnología utilizada más gastos de importación



**Ilustración 5. Funcionamiento de captación y concentración del rayo solar**

**B. S.I.V.R.A. (Sistema de Iluminación Variable de Regulación Automática para ambientes sin ventanas)<sup>57</sup>**

<sup>57</sup> <http://www.iguzzini.com/html/es/558.html> Consultado el 28 de noviembre de 2010.

Este sistema es parte de una investigación de la empresa italiana iGuzzini, la cual es conocida en el mundo por la fabricación y distribución de luminarios para luz artificial, de uso interior y exterior. Sin embargo, es importante señalar, que aún cuando su principal actividad es la creación de luz para todo tipo de lámparas, sus diseños se sustentan en el área de investigación, abarcando así, el campo de tratamiento de la luz natural, por lo que presentan sus recientes aportaciones en este campo.

#### Imagen 4. Captador S.I.V.R.A.

Fuente de imagen en página de Iguzzini



La investigación surge en 1988 y una segunda fase en 1998 con el nombre y el objetivo de crear un Sistema de Iluminación Variable de Regulación Automática para ambientes sin ventanas (llamado SIVRA), proyecto de investigación financiado por el CNR (Consejo Nacional de Investigaciones) y por el Ministerio Italiano de Investigación Científica y tecnológica, esta investigación pretende obtener los siguientes resultados:

- Garantizar uniformidad y niveles de iluminación adecuados para las actividades, a realizar primero mediante luz natural y segundo con un sistema alterno de luz artificial para mantener los niveles cuando por condiciones meteorológicas la luz diurna no sea suficiente. Obteniendo con ello un confort visual
- El ahorro energético a través del uso de un sistema eficiente
- El transporte eficiente de la luz natural sin deslumbramiento y sin radiación directa.

#### Descripción técnica del sistema.

Se compone de los elementos: en el exterior del edificio está situado el colector y en el interior el difusor.

La unidad de conducción o transporte y la unidad de difusión son considerados un solo elemento. Contempla un sistema de enfoque como elemento de conexión entre el colector y el difusor, cuya función es enfocar y dirigir la luz diurna en el interior de la unidad de transporte.

El colector captura y dirige la luz diurna en sus componentes directa e indirecta (Rayo de Sol directo y la luz proveniente del cielo). A través de la concentración lineal de sección rectangular del colector y con la película de lentes Fresnel 3M-21X.

El receptor tiene un seguidor solar que es controlado por un programa informático que calcula la altura solar de acuerdo al día, la hora y a la estación, el sistema realiza un trazado del sol, siguiendo su recorrido a lo largo del día, con translación únicamente sobre el plano vertical con un movimiento de 10° a 80° para verificar la eficiencia del sistema en las horas irradiación solar entre las diez de la mañana a las dos de la tarde.

El difusor, colocado en el interior del espacio, contempla el transporte a través de un ducto de sección rectangular con material altamente reflexivo cuya función es la emisión y el control del

flujo de luz. La unidad de difusión es un film óptico doblado desde el conducto de transporte hasta el difusor que es una hoja de policarbonato revestida con material 3M OLF. La luz artificial es integrada en esta unidad.

La aportación de este sistema a la presente investigación, es que además de contemplar los pasos sugeridos en la metodología: captar, transmitir y distribuir, considera como parte de su funcionamiento dos sistemas de control, el primero para hacer seguimiento, a través de software, de los rayos directos del sol, hora por hora y día por día; el segundo sistema de control se refiere a monitorear constantemente los niveles de iluminación requeridos en el interior, de tal manera que en cuanto registren niveles menores, se haga funcionar la luz artificial, así mismo en las horas que sean requeridas antes del amanecer y posterior al atardecer. Ésta contribución en el funcionamiento, abre otra línea de investigación futura para este proyecto, pues al tener sistemas de control, se garantiza el aprovechamiento máximo de las horas de sol, redundando en un ahorro energético.

No obstante, lo que el sistema de iGuzzini no propone y que en la presente investigación se propondrá como parte de los objetivos, es analizar la compensación del uso de energía artificial a base de paneles solares, para que la energía que se logre almacenar en las hora de radiación solar, sea aprovechable por la noche o en cuando no se obtengan los niveles de iluminación mínimos. Otra fase de análisis que este sistema describe es el uso de tecnología de luz artificial mediante fluorescencia lineal, puesto que y que debido a su importancia , debería contemplar el uso de nuevas fuentes de luz, como la tecnología LED, que sean capaces además del ahorro energético, de simular y reproducir los colores de la luz natural a través del día, evitando que el usuario tenga incomodidad por las diferencias en el color de temperatura de la luz artificial y la del sol, además de señalar que sea considerada la compensación de niveles de iluminación a través de atenuadores, para que sea casi imperceptible la alternancia de la luz artificial en los momentos de mayor nubosidad o sombreado.

**Ventaja:** Sistema alternativo de iluminación artificial a base de sensores y programación, que encienden luminarios cuando se detectan niveles de iluminación establecidos para la actividad a desarrollar, antes del amanecer y después del atardecer.

**Desventaja:** Aún se encuentra en proyecto y es de patente italiana, lo que de producirse en serie, seguiría teniendo un alto costo por importación.

## Sistemas pasivos

### A. Solatube (Everlux )<sup>58</sup>

Es un sistema inventado en Australia en 1980 y de patente norteamericana, cuyo principio es la conducción de la luz a través de ductos tubulares, y se encuentra constituido por las siguientes partes:

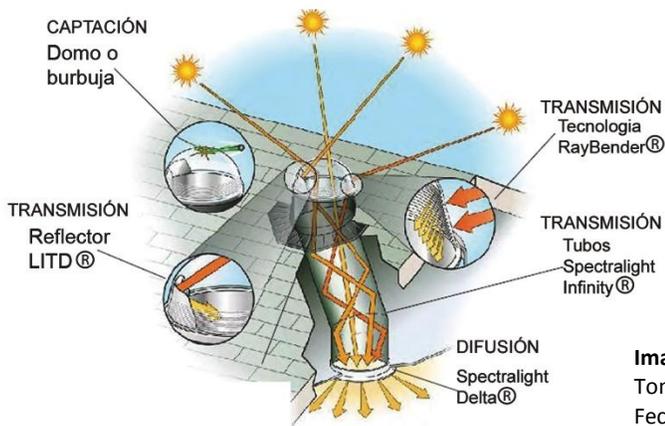
- La captación es mediante un domo transparente circular de 92% de transmitancia que filtra los rayos UV e infrarrojo. Algunos contienen la Tecnología RayBender<sup>®</sup> que es un acabado especial, cuya función es re-dirigir los rayos captados hacia el interior del tubo de

---

<sup>58</sup> [www.solatube.com](http://www.solatube.com)

reflexión. En el domo se aloja la tecnología denominada Reflector LITD<sup>®</sup> (light intercepting transfer device), que es una pestaña metálica altamente reflexiva que se encarga de interceptar los rayos solares provenientes del sur en latitudes del hemisferio norte, para re- dirigirlos hacia el interior del tubo.

- La transmisión es a base de tubos de aluminio de 10", 14" y 21" pulgadas de diámetro, revestidas en su interior por una película altamente reflexiva denominada Spectralight Infinity<sup>®</sup>, que de acuerdo a su descripción técnica reporta reflejar el 99.7% del flujo incidente en su superficie.
- La difusión es proporcionada a través de diferentes tipos de difusor, pero su recomendación es que sea a través de su sistema Spectralight Delta<sup>®</sup>, que permite que se distribuya de manera uniforme el flujo luminoso en la habitación.



Solatube hace referencia a sus curvas fotométricas para sus difusores, lo cual será de gran utilidad para hacer el análisis de la distribución de la luz en el interior del espacio, y lo que brindará soluciones a la uniformidad de los niveles de iluminación.

**Imagen 5. Sistema Solatube.**

Tomada de: [www.solatube.com](http://www.solatube.com).

Fecha de consulta: 15 de agosto de 2010. 11:00a.m.

Procesada por Miriam García

*43.3	*65.4	*82.3	*88.7	*85.7	*85.7	*88.6	*81.7	*84.2	*44.3
*66.7	*86.3	*98.4	*115.1	*128.3	*128.1	*114.5	*97.7	*85.7	*66.7
*85.9	*101.8	*130.5	*162.3	*189.9	*189.3	*161.6	*129.6	*101.3	*86.0
*94.1	*122.0	*165.2	*205.7	*242.3	*241.7	*205.0	*164.3	*121.3	*94.4
*97.8	*132.5	*185.4	*236.2	*246.5	*246.3	*235.7	*184.2	*131.8	*98.0
*97.8	*132.5	*185.6	*236.5	*246.5	*246.4	*236.0	*184.4	*131.8	*98.1
*94.0	*121.9	*165.4	*206.1	*242.6	*242.1	*205.6	*164.7	*121.4	*94.5
*85.4	*101.4	*130.6	*162.7	*190.8	*190.3	*162.3	*130.2	*101.4	*86.0
*65.5	*85.4	*98.2	*115.5	*129.3	*129.2	*115.4	*98.3	*85.8	*65.7
*44.3	*65.0	*82.5	*87.2	*86.5	*86.6	*87.3	*82.7	*65.5	*43.0

Según el cálculo del distribuidor, para iluminar una habitación con uso de oficina de 25 m<sup>2</sup>, cuyas dimensiones son 5m de ancho, 5 m de largo, 3 metros de altura, sin ventans y cuyo recorrido en vertical será de 8m desde la azotea hasta la planta baja de un edificio de dos niveles y un recorrido horizontal interior de 5m desde una esquina hasta el centro de la habitación, se proponen los dos modelos de mayor diámetro: 290DS de Ø14" y 330 DS de Ø21".

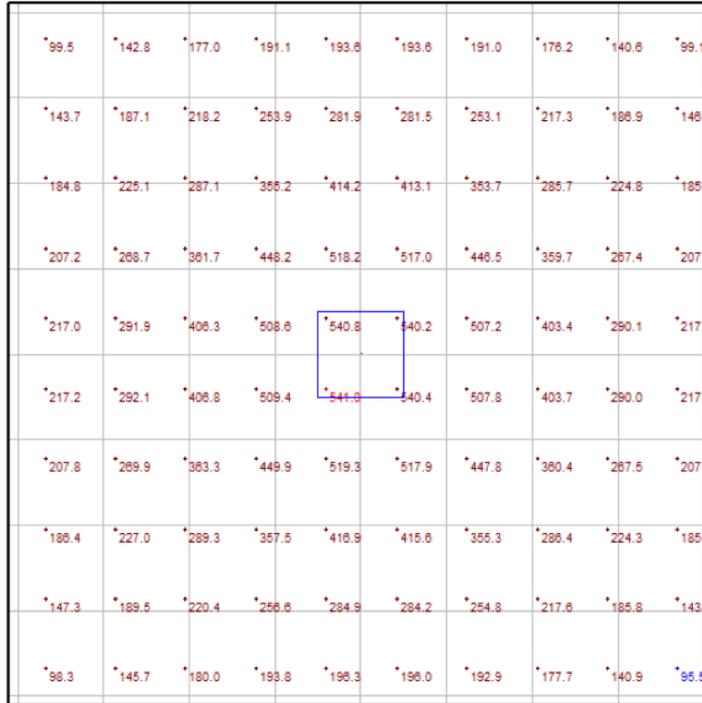
**Imagen 6. Niveles de iluminación sobre el plano de trabajo brindados por el STLN de 14" de diámetro.**

Utilizando el software Visual, con el modelo de 14" de diámetro, los niveles de iluminación sobre el plano de trabajo serán:

Debajo de la salida lumínica alcanza 246 lx.

En las esquinas de la habitación sólo se alcanzarán 43 lux.

Por lo que este modelo no brinda los 300 lux requeridos para el uso de oficina de acuerdo con la IESNA.



Con un ducto de 21" de diámetro se alcanzarán niveles sobre el plano de trabajo:

Debajo de la salida lumínica niveles de 540 lux.

En las esquinas de la habitación 99 lux.

**Imagen 7. Niveles de iluminación en plano de trabajo proporcionados por STLN de 21" de diámetro.**

En entrevista realizada a proveedor de Solatube en México a través de la empresa Everlux, asegura que hasta el momento ningún domo ha presentado fallas por uso o cambio de coloración por exposición al sol desde hace 20 años que instalaron el primer sistema en nuestro país. De acuerdo a su información la luz puede ser transmitida de manera íntegra hasta un recorrido vertical de 8m, la cantidad de luz colectada está directamente en función del diámetro del tubo, influyen la distancia en vertical y el número de curvas que tenga en su recorrido, pudiendo colocar codos de 45° y 90°. El uso es residencial y comercial, pero no lo recomiendan en edificios multifamiliares porque debe alojarse el en los niveles intermedios entre la azotea y la planta baja.



**Ventajas:** Disponible en mercado nacional, de costo accesible para diámetro de 10", por ser un sistema pasivo, no requiere de alimentación eléctrica ni de la compra de aditamentos para su funcionamiento.

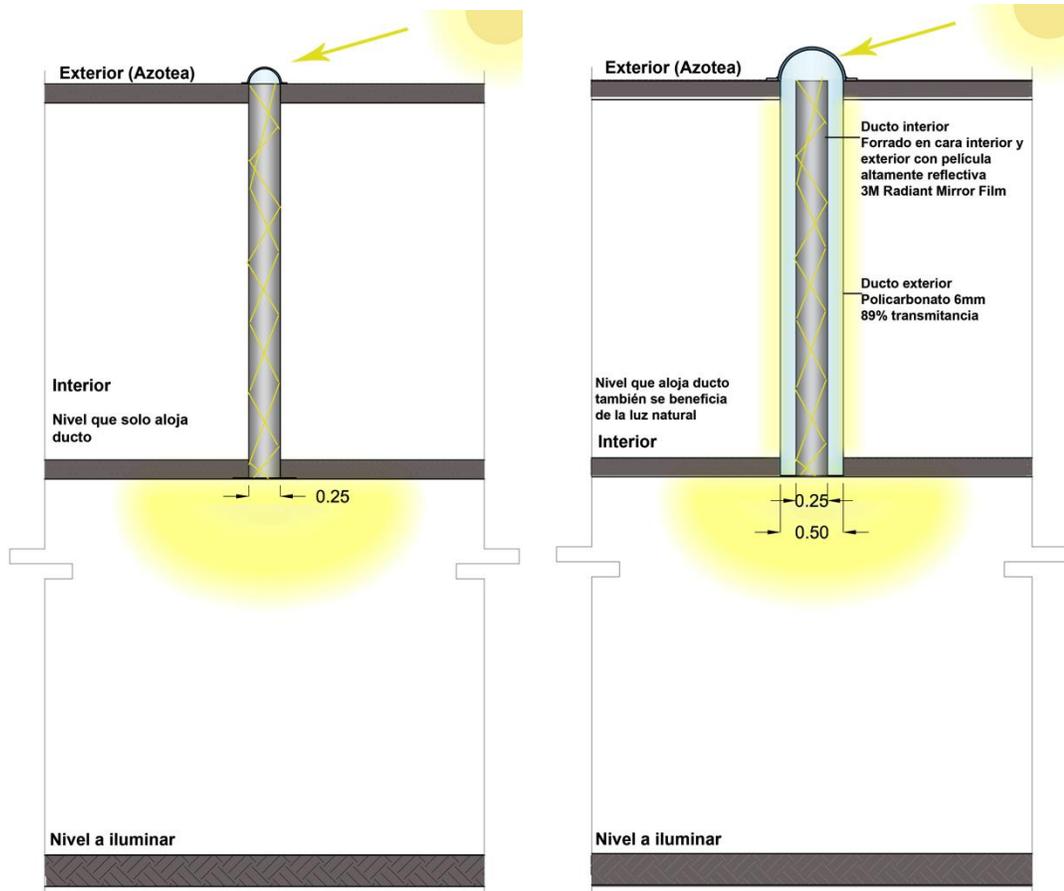
**Desventajas:** Una sola salida de luz por sistema, por lo que el único beneficiado es el espacio a iluminar y en los niveles superiores alojarán un ducto.

### **Variaciones a STLN que mejoran su desempeño.**

Para disminuir las desventajas que el sistema pasivo de ducto solar presenta, una serie de modificaciones en el diseño pueden ayudar a incrementar los beneficios de este tipo de sistemas. Ejemplo de ello es la propuesta del ducto de luz natural que hacen Baroncini y colaboradores<sup>59</sup>, investigadores de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Pescara, Italia, en la que desarrollan una variación en el diseño del modelo tradicional para que la luz pase no solo dentro del ducto de 0.25m de diámetro, sino que se coloca un tubo transparente de 0.50m diámetro, para que la luz pase y también beneficie los espacios intermedios por los cuales cruza. Dicho de otra manera, en el sistema tradicional de ductos de luz, el rayo solar se capta en la azotea, se lleva pisos abajo a través de reflexiones múltiples en el interior del ducto, pero la luz ganada sólo se utiliza en el último piso, en donde se encuentra la terminación del tubo de aluminio; en la nueva propuesta, al forrarse con un tubo transparente de mayor diámetro se puede reflejar una porción de luz en el exterior del ducto, iluminando los niveles entre la azotea y la planta baja. Para esta propuesta se realizan pruebas de funcionamiento a través de software y se analizan las ventajas que tendría este diseño. El modelo en escala 1:2 presenta resultados de iluminación, pero faltaría conocer el principio físico de reflexiones en la superficie exterior del ducto.

---

<sup>59</sup> C. Baroncini, O. Boccia, F. Chella, P. Zazzini. "Análisis experimental sobre un modelo a escala 1:2 de un ducto de luz doble, un dispositivo tecnológico innovador para la transmisión de luz natural". Solar Energy. Vol. 84 (2010). Pp 296- 307



**Trayecto hacia la luz natural. Propuesta estadounidense tomando como modelo el sistema japonés Himawari**

El investigador Larry Flynn<sup>60</sup> del departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) a través de su Programa de Investigación en Innovación de Pequeños Negocios en Energía, está llevando a cabo el desarrollo de un modelo que es una variación del sistema japonés Himawari, buscando bajar el costo por medio de variaciones en materiales. Las diferencias importantes son:

HIMAWARI	PROTOTIPO DOE
<b>Captación en una fase: Un lente Fresnel concentra el rayo del sol y lo dirige concisamente a la fibra óptica.</b>	Captación en dos fases. La captación es a través de un lente que dirige los rayos solares a otro lente de menor dimensión, el cual a su vez dirige el rayo a la fibra óptica.
<b>Seguidor solar controlado por computadora</b>	Seguidor solar que utiliza energía de una celda fotovoltaica, y que regresa al seguidor de manera mecánica por vapor de refrigerante líquido
<b>Fibra óptica de vidrio</b>	Fibra óptica de plástico

<sup>60</sup> Flynn, Larry. *A run to daylight*. Building desing and construction. Vol. 42. No. 10. Octubre de 2001, pp. 53 y 54.

En este sistema se buscó realizar un prototipo pasivo, es decir de piezas fijas calculando solamente el ángulo del recorrido solar entre el amanecer y el atardecer y entre el invierno y el verano, pero los resultados de la investigación sugieren que es imposible.

Los materiales utilizados en el modelo fueron adquiridos de empresas de producción nacional, lo que redujo los costos por fabricación.

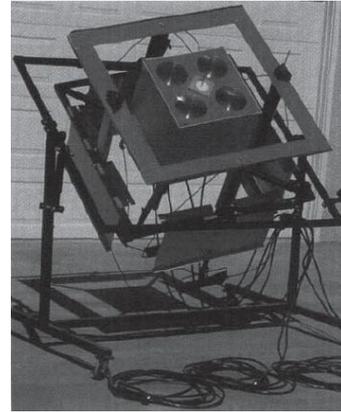
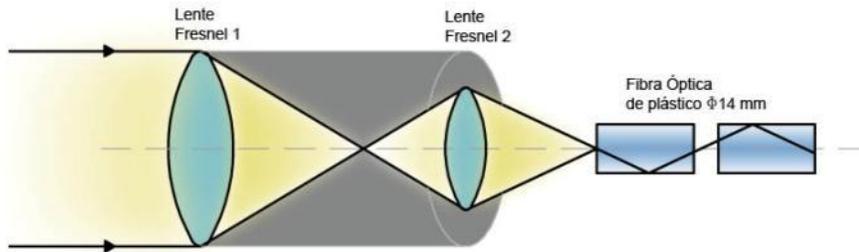


Imagen 8, Sistema de captación DOE

**Imagen 9. Prototipo de Sistema de transporte de luz.**

Tomados de la revista Building Design Construction. Tomo 42 p 53. Con fines didácticos.

MATRIZ COMPARATIVA DE SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LUZ NATURAL

PRODUCTOR	HIMAWARI La Forêt Engineering Co., Ltd. Mori Building Group			SOLATUBE			S.I.V.R.A. iGuzzini	S.W.A. D.O.E.	ODL	SUNPIPE	FACULTAD DE ARQUITECTURA PESCARA ITALIA	
CLASIFICACIÓN DE SISTEMA	ACTIVO			PASIVO			ACTIVO	ACTIVO	PASIVO	PASIVO	PASIVO	
	MATERIAL	PRINCIPIO FÍSICO	CARACTERÍSTICAS DE MATERIAL	MATERIAL	PRINCIPIO FÍSICO	CARACTERÍSTICAS DE MATERIAL	MATERIAL	MATERIAL	MATERIAL	MATERIAL	MATERIAL	
<b>CAPTACIÓN</b>	LENTE FRESNEL, con seguidor solar a través de un sensor óptico, protegidos por un domo de acrílico	El lente convexo es un concentrador del rayo solar filtrando longitudes de onda Ultravioleta e infrarrojos y permitiendo el paso únicamente de luz visible.	Se requieren 6 lentes Fresnel para concentrar luz solar a un solo cable de fibra de vidrio	DOMO DE ACRÍLICO	El domo capta la luz solar desde cualquier ubicación que tenga, redirigiendo los rayos al interior del ducto. Filtración UV e infrarrojo	Tecnología denominada Raybender®3000, que es un domo de lente Fresnel y otro domo interior	Captación por medio del receptor "Attivo" con LENTES FRESNEL CON PELÍCULA 3M-21X y seguidor solar de las 10am a 2pm, movimiento de 10° a 80 Montaje en plano vertical	LENTE FRESNEL de fabricación nacional de empresa en Estados. Se emplean dos lentes Fresnel para concentrar el rayo.	DOMO DE POLICARBONATO	Domo de policarbonato	DOMO DE ACRÍLICO	
<b>TRANSPORTE</b>	FIBRA ÓPTICA DE FIBRA DE CUARZO DE VIDRIO	Transporte por reflexión de la radiación de luz visible en el cable de fibra óptica de cuarzo de vidrio.	Fibra de vidrio de 1mm de diámetro	TUBO DE ALUMINIO	Reflexión del rayo solar en sección tubular o rectangular con material altamente reflexivo	Tecnología Spectralight® Infinity, describe que 99.7% de luz captada es llevada 15.2m abajo sin pérdidas	Lo consideran una sola unidad al transporte y difusor El transporte es de sección rectangular revestido con material altamente reflectivo y difusor de policarbonato revestido con película 3M OLF. Luz artificial de fluorescencia lineal T5	FIBRA ÓPTICA DE FIBRA DE PLÁSTICO	DUCTO DE ALUMINIO ALTAMENTE REFLECTIVO de 10" y 14" de diámetro	Ducto de aluminio con capa de plata pura con acabado de espejo	DOBLE TUBO. Uno de aluminio de 25 cm diámetro. Otro exterior transparente de 50 cm diámetro	
<b>DISTRIBUCIÓN</b>	Salida que simula luminarios, con variedad en la fotometría, que puede obtener luz puntual, dirigida o abierta .			DIFUSOR	De acrílico con acabado prismático expandir el haz de luz	Lentes Fresnel para obtener luz difusa		DIFUSOR ACRÍLICO	DIFUSOR DOBLE con cristal en la parte inferior	Difusor de policarbonato	DIFUSOR ACRÍLICO	
<b>CARACTERÍSTICAS ESPECIALES</b>	Flexibilidad en el paso de cables a través de los diferentes niveles de la edificación, con poco espacio para alojar la instalación, facilitando la intervención en edificaciones ya construidas. Dos salidas de luz en el sistema básico de 12 lentes			Sistema básico, sin complicaciones de alimentación eléctrica, de menor costo que los demás sistemas con control y lentes fresnel.			<b>Cuenta con dos sistemas de control:</b> 1. Seguimiento solar. 2. Control interior de niveles de iluminación mantenidos, conectados a luz artificial que enciende cuando no se tienen la luz suficiente para las actividades	Dos lentes fresnel, Uno concentra el rayo y lo dirige al segundo lente que concentra a la fibra de plástico	El domo se orienta al sur en nuestra latitud	El domo tiene forma de diamante y posibilidad de instalación en fachada	El ducto exterior transparente permite paso de luz en niveles intermedios entre la captación y la salida lumínica del ducto.	
<b>ESQUEMA</b>												
<b>SITIO EN INTERNET</b>	<a href="http://www.himawari-net.co.jp">www.himawari-net.co.jp</a>			<a href="http://www.solatube.com">www.solatube.com</a>			<a href="http://www.iguzzini.com">www.iguzzini.com</a> Consultado 28 de noviembre de 2010	Revista <i>Building Design and Construction</i> . Volumen 42 (2001) pp. 53 y 54	<a href="http://www.energia.csr.com">www.energia.csr.com</a>	<a href="http://www.sunpipe.con.uk">www.sunpipe.con.uk</a>	Revista Solar Energy Volumen 84 (2010), páginas 296-307.	
<b>PAÍS DE PROCEDENCIA</b>	Japón			Invención en Australia y de patente y fabricación en Estados Unidos			Italia	Estado Unidos	Estados Unidos	Reino Unido	Italia	
<b>DISPONIBILIDAD COMERCIAL EN MÉXICO</b>	No está disponible en nuestro país, lo que incrementa el costo no sólo por los materiales utilizados en la fabricación, sino también por la importación			Disponible en México a través de empresa EVERLUX S.A. de C.V.			No disponible por tratarse de un proyecto de investigación.	No disponible por tratarse de un proyecto de investigación.	Distribución a través de empresa CSR en Monterrey	No disponible en México	No disponible por tratarse de un proyecto de investigación	
<b>NOTAS</b>	El costo del sistema podría reducirse si se busca la fabricación nacional.			Una sola salida de luz por sistema, beneficiando únicamente al espacio a iluminar y se requiere de espacio para alojar el ducto en su transporte vertical y horizontal. Se debe analizar el comportamiento del sistema con una captación en ángulo orientado al sur en nuestra latitud. Con posibilidad de Sistema de control de luz, que funciona como atenuador			La luz artificial podría proponerse de tecnología LED's para la simulación en la temperatura de color y atenuación apropiados en la intermitencia entre luz natural y artificial y no cause molestias o fatiga visual. Yel uso de paneles solares	Proyecto del Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) buscando reducir el costo por fabricación nacional y variación en los materiales	Producto de importación lo que reduce característica sustentable	De instalarse en fachada, se deberá aprovechar la luz reflejada del piso y del contexto inmediato	Solución única para tener salida de luz durante todo el ducto.	

## 1.6 Lentes Fresnel.

Los lentes Fresnel son dispositivos ópticos que concentran la radiación solar en un punto o foco, esta energía concentrada es utilizada en arquitectura para aplicaciones de luz natural o de aprovechamiento de calor. Estrictamente hablando, la óptica, la física y las matemáticas aplicadas que son las ciencias que estudian estos fenómenos, describen que los lentes Fresnel son dispositivos ópticos, con propiedades de focalización que son constituidas simplemente por zonas anulares concéntricas de igual área, que alternan zonas transparentes y zonas opacas definidas por la longitud de onda de la luz que incidirá sobre ellas.<sup>61</sup>

Para las aplicaciones de iluminación natural que transportan el flujo lumínico a través de fibra óptica, se requiere un lente concentrador como los lentes cóncavos o las lentes de Fresnel que son más ligeros, en ambos casos, las siguientes propiedades y definiciones<sup>62</sup> son útiles para una mejor comprensión sobre su funcionamiento.

En primera instancia se distinguen tres elementos como mínimo en un sistema de concentración: la fuente luminosa (el sol), el concentrador (la lente) y el colector (que en el caso de las aplicaciones de luz natural es la fibra óptica).

Se define como fuente extensa de Lambert aquella en la que todos los puntos del concentrador son tocados por todos los puntos de la fuente luminosa con la misma intensidad, por lo que radia uniformemente en todos sus puntos. Un concentrador es considerado como ideal cuando hace incidir en el colector todos los rayos procedentes de la fuente luminosa, sin embargo no es real ya que existen pérdidas por varios factores entre ellos por la reflexión y absorción del cuerpo mismo de la lente, para que un concentrador envíe la mayor parte de los rayos captados al concentrador es dependiente de dos variables: el tipo de lente y el índice de refracción. El tipo de lente está definido por su geometría, mientras que el índice de refracción es el ángulo en el cual los rayos que tocan los extremos del concentrador alcanzan el borde del colector, medido a partir de la normal del sistema óptico. El índice de refracción puede estar en función de la longitud de onda que quiera concentrarse, de tal manera que se pueden dejar fuera de los bordes del colector longitudes de onda como el infrarrojo y el ultravioleta (como el sistema Himawari), a este hecho se le conoce como aberración cromática.

Desde el punto de vista de un lente Fresnel ideal, el sol es un disco que radia uniformemente en todos sus puntos y se ve desde la tierra bajo un ángulo de 32' (9.75 m).

Existen dos coeficientes que deben conocerse en el manejo de sistemas ópticos de focalización: la concentración geométrica y la concentración óptica.

La concentración geométrica es definida por el coeficiente:

$$\text{Concentración geométrica} = \frac{\text{área de superficie del concentrador}}{\text{área de superficie del colector}}$$

<sup>61</sup> Giménez, Fernando; *Et. al.* "Diseño de lentes difractivas fractales". Universidad Politécnica de Valencia. Documento en línea: [http://diog.webs.upv.es/publicaciones/pdfs/2007\\_ACC\\_229.pdf](http://diog.webs.upv.es/publicaciones/pdfs/2007_ACC_229.pdf) . Consultado el día 5 de septiembre de 2012.

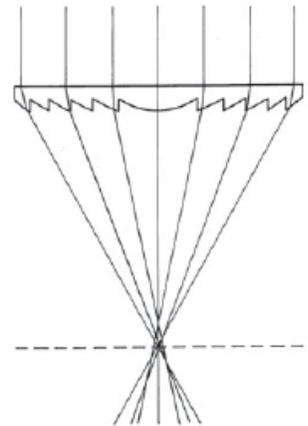
<sup>62</sup> Pingueras, Lorenzo E. Contribución a la teoría de diseño y la tecnología de las lentes de Fresnel para su uso como concentradores en aplicaciones fotovoltaicas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Telecomunicación. 1982. pp. 18- 80

Y la concentración óptica es el resultado de:

$$\text{Concentración óptica} = \frac{\text{potencia recibida en el colector cuando es iluminado por el concentrador}}{\text{potencia recibida en el colector iluminado directamente por la fuente en la posición en que recibe la máxima potencia}}$$

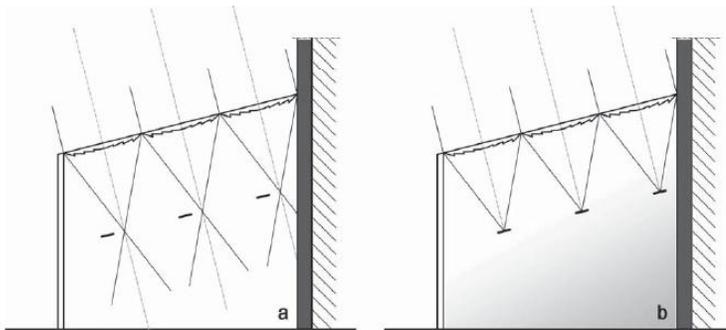
Una aplicación práctica arquitectónica es la propuesta por investigadores del departamento de física de la Universidad de Patras en Grecia<sup>63</sup>. Como se mencionó anteriormente una lente de Fresnel concentra la energía en un punto P de tal manera que si en ese punto no existe algo que la detenga, la luz volverá a ser divergente y continuará su camino, por lo que la idea es colocar en el punto focal materiales absorbentes que aprovechen esa energía como calor o como electricidad, al mismo tiempo que se genera sombra en el resto del edificio. Sin embargo el proyecto va más allá, puesto que se concibe como un sistema dinámico para que los captadores de energía sean removidos cuando existan niveles bajos de radiación global, dejando pasar la luz en donde es requerida.

En la zona focal se propone colocar celdas fotovoltaicas su aprovechamiento en energía eléctrica; el otro uso es como calentador de fluidos, ya sea agua para su utilización en el edificio o aire para su recirculación como calefacción; también se hacen propuestas mixtas. La especificación es que la cara lisa es colocada al exterior del edificio y la cara con los anillos concéntricos al interior del edificio, de manera tal que se acumula menos polvo, suciedad y con ello se evitan pérdidas en la transmisión. Los lentes deberán ser de baja concentración, que es suficiente para su fin de generar energía y calentar fluidos y el resto de la radiación que en su mayoría es radiación difusa se utiliza para la iluminación del espacio.



**Ilustración 6. Geometría de los lentes fresnel.**

Fuente de imágenes: Revista Solar Energy. Volumen 81 (2007) página 665. Artículo *The fresnel lenses concept for solar control in buildings*



**Ilustración 7. colector de calor fuera y dentro de foco de lentes fresnel**

**a) Fuera de foco y b) dentro de foco**

Los lentes fresnel pueden construirse de vidrio o de plástico acrílico. Los de vidrio son más difíciles para ondularse pero tienen mayor tiempo de vida, además de ser más resistentes a la temperatura y a los rayos U.V., lo que los hace adecuados para su uso arquitectónico.

<sup>63</sup> Tripanagnostopoulos, Y. *Et. al.* "The Fresnel lens concept for solar control of buildings". Revista: Solar Energy. Vol. 81 (2007), pp. 661-675.

Es importante señalar, que cualquier sistema implementado en edificaciones ya construidas, debe analizar y tomar en cuenta la estructura, a fin de evitar daños o perforaciones a elementos o sistemas estructurales. También se debe garantizar que la colocación sea correctamente ejecutada, para evitar infiltraciones al interior de inmueble, por lo que deberá ser parte del desarrollo de las propuestas, la especificación completa para garantizar un sistema completamente cerrado.

## 1.7 Aluminio

El aluminio es usualmente extraído de las minas de bauxita, importada de Brasil, Surinam, y Venezuela, las cuales son áreas importantes de bosque. La extracción ocurre principalmente en excavaciones a cielo abierto, después de haber retirado la vegetación. El aluminio es producido de la bauxita en dos etapas después de la extracción del mineral. (1) El óxido de aluminio es extraído de la materia prima por calentamiento entre 1100 y 1300 °C, este proceso es denominado Calcinación. (2) El óxido es puesto en una bandeja de electrólisis alrededor de los 950°C con sodio y fluoritas. (3) El aluminio puro es depositado en el polo negativo (el cátodo). Sobre el polo positivo (el ánodo) el oxígeno es liberado en combinación con monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).<sup>64</sup>

El método actual de producción de aluminio data de 1886, cuando Charles Hall en América y Paul Héroult en Francia descubrieron un método electrolítico de separación del aluminio y oxígeno en alúmina. La llave del enigma era la criolita, un fluoruro doble de aluminio y sodio, que al fundirse, disuelve la alúmina. Una corriente que pase a través de la mezcla fundida, depositará aluminio puro en el fondo del horno. Se requieren corrientes grandes, de baja tensión

En 1906, un investigador metalúrgico alemán, Alfred Wilm, descubrió más o menos accidentalmente el fenómeno de “endurecimiento por envejecimiento” en una aleación conteniendo 3.5% de cobre y 0.5% de magnesio. Observó que después de su tratamiento y luego de inmersión en agua, la resistencia del metal gradualmente aumentaba siendo máxima a los cuatro a cinco días, a temperatura ordinaria. Esta aleación, producida por la Düren Metal Works, se conoció con el nombre de Duralumin. Actualmente se producen aleaciones con tensiones de tracción de hasta 3,600 Kg/cm<sup>2</sup>. El peso específico de las aleaciones de aluminio varía entre 2.63 y 2.82.<sup>65</sup>

Acabado	Reflectancia %	Emisividad % a 9.3μ
Capa de abrillantador R5	90	3
Pintura negra	5	95
Pintura Blanca	90	92
Cubierta anódica negra	5	95
Cubierta anódica blanca	80	36-65

**Tabla 4 Reflectancia y emisividad del aluminio con diferentes acabados**

Fuente: Handbook of Aluminum. Nueva York 2003, p.55.

<sup>64</sup> Bjorn, Berge. The ecology of building materials. Ed. Architectural Press. Gran Bretaña 2000, p. 77 y 78

<sup>65</sup> Scholberg, Philip. Traducción Arq. S. Milner. Nuevas técnicas en la construcción. Capítulo Metales livianos. Librería y editorial Alsina. Argentina 1954. pp 214- 215.

Reflectancia espectral.

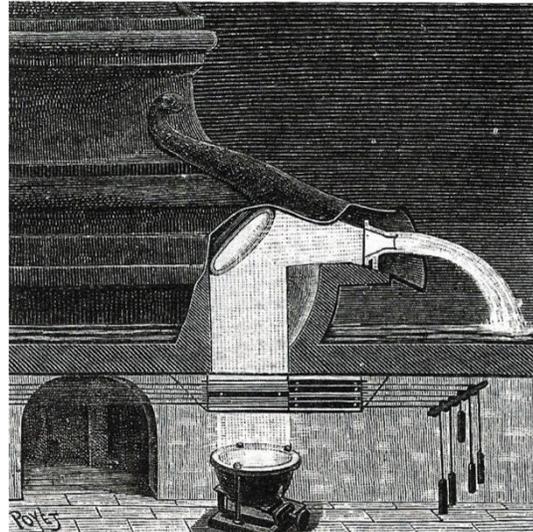
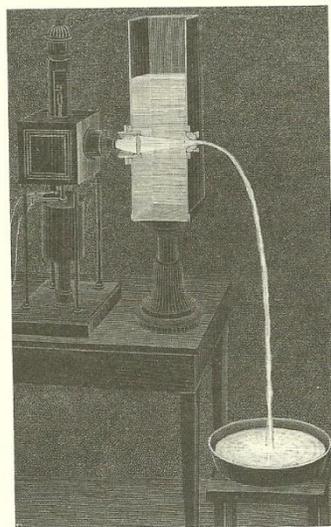
La reflectancia de la luz en el aluminio de superficie lisa es mayor al 90% para longitudes de onda entre 0.9 y 12  $\mu\text{m}$ , para longitudes de onda menores a 0.2  $\mu\text{m}$  la reflectancia baja al 70%.

Una alta reflectancia del aluminio es obtenida cuando se deposita vapor, el cual produce superficies muy lisas. Películas de vapor depositado requiere el mínimo de espesor de aproximadamente  $10^{-5}$  cm para la máxima reflexión. La propiedad reflexiva del aluminio decrece en superficies rugosas.<sup>66</sup>

## 1.8 Fibra óptica

### Surgimiento de la conducción de la luz.

Inmersa en la historia de la fibra óptica se encuentra la historia misma de la conducción de la luz, ya que este fenómeno fue descubierto por el ingeniero Daniel Colladon en 1841 y fue el primero en demostrar que la luz se podía guiar. Utilizó el agua para mostrar al fluido a través de varios hoyos y llegando a un estanque, en este trayecto viajaba la luz, el experimento lo logró con un lente que enfocaba la luz a través de un tanque de agua y el agua pasaba por un hoyo a través de del tanque, los rayos viajaban por reflexión total interna atrapados en el líquido, descubriendo que la luz viajaba también en la curvatura del agua.



**Imagen 10. La fuente de Colladon, conducción de luz a través de agua en su artículo publicado en 1884**

**Imagen 11. Diagramas de William Wheeler.**

Fuente de imágenes: Hecht, Jeff. 1999

Posteriormente el ingeniero Yankee llamado William Wheeler, en 1871 imaginó iluminar las casas utilizando agua como medio de conducción, por lo que hizo pasar el líquido a través de las

<sup>66</sup> Totten, George E. Y MacKenzie, D. Scott (editores). Handbook of aluminum. Metalurgia Física y Procesos. Volumen 1. Ed. Marcel Dekker. Nueva York 2003. Pp. 54-57.

habitaciones que se encontraban debajo de alguna fuente, generando un arco lumínico, este ambicioso ingeniero estableció cuidadosamente la lógica de la conducción de la luz<sup>67</sup>.

Después de conocer que la luz se podía contener y guiar por reflexión interna, en los años cincuenta comenzó la experimentación con hilos de cuarzo para llegar finalmente a estudios del transporte de imágenes en el interior de mazos de fibra de vidrio, se ha ido perfeccionando la pureza de la fibra óptica en su fabricación lo que implica que cada vez se tienen menos pérdidas por absorción en grandes distancias (denominado nivel de atenuación medido en dB/m), siempre que el diámetro de las fibras sea más grande que la energía radiante.<sup>68</sup>

Para comprender el comportamiento de la luz a través de una fibra óptica, es necesario retomar algunos conceptos básicos de óptica, especialmente la refracción, que como se mencionó en la sección “luz como fenómeno”, se trata de una desviación de la dirección cuando pasa de un medio a otro con diferente densidad<sup>69</sup>.

Los medios tienen determinado un índice de refracción, la referencia es el vacío cuyo índice de refracción es uno, por lo que los medios como el aire y el agua tendrán índices superiores. Un índice de refracción grande hará que el rayo se acerque más a la normal del nuevo medio a atravesar, mientras que un índice de refracción bajo hace que el rayo se acerque más a la superficie del medio. Sin embargo suceden las dos siguientes leyes<sup>70</sup>:

1. El rayo refractado se encuentra en el mismo plano que el rayo incidente.
2. Cuando el rayo incidente y el rayo refractado se han dibujado del mismo tamaño a partir del punto en que ocurre el cambio de medio, se puede afirmar que existe una relación

entre las distancias a la vertical:  $\frac{AN}{BN_1} = \frac{n_2}{n_1}$

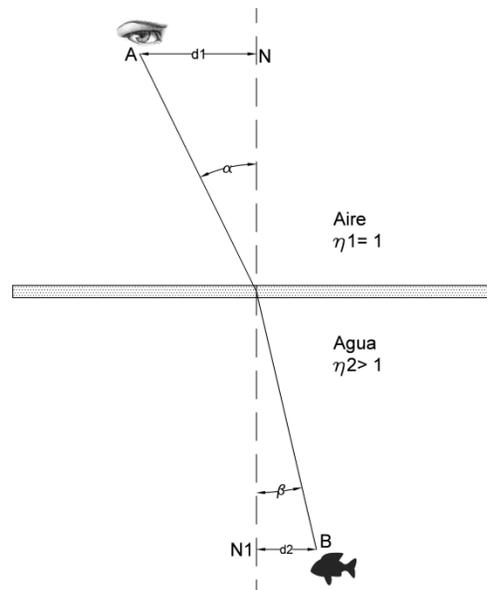


Ilustración 8. Índice de refracción. Reproducido de Cetto, Ana María 2003.

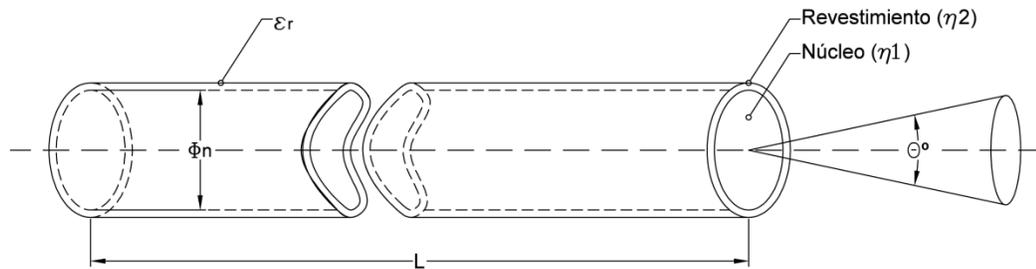
<sup>67</sup> Hecht, Jeff. *City of light. The story of fiber optics*. Oxford University Press. Nueva York 1999, pp. 12- 27

<sup>68</sup> Hetch, Eugene. *Óptica*. Versión castellana de editorial Pearson educación. 3ª Edición. Madrid 2000, p. 198

<sup>69</sup> Szokolay Sven V. *Op. Cit.* p 80.

<sup>70</sup> Cetto, Ana María. *La luz en la naturaleza y en el laboratorio*. Colección la Ciencia para Todos. Fondo de Cultura Económica. 3ª edición. México 2003, pp. 27- 35.

La fibra óptica consiste en un arreglo coaxial de un núcleo (que es el medio que conduce la luz) y un revestimiento de bajo índice de refracción para fomentar la reflexión interna en la superficie del núcleo. El material con el que se fabrica la fibra óptica es el sílice porque es la que mejor desempeño ha presentado en términos de transmitancia y resistencia al calor.<sup>71</sup>



**Ilustración 9. Especificaciones técnicas de una fibra óptica. Reproducido de Hetch Eugene, 2000.**

El desempeño de la fibra óptica se basa en dos características principales: la apertura numérica y la atenuación. La apertura numérica (NA) como se puede ver en la ilustración 8 es una medida del ángulo de aceptación y está determinada por:

$$NA = \text{sen } \theta_A = \sqrt{n_n^2 - n_r^2}$$

Donde:

$\theta_A$  es el ángulo de aceptación

$n_1$  es el índice de refracción del núcleo; y

$n_2$  es el índice de refracción del revestimiento

De manera comercial la mayor parte de la fibra óptica tiene apertura numérica entre 0.2 y 0.4, lo que corresponde a ángulos de aceptación entre  $12^\circ$  y  $24^\circ$ , la más alta es de 0.86 lo que equivale un ángulo de aceptación de  $59^\circ$ . El límite ideal y que es la referencia es una apertura numérica de 1. La atenuación está en función de la longitud de onda y del ángulo de la radiación incidente, es especificada por el fabricante y es medida en dB ( $-10 \cdot \log_{10} \cdot n_{fibra}$ ) para una longitud base de 1 metro.<sup>72</sup>

<sup>71</sup> Kribus, Abraham; Zik, Ory y Karni, Jacob. "Optical fibers and solar power generation" Revista: Solar Energy. Vol. 68, No. 5 (2010), p. 406

<sup>72</sup> *Idem.*

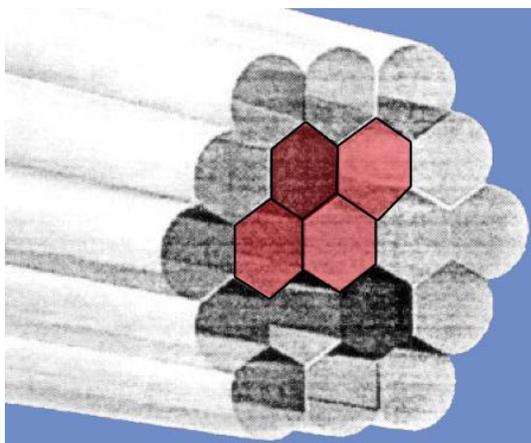
**Tabla 5. Datos para diferentes marcas comerciales de fibra óptica. Atenuación es una integral sobre un espectro de radiación solar típico para una fibra de 1 m de longitud**

	MARCA	MODELO	Atenuación (dB)	Apertura Numérica	Ángulo de aceptación (o)
1	Schott	W	2.348	0.860	59
2	Schott	B3	1.767	0.540	32
3	Spectran	HCP-M1000T	0.168	0.370	21
4	Spectran	HCN-H1000T	0.348	0.480	28
5	Spectran	HCL-M940T	0.067	0.220	12
6	3M	FP-1.0-LHT	0.050	0.400	24
7	3M	FT-1.0-URT	0.291	0.480	28
8	3M	FG-100-GLA	0.216	0.365	21
9	3M	FG-550-LER	0.014	0.220	12
10	3M	FT-1.0-DMT	0.090	0.390	23
11	Sumita	SON-60	0.325	0.500	30
12	Fujikura	GC 800/1000L	0.038	0.250	14

Fuente: Abraham Kribus, Ory Zik y Jacob Karni. Departamento de Investigación en Energía y Ciencias Ambientales, Israel. 2010

La radiación solar se encuentra en el rango de  $0.3\mu\text{m}$  y  $3.0\mu\text{m}$  y la fibra óptica de Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) puede transportar un espectro entre  $0.3\mu\text{m}$  y  $2.5\mu\text{m}$ . La absorción del material depende de la longitud de onda que va a ser transmitida pero los fabricantes establecen valores promedio para las diferentes longitudes espectrales de la irradiancia solar<sup>73</sup>. Así mismo se han generado diversos modelos que solucionen especialmente en el área de captación las dificultades que presenta el uso de fibra óptica como colector en un sistema de lentes de focalización, entre ellas se puede resaltar:

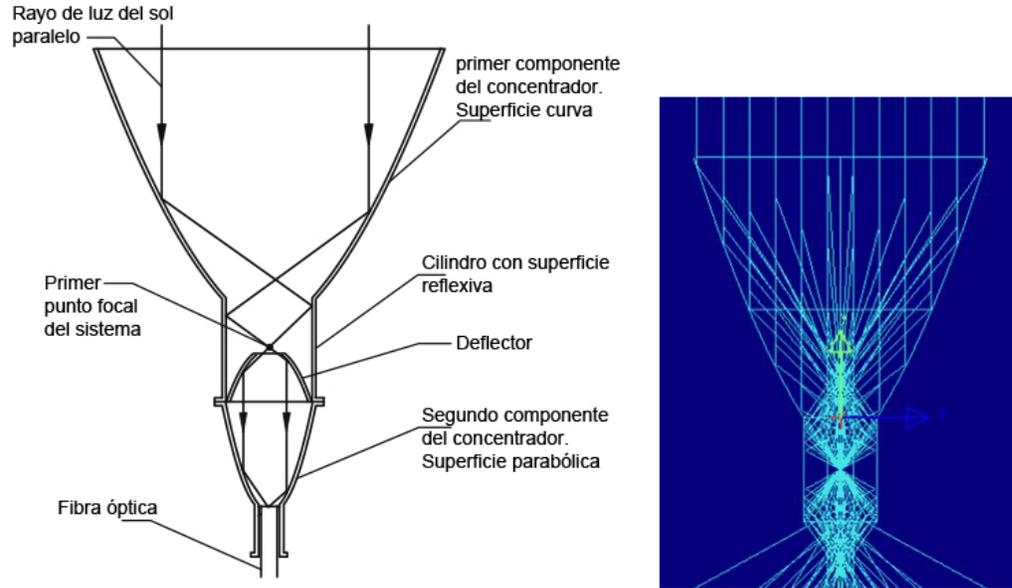
Para evitar espacios vacíos entre las secciones circulares de la fibra óptica en 1979 el investigador chino Liang propuso pulir la sección de entrada de cada fibra para darle forma hexagonal.



**Imagen 12. Pulido de fibra óptica para sección hexagonal en área de captación (a partir de imagen tomada en tesis doctoral de Jaramillo Salgado)**

<sup>73</sup> Jaramillo Salgado, Oscar Alfredo. Tesis doctoral "Transporte de energía radiativa a través de fibras ópticas. Teoría y experimentación". Centro de Investigación en Energía, UNAM. Temixco 2002, pp. 24- 37.

El diámetro pequeño de la fibra óptica le da flexibilidad, pero reduce la capacidad de colección de energía solar concentrada, por lo que desde 1993 se han propuesto entradas cónicas que aumenten en área de colección de la fibra. Con ello se sustituye el uso de lentes que concentren el rayo solar.



**Imagen 13. Sistema compuesto de concentradores cónicos y parabólicos para fibra óptica**

**Imagen 14. Análisis de la geometría del concentrador con software de trazo de rayos.**

Fuente de imágenes: Revista Solar Energy volumen 83 (2009) p. 2087 y volumen 85 (2011) p. 1365. Ambos artículos emitidos por científicos del Instituto de tecnología de Beijín.

### 1.9 Materiales y técnicas de distribución de la luz al interior de los espacios.

La siguiente fase después de analizar la captación y transmisión de la luz, es la manera en que ésta será distribuida en los espacios, sin el estudio de esta fase final no podría denominarse sistema, pues en esta fase es donde se toma en cuenta al usuario y en donde entra el fenómeno de la luz como un proceso fisiológico, se toma en cuenta la actividad a desarrollar, la psicología de la percepción y los niveles de iluminación requeridos.

Así mismo debe considerarse la geometría del espacio arquitectónico a iluminar, sus dimensiones, sus colores y texturas, pues de ello dependerá el tratamiento final de la luz, antes de que llegue al ojo humano, proceso en el cual derivará la percepción, el estado de ánimo, el desempeño en las actividades, etc. De acuerdo con Paroncini, investigador del Departamento de Energía de la Universidad Politécnica de la Marche en Italia, existe una influencia directa en el ser humano de cualquier fuente luminosa, ya sea luz natural o artificial, existen cuatro importantes aspectos a considerar en el diseño lumínico:

- El nivel de iluminación
- La porción del espectro electromagnético de que reproduce la fuente de luz
- Temperatura de color

- La variabilidad o no de la luz<sup>74</sup>

Según el autor estas variables intervienen en las actividades cognitivas, hormonales y hasta en la temperatura corporal de quienes se exponen a cierta fuente luminosa, por lo que se debe satisfacer la adecuada cantidad de luz de acuerdo a la actividad visual a la que se vaya a someter, así mismo se debe garantizar la uniformidad en la distribución lumínica y evitarse la radiación solar directa para no generar deslumbramiento, aspecto que es más dañino que tener un menor nivel de iluminación al requerido.

### Colores y texturas

De acuerdo a la psicología ambiental, el color de la luz, influye en algo más que el comportamiento y estado de ánimo del ser humano, tienen implicaciones fisiológicas más serias, como la reproducción y los periodos de vigilia y sueño. Es por ello que como parte del proceso de la búsqueda de confort, debe considerarse que las personas que pasan prolongado periodos de tiempo en interiores, deberán encontrarse en niveles adecuados de iluminación, y no basta sólo con controlar la temperatura y la humedad de los espacios.

De acuerdo con el investigador del Instituto Europeo de Diseño y especialista en color, Jorrit Tornquist<sup>75</sup>, los resultados de su análisis del color de la luz son:

La luz penetra en la bóveda craneal en cantidad suficiente para estimular células fotosensibles situadas en el cerebro. Esto significa que la luz penetra en nuestro organismo a través de los ojos, la piel y el cráneo, y que influye en él independientemente de la visión. Según los colores claros u oscuros de la luz determinan respuestas fisiológicas de las cuales no tenemos control, ni conocimiento de que ocurra en nuestro organismo.

Color o luz	claros	oscuros
Los vasos sanguíneos se	dilatan	contraen
La producción de adrenalina es	estimulada	ralentizada
La circulación es	estimulada	baja
La libido	aumenta	disminuye
Los cuerpos parecen	Más ligeros Menos sólidos	Más pesados, Más compactos, Más sólidos
La tasa de hemoglobina	aumenta	baja
Las habitaciones parecen	Más grandes	Más pequeñas

### El color de la luz, Efectos fisiológicos.

Otra de las afirmaciones es el hecho de que la reacción del organismo a la luz de color no tiene relación con el acto consciente del ver y por lo tanto en este nivel no tiene significancia cultural. En

<sup>74</sup> Paroncini M., Calcagni, F. Y Corvaro, F. Monitoring of a light pipe system. Revista Solar Energy. Vol.81 (2007), pp. 1180-1186.

<sup>75</sup> Tornquist, Jorrit. Color y luz. Teoría y práctica. Versión castellana de Rosa María Oyarbide. Editorial Gustavo Gili. Barcelona 2008. Pp. 273-277.

uno de los experimentos, se vendaron los ojos de varios Individuos, a los que se iluminó una mitad de la cara y del cuello con luz azul y la otra mitad con luz roja, las reacciones mostradas fueron diversas en las correspondientes mitades del cuerpo. La reacción física es expresión de la reacción a un estímulo procedente del exterior. Según sus resultados se puede observar que:

- Ambientes de color verde o con luz verde hacen sensible a los olores fuertes y estimulan el gusto.
- El rojo excita, el azul induce a la introspección
- En ambientes rojos se suprimen la sensibilidad a los olores fuertes y el gusto.
- La luz rojo-naranja baja la tasa de azúcar en la sangre.
- La luz azul- violeta sin rayos UV provoca tumefacciones, erupciones cutáneas y lleva a la despigmentación de la piel.
- Una equilibrada radiación ultravioleta excita la actividad cerebral, baja la presión sanguínea, dilata los capilares y aumenta el apetito.

Color o luz	cálidos	fríos
La presión sanguínea, la respiración, el latido cardíaco son	estimulados	calmados
El paso del tiempo parece	Más lento	Más rápido
El movimiento de los párpados es	Más frecuente	Menos frecuente
El sistema nervioso se	excita	Relaja
La sensibilidad acústica es	menor	Mayor
Los cuerpos parecen	Más pesados	Más ligeros
El efecto psíquico es	centrífugo	Centrípeto
El deseo de comunicar	aumenta	Disminuye
La libido	aumenta	Disminuye
La temperatura ambiental	Más alta	Más baja
Color o luz	cálidos	fríos
Los cuerpos parecen	Más grandes, más cercanos, reducidos	Más pequeños, más lejanos, agrandados
Una habitación parece	Más seca	Más húmeda

Los niveles de iluminación estable cansan los ojos y también los otros sentidos. El organismo humano está predispuesto a funcionar óptimamente sometido a cambios ligeros y continuos, que le permitan mantener la capacidad de concentración.

Es necesario tomar en cuenta estos factores, para tener conciencia de los efectos que podemos producir en las personas que habitan nuestros espacios, para poder mejorar los sistemas que actualmente utilizamos, buscando en todo momento el confort del usuario.

### 1.10 Niveles de iluminación recomendados

De acuerdo con la Sociedad Norteamericana de Ingenieros Eléctricos y de Iluminación (IESNA), existen diferentes niveles de iluminación requeridos, acorde a la actividad visual que vaya a realizarse, tomando en cuenta que deberá evitarse la fatiga visual por la contracción o dilatación de la pupila, por variaciones o inadecuaciones en los niveles de iluminación. También deberá tomarse en cuenta el período de tiempo que pasarán las personas en los espacios, ya que podría provocarse fatiga en caso de mantener niveles de iluminación altos y homogéneos.

En la publicación de 1997 de iluminancias sugeridas para espacios interiores de IESNA los niveles de iluminación se hacían recomendaciones de acuerdo a la complejidad visual a desarrollar, al tamaño y contraste de los objetos a observar y al tiempo en que el observador desarrolla la actividad, todo esto se resume en la siguiente tabla de iluminancias recomendadas:

**Tabla 6. Categorías y valores de iluminancia para tipos generales de actividades en interiores<sup>76</sup>**

Rangos de iluminancias				
TIPO DE ACTIVIDAD	CATEGORÍA DE ILUMINANCIA	LUX	PIE CANDELA	REFERENCIA DE PLANO DE TRABAJO
Espacios públicos con alrededores oscuros	A	20-30-50	2-3-5	Iluminación general en los espacios
Orientación simple para visitas de estancia corta	B	50-75-100	5-7.5-10	
Espacios de trabajo donde ocasionalmente se realizan tareas visuales	C	100-150-200	10-15-20	
<b>Desempeño de tareas visuales de gran contraste y gran tamaño</b>	<b>D</b>	<b>200-300-500</b>	<b>20-30-50</b>	<b>Iluminancia sobre planos de trabajo</b>
Realización de tareas visuales de contraste medio y tamaño pequeño	E	500-750-1000	50-75-100	
Realización de tareas visuales de bajo contraste y tamaño muy pequeño	F	1000-1500-2000	100-150-200	
Realización de tareas visuales de bajo contraste y tamaño muy pequeño por periodos de tiempo prolongados	G	2000-3000-5000	200-300-500	Iluminancia obtenida por una combinación de iluminación general y local (iluminación suplementaria)
Realización de tareas visuales de precisión por periodos de tiempo muy prolongados	H	5000-7500-10000	500-750-1000	
Realización de tareas visuales muy especiales de extremadamente bajo contraste y tamaño pequeño	I	10000-15000-20000	1000-1500-2000	

Para comprender a fondo cómo intervienen los niveles de iluminación, el tamaño y el contraste en la percepción visual, María Elena Díaz señala en su libro<sup>77</sup> que con una iluminación adecuada el ojo detecta cambios que suceden hasta en 1/50 segundos, las imágenes tienen cierta persistencia, la cual depende del estímulo y del tiempo de exposición, hasta que finalmente los cambios se

<sup>76</sup> Murdoch, J.; Harrold, R. y Goldsbury, C.J. (Editores). Ready reference. IESNA. 3ª edición. Estados Unidos 1996.

<sup>77</sup> Díaz Enciso, María Elena. *Op cit.*

reciben en el cerebro, lo que resulta importante para considerar el movimiento como una variación suave y no como una serie de saltos, en cuanto a la agudeza visual que es capacidad que tiene el ojo de diferenciar pequeños detalles de los objetos, discernir o discriminar sus elementos constitutivos, lo que da el sentido de las formas, depende del establecimiento de mínimo visible de cada persona y la distancia mínima a la que deben observarse los objetos. Algunos factores que modifican la agudeza visual son: las ametropías, las variaciones fisiológicas individuales, tamaño anormal de la pupila, el estado fisiológico del sujeto con fatiga, estados patológicos por glaucoma, diabetes, hipertensión, el contraste de los objetos a observar y los niveles de Iluminación.

En la cuarta edición de las recomendaciones de iluminancia, el criterio se basa en el conocimiento del espacio a iluminar, en las características del ocupante y en la tarea a desarrollar. Así mismo se explica cómo influye la edad del ocupante en el desempeño visual. De los criterios señalados en la tabla anterior, se reduce a tres categorías, lo que facilita distinguir las diferencias básicas de criterio.

<b>Orientación y tarea visual simple.</b> El desempeño visual tiene poca relevancia. Este tipo de criterio aplica a espacios públicos en donde actividades visuales como lectura o inspección son escasamente realizadas. Sin embargo se sugieren niveles de iluminación superiores en espacios en donde se desarrollen tareas visuales importantes de manera ocasional.		
<b>A</b>	Espacios públicos	30 lx (3 pie candela)
<b>B</b>	Orientación simple y visitas cortas	50 lx (5 pie candela)
<b>C</b>	Áreas de trabajo en donde se desarrollan tareas visuales simples	100 lx (10 pie candela)
<b>Tarea visuales comunes.</b> El desempeño visual es importante. Estas actividades son encontradas en áreas comerciales, industriales y residenciales. Los niveles de iluminación recomendados difieren de acuerdo a las características de las tareas visuales. Se recomiendan niveles de iluminación superiores para las actividades visuales que utilicen elementos de bajo contraste o de tamaño pequeño.		
<b>D</b>	Desarrollo de actividades visuales con elementos de alto contraste y gran tamaño	300 lx (30 pie candela)
<b>E</b>	Desarrollo de actividades con elementos de bajo contraste y gran tamaño o de alto contraste y tamaño pequeño	500 lx (50 pie candela)
<b>F</b>	Desarrollo de actividades visuales con elementos de bajo contraste y tamaño pequeño	1,000 lx (100 pie candela)
<b>Tareas visuales especiales.</b> El desempeño visual es muy importante. Estas actividades son muy especializadas, incluyendo aquellas que implican elementos muy pequeños o de muy bajo contraste. Se recomienda que los niveles de iluminación sugeridos sean logrados implementando iluminación complementaria sobre el área de trabajo. Niveles de iluminación superiores se logran acercando la fuente de iluminación al área de trabajo.		
<b>G</b>	Desarrollo de actividades visuales cerca del umbral	3,000 a 10,000 lx (300 a 1000 pie candela)

Las reflectancias sugeridas por IESNA para los diferentes componentes de un local son:

- Para el techo el 80% o superior.
- Para el piso de 20% a 40%
- Para las paredes de 50% a 70%
- Para el mobiliario de 25% a 45%

El Manual de Iluminación de IESNA, sugiere que en espacios de oficinas y donde es común el uso de monitores de computadoras se deberá tomar en cuenta también:

- El deslumbramiento directo de la fuente de luz
- La iluminancia vertical
- El deslumbramiento por reflejos
- La geometría del ojo, del área de trabajo y de la fuente de luz
- En espacios donde la interacción social sea importante como en salas para conferencia o reuniones es importante poder apreciar el rostro de las personas
- La distribución de la luz en el espacio habitable
- Las luminancias de las superficies del local
- Las superficies de los objetos o mobiliario cercanos al plano de trabajo
- Las sombras generadas

En México la Secretaría del Trabajo y Previsión Social es la encargada de regular las condiciones lumínicas de áreas laborales, para el uso de oficinas la NOM-025-STPS-2008 en el capítulo siete establece:

Tarea visual del puesto de trabajo.	Área del trabajo	Niveles mínimos de iluminación (luxes).
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple, empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	300
Distinción clara de detalles: maquinado y acabados delicados, ensamble de inspección moderadamente difícil, captura y procesamiento de información, manejo de instrumentos y equipo de laboratorio.	Talleres de precisión: salas de cómputo, áreas de dibujo, laboratorios.	500

Esta norma también establece en porcentaje los niveles máximos permisibles de reflexión para el plano de trabajo y para las paredes circundantes, determinando un 50% y 60% respectivamente.

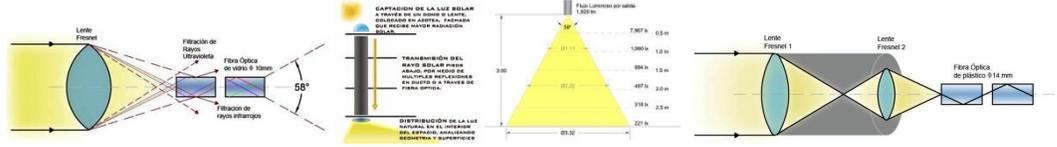
Así mismo las Normas Técnicas Complementarias al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, en la sección 3.5 del proyecto arquitectónico establece que en áreas destinadas para oficina deberán cumplirse los siguientes niveles de iluminación.

Tipo de edificación	Cuando sea preciso apreciar detalles:	Nivel de iluminación (luxes)
Oficinas públicas y privadas	Toscas o burdos	200
	Medianos	300
	Muy finos	500

En cuanto a iluminación natural se refiere, únicamente se establece el criterio de iluminación lateral por medio de ventanas que deberán tener un dimensionamiento mínimo del 17.5% del área total del espacio a iluminar, y se permite el uso de tragaluces en todos los casos.

La manera de lograr estos niveles de iluminación depende de varios factores antes descritos, como son la fuente luminosa, la distancia entre dispositivos que conducen la luz, la geometría del espacio, los colores, las texturas, etc. Por lo que deberá entenderse como un sistema, y no como un conjunto de partes que podrían utilizarse de manera aislada, pues cada una de sus variables, modificarás sustancialmente el resultado deseado a obtener.

## CONCLUSIONES DE MARCO TEÓRICO



1. El arquitecto debe considerar la necesidad de espacios bien iluminados de manera natural. Para ello debe llevar a cabo un estudio de las actividades que se llevarán en las edificaciones y de acuerdo a ello determinar los niveles de iluminación necesarios para generar confort visual. De manera consecuente se analizará el contexto inmediato a la edificación para conocer la luz natural disponible al exterior de la edificación; con el objeto de determinar si es posible que a través de estrategias como orientación y diseño de ventanas y tragaluces se lleve esa luz al interior.
2. El uso de Sistemas de Transmisión de Luz Natural (**STLN**) se presentan como solución de espacios ya construidos que no tienen acceso a tragaluces o ventanas o cuando éstas últimas no se encuentran en la orientación más favorable o presentan obstrucciones por el contexto, brindando niveles de iluminación inferiores a los requeridos por los usuarios de acuerdo a las actividades que llevan a cabo. Su uso también se justifica en aquellos espacios que se encuentran lejanos a ventanas puesto que, como se ha demostrado en investigaciones anteriores, la luz disminuye considerablemente conforme nos alejamos.
3. Después del análisis de los diferentes STLN se considera que el análisis de materiales novedosos, altamente reflexivos y ligeros es punto medular para el desarrollo y diseño de nuevos sistemas que permitan el beneficio al mayor número de usuarios en el edificio de instalación.
4. Se sugiere realizar el análisis como en la mayoría de los métodos propuestos en la literatura del tema, que consiste en un estudio por fases: Captación, transmisión y distribución de la luz, desmembrando los materiales, procesos físicos y las variables que intervienen en cada una de ellas, pues sólo así podrán realizarse nuevas propuestas, en la que siempre existe la búsqueda de dispositivos de menores dimensiones, de mayor eficiencia u optimización de recursos y de mejora en la reducción de impacto ambiental y de costos.
5. Se puede observar que el avance en soluciones arquitectónicas, no sólo depende de la creatividad del diseñador, sino del avance científico y tecnológico de la época en que se desarrolla, por lo que deberá tomarse en cuenta el análisis no sólo teórico de las propuestas, sino de la selección y utilización de los materiales, porque son de tendencia evolutiva.
6. El objetivo en todo momento será el bienestar de las personas y la reducción de la dependencia de energías no renovables y de generación por combustibles.

Con el objetivo de conocer el comportamiento de la luz a través de sistemas comunes de iluminación como son fachadas de vidrio y su rendimiento en patios de iluminación, se montó un experimento en el tercer nivel de un edificio ubicado en el Centro Histórico de la Ciudad de México, frente al caso de estudio, puesto que los patios de iluminación funcionan bajo el mismo principio que los sistemas de transporte de luz estudiados como los lumiductos o a través de fibra óptica: REFLEXIÓN DE LA LUZ EN LAS SUPERFICIES,.

En este análisis se comprobó que estos sistemas funcionan mejor bajo luz directa que bajo luz indirecta, por lo que cuando el rayo del sol logra llegar directamente a la parte superior del cubo, los niveles de luz en el interior incrementan, pero bajo luz difusa no muestra cambios aún cuando la radiación solar en la azotea incrementa.





Imagen 1. Ubicación de patio de iluminación

Este edificio presentaba la característica arquitectónica de la zona del Centro Histórico de la Ciudad de México, que son construcciones con dimensiones de fachada menores respecto a la profundidad del predio, es decir, tienen mayores dimensiones en profundidad que en fachada lo que no permite la correcta iluminación del interior.

Es por esta razón que se modificó arquitectónicamente el espacio, abriendo un patio interior al centro de la longitud total de la edificación, generando un cubo de luz que ayudara a incrementar los niveles de iluminación especialmente en los niveles inferiores.



Imagen 2. Vista del edificio antes de intervención

El edificio se encuentra girado  $6^\circ$  al oriente respecto del norte geográfico, siguiendo la traza urbana.

Para medir la eficiencia de la modificación en términos lumínicos, se colocaron antes de la intervención 10 fotómetros Li-Cor 210SA en el tercer nivel, con una separación entre ellos de un metro. El objetivo fue conocer el comportamiento de la luz natural a través de las fachadas existentes.



Imagen 3. Fotómetro. Sensor utilizado para mediciones de luz natural, unidad de medida: lux.

Las mediciones se realizaron cada minuto y se obtuvo una base de datos que fue procesada en Excel para generar gráficas que permitan el análisis de la distribución lumínica.

Los resultados obtenidos en la primer medición, muestran que la luz decrece rápidamente conforme se aleja de la ventana por donde entra, obteniendo niveles de iluminación por debajo de lo aceptables para llevar cabo actividades en el interior. En la siguiente gráfica se presentan los valores registrados a las 12:00 p.m. a finales de octubre de 2009 y como se puede ver a 7 metros de distancia respecto de la fachada el nivel de luz es muy bajo.

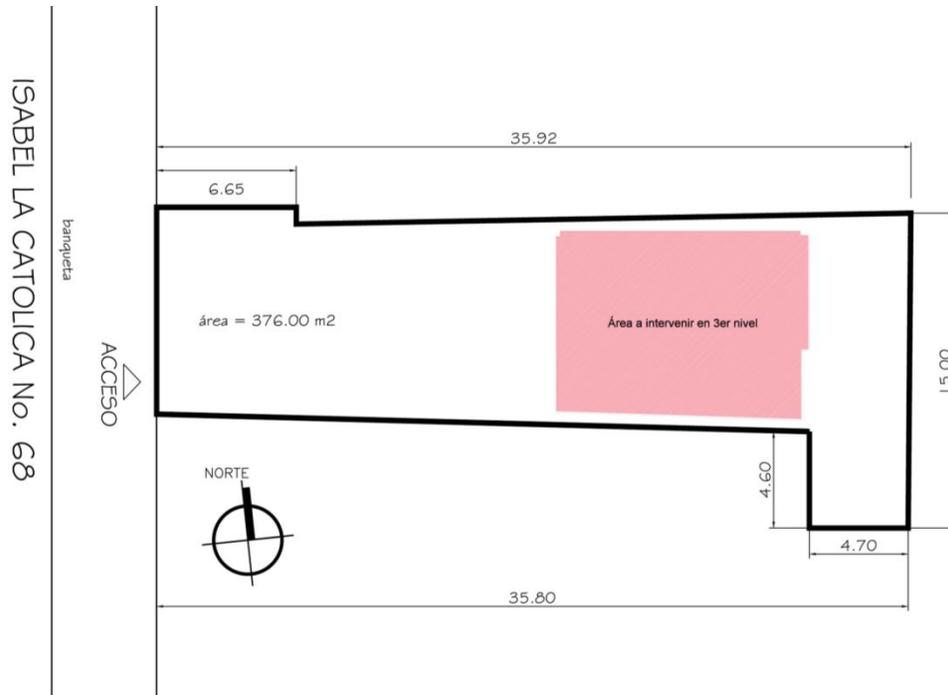


Imagen 4. Dimensiones generales y orientación del edificio

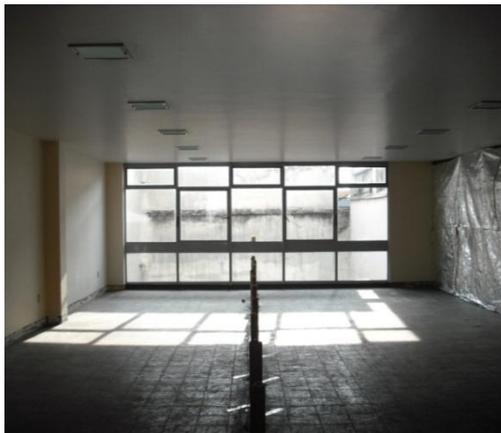


Imagen 6. Colocación de fotómetros antes de intervención.

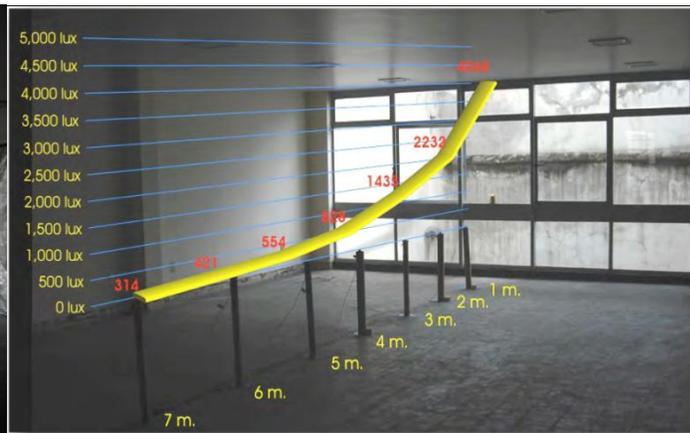


Imagen 5. Resultados obtenidos antes de la intervención. (A. Valeriano, 2010)

## DESPUÉS DE LA INTERVENCIÓN.

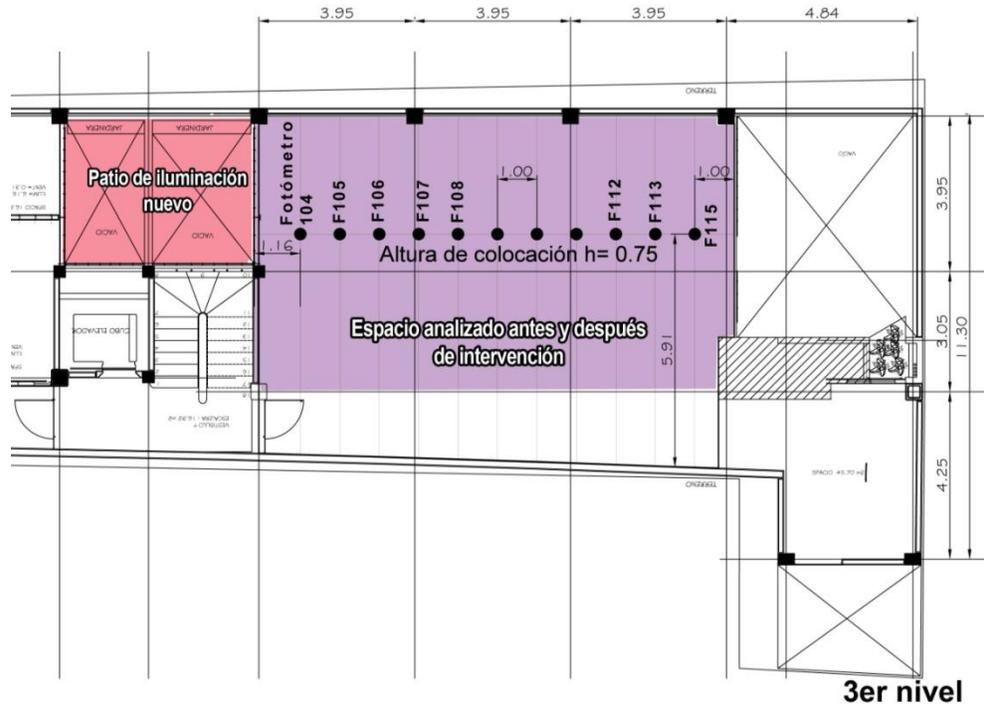
En el edificio se llevaron a cabo dos registros o bases de datos:

1. En la azotea se midieron:

- Iluminancia global horizontal.
- Irradiancia global horizontal.

- Datos climatológicos de temperatura del aire (°C), dirección (0° a 360°) y velocidad del viento (m/s), precipitación pluvial (mm), humedad relativa (%) y presión atmosférica (mmHg), para el complemento de la información de irradiancia e iluminancia
- Se utilizó un adquisidor de datos, marca Campbell Scientific, modelo CR1000.

Las mediciones y el registro se realizaron cada minuto a través del Software PC200W. Versión 4.0 y fueron procesados en Excel, con el objetivo de conocer la luz disponible en el exterior, las horas de radiación y la relación de la cantidad de luz con las demás variables meteorológicas medidas.



**Imagen 7. Colocación de fotómetros en tercer nivel e intervención arquitectónica**

La intervención consistió en hacer un cubo de luz al centro de la edificación (ver imagen 6).



2. La segunda base de datos se genera en el tercer nivel, con 11 fotómetros a cada metro de distancia a partir de la fachada oriente, en un plano situado a 75 cm respecto del piso terminado, conectados al adquisidor de datos Agilent mencionado anteriormente, las mediciones se hacen cada minuto y se registraron datos del 28 de octubre al 21 de noviembre de 2011. (ver Imagen 7)

**Imagen 8. Colocación de fotómetros en tercer nivel**

## RESULTADOS

Se analizarán los días 29 de octubre y el 2 de noviembre de 2011, estableciendo la relación de la cantidad de luz disponible al exterior del edificio y la luz que llega al interior.

### 29 de octubre de 2011. Horario de Verano.

Tabla 1 Cálculo y registro de hora de amanecer para el 29 de octubre

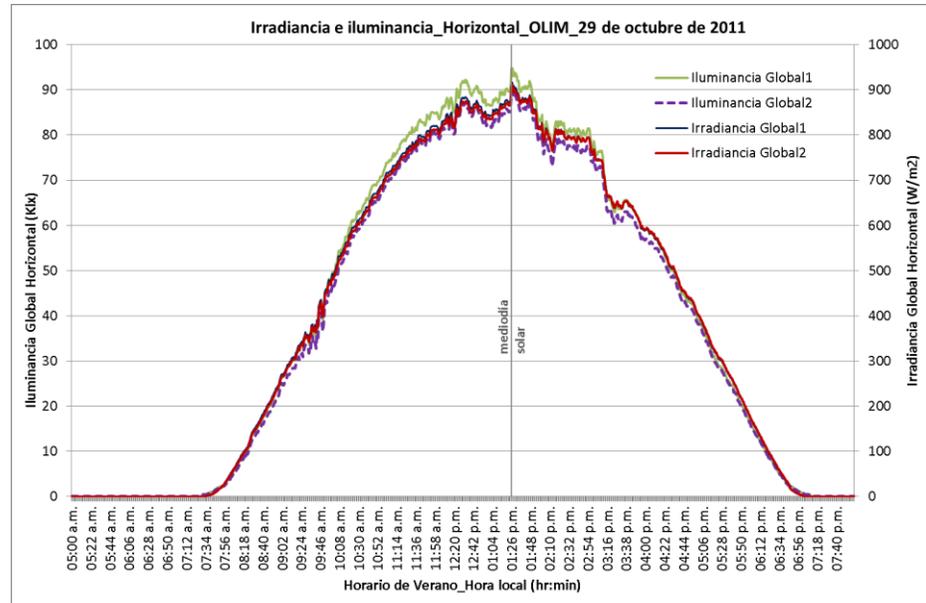
MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL (Horario de verano)	HORA LOCAL (SIN Horario de verano)	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	07:33	06:33	06:12
Hora de amanecer según cálculo	07:36	06:36	06:15
Hora de atardecer según mediciones	19:03	18:03	17:42
Hora de atardecer según cálculo	19:04	18:04	17:43
<b>Total Horas de Iluminación y radiación:</b>	<b>11:30</b>		

Primero se analiza la hora de amanecer y de atardecer de acuerdo a los datos que registraron los equipos de medición y se compara con el cálculo a través de ecuaciones programadas en Excel, para poder eliminar los datos que se encuentren de iluminación y radiación que se encuentran fuera de ese periodo de tiempo.

Tabla 2. Irradiancia e Iluminancia Máxima

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	VALOR MÁXIMO REGISTRADO	HORA LOCAL (Horario de verano)	HORA LOCAL (SIN Horario de verano)	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Irradiancia Global Piranómetro 1 (W/m <sup>2</sup> )	916	13:27	12:27	12:06
Irradiancia Global Piranómetro 2 (W/m <sup>2</sup> )	910	13:27	12:27	12:06
Iluminancia Global Fotómetro 1 (Klx)	94.7	13:27	12:27	12:06
Iluminancia Global Fotómetro 2 (Klx)	89.9	13:27	12:27	12:06

De acuerdo con los registros la hora de amanecer se dio a las 7:33 am en la hora local que presenta horario de verano, de acuerdo con el calculo existe una diferencia para ese día de una hora veintinueve minutos con el tiempo solar verdadero, en donde la hora local esta adelante.



**Gráfica 1. Irradiancia e Iluminancia 29 de octubre de 2011.**

Para llevar a cabo el análisis, se comparan las mediciones en interior y exterior, observando que la iluminancia máxima se da a las 13:27 hora local, por lo que se extraen los datos de iluminación al interior para esa hora:

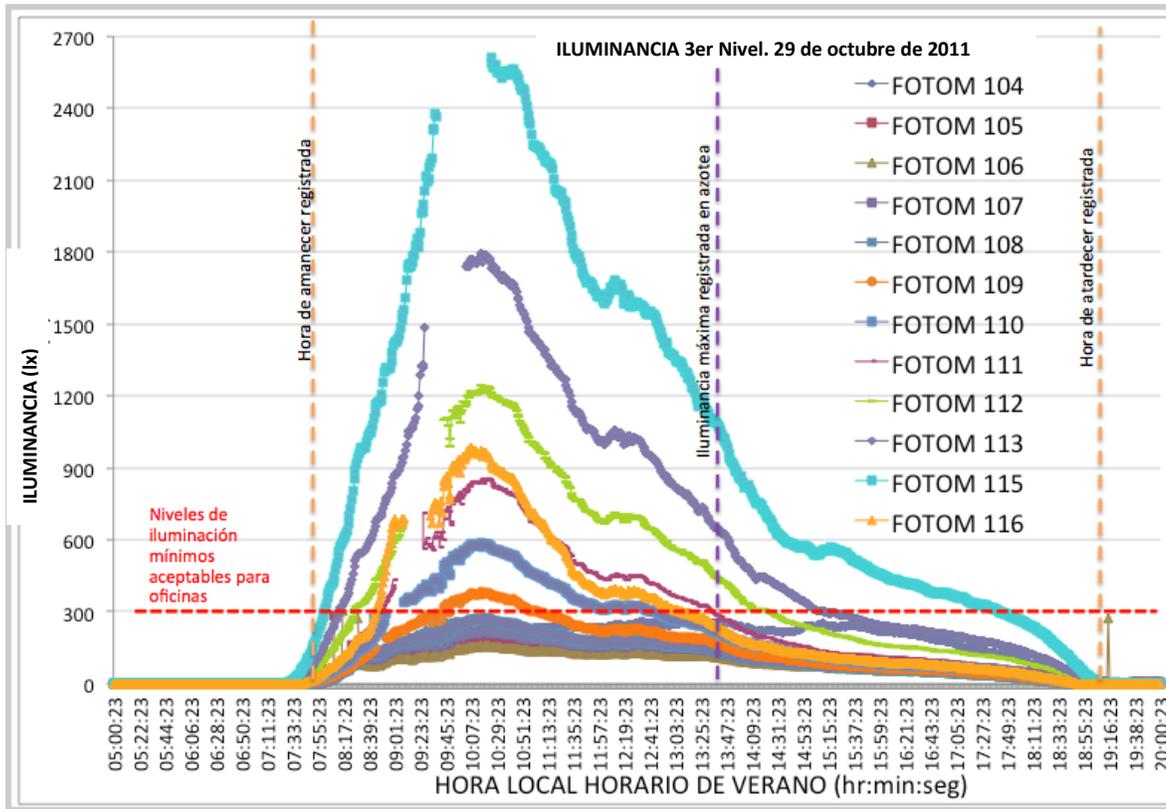
Al considerar 94 700 luxes como el 100% de luz disponible se obtienen los siguientes porcentajes de luz en el interior:

Fotómetro 104 = 0.27%; Fotómetro 105= 0.18%; Fotómetro 106 = 0.13%; Fotómetro 107 = 0.15%;  
 Fotómetro 108= 0.16%; Fotómetro 109= 0.20%; Fotómetro 110= 0.26%; Fotómetro 111= 0.35%;  
 Fotómetro 112= 0.53%; Fotómetro 113= 0.77%; y el Fotómetro 115= 1.25%

Al graficar la iluminación natural al interior de la edificación se observa que el nivel máximo de registro en cada fotómetro se da a diferentes horas, pudiendo concluir que la luz directa en ese punto ocurre durante la mañana, cuando el sol se encuentra en su punto más bajo al amanecer, el fotómetro 104 es el de mayor valor, conforme asciende el sol se va recorriendo hasta llegar al fotómetro 115.

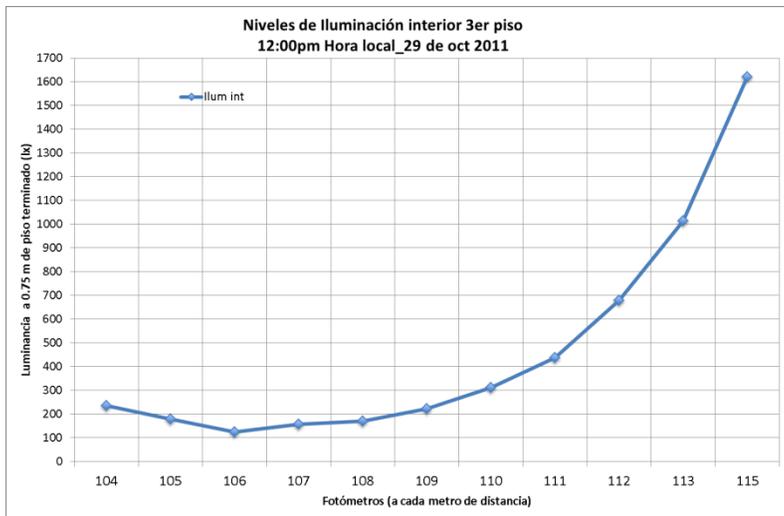
**Tabla 3. Mediciones en interior de 3er nivel al mediodía solar.**

FOTÓMETRO	VALOR EN LUXES 1:27 (HORA LOCAL)
104	259.13
105	173.48
106	121.33
107	146.31
108	153.84
109	187.17
110	245.47
111	326.76
112	506.43
113	728.28
115	1180.16



Gráfica 2. Iluminancia interior 3er nivel 29 de octubre de 2012.

La comparativa de las mediciones antes y después de la intervención se da con los siguientes datos extraídos a las 12:00 p.m. de la hora local puesto que es la hora en que son presentados los datos anteriores a la modificación.



Gráfica 3. Iluminancia interior registrada cada metro.

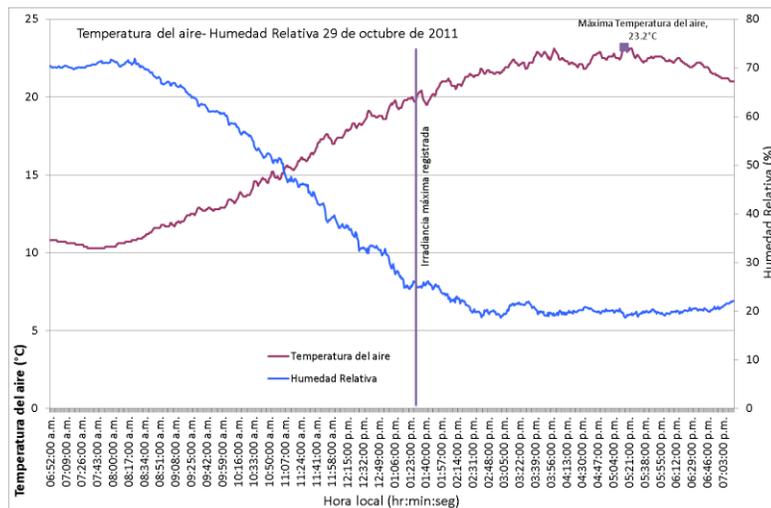
Se puede observar en la siguiente gráfica que los datos a pesar de que tienden a cero, no son menores a 100 luxes y que en los fotómetros del 104 al 106 la gráfica vuelve a subir, situación que no ocurría antes de la intervención porque esos niveles ya era cero.

En la azotea del edificio también se midieron otras variables meteorológicas como la temperatura del aire y la humedad relativa, que ayudan a comprender de manera integral el comportamiento del clima ya que el laboratorio no observa el cielo y la nubosidad con

instrumentos, por lo que el análisis de los demás componentes meteorológicos ayudan a la comprensión de la cantidad de radiación que llega, la nubosidad se ve reflejada en la gráfica de irradiancia e iluminancia, pues genera variaciones en la cantidad de luz disponible en un periodo de tiempo muy corto.

De acuerdo a la WMO la temperatura es la medida física que describe el movimiento aleatorio de las moléculas de un cuerpo. Para propósitos meteorológicos las temperaturas son mediciones de la media. Más común es la temperatura del aire a diferentes alturas. La WMO define la temperatura del aire como "la temperatura indicada por un termómetro expuesto al aire en un lugar cubierto de la radiación solar directa". Su medición en nuestro sitio de estudio se presenta en °C y su utilidad en la arquitectura es para conocer los niveles de confort de los usuarios al interior de los espacios, debiendo ser considerada en la iluminación natural por estar ambas contenidas en la porción de radiación solar directa que se permite entrar a un espacio.

Mientras que la humedad relativa es la relación en porcentaje de la presión de la saturación de vapor y al igual que la temperatura del aire, es considerada por los arquitectos como herramienta de diseño de espacios confortables.



**Gráfica 4. Relación Temperatura- Humedad relativa. 29 de octubre 2011**

En la gráfica de la temperatura del aire y la humedad se puede apreciar que son inversas, que cuanto mayor sea al temperatura menor será la humedad relativa. También se puede ver que la temperatura desciende poco después del amanecer y que conforme aumenta la radiación solar va aumentando la temperatura, pero que aún cuando la radiación solar llega a su máximo valor a la 1:27 p.m. de

la hora local, la temperatura del aire llega a su punto máximo cuatro horas y diecinueve minutos más tarde, fenómeno que se da por la presencia de nubes.

Por ser el periodo de otoño para la latitud de estudio, la humedad relativa no es mayor a 80%, pero la temperatura del aire es menor a 20°C, encontrándose por debajo de la zona de confort, por lo que la radiación solar directa entre las 8:00 a.m. y las 2:00 p.m. deberá ser contemplada como estrategia de diseño en esta época del año.

## 2 de noviembre de 2011. Sin horario de verano.

Con la misma metodología se procesaron los datos obtenidos el 2 de noviembre, para poder hacer comparaciones en el comportamiento de la luz en el edificio, para este día se presenta mayor nubosidad, que como se mencionó anteriormente, presenta más variaciones en la gráfica de radiación solar.

Tabla 4. Amanecer y atardecer 2 de noviembre de 2011

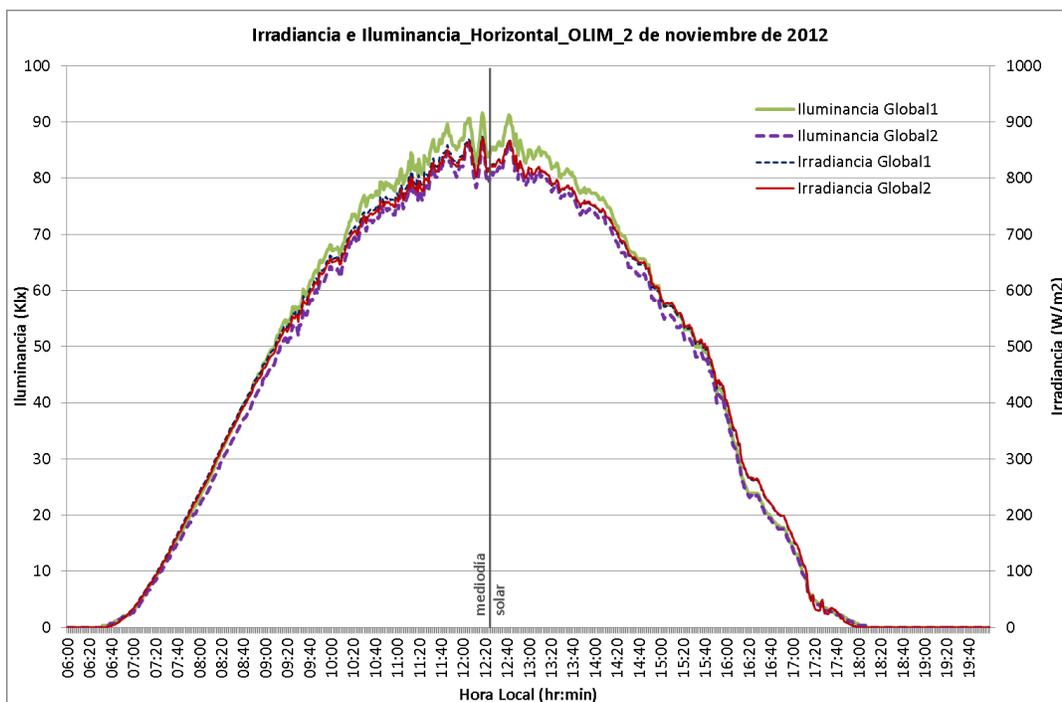
MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL (SIN Horario de verano)	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	06:35	06:14
Hora de amanecer según cálculo	06:38	06:17
Hora de atardecer según mediciones	17:58	17:37
Hora de atardecer según cálculo	18:02	17:41
<b>Total Horas de Iluminación y radiación:</b>	<b>11:23</b>	

De acuerdo con el cálculo, la diferencia entre la hora local y el Tiempo Solar Verdadero (T.S.V.) es de 21 minutos.

Lo máximos registrados para esos días son:

Tabla 5. Irradiancia e Iluminancia máxima 2 de noviembre de 2011

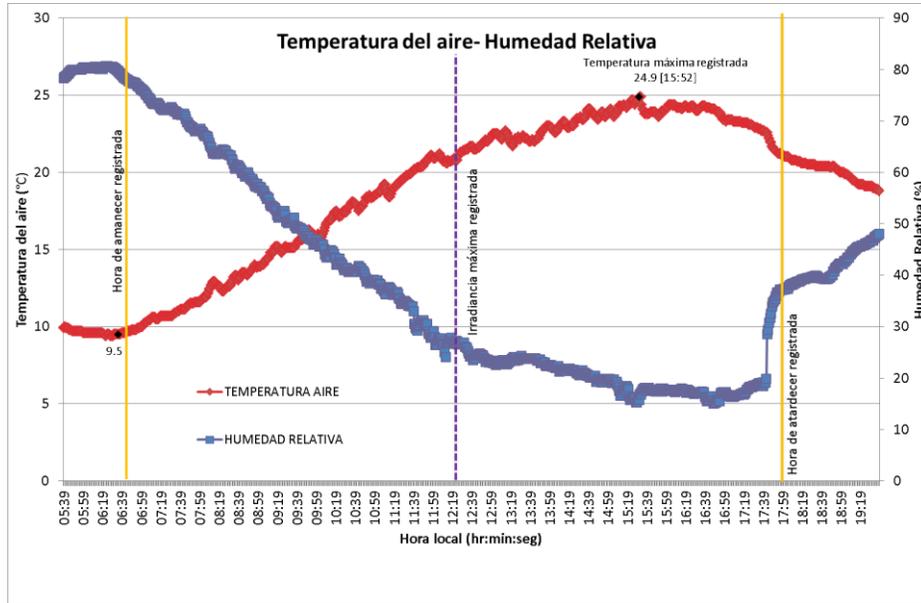
MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	VALOR MÁXIMO REGISTRADO	HORA LOCAL (SIN Horario de verano)	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Irradiancia Global Piranómetro 1 (W/m <sup>2</sup> )	874	12:18	11:57
Irradiancia Global Piranómetro 2 (W/m <sup>2</sup> )	870	12:18	11:57
Iluminancia Global Fotómetro 1 (Klx)	91.6	12:18	11:57
Iluminancia Global Fotómetro 2 (Klx)	86.9	12:18	11:57



Gráfica 5. Irradiancia e Iluminancia global horizontal para el 2 de noviembre de 2011.

Se considerará 91 600 luxes el 100% de la luz natural disponible en el exterior, a las 13:18 de la hora local que es el momento en que se da la iluminancia máxima, por lo que los valores obtenidos en el interior por los fotómetros serán un pequeño porcentaje del total de luz medida en la azotea.

Obteniendo que el Fotómetro 104 = 0.2% (222.89 lx); Fotómetro 105= 0.14% (126.77 lx); Fotómetro 106= 0.09% (84.99 lx); Fotómetro 107= 0.11% (99.98 lx); Fotómetro 108=0.10% (96.95 lx); Fotómetro 109=0.12% (113.70 lx); Fotómetro 110=0.17% (154.32); Fotómetro 111= 0.20% (187.87 lx); Fotómetro 112=0.33% (302.01 lx) y Fotómetro 113= 0.47% (434.91 lx).

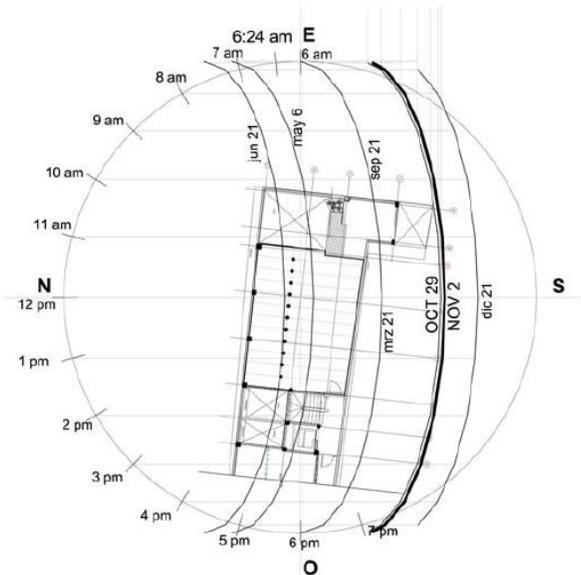


Gráfica 6. Relación Temperatura- Humedad relativa. 2 de noviembre de 2011.

Gráfica 7. Gráfica solar para sitio de estudio

Las horas de iluminancia máximas registradas por los fotómetros fueron por la mañana, lo que sugiere que recibieron luz directa por el bajo ángulo del sol al amanecer, pero que no afecta la radiación directa cuando incrementó la radiación recibida en la azotea, puesto que como se verá en la gráfica solar, los niveles superiores no permitirán el acceso al tercer nivel, puesto que el sol viene del sur, generando sombras.

Se analiza de igual manera los datos climáticos de temperatura del aire y humedad relativa para el 2 de noviembre.



La radiación máxima se da a las 13:18 horas y la temperatura máxima ocurre 2 horas con 42 minutos después, pero el lapso de tiempo es menor que en el caso del 29 de octubre analizado anteriormente, lo que podría sugerir una mayor presencia de nubes en octubre. La temperatura llega un poco antes a los 20°C pero de manera general tampoco cumple con la temperatura necesaria para generar confort.

### Otras herramientas de diseño de iluminación

Se hizo el trazo de la gráfica solar ortogonal para conocer el recorrido del sol en los días de análisis, obteniendo que en gran parte la iluminación del interior se lleva a cabo de manera indirecta, es decir que para octubre a enero la inclinación del sol no permite la entrada directa del rayo solar, pero la iluminación proveniente del cielo (difusa o indirecta) es de gran relevancia, por lo que las superficies altamente reflejantes permiten incrementar los niveles de luz al interior y especialmente los pisos inferiores de la edificación. De acuerdo con el método gráfico la hora de amanecer debió ocurrir a las 6:24 T.S.V. aproximándose más a los registros que el método de cálculo.

### Reglamento de construcciones del Distrito Federal

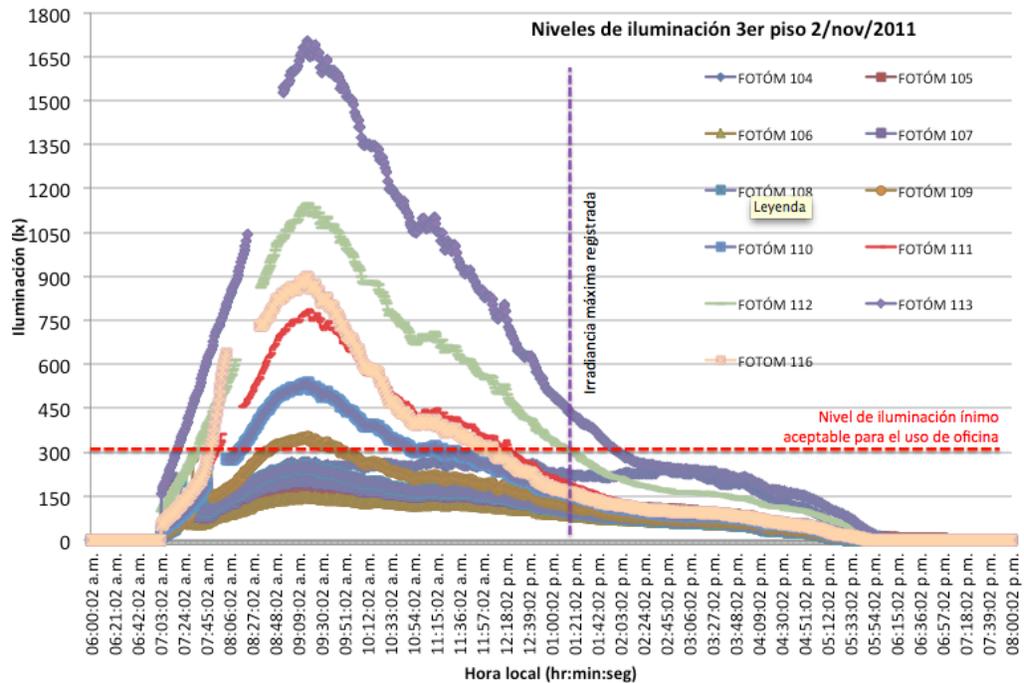
Iluminación y ventilación.

Las normas técnicas complementarias al reglamento de construcciones del D.F. en el capítulo del proyecto arquitectónico, se establece en la sección 3.4.2 (Iluminación y ventilación natural) que el área de ventanas no deberá ser menor al 17.5% del área del local y que los domos o tragaluces podrán dimensionarse tomando como base mínima el 4% de la superficie del local y que el coeficiente de transmisibilidad del espectro solar del material translucido de domos y tragaluces no deberá ser inferior al 85%.

También se establece que los niveles mínimos de iluminación que deben tener las edificaciones de acuerdo a su uso son:

**Tabla 6. Niveles de iluminación de acuerdo a Normas Complementarias al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal**

Tipo de edificación	Local	Nivel de iluminación
Habitacional	Circulación horizontal y vertical	50 luxes
Oficinas privadas y públicas	Cuando sea preciso apreciar detalles	100 luxes
	Cuando sea preciso apreciar detalles toscos o burdos	200 luxes
	Medianos	300 luxes
	Muy finos	500 luxes



Gráfica 8. Iluminancia interior en 3er nivel para el 2 de noviembre de 2011.

## Conclusiones

Esta última gráfica es la que nos permite observar el comportamiento del interior a través del cubo de iluminación, debido a que se observa que los niveles máximos de iluminación ocurren cuando llega luz directa, en el resto del día en que solo se obtiene por luz proveniente del cielo (luz difusa), no ocurre el incremento cuando se da la radiación máxima en azotea, esto puede verse porque en la línea en que se marca la radiación máxima, la gráfica sigue en descenso.

La luz natural tiene como principal característica la *VARIABILIDAD*, por lo que su estudio requiere de observación constante y precisa de cada uno de los componentes que determinan esta variación, como la nubosidad, la geometría solar, el contexto urbano y principalmente la relación del volumen geométrico con el recorrido del sol a lo largo del día y del año. Este estudio pretende ser un análisis muy puntual de los efectos de la intervención arquitectónica al contribuir en la penetración de luz natural a través de un cubo al centro del espacio, con los datos obtenidos en el exterior, y en el interior antes y después se puede concluir que los niveles de iluminación aumentaron, beneficiando las actividades que ahí se pueden llevar a cabo.

En este capítulo se analizan las diferentes metodologías que se han utilizado para evaluar y predecir el desempeño de los Sistemas de Transmisión de Luz Natural.

Se analizan principalmente revistas científicas, por ser las fuentes que presentan experimentación reciente sobre este tipo de sistemas, así como también analizan a profundidad los resultados obtenidos, proponiendo tipos de gráficas, equipos de medición y material gráfico de consulta.



En la revisión de metodología utilizadas en la experimentación y estudio sobre nuevos sistemas de captación de luz natural, se obtienen las siguientes variables a considerar en el diseño de Sistemas eficientes, así como la predicción en el desempeño de este tipo de dispositivos. Se proporciona a través de esta revisión una idea general para el tratamiento experimental de los Sistemas de Transmisión de Luz Natural (STLN).

De acuerdo con Jeong Tai Tim y Gon Kim, en su artículo “Revisión sobre nuevos desarrollos en sistemas ópticos de luz natural para edificaciones con ambientes interiores saludables”<sup>1</sup>, al hacer la revisión de la literatura existente sobre este tipo de sistemas, se puede resaltar que las variables a considerar en un ducto de captación de luz natural son: la forma del ducto (sección transversal), reflexividad del material con que se recubre el interior, ángulo de inclinación en la captación, ángulo de incidencia del rayo solar, el índice de refracción y especialmente la relación entre diámetro y longitud del ducto. Se demostró que los ductos de luz (llamados en español *lumiductos*) son dispositivos eficientes para introducir luz natural en las edificaciones. Los lumiductos más eficaces son los rectos y cortos, con bajos coeficientes en la relación diámetro-longitud, es decir son más eficientes si tienen mayor diámetro y la menor longitud posibles.

El objetivo de este artículo es la prueba de un sistema óptico de luz natural, en el cual se hacen diversas modificaciones a partir de una amplia selección de variables físicas y ópticas para generar una nueva configuración de un sistema de lumiducto. Entre las nuevas aportaciones que se hacen en las variaciones se encuentran:

- El uso de acrílico que permite una transmitancia del 99%.
- Se implementa en el sistema un dispositivo óptico (una pestaña hecha del mismo material que el ducto) montado dentro del domo que se orienta hacia el sur para capturar los rayos y re-dirigirlos al interior del ducto.
- El diámetro del dispositivo puede ser cambiado según las condiciones, el tubo hecho con película de aluminio está recubierto de un delgado material prismático y transporta la luz natural desde el domo hasta el difusor, a través de múltiples reflexiones especulares.
- El difusor hecho de acrílico se pone al fondo del tubo y será el encargado de liberar la luz en el espacio interior.

**Metodología que utilizaron Jeong Tai y Gon Kim para probar el desempeño del sistema que proponen.** Fue instalado en el centro de un cuarto de prueba de 6.0m de ancho, 6.0m de longitud y 4.0m de altura, localizado en una azotea. El diámetro del ducto de luz utilizado fue de 0.65m y una longitud de 1.32m para obtener una *Relación de Aspecto*, que es el coeficiente de la proporción Longitud/ Diámetro, de 2:1. Las superficies del interior del cuarto de prueba fueron terminadas en paneles de marfil cuya reflectancia es de 68%, piso de azulejo beige reflectancia del 51% y plafón blanco de 87%, las reflectancias fueron medidas con un Espectramagic Minolta. Se llevaron a cabo mediciones en 49 puntos, con una configuración en retícula de 7 x 7 sensores con un intervalo de 0.8m y a una distancia de 0.6 m de los muros. La iluminancia horizontal se realizó a 0.35m del piso. El sensor utilizado para medir niveles de iluminación fue un fotómetro LI-210SA y un adquisidor de datos Agilent modelo HP34970A. Las mediciones ocurrieron en condiciones de cielo despejado y cubierto, de las 9:00 a las 18:00 horas.

Los resultados obtenidos son presentados y las condiciones de cielo fueron verificadas con la Administración Meteorológica de Korea. El promedio de niveles de iluminancia exterior para cielo

<sup>1</sup> Jeong Tai Kim, Gon Kim. Revista: Building and environment. Volumen 45 (2010)/ Páginas 256- 269

cubierto fue de 34, 779 lux (34.77klx) con una escala de 9 de 10 nubes, mientras que para cielo despejado se registraron 79,247 lux (79.24 klx) con una escala de 1.5 de 10 nubes.

La iluminancia horizontal en el interior del cuarto bajo condiciones de cielo cubierto fueron reportadas de 149 lux a las 18:00 horas, de 492 lux a las 13:00 horas y el promedio general de iluminancia en fue de 238 lux. Mientras que bajo condiciones de cielo despejado el nivel máximo iluminancia en el interior fue de 1,548 lux registrado a las 13:00 horas, el nivel más bajo fue de 33lux a las 18:00 horas y el promedio general fue de 510lux. De acuerdo a los Niveles de Iluminación Estándar Koreanos, ambas condiciones de cielo son recomendadas para luz ambiental en áreas destinadas a vivienda.

Otra metodología es propuesta por el Doctor D.J. Carter, investigador de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Liverpool, Reino Unido, en su artículo "Medición y Predicción del desempeño de sistemas pasivos de ductos de luz solar"<sup>2</sup> presenta resultados de laboratorio y mediciones en campo de salida de flujo luminoso y distribución de intensidad luminosa para diferentes configuraciones de lumiductos. Se desarrollan dos estructuras, una para la medición de la intensidad luminosa y otra para el flujo luminoso. Los resultados indican el desempeño cuantitativo y forman la base para métodos numéricos de predicción de desempeño para un amplio rango de configuraciones de sistemas de lumiductos.

En términos generales, de acuerdo con el Dr. Carter, la transmisión de la luz está en función de la reflectancia de la superficie, ángulos de incidencia de la luz que entra y las proporciones del ducto en términos de la relación Longitud/ diámetro (denominado en inglés como aspect ratio). Si el camino que debe recorrer la luz es largo, el número de reflexiones es necesariamente mayor, y las pérdidas de luz dependen en gran medida de la reflectancia del material de la pared del ducto.

El experimentador realiza una modificación al sistema básico, que consiste en realizar un corte en el la parte superior del ducto en un ángulo oblicuo e inclinar el corte hacia el ecuador, los resultados observan que esto tiene como efecto incrementar el flujo de luz en la salida del difusor, el nivel aumenta al doble bajo condiciones de cielo claro y soleado, pero tiene un efecto negativo bajo condiciones de cielo cubierto.

**Desarrollo experimental.** El trabajo examina el flujo luminoso de salida, intensidad luminosa y distribución de iluminancia en un plano para un número de configuraciones de sistemas pasivos de lumiductos, combinando datos de laboratorio y mediciones en campo.

Se diseño una estructura que sostiene sensores a cada 10 grados, tomando como centro la terminación inferior o el difusor del ducto, de tal manera que se pueda obtener la fotometría o curva polar de la distribución de la intensidad luminosa (ver imagen 1). El experimento fue instalado en un cuarto con propósitos de investigación en la Universidad de Liverpool, debido a las restricciones de espacio los dispositivos utilizados fueron de longitudes de 610 y 1220 mm, con inclinaciones en la captación de 0° y 30°.

---

<sup>2</sup> DJ Carter. REVISTA: Lighting Res. Technology. Volúmen 34, 1 (2002)/ Páginas 39- 52

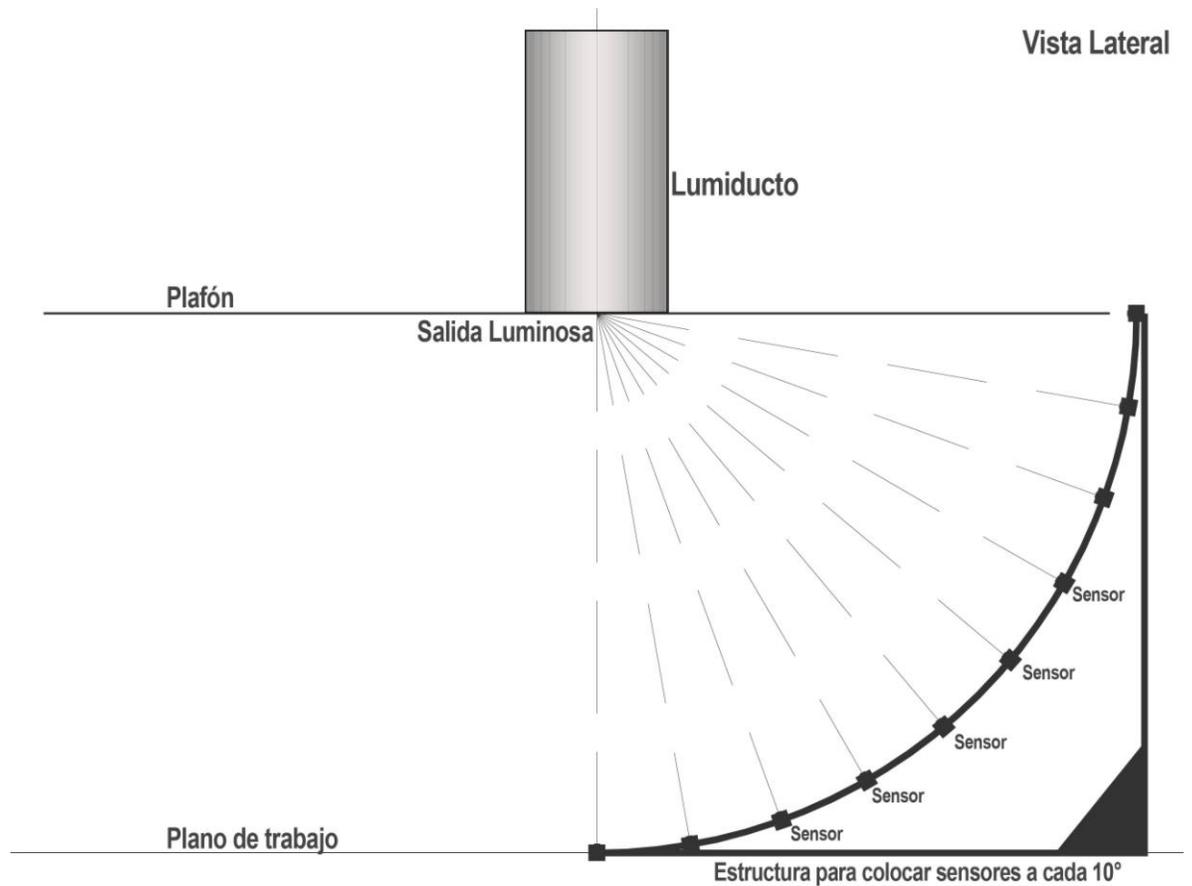


Imagen 1. Estructura creada para medir iluminancia a cada 10° desde 0° hasta 90°

La luz fue medida con sensores recién calibrados, conectados a un adquisidor de datos que registraba simultáneamente iluminancia exterior. El área de estudio fue cubierta para prevenir reflexiones que afectaran la lectura de los fotómetros.

El segundo experimento tiene por objetivo analizar el flujo de salida del lumiducto, para lo cual fue diseñada una caja cúbica de 0.8 m por lado, juntas selladas cubierta en el interior con pintura blanco mate, que hiciera la función de un fotómetro de esfera integradora de Ulbricht o fotómetro integrado, utilizado en laboratorios para determinar el flujo luminoso de diversas fuentes lumínicas (ver imagen 2). Las tapas fueron diseñadas para alojar las tres principales medidas de lumiductos. Un sensor calibrado fue montado en el centro a 20 cm de la base para medir el nivel de iluminación proveniente directamente de la fuente, la caja fue calibrada en laboratorio utilizando lámparas con flujo lumínico conocido. Los ductos utilizados en el techo del cuarto de prueba, a una distancia de 1600 mm sobre el piso y de los siguientes diámetros: 200 mm, 330 mm, 450 mm y 530 mm.

El periodo de medición fue de Septiembre de 1999 a noviembre de 1999, con aparatos alineados al sur ( $C=0^\circ$ ). Para el periodo de diciembre de 1999 los dispositivos se colocaron en una inclinación de  $30^\circ$  (hacia el SSE). Los resultados se obtienen bajo condiciones de cielo predominantemente nublado con iluminancia horizontal exterior que solo en 10% de las mediciones superó los 25000

lux (25 klux). En las conclusiones se muestra que a menor coeficiente longitud/diámetro mayor eficiencia, es decir, a mayor diámetro y menor longitud el coeficiente es más pequeño y por lo tanto aumenta la eficacia del sistema, lo que es evidente, pues a mayor diámetro penetra mayor cantidad de luz y a menor longitud menor número de reflexiones necesarias, lo que evita pérdidas de luz que se quedan en el ducto.

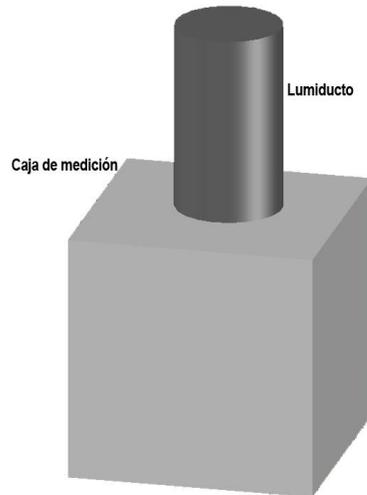


Imagen 2. Salida de lumiducto con Caja de Medición que simula fotómetro de esfera integradora de Ulbricht

Otra metodología de experimentación es la utilizada por C. Baroncini y colaboradores publicada en el artículo "Análisis experimental sobre un modelo escala 1:2 de un lumiducto doble, un dispositivo tecnológico innovador para la transmisión de luz natural"<sup>3</sup> en las pruebas a su diseño de un lumiducto doble en el que un ducto exterior transparente, de policarbonato cubre a un lumiducto común de aluminio forrado tanto en su pared interior como exterior con la película reflectiva para la transmisión de luz por reflexión, generando una columna de luz (ver descripción y diagrama en marco teórico en la sección 1.5). Durante la fase experimental, generan un modelo a escala 1:2 con paredes de madera sin pintar con una reflexión del 50% y techo y piso del 49.1%, estos coeficientes fueron medidos con espectrofotómetro (EF) Minolta, que es un sensor que mide la reflectancia espectral o medición de color<sup>4</sup>. Se usaron fotómetros LSI-BSR001 de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en francés) cuyo rango de medición es de 0 a 25 Klux, se hicieron mediciones en dos momentos y configuraciones diferentes, en el primero se midió en un plano horizontal a 0.40 m respecto del piso, la colocación de doce fotómetros se hizo en forma radial, tomando como centro el centro del lumiducto (ver imagen 3). Mientras que en el segundo momento se midió en el plano vertical, colocando cuatro ejes paralelos al ducto, a la misma distancia y midiendo en tres puntos por cada eje (ver imagen 4). En todo momento se hicieron mediciones de la iluminancia global horizontal externa con fotómetros de la CIE LSI-DPA 503 cuyo rango de medición es de 0 a 100 Klux.

<sup>3</sup> C. Baroncini, et. al. Revista Solar Energy. Número 84 (2010), pp. 296- 307.

<sup>4</sup> <http://www.konicaminolta.com.cn>

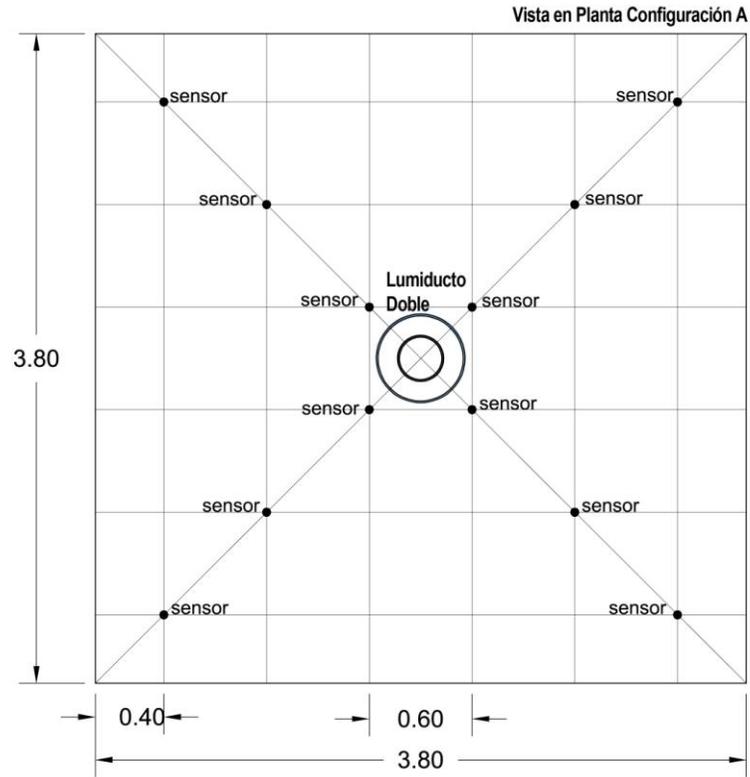


Imagen 3. Configuración A para medir iluminancia horizontal proveniente de un lumiducto doble

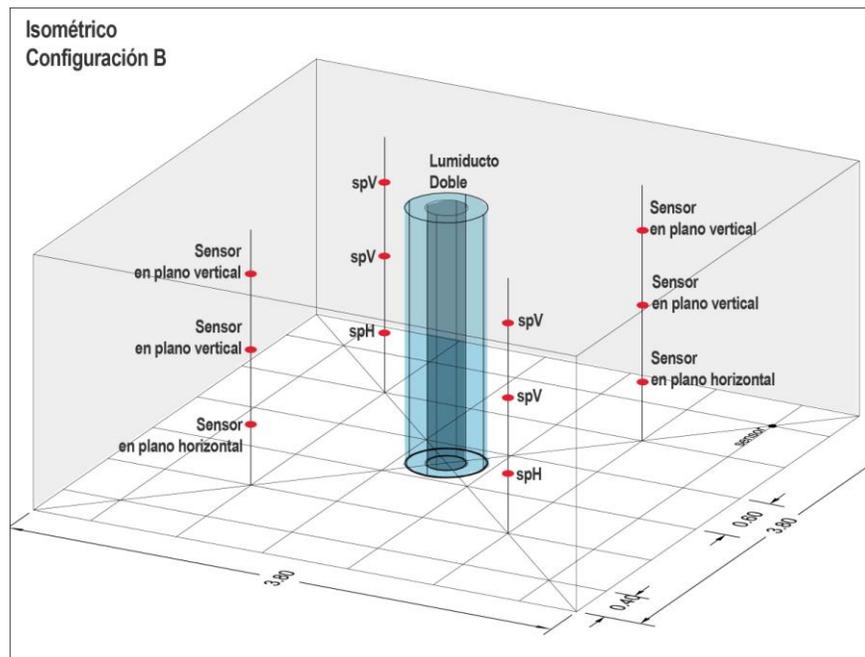


Imagen 4. Configuración B para medir iluminancia horizontal y vertical de lumiducto doble

Los resultados de ambas configuraciones se presentan con la obtención de gráficas que relacionan la iluminancia exterior con la mínima, máxima y promedio de la iluminancia interior, en ellas se muestra que bajo condiciones de cielo cubierto, la iluminancia interior sigue la tendencia de la iluminancia exterior, pero en presencia de radiación solar directa se vuelve demasiado complejo la predicción del comportamiento de la luz tanto en el plano vertical como el en horizontal, puesto que la componente reflectiva de las superficies del cuarto de prueba y del mismo ducto aportan diversos grados de luz de acuerdo a la posición del rayo solar respecto al eje y composición del ducto y de la intensidad de la radiación solar. Se concluye que en promedio existe una diferencia de 60 lux entre la iluminancia interior máxima y mínima, pero que la menor diferencia entre éstas se da cercano al atardecer con 17 luxes, mientras que la mayor diferencia se presenta en el mediodía cuando el sol se encuentra en su punto más alto con 118 lux. A través de imágenes en colores falsos generadas de un cálculo numérico por medio del software Radiance se observa que hay una gran diferencia lumínica entre la parte superior del ducto de luz doble y las demás superficies de la habitación incluido el plano de trabajo, por lo que los autores lo determinan como área con riesgo de deslumbramiento, sugieren que se cubra sólo esta sección del ducto con una película que ayude a disminuir este gran contraste, convirtiéndola en luz difusa.

Así mismo se obtiene la relación de iluminancia, obteniendo el coeficiente de dividir la iluminancia interior entre la iluminancia exterior.

La mejor opción para determinar por completo el rendimiento de un lumiducto es llevar a cabo pruebas durante un año. Tal como hicieron Paroncini, Calcagni y Corvaro, investigadores del Departamento de Energía de la Universidad Politécnica en Ancona Italia, quienes en su experimentación con lumiductos realizaron mediciones de enero del 2005 a junio del 2006, las pruebas fueron llevadas a cabo en un espacio provisional sin ventanas de dimensiones de 2.60 m de longitud, 3.20 m de ancho y 3 m de altura, en su configuración utilizaron un ducto de 0.25m de diámetro por 1 m de longitud con una superficie de reflexión de 99%, al cual le colocaron un domo micro-corrugado y un difusor convexo que tiene por objetivo distribuir la luz de manera uniforme. Los resultados los publican en su artículo "*Monitoring a light pipe*"<sup>5</sup>. Entre los aspectos que deben resaltarse de la metodología es el periodo mencionado en que logran monitorear el sistema, pues no es sencilla la disposición de un espacio para experimentación durante tanto tiempo y el manejo de datos y resultados se torna complicado. Colocan seis sensores con una distribución de dos filas de tres sensores cada una, a una distancia de 2.20 m desde el plafón o techo y a una altura de 0.80 m colocados sobre un tripie, esta altura es comparable con el nivel de plano de trabajo, igual que las metodologías descritas anteriormente se lleva a cabo al mismo tiempo el registro de la iluminancia exterior. Las gráficas obtenidas muestran el promedio horario de datos registrados cada 10 segundos, en un día despejado. El tipo de difusor utilizado favorece la salida lumínica en el sensor colocado en la pared norte, pero no es posible determinar en base al artículo la posición del sol en ese día, puesto que los autores no señalan la posición geográfica del sitio de estudio. Se muestran gráficas con curvas de niveles de iluminancia interior y se registra la iluminancia exterior, se grafica también la relación de iluminancia hora por hora para un día de enero y uno de junio por comparar el invierno y el verano respectivamente. Se presentan gráficas representativas para cada estación del año siempre eligiendo un día despejado, lo que permite observar el desempeño del ducto de acuerdo a las diferentes intensidades de radiación y bajo diferentes ángulos de captación determinadas por la rotación y traslación terrestre.

<sup>5</sup> Revista Solar Energy. Volúmen 81 (2007), pp. 1180-1186.

En este capítulo se presenta el sitio arquitectónico que es objeto de estudio ubicado en el Centro Histórico de la Ciudad de México.

Se presentan imágenes que describen el sitio en tres etapas: perfil urbano, contexto inmediato y espacio a analizar.

Así mismo se presenta la gráfica y el estudio de ángulos para determinar la posición solar.





Imagen 1. Horizonte del Centro Histórico de la Ciudad de México (Miriam García, 2011)



Imagen 2. Ubicación del caso de estudio

El Sitio de estudio se encuentra inserto en el perímetro A del Centro Histórico de la Ciudad de México, con las coordenadas geográficas de latitud  $19^{\circ} 25' 45.85''N$ , longitud  $99^{\circ} 08' 13.20''O$  y a una altitud de 2231msnm. Ubicado entre las calles de República del Salvador y Mesones

Imagen 3. Fachada Principal de Caso de Estudio. Edificio de dos niveles

El uso actual del edificio es de Oficinas, consta de dos niveles y es un inmueble perteneciente al siglo XIX, protegido por el INAH, por lo que cualquier intervención propuesta deberá apegarse a los procedimientos de rehabilitación que establece esta institución.

De acuerdo a la tesis de maestría realizada por la Arq. Cecilia Guadarrama Gándara<sup>1</sup>, quien llevó a cabo estudios



<sup>1</sup> Guadarrama Gándara, Cecilia. Luz natural. Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Posgrado Facultad de Arquitectura. UNAM 2011.

de iluminación natural en el sitio a intervenir, se determina que los niveles obtenidos en el interior de la edificación son menores a 300 lx. La metodología que utilizó para llegar a este resultado fue una comparación entre la exactitud de un modelo a escala y el cálculo por software, se determina que aún cuando la luz no tiene factor escalar, la dimensión de los sensores con los que se llevaron a cabo las mediciones en la maqueta afectan en la determinación de los niveles de iluminación, mientras que en el uso de software es recomendable siempre y cuando los datos de los que parta el cálculo correspondan a la latitud de estudio, al comparar con las mediciones hechas en el sitio en escala 1:1 Cecilia presenta una gráfica con los tres resultados, en donde se aprecia que el cálculo es una curva simétrica y que en ocasiones es muy similar a los datos registrados, pero evidentemente como no toma en cuenta los fenómenos meteorológicos que ocurren en tiempo real, la curva de las mediciones presenta oscilaciones y muestra tendencias, pero no es igual en ningún punto, pues como la arquitecta explica en los primeros capítulos influye el contexto inmediato de la edificación y la nubosidad. Se concluye que el espacio no fue planeado para el uso de oficinas sino habitacional, es a partir de esta afirmación que la presente investigación propone utilizar un lumiducto para incrementar los niveles de iluminación necesarios para el nuevo uso (oficina) a través de luz natural. Con el objetivo de determinar si es posible obtener niveles superiores a 300 lx con la implementación de este sistema se experimenta en el caso de estudio.

Niveles mayores a 300 lx son recomendados por IESNA que es la Sociedad de Ingenieros en Iluminación en América del Norte (ver sección del marco teórico).

Si observamos el perfil urbano en el contexto inmediato del sitio de intervención, vemos que le rodean edificios tres niveles en su mayoría, aún cuando en general se puede hablar de una escala baja la densidad de construcción que existe es un factor determinante que deberá tomarse en cuenta con un análisis minucioso de la trayectoria solar. Sin embargo por tratarse de un Centro Histórico en el que no da lugar a construcciones nuevas, es un espacio con alto potencial para la instalación de lumiductos en la azotea, pues las posibilidades de obstrucciones por futuras edificaciones altas es poco probable. No obstante deberá analizarse el efecto que tiene el predio al ubicarse en una avenida con orientación en el eje Norte- Sur.



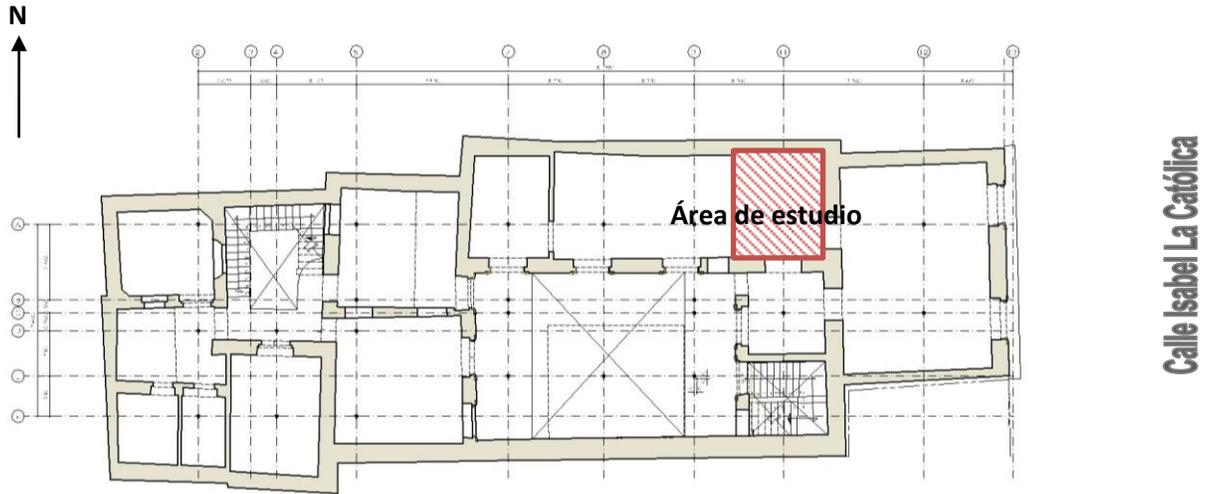
Imagen 4. Contexto de Caso de Estudio

**La casa del Siglo XIX**

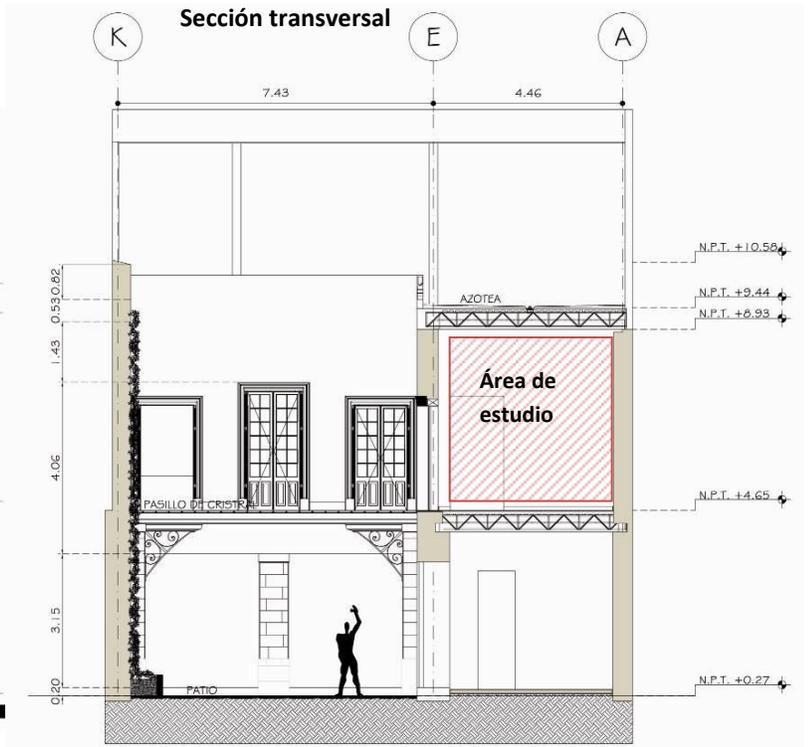
De acuerdo con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), durante el siglo XIX cambian los modos de vida de los habitantes del Centro Histórico, pues en este siglo se construye la zona poniente, influencia por las costumbres norteamericanas y francesas. Describe que las casa residenciales se desarrollaban en dos niveles, comunicadas por una escalera central. En la planta baja se agrupaban los espacios considerados como públicos, como las zonas de estar y los servicios, mientras que en planta alta se disponían las habitaciones. Los espacios ajardinados eran separados del área construida. (González Avellaneda. Et al, INAH)

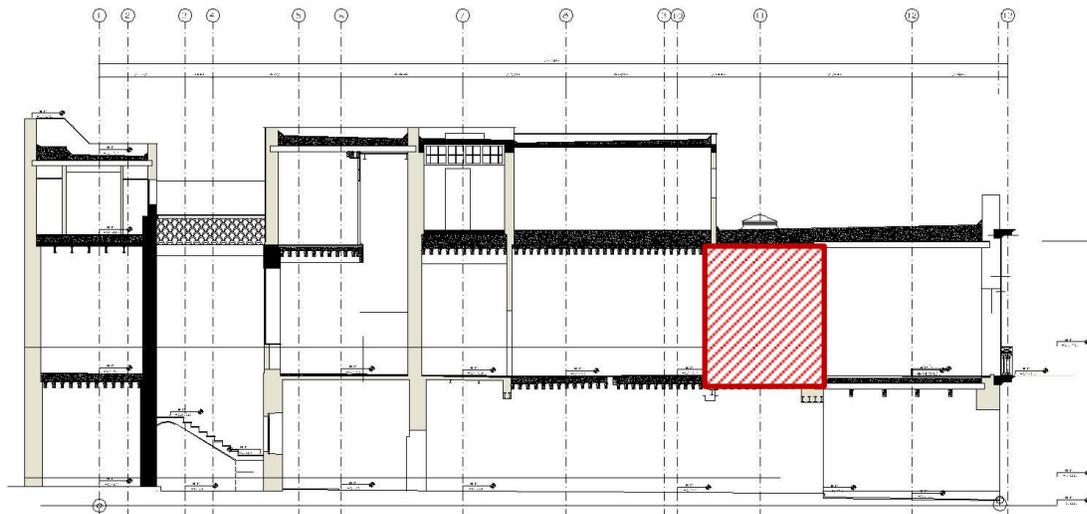
**PLANOS ARQUITECTÓNICOS**

**Planta alta.** En donde se ubica el espacio a intervenir.



**Abajo: Fachada principal sobre calle Isabel la Católica.**





**Corte longitudinal**

El área a intervenir es de 75m<sup>2</sup> en la planta baja, con una altura libre de 3.72m a considerar en el diseño de iluminación natural



**Imagen 5. Vista general de espacio utilizado en experimentación.**

El techo tiene vigas de madera, con entrepiso de cemento, un preparado con arcillas molidas y cal. Las paredes son de materiales pétreos y ladrillo, con aplanado en yeso y pintura blanca. Los pisos tienen acabado en duela.

La principal aportación de luz natural proviene de un domo cuadrado de 1.20m por lado, sobre el que se montó el experimento (ver metodología de trabajo). El inmueble se ha ido modificando a fin de obtener la mayor entrada posible de luz natural, como el desmontaje de parte del entrepiso en un corredor al lado del patio, con lo que se ganó la penetración de luz al lugar de estudio.

## GRÁFICA SOLAR

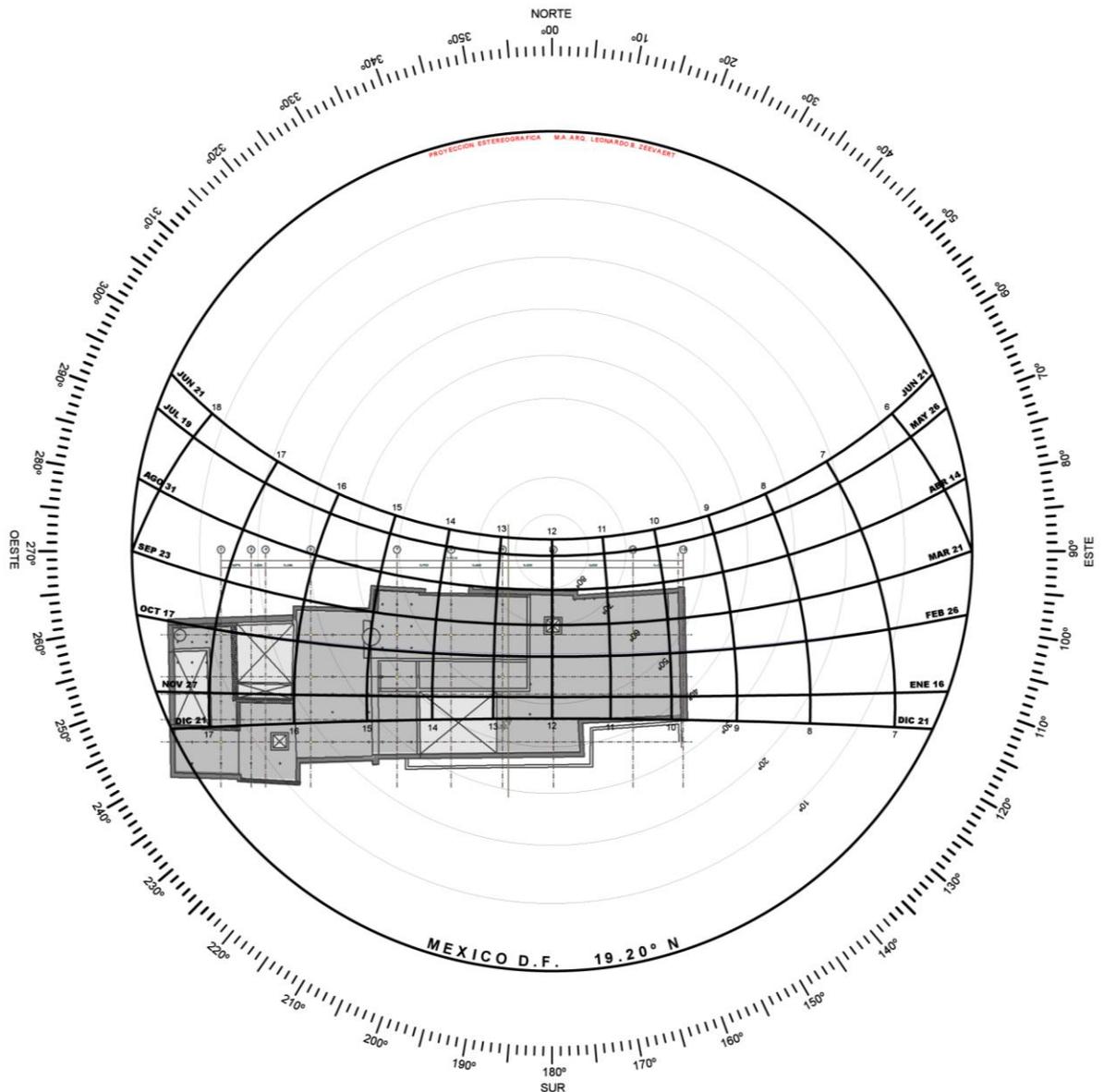


Imagen 6. Gráfica solar para sitio de estudio. Trazo: Mtro. En Arq. Leonardo Zeevaert A.

En la gráfica solar se puede apreciar que en el invierno el espacio de estudio recibirá sombra después de las 2:00 p.m. TSV porque al poniente tiene próximo un edificio de un nivel más. Así mismo se observa que el ducto tiene muchas posibilidades de recibir luz directa en la mayor parte del año.

**Tabla 1. Posición Solar para el 25 de diciembre inicio de la fase experimental**

25 de diciembre de 2011				29 de enero de 2012			
hora local	hora solar	altura solar	azimuth	hora local	hora solar	altura solar	azimuth
07:36	07:00	5.26	63.01	07:49	07:00	7.42	67.95
08:36	08:00	17.39	56.58	08:49	08:00	20.15	61.47
09:36	09:00	28.57	47.89	09:49	09:00	32.03	52.69
10:36	10:00	38.05	35.93	10:49	10:00	42.33	40.26
11:36	11:00	44.71	19.84	11:49	11:00	49.78	22.66
12:36	12:00	47.22	0	12:49	12:00	52.65	0

**Tabla 2. Posición solar 29 de enero fecha de término de la fase experimental**

Durante el periodo de experimentación del 25 de diciembre de 2011 al 29 de enero de 2012, periodo del que se presentan resultados, la altitud solar máxima fue de 52.65 grados sobre el horizonte. Se presentan ángulos de altitud solar y acimut a partir de las 7:00 a.m. en Tiempo Solar Verdadero (TSV) puesto por ser invierno en la latitud de estudio no hay elevación solar arriba del horizonte a las 6:00 a.m. TSV.

Para las otras estaciones del año la elevación solar es la siguiente:

**Tabla 3. Posición solar para la estación de verano en la latitud de estudio**

21 de junio de 2012			
HL	TSV	altura solar	azimuth
08:38	08:00	34.32	105.66
09:38	09:00	47.99	103.8
10:38	10:00	61.74	103.56
11:38	11:00	75.38	108.57
12:38	12:00	86	0

**Tabla 4. Posición solar para las estaciones de primavera y otoño**

21 de marzo y 23 de septiembre de 2012			
hora local	hora solar	altura solar	azimuth
08:43	08:00	28.24	79.77
09:43	09:00	41.97	72.37
10:43	10:00	55	61.02
11:43	11:00	66.05	39.98
12:43	12:00	71.19	0

La posición solar es de gran relevancia pues como se verá en la sección de cálculo el nivel de iluminación en el interior transmitido por un lumiducto estará en función no solo de la iluminancia solar y de las condiciones climáticas, sino también del ángulo de incidencia del rayo solar.

En este capítulo se desarrolla la metodología con la cual se pretende comprobar la hipótesis. Se divide en tres etapas:

1. Mediciones de radiación solar e iluminancia en el sitio de estudio.
2. Cálculos realizados a través de software para determinar el rendimiento de un ducto que transmite luz por reflexión.
3. Fase experimental en tres momentos:
  - a. Mediciones de la transmisión de luz de un tramo de ducto de 1.20m en azotea, comparándolo con otros dos de diferentes acabados.
  - b. Medición de niveles de iluminación sobre plano de trabajo, de luz transmitida a través de diferentes ductos, incluyendo un ducto comercial.
  - c. Medición de niveles de iluminación en el interior de un ducto reflectivo con variación en la longitud 1.20 m y 4.20 m y dos ángulos de captación 0° y 45°

Esta metodología tiene el objetivo de medir el desempeño y viabilidad de los Sistemas de Transmisión de Luz Natural en nuestra latitud, es una propuesta que nace a partir de diferentes metodologías y con aportaciones que surgen en el momento de la experimentación.



## 5.1 MEDICIONES IRRADIANCIA E ILUMINANCIA EN SITIO DE ESTUDIO

El Programa de Maestría y Doctorado de la Facultad de Arquitectura, en su esfuerzo por apoyar las investigaciones que se llevan a cabo, ha adquirido a lo largo de varios años, instrumentos de medición de diversa índole, a solicitud del “Laboratorio de Interacción con el Medio” (LIM) a cargo del Mtro. En Arquitectura Leonardo Zeevaert. Este proyecto surge a través de las asignaturas del campo de conocimiento de Tecnología, en las cuales se busca establecer criterios arquitectónicos que sean acordes con el ambiente en el que se emplaza un proyecto arquitectónico, sin embargo, estos razonamientos deben ser la respuesta a un análisis climático a fondo, el cual deberá estar basado en datos confiables, actualizados y constantes. Bajo este criterio surge el Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio (OLIM).

Desde su concepción, se buscó el apoyo de los profesionales del área climatológica, por lo que se mantiene una relación estrecha con el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica y el proyecto conjunto es la conformación de un Observatorio que trabaje en paralelo con el de Ciudad Universitaria, por lo que se colocaron equipos en la azotea de un edificio de cinco niveles, ubicado en la calle de Isabel la Católica en el Centro Histórico de la Ciudad de México, cuyas coordenadas geográficas son  $19^{\circ} 25' 45.2''$  N y  $99^{\circ} 08' 12.8''$  O con una elevación de 2228 MSNM, la características de esta zona de la Ciudad es la ausencia de árboles y la arquitectura de baja escala a excepción de unos pocos edificios altos, sin embargo, no existen obstrucciones en el horizonte del contexto inmediato lo que beneficia la toma de mediciones.



Imagen 1. Ubicación del Observatorio y del Caso de Estudio en cuadrante A del Centro Histórico de la Ciudad de México

Los parámetros a medir en este observatorio serán:

- Radiación Solar Global
- Radiación Solar Difusa
- Iluminancia Horizontal Global
- Iluminancia Horizontal Difusa
- Iluminancia vertical en los puntos cardinales Oriente, Poniente, Norte y Sur.
- Parametros básicos del clima: Temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación pluvial y presión atmosférica.

**Imagen 2. Vista desde azotea de montaje en Centro Histórico de la Ciudad de México**



Entre la infraestructura con la que cuenta este observatorio se encuentra:

- 3 Piranómetros, de los cuales uno es modelo CMP11 cuyo tiempo de respuesta es de 1.66 segundos, utilizado en estaciones meteorológicas, emite voltajes de 0- 20 mV a prueba de agua, mientras que los dos piranómetros modelo CMP21, son recomendados para investigaciones, respaldados por la norma ISO 9060, con sensor de temperatura, también emiten voltajes de 0- 20mV.<sup>1</sup>



2 piranómetros marca Kipp and Zonen Modelo CMP21 para medición de radiación global horizontal. Los cables se conectan a un canal del Datalogger, de acuerdo a diagrama de conexión, establecido en la programación del datalogger, está compuesto de Línea (rojo, Hi), Neutro (azul, Low) y Tierra física.

<sup>1</sup> [www.kippzonen.com](http://www.kippzonen.com)

- 2 Fotómetros, marca Li-cor, modelo 210SA, para mediciones de iluminación global y difusa, cuya característica es que cuenta con sensor de silicón filtrado cuyo rango de medición es de  $\pm 5\%$  dentro de la curva de CIE (curva fotópica) y  $5\mu\text{s}$  de capacidad de respuesta.<sup>2</sup> De acuerdo a plano de colocación puede medir luz proveniente de la bóveda celeste o reflejada de superficies. Se cuenta con cable adaptador multivoltaje con terminación en Plug para ser compatible con caja de conexión, o se dejan los cables expuestos se puede llevar a cabo conexión a canal de Datalogger Línea(Hi), Neutro (Low) y Tierra física (Ground).



- Estación meteorológica marca VAISALA, modelo WXT520, cuyos registros serán Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$  /  $^{\circ}\text{F}$ ), humedad relativa (%), precipitación pluvial (mm), velocidad del viento (m/s), dirección del viento ( $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ) y presión atmosférica (mmHg / inHg). Se debe verificar que durante montaje el indicador apunte al norte geográfico para obtención correcta de datos. La estación cuenta con tres cables Hi, Low y Ground para Datalogger, también deberá conectarse para recibir energía al mismo Datalogger a 12V.
- Adquisidor de datos (*datalogger*), marca Campbell Scientific, modelo CR1000, de 4MB de memoria, 8 canales dobles o 16 sencillos con posibilidad de extensión de canales a través de Multiplexor.



Es el encargado de recibir los datos provenientes de los instrumentos de medición. Su conexión a computadora es a través de cable con adaptador para comunicación vía USB, el Software que utiliza es PC200W. la alimentación de energía es a través de celda fotovoltaica para no perder datos por fallas en el suministro, haciendo al sistema portátil.

- Batería recargable, marca Campbell, modelo PS100

Panel Solar, Pico de poder 10W, marca BP SOLAR, modelo SX310M, Voltaje 16.8 volts, corriente 0.59

Estos instrumentos fueron montados en la azotea y controlados a través de una Computadora Portátil con Software PC200W. Versión 4.0

Se obtuvieron mediciones del 29 de julio al 5 de agosto de 2011. Se conectaron equipos de medición de radiación e iluminancia global y se obtuvieron datos climáticos en la azotea de un edificio de cinco niveles enfrente del sitio a analizar

<sup>2</sup> [www.licor.com](http://www.licor.com)

Imagen 3. Montaje de equipos de medición en área de estudio



Se realizó el registro de datos con una frecuencia de cada minuto.

## 5.2 CÁLCULOS

El cálculo se realizó en un programa alemán llamado Dialux de libre distribución en internet<sup>3</sup>, en él se modeló el espacio arquitectónico a analizar en la fase experimental, que es un local que en planta tiene 3.14 m de ancho y 3.94 m de longitud. Las paredes son blancas, por lo que en el software se utilizan los colores de las superficies, intentando acercarse al aspecto general del caso de estudio. Las paredes y techo se colocaron de color blanco con un porcentaje de reflexión y el piso la textura de duela de madera color café con un porcentaje de reflexión de 26%.

El plano de trabajo se ubicó a 0.75 m respecto del nivel de piso. Y se insertó una trama de cálculo sobre el mismo nivel, con puntos de medición a cada 65 cm. Se pidió en las características del software que se mostraran los puntos y sus valores después de llevar a cabo el cálculo.

Se insertó el archivo con extensión .ies para la luminaria de simulación de solatube, la cual se obtuvo de la página del proveedor del sistema comercial<sup>4</sup>.

Se generaron imágenes en perspectivas, en las cuales se muestra la colocación de la luminaria y su fotometría, y la imagen en colores falsos para mostrar de manera gráfica los niveles de iluminación.

## 5.3 FASE EXPERIMENTAL PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE UN STLN

La fase experimental fue dividida en tres etapas, lo que permitió evaluar de manera integral un Sistema adquirido por la UNAM que se distribuye de manera comercial en nuestro país. Los datos obtenidos provienen de dos fuentes principales:

<sup>3</sup> [www.dial.de](http://www.dial.de)

<sup>4</sup> <http://www.solabrite.com/technical.asp>

- a) Los equipos descritos en la sección anterior que conforman el Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio (OLIM) del Posgrado de la Facultad de Arquitectura instalados en la azotea de un edificio de cinco niveles ubicado frente al sitio analizado y;
- b) Equipos montados en el edificio del caso de estudio.

Del Observatorio se tomarán datos de Radiación Global Horizontal, Iluminancia Global Horizontal e Iluminancia Difusa Horizontal para el periodo a analizar del 25 de diciembre de 2011 al 2 de febrero de 2012, lo que representa el periodo de invierno para la latitud de estudio.



La iluminancia difusa se tomó con un fotómetro sombreado por un arillo diseñado por el LIM, mientras que la iluminancia global de un fotómetro LI-COR 210 colocado al mismo nivel que el sensor de iluminancia difusa. La radiación Global fue registrada con Piranómetros Kipp and Zonen CMP-21.

El cálculo del amanecer, atardecer y mediodía solar se consultaron de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NOAA)<sup>5</sup>, el tipo de cielo o clima se obtuvo de fichas que se solicitaron al Servicio Meteorológico Nacional. Estos datos son cotejados con los registros obtenidos en la experimentación.

- En el caso de estudio, se montaron equipos para medición de Iluminancia, los aparatos se colocaron de la siguiente manera:

<sup>5</sup> <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>

Consultado el día 6 de mayo de 2012

## ETAPA EXPERIMENTAL

### Fase 1 Comparación de ductos



En esta etapa se forraron tramos de sonotubo de 60 cm de diámetro con diferentes películas reflectivas y uno con blanco, para evaluar el comportamiento de la luz a través de tubos de diferentes acabados y poder compararlo con Solatube. Se colocaron en la azotea del segundo nivel.

Se colocó un fotómetro a nivel de piso en la azotea y en el interior de cada ducto.

### Fase 2 Montaje de Ductos en Losa de 1er Nivel



Se fueron instalando en losa de primer nivel cada ducto con diferentes películas.

Se colocó una retícula de sensores a nivel de plano de trabajo bajo salida lumínica de ducto, a fin de conocer el comportamiento de la luz en el espacio arquitectónico, su distribución espacial y niveles de iluminación, a través de diferentes materiales reflectantes.

### Fase 3 Solatube



Finalmente se montó Solatube en el mismo espacio analizado, para obtener mediciones bajo diferentes condiciones de cielo.

Se probó con dos diferentes materiales para el domo de captación, con dos ángulos diferentes de captación y con dos longitudes de transporte, así como el sistema comercial completo con una longitud de 1.20 m.

En el periodo comprendido del 25 de diciembre al 3 de febrero, se obtuvieron los siguientes días de medición con los experimentos correspondientes:

DÍA	EXPERIMENTO
<b>FASE 1</b>	
<b>25 y 26 dic 2012</b>	Comparación de ductos de 1.2m en azotea
<b>FASE 2</b>	
<b>1 enero 2012</b>	Sonotubo forrado con cartulina Couche color blanco
<b>2 enero 2012</b>	Sonotubo forrado con cartulina Couche color blanco
<b>3 enero 2012</b>	Sonotubo forrado con cartulina Couche color blanco hasta las 14:00 hrs
<b>4 enero 2012</b>	Ducto de sistema Solatube de 1.20 m de longitud
<b>8 enero 2012</b>	Sonotubo forrado con Foil brillante auto-adherible
<b>9 enero 2012</b>	Sonotubo forrado con Foil brillante auto-adherible
<b>29 enero 2012</b>	Sonotubo forrado con película "Chrome Mirror de Avery" de 1mm
<b>31 enero 2012</b>	Sonotubo forrado con "Chrome Mirror de Avery" de 1mm
<b>1 febrero 2012</b>	Sonotubo forrado con "Chrome Mirror de Avery" de 1mm
<b>2 febrero 2012</b>	Sonotubo forrado con "Chrome Mirror de Avery" de 1mm
<b>FASE 3</b>	
<b>11 enero 2012</b>	Ducto de Solatube de 1.20 m con Difusor del sistema
<b>17 de enero 2012</b>	Ducto Solatube de 1.20 m de longitud con Domo y difusor
<b>19 enero 2012</b>	Ducto Solatube de 4.20 m de longitud
<b>21 enero 2012</b>	Ducto Solatube de 4.20 m de longitud, con codo de Captación a 45 grados de inclinación. Datos de Zenit y Atardecer.
<b>24 enero 2012</b>	Ducto Solatube de 4.20 m de longitud, con codo de Captación a 45 grados de inclinación. Datos de atardecer
<b>25 enero 2012</b>	Ducto Solatube de 4.20 m de longitud, con codo de Captación a 45 grados de inclinación. Datos de Amanecer y Zenit.
<b>27 enero 2012</b>	Ducto Solatube de 4.20 m de longitud, con codo de Captación a 45 grados de inclinación. Amanecer, Zenit y tarde hasta las 4:00 p.m.

## DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE FASE 1



Se forraron dos tramos de sonotubo de longitud de 1.20 m, un tramos con cartulina color Couche blanco. El otro tramo con película Foil brillante auto adherible, con el objetivo de tener superficies con las cuales comparara el sistema comercial, el blanco representa a las superficies que los arquitectos utilizan en los tragaluces. El Foil es una superficie reflectiva, que intenta buscar una solución hecha en obra, a manera del sistema comercial.

Se colocó un fotómetro LI-COR 210 a nivel de piso en la azotea del segundo piso del edificio-estudio. Este fotómetro se denominó de referencia, para conocer la cantidad de luz disponible que llega al edificio.

Se colocó también un fotómetro en el interior de cada ducto de 1.20 m de longitud, colocados también en la azotea. Se obtuvieron datos de mediciones el 25 y 26 de diciembre de 2011.

En la fase uno de la experimentación, el objetivo fue conocer y comprender cómo se comporta la luz en el interior del ducto comercial de 60 cm de diámetro, por lo que se estudió en un tramo de 1.20 m de longitud que se consideró como base o punto de partida para su análisis. Se compara con otros dos de diferentes acabados y con ello diferentes factores de reflexión.

## DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE LA FASE 2 DE EXPERIMENTACIÓN

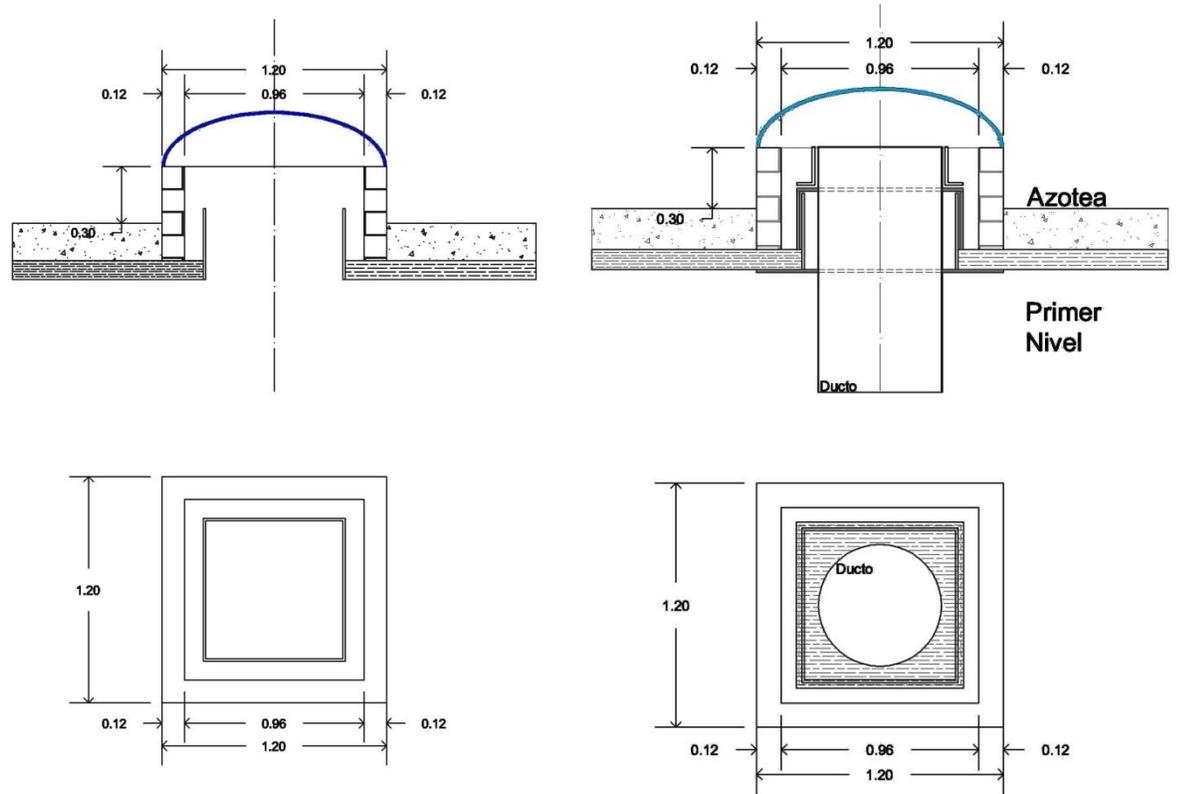


Se llevó a cabo la instalación de los ductos en un domo de manera que la luz fuera transportada de la azotea del primer nivel al interior del espacio debajo de la azotea. La longitud de todos los ductos probados fue de 1.20 m y de diámetro de 55 cm para el sistema comercial y de 60 cm para el sonotubo con diferentes acabados. Se colocó un arreglo de fotómetros al centro del espacio a estudiar, con una distancia de 0.60 m entre ellos, con el objetivo de conocer el comportamiento de la luz una vez que es transportada por reflexión a través de las diferentes superficies.

Para llevar a cabo la comparación entre diferentes días de medición, se obtendrá en porcentaje, representando el 100% de luz natural disponible al fotómetro del Observatorio, que se encuentra

en la azotea de un quinto piso en el edificio de enfrente. El fotómetro de referencia obtendrá un porcentaje menor por encontrarse metros más abajo que el del observatorio. Finalmente se obtendrá una relación del porcentaje de luz que llega a cada sensor colocado en cada ducto.

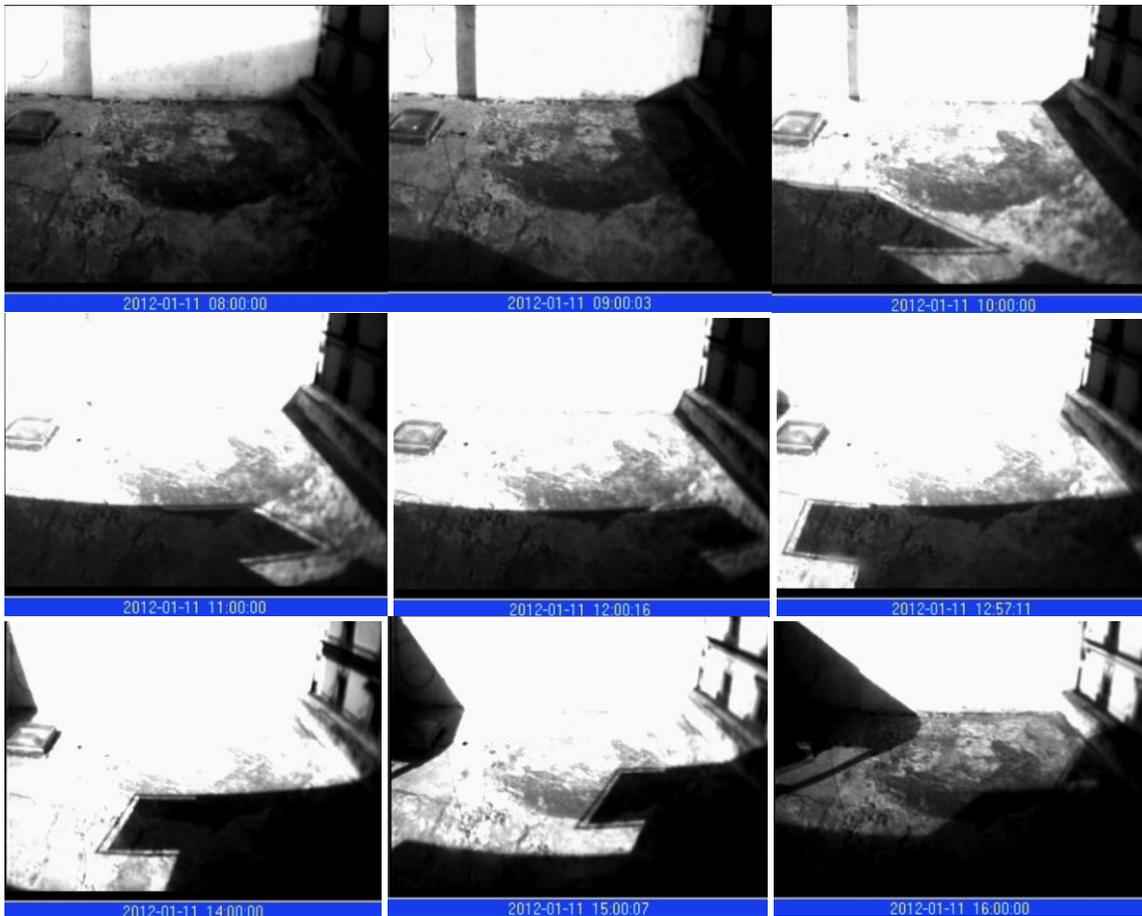
En el espacio a analizar existe un domo, sin embargo por sus dimensiones y forma no permitía hacer mediciones y compararlo con el Solatube de manera directa, por lo que se hicieron algunos ajustes para que se instalaran los diferentes ductos.



En la imagen de la izquierda se dan las dimensiones del domo en su estado original, mientras que a la derecha se detalla el montaje de los ductos para cerrar el domo y dejar únicamente el área necesaria para la comparación con Solatube de diámetro de 55 cm. El ducto blanco representará la cantidad de luz que entra a un espacio a través de un hueco de 60 cm de diámetro, para después evaluar el desempeño de un ducto de mayor brillantez como es el Foil, y finalmente probar dos superficies altamente reflejantes como son la película Avery Mirror Cromm de 1mm y Solatube.



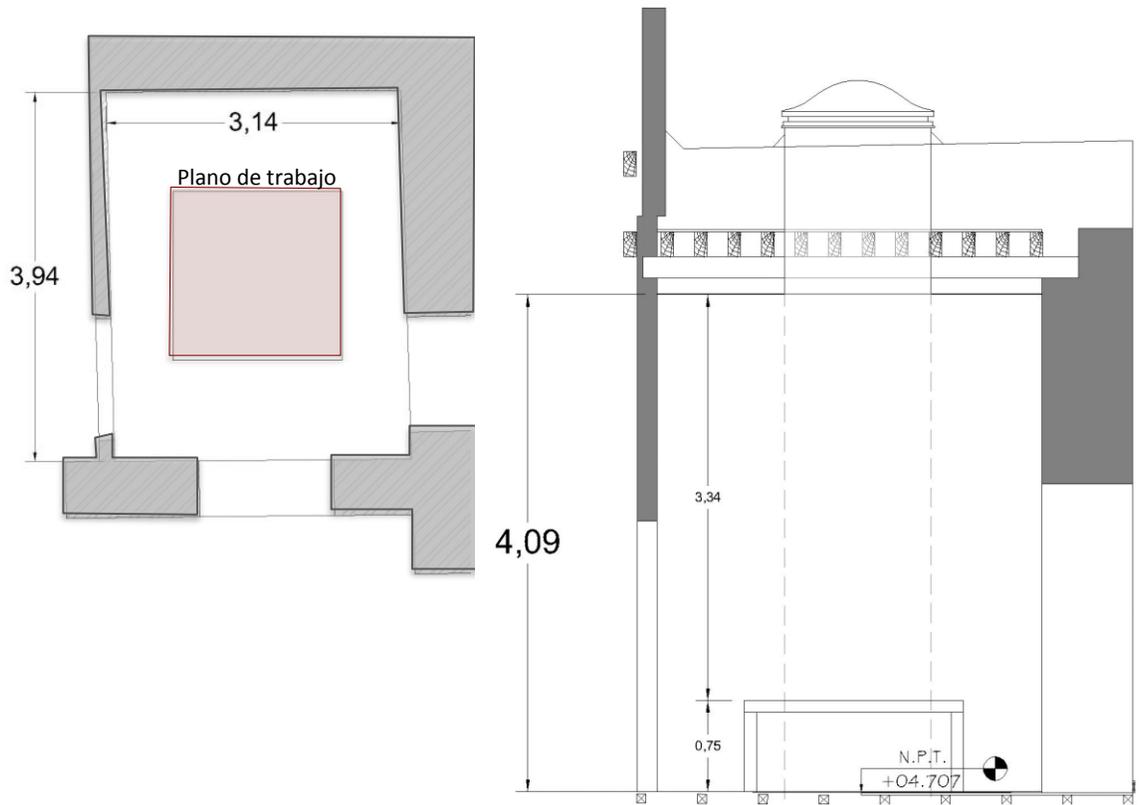
Imagen 4. Azotea de caso de estudio



En la imagen 4 se muestra una vista general de la azotea y del domo en el que se hizo la intervención para colocar los diferentes ductos, en ella se puede observar la configuración del contexto.

Se colocó una cámara de video para observar la proyección de sombras del contexto, se resalta que se recibirá luz directa entre las 10:00 a.m. y las 14:00 de la hora local, fuera de ese rango de tiempo el domo se encuentra en sombra, por lo que recibirá luz sólo de la componente difusa y reflejada, pero no tendrá aportación de la componente directa.

Se instalaron los ductos en diferentes días por lo que primero se genera una gráfica de la irradiancia e iluminancia medidas en el Observatorio, se compara con la iluminancia medida en la azotea del caso de estudio. Esta información se compara con la que fue proporcionada por el SMN para determinar si es día nublado, despejado o parcialmente nublado.



**Imagen 5 Dimensiones en planta y corte del espacio de experimentación.**

**DESCRIPCIÓN DE ARREGLO DE FOTÓMETROS**

Se colocó una retícula de sensores, con una separación de 0.60 cm, que se colocaron sobre una mesa de altura de 0.75 m a partir del nivel de piso terminado. Durante la experimentación se hicieron diversos ajustes que fueron necesarios debido a un falso que presentaron algunos de los fotómetros, por lo que tuvieron que ser remplazados en las diversas pruebas, así como también los cambios generados por la misma dinámica de la experimentación por el número de fotómetros con que se contaba. La distribución de los fotómetros en las diversas pruebas es:

COORDENADAS DE FOTÓMETROS 1 ENERO			
Fotómetro 4 (0.69, 2.88)	Fotómetro 7 (1.29, 2.88)	Fotómetro 8 (1.89, 2.88)	Fotómetro 10 (2.49, 2.88)
Fotómetro 11 (0.69, 2.28)	Fotómetro 24 (1.29, 2.28)	Fotómetro 13 (1.89, 2.28)	Fotómetro 15 (2.49, 2.28)
Fotómetro 16 (0.69, 1.68)	Fotómetro 17 (1.29, 1.68)	Fotómetro 18 (1.89, 1.68)	Fotómetro 19 (2.49, 1.68)
Fotómetro 20 (0.69, 1.08)	Fotómetro 21 (1.29, 1.08)	Fotómetro 22 (1.89, 1.08)	Fotómetro 23 (2.49, 1.08)

COORDENADAS DE FOTÓMETROS 12 ENERO			
Fotómetro 4 (0.69, 2.88)	Fotómetro 7 (1.29, 2.88)	Fotómetro 8 (1.89, 2.88)	Fotómetro 10 (2.49, 2.88)
Fotómetro 6 (0.69, 2.28)	Fotómetro 24 (1.29, 2.28)	Fotómetro 13 (1.89, 2.28)	Fotómetro 15 (2.49, 2.28)
Fotómetro 16 (0.69, 1.68)	Fotómetro 17 (1.29, 1.68)	Fotómetro 18 (1.89, 1.68)	Fotómetro 19 (2.49, 1.68)
Fotómetro 20 (0.69, 1.08)	Fotómetro 21 (1.29, 1.08)	Fotómetro 22 (1.89, 1.08)	Fotómetro 9 (2.49, 1.08)

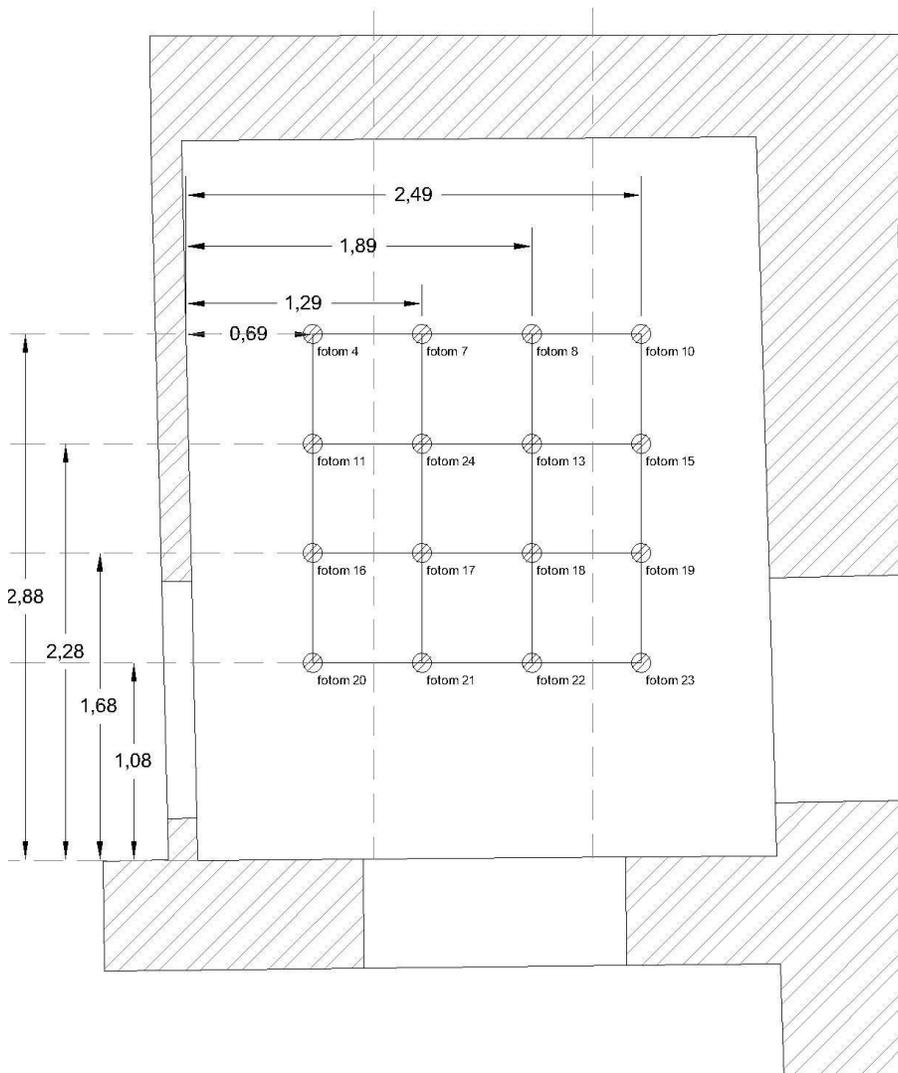


COORDENADAS DE FOTÓMETROS 2 ENERO			
Fotómetro 4 (0.69, 2.88)	Fotómetro 7 (1.29, 2.88)	Fotómetro 8 (1.89, 2.88)	Fotómetro 10 (2.49, 2.88)
Fotómetro 6 (0.69, 2.28)	Fotómetro 24 (1.29, 2.28)	Fotómetro 13 (1.89, 2.28)	Fotómetro 15 (2.49, 2.28)
Fotómetro 16 (0.69, 1.68)	Fotómetro 17 (1.29, 1.68)	Fotómetro 18 (1.89, 1.68)	Fotómetro 19 (2.49, 1.68)
Fotómetro 20 (0.69, 1.08)	Fotómetro 21 (1.29, 1.08)	Fotómetro 22 (1.89, 1.08)	Fotómetro 23 (2.49, 1.08)

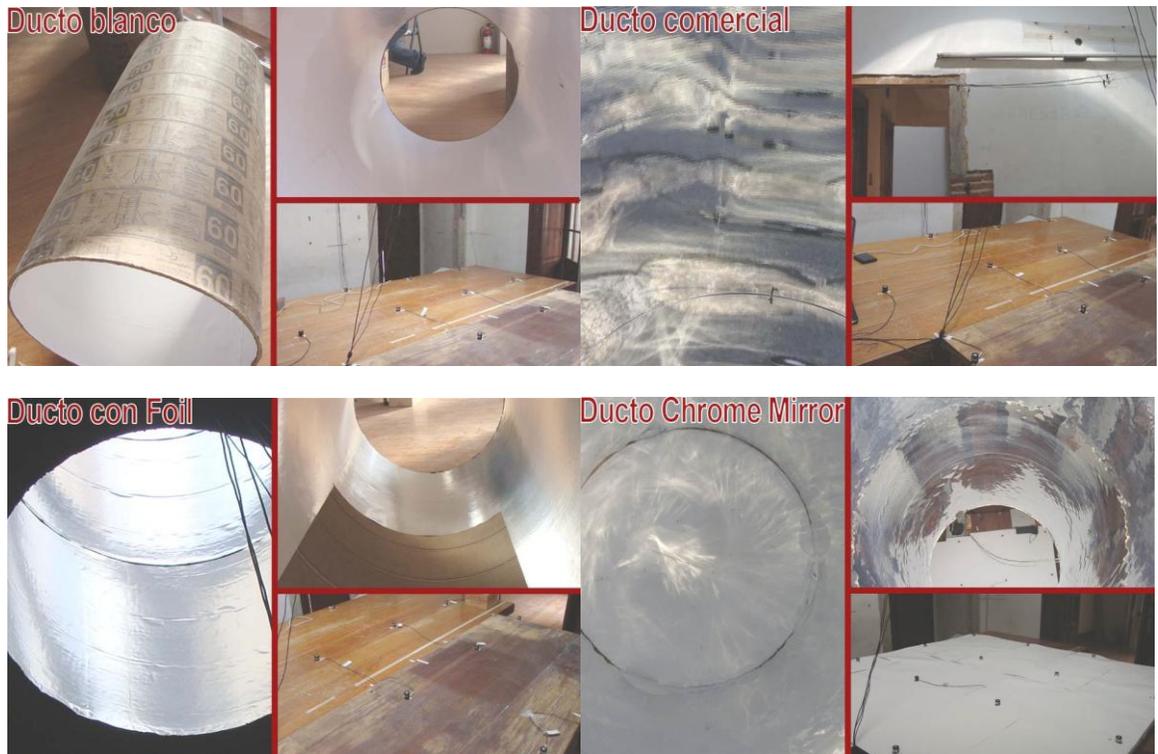
### Arreglo de fotómetros.

Se realizan gráficas de distribución lumínica a nivel de plano de trabajo.

Imagen 6. Colocación de fotómetros en el espacio arquitectónico estudiado



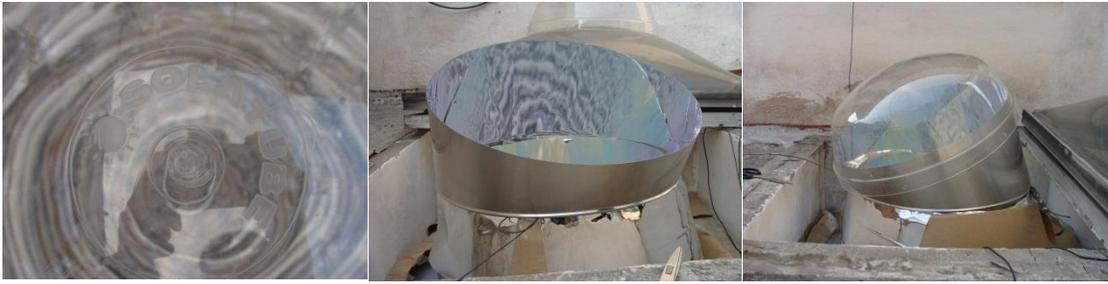
En la fase 2 se colocaron en diferentes días cuatro ductos con diferente acabado. Primero el ducto blanco, después el ducto comercial, posteriormente el ducto con Foil y finalmente el ducto de acabado con película Chrome mirror.



### DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE FASE EXPERIMENTAL 3



Primero en esta fase se utilizó solamente el ducto del sistema comercial, pues se dejó el domo utilizado comúnmente y con el que se probaron los demás ductos. Posteriormente para comprender de manera más particular el funcionamiento del domo, del difusor fueron colocados paulatinamente, primero el difuso y después el domo, obteniendo mediciones en diferentes días para su análisis. Finalmente para apreciar la manera en que funciona cuando se incrementa la longitud, así como la manipulación en el área de captación inclinándola  $45^\circ$  al sur geográfico, por considerar que estos sistemas tienen un mejor desempeño con la luz directa, por lo que en nuestra latitud de estudio podría beneficiar que los rayos de sol sean redirigidos al inclinar el domo de captación



Los resultados en esta etapa de experimentación son diversos y se cuenta con varios recursos para su análisis, como videos en azotea para determinar las horas de luz directa, sombras producidas por el contexto, etc. Imágenes HDR de distribución lumínica al interior y mediciones en azotea, en el interior del ducto y debajo del difusor.

Para la obtención de gráficas más precisas, se colocó un fotómetro en la azotea, al que se ha llamado de referencia, para conocer niveles de iluminación disponible, un fotómetro en el interior del ducto para conocer su desempeño y un fotómetro debajo del difusor del sistema.

Se indica el mediodía para conocer el momento en el que el sol estuvo en el punto más alto de su recorrido en cada día de registro.

También se mantuvo el arreglo de fotómetros en retícula con 0.60m de separación entre sensores, colocados sobre el plano de trabajo, de cuyos datos se obtienen gráficas de distribución lumínica.

## PROCESAMIENTO DE DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Se presentan primero las gráficas de los datos registrados en las mediciones, para generar gráficas en Excel y gráficas de distribución lumínica en el software Surfer versión 8.0. Se generan tablas en las que se hace la relación entre la iluminancia global medida en la azotea del Observatorio del Laboratorio de Interacción con el medio (OLIM) y la azotea del Caso de Estudio (CE), siendo el 100% la del OLIM debido a que se encuentra 3 niveles arriba de la azotea CE, esta relación sólo es como medida de validación de datos, pero al realizarse la relación en porcentaje entre la iluminancia sobre el plano de trabajo y la iluminancia de la azotea CE, se considera el 100% la azotea CE y se discriminan los valores del OLIM debido a que se considera que es importante tener como referencia la luz disponible en la azotea del caso de estudio y ya no la medida en OLIM.

**GENERACIÓN DE IMÁGENES HDR.** Una herramienta utilizada para observar la distribución de la luz con el ducto blanco, es la generada a través de una imagen HDR en colores falsos, creada a través de fotografías con diferente ISO en un breve periodo de tiempo, cuidando que no existieran variaciones de luz importantes durante la toma y se procesaron en el software Photosphere. En las imágenes HDR se observa la distribución lumínica en el plano de trabajo y en las superficies del espacio arquitectónico estudiado, únicamente para ver cuestiones de uniformidad.

Finalmente se procesan los datos obteniendo los promedios en cada hora entre las 7 y las 18:00 horas y se obtienen máximos, mínimos y promedios. Se realizan gráficas en Excel, esto con el fin de facilitar la lectura de los resultados y hacer las comparaciones correspondientes.

Como se mencionó en la metodología, el observatorio montado en Centro Histórico de la Ciudad de México, pretende monitorear el clima, irradiación e iluminación para contar con una base de datos, con el objetivo de conocer a fondo la disponibilidad de luz natural en el sitio de estudio, aquí se analizan los resultados en diferentes meses del año.

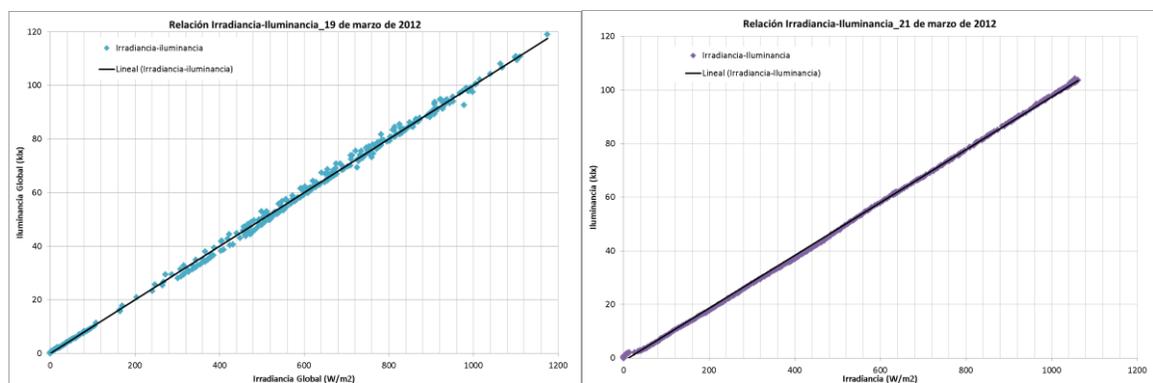
Con el objetivo de conocer el recurso solar en área de estudio, se presentan gráficas y datos que resumen la irradiancia e iluminancia horizontal. Se enfatiza la irradiancia e iluminancia máxima en diferentes épocas del año en la medida en que los datos estuvieron disponibles, en algunos casos se cuenta con mediciones de irradiancia e iluminancia difusa, lo que permite que se comprenda de manera más integral los componentes de la luz natural.



Para evaluar las gráficas que a continuación se presentan y comprender de manera general la diferencia en cada mes presentado, es necesario recordar que la constante solar, que es flujo de radiación solar que llega al tope de la atmósfera y que nos sirve para determinar la energía que incide perpendicularmente en  $1\text{m}^2$  la frontera exterior de la atmósfera, es de  $1,353\text{ W/m}^2$ , la cual tiene una variación de  $\pm 3\%$  debido al recorrido de la tierra en una órbita elíptica alrededor del sol.<sup>1</sup> Así mismo como se explicó en la sección 1.3 del marco teórico la constante de iluminación solar fuera de la atmósfera es de 128 Klx. La variación y atenuación de estos dos valores estará afectada principalmente por las condiciones atmosféricas del sitio y por la posición del sol.

Quizá lo primero que se debe observar en un gráfica en donde se presentan la irradiancia e iluminancia, en donde el eje de las abscisas es el tiempo (hora local) y en las ordenadas los valores registrados durante la medición, es que de manera general ambas tienen el mismo comportamiento, es decir si la irradiancia aumenta la iluminancia también lo hace, así mismo si la irradiancia decrece la iluminancia se verá disminuida también, esto es debido a que de luz visible es una porción del espectro electromagnético de la radiación solar la cual abarca un rango más amplio de longitud de onda, pues como se vio en el marco teórico la radiación solar incluye radiación ultravioleta e infrarroja, sin embargo de manera más puntual los valores de ambas quedan establecidos por las condiciones climatológicas del sitio, especialmente la nubosidad determina la distribución lumínica.

Si se grafica la iluminancia en función de la irradiancia, se puede ver la relación que guardan en días despejados, pues es una función lineal y tienen clara una línea como tendencia, sin embargo cuando son días nublados, no se puede establecer una relación lógica como la anterior. Para ejemplificar gráficamente este fenómeno, se tomaron los días 19 y 21 de marzo, de los cuales se darán más datos al final de esta sección, estos días fueron elegidos porque se tienen mediciones de iluminancia difusa. Se consideró el 19 como parcialmente nublado y el 21 como día despejado.

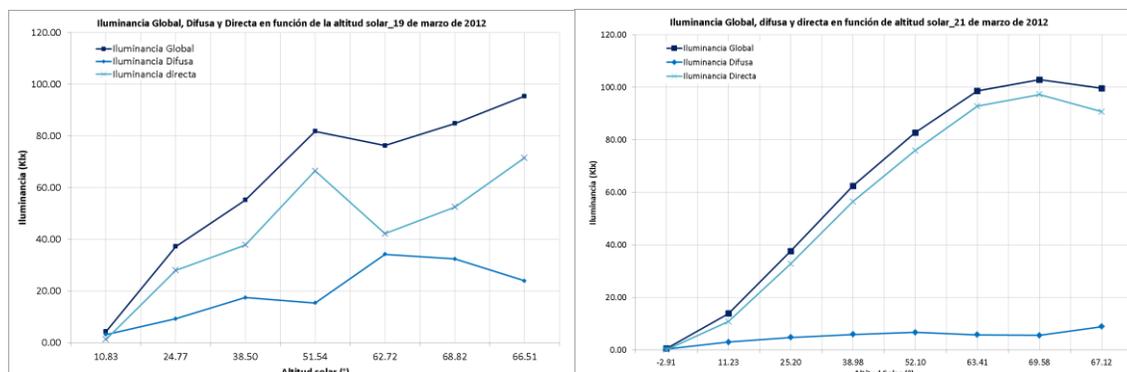


**Gráfica 1. Relación irradiancia iluminancia día parcialmente nublado.**

**Gráfica 2. Relación irradiancia- iluminancia día despejado.**

<sup>1</sup> Sánchez Maza, Miguel Ángel (coordinador). Energía solar fotovoltaica. Editorial Limusa. México 2008, pp. 16 y 17.

Otra manera de establecer cómo la iluminancia queda determinada por las condiciones climatológicas es la siguiente, se relaciona la iluminancia con la altitud solar, para el día despejado la iluminancia difusa tiene una aportación menor aportación y se observan menos variaciones, mientras que en el día parcialmente nublado aumenta la iluminancia difusa.



Gráfica 3. Relación de la iluminancia con la altitud solar, 19 de marzo de 2012 parcialmente nublado.

Gráfica 4. Relación de iluminancia con altitud solar 21 de marzo de 2012 día despejado.

Tabla 1. Valores promedio de iluminancia e irradiancia 19 y 21 de marzo de 2012.

	19 de marzo							21 de marzo						
	altura solar	Irradiancia		Iluminancia			Relación de cielo	altura solar	Irradiancia		Iluminancia			Relación de cielo
		Global	Difusa	Global	Difusa	Directa			Global	Difusa	Global	Difusa	Directa	
06:00	-3.31	1.27	1.05	0.25	0.21	0.04	0.83	-2.91	4.30	1.97	0.55	0.44	0.12	0.46
07:00	10.83	41.94	30.47	4.28	3.07	1.21	0.73	11.23	158.54	22.62	13.90	3.04	10.87	0.14
08:00	24.77	388.46	82.87	37.17	9.18	27.99	0.21	25.20	403.29	39.02	37.66	4.82	32.84	0.10
09:00	38.50	554.91	164.10	55.18	17.40	37.77	0.30	38.98	647.12	48.42	62.50	5.99	56.51	0.07
10:00	51.54	823.92	136.56	81.82	15.30	66.52	0.17	52.10	850.44	53.46	82.75	6.77	75.98	0.06
11:00	62.72	749.98	327.19	76.30	34.17	42.14	0.44	63.41	1,009.98	48.85	98.64	5.81	92.83	0.05
12:00	68.82	839.42	300.90	84.84	32.41	52.44	0.36	69.58	1,056.00	49.18	102.90	5.60	97.30	0.05
13:00	66.51	943.12	208.38	95.39	23.87	71.52	0.22	67.12	1,005.72	78.44	99.66	8.93	90.72	0.08
14:00	57.19	849.55	153.46	86.15	18.93	67.22	0.18	57.57	866.68	103.81	86.12	11.38	74.74	0.12
15:00	44.79	594.16	210.39	61.64	23.30	38.34	0.35	45.04	705.46	92.47	70.42	10.32	60.09	0.13
16:00	31.32	608.19	188.82	62.18	20.69	41.49	0.31	31.49	497.21	72.79	49.71	7.93	41.78	0.15
17:00	17.43	269.66	99.81	26.87	10.77	16.10	0.37	17.56	255.29	50.57	24.79	5.58	19.22	0.20
18:00	10.43	31.17	17.70	3.32	2.08	1.25	0.57	10.55	42.24	16.35	4.16	1.95	2.21	0.39

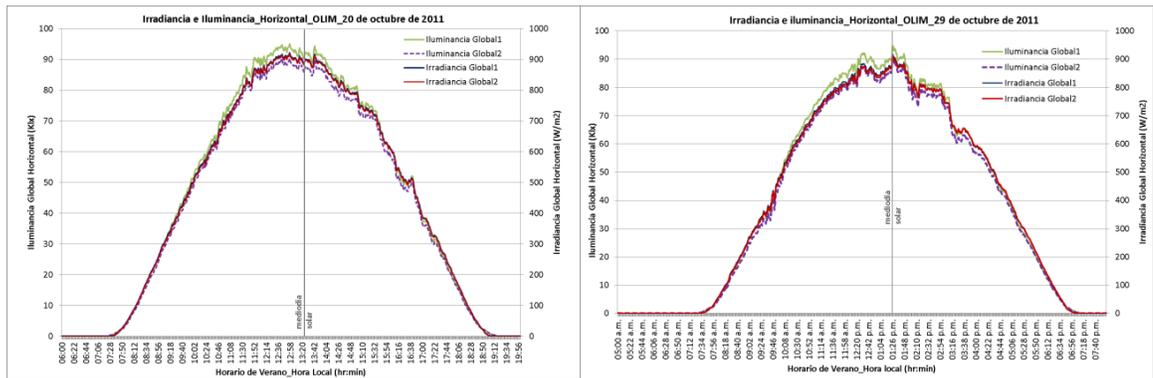
Para la tabla uno, los valores de radiación directa se obtuvieron de calcular la diferencia de las mediciones de radiación global y la radiación difusa, y la relación de cielo como se recordará de la sección 1.3 del marco teórico, es la relación que establece la Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norte América (IESNA) para determinar el tipo de cielo despejado, parcialmente nublado o nublado, obtenido de dividir la irradiancia difusa entre la irradiancia global. Su escala establece que si el coeficiente es menor o igual a tres se considera despejado, si se encuentra entre 0.4 y 0.7 se considerará parcialmente nublado y si el coeficiente es mayor o igual a 0.8 es día nublado, estos valores nunca excederán a uno.

De ahí que en las gráficas siguientes se considerarán días nublados o parcialmente nublados aquellos que presentan variaciones de irradiancia e iluminancia en tiempos relativamente cortos, es decir, se parecían oscilaciones en los valores.

Finalmente lo que se espera es que la irradiancia sea mayor para los meses de marzo y abril, que es la estación de primavera en la latitud de estudio, puesto que a pesar de que el verano podría tener mayor radiación solar, el clima del valle de México en sus normales climatológicas ha presentado lluvias de verano, por lo que los días son nublados. El invierno ocurre del 21 de diciembre al 21 de marzo, por lo que la irradiancia deberá reflejar una disminución y las horas con presencia de luz solar son menos que en otras épocas del año siendo el 21 de diciembre el día más corto del año como se puede apreciar en la gráfica solar realizada para el caso de estudio en la sección 4, es en este periodo en donde el recurso solar es limitado, se lleva a cabo la fase experimental para analizar el desempeño de Sistemas de Transmisión de Luz Natural.

**6.1 Primer periodo de mediciones de Iluminancia e Irradiancia Globales. Octubre- Noviembre de 2011. Otoño**

**Octubre de 2011.**



**Gráfica 5. Datos de irradiancia e iluminancia global horizontal el 20 de octubre de 2012**

**Gráfica 6. Datos de irradiancia e iluminancia para el 29 de octubre de 2012.**

En México el horario de verano aplica del primer domingo de abril al último sábado del mes de octubre, por lo que los datos presentados para el mes de octubre en la hora local tienen el horario de verano, el motivo de presentar los datos en el horario local se debe a que la aplicación de Sistemas de Transmisión de Luz Natural es para el uso de oficinas, por lo que se evaluará el recurso en horas laborales en que pueda generarse un ahorro eléctrico.

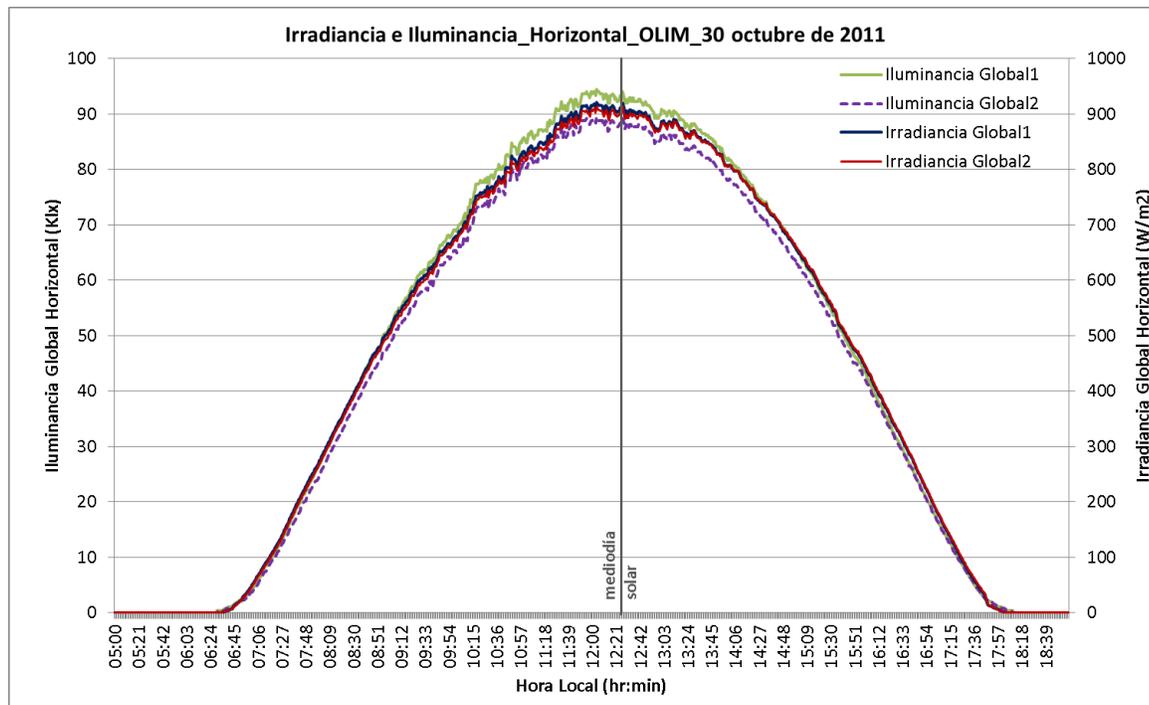
Como se observa en las gráficas 1 y 2 los días de octubre presentados fueron mayormente despejados, se observa la simetría de la curva respecto del mediodía solar, que para ese periodo tiene una diferencia de una hora veinte minutos con la hora local. La irradiancia global supera ligeramente los 900 W/m<sup>2</sup> y la iluminancia global en el sitio de estudio es superior a los 90 Klx para esa época del año, lo que significa que si la estrategia de iluminación propuesta es diseñada

correctamente, los niveles de iluminación en el interior serán suficientes para llevar a cabo actividades visuales apropiadas sin necesidad del uso de energía eléctrica durante varias horas.

### 30 de octubre de 2011.

Se selecciono el 30 de octubre de 2011 porque es el día más despejado de esta primera serie de datos. Este día cambia de horario de verano a horario de invierno en la latitud de estudio, por lo que el amanecer ocurre a las 6:34 de la hora local y se tiene presencia de luz solar hasta las 18:03. Los datos del cálculo de amanecer y atardecer se toman del Servicio de Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NOAA)<sup>2</sup>hg de los Estados Unidos.

La irradiancia global máxima para ese día es de 921 W/m<sup>2</sup> y la iluminancia global máxima de 94.4 Klx.



Gráfica 7. Irradiancia e Iluminancia globales para el 30 de octubre de 2011.

<sup>2</sup> <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>

Consultado el día 6 de mayo de 2012

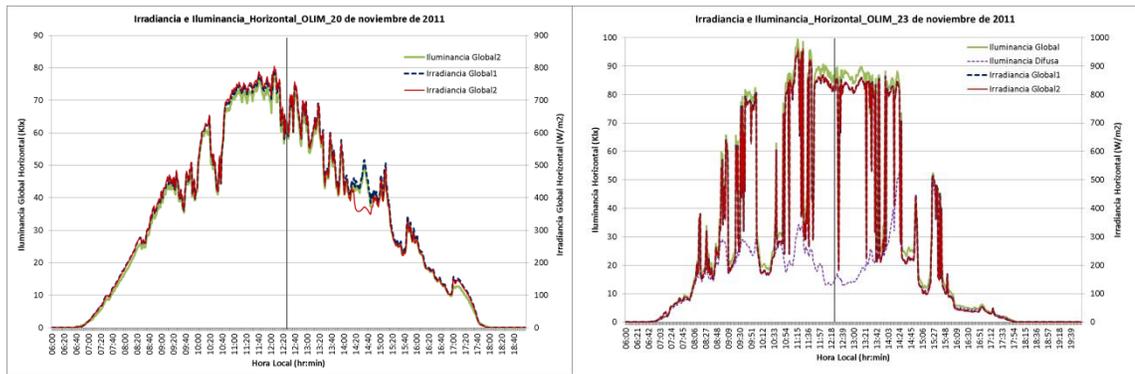
Tabla 2. Hora de amanecer y atardecer calculada y registrada el 30 de octubre de 2011.

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL (SIN Horario de verano)	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	06:34	06:13
Hora de amanecer según cálculo	06:36	06:15
Hora de atardecer según mediciones	18:03	17:42
Hora de atardecer según cálculo	18:04	17:43
Mediodía solar	12:20:10	12:00
Total Horas de Iluminación y radiación:	11:29	

Tabla 3. Valores máximos de irradiancia e iluminancia medidos en caso de estudio

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	VALOR MÁXIMO REGISTRADO	HORA LOCAL (SIN Horario de verano)	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Irradiancia Global Piranómetro 1 (W/m <sup>2</sup> )	921	12:04	11:43
Irradiancia Global Piranómetro 2 (W/m <sup>2</sup> )	914	12:04	11:43
Iluminancia Global Fotómetro 1 (Klx)	94.4	12:04	11:43
Iluminancia Global Fotómetro 2 (Klx)	89.5	12:04	11:43

Noviembre de 2011



Gráfica 8. Irradiancia e iluminancia del 20 de noviembre de 2011. Día parcialmente nublado

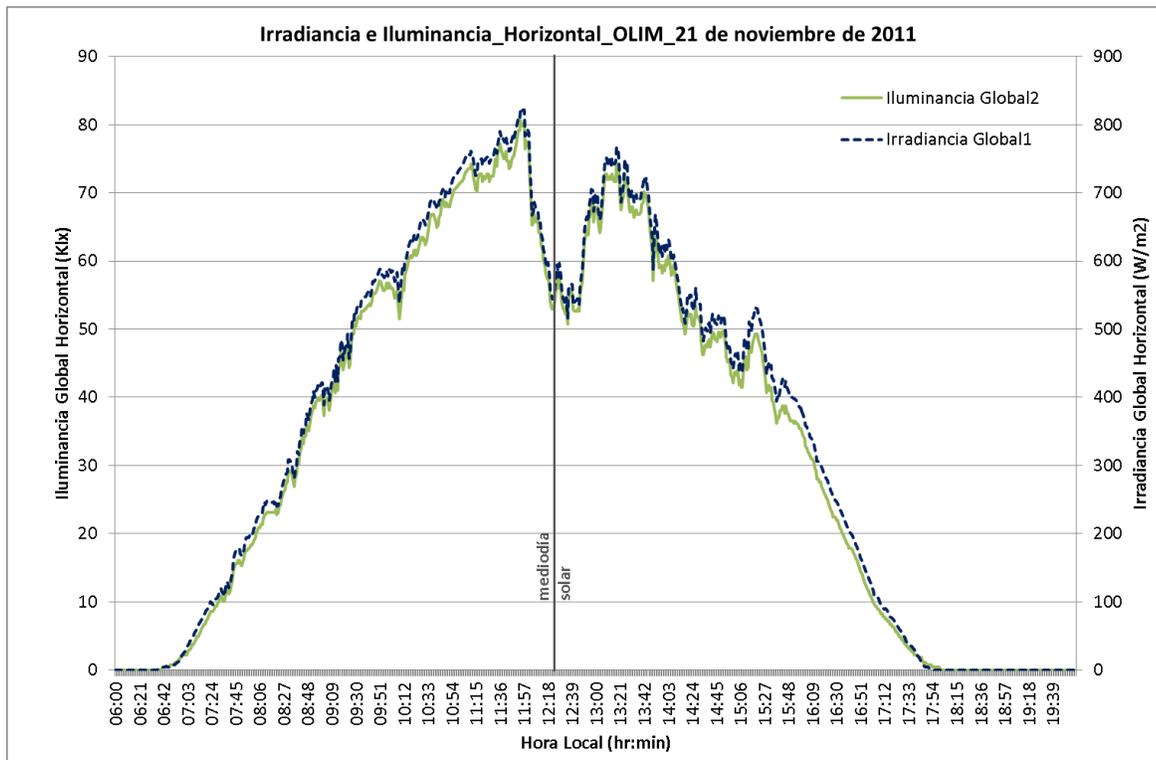
Gráfica 9. Irradiancia e iluminancia del 23 de noviembre de 2011. Día nublado.

Se tomaron días cercanos al 21 de cada mes para tener un periodo de evaluación constante, como frecuentemente se representa en las gráficas solares, sin embargo se cuenta con una base de datos del 18 de octubre de 2011 al 26 de abril de 2012 con registro cada minuto.

Para el 20 de noviembre la irradiancia máxima fue de 805 W/m<sup>2</sup> y la iluminancia máxima registrada en el mismo instante fue de 78.35 Klx, contrastada con el 23 de noviembre cuya

irradiancia máxima fue de  $961 \text{ W/m}^2$  e iluminancia máxima de  $98.5 \text{ Klx}$ . La altitud solar máxima para el 20 de noviembre fue de  $50.85^\circ$  y para el 23 de noviembre fue de  $50.2^\circ$ , por lo que los días intermedios entre estos dos se encontrarán entre estos valores tendiendo a  $50.2^\circ$  ya que como se recordará el sol tiene ángulos de altitud solar más bajos conforme se acerca al solsticio de invierno el 21 de diciembre. El mediodía solar estará ocurriendo 22 minutos después del mediodía en la hora local para ese periodo analizado.

A partir del 23 de noviembre el Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio cuenta con mediciones de iluminancia difusa, lo que permitirá un punto más de comparación y determinación entre días nublados y despejados, ya que en días nublados la componente difusa de la iluminancia tiene mayor aportación que en días despejados.



**Gráfica 10. Irradiancia e iluminancia global para el 21 de noviembre de 2011.**

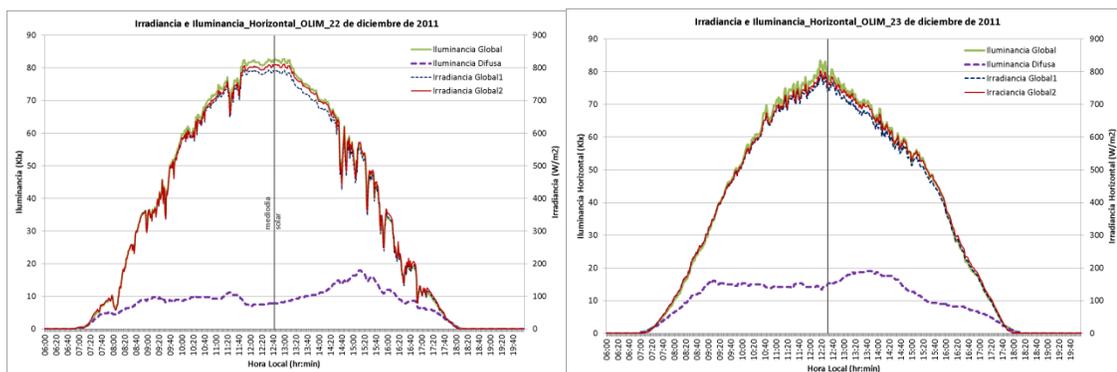
En la gráfica seis ocurre que en las horas cercanas al mediodía solar decrece de manera drástica la irradiancia y la iluminancia, en días despejados se registra la irradiancia y la iluminancia máxima cercano al momento en que el sol se encuentra en el punto más alto, se consideran estos días de noviembre como parcialmente nublados.

Para el 21 de noviembre la irradiancia solar global máxima fue de  $821 \text{ W/m}^2$  a las 11:54 de la hora local (11:31 TSV) y en el mismo momento la iluminancia global fue de  $80.6 \text{ klx}$ . La máxima altitud solar al mediodía solar para el 21 de noviembre fue de  $50.63^\circ$ .

Tabla 4. Número de horas de luz solar en sitio de estudio para el mes de noviembre de 2011

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	06:41	06:18
Hora de amanecer según cálculo	06:48	06:25
Hora de atardecer según mediciones	17:54	17:31
Hora de atardecer según cálculo	17:57	17:34
Mediodía solar	12:22:23	12:00
<b>Total Horas de Iluminación y radiación medidas:</b>	<b>11:13</b>	

6.2 Segundo periodo de Mediciones Diciembre de 2011 a Febrero de 2012. Invierno  
 Diciembre 2011. Solsticio de Invierno.

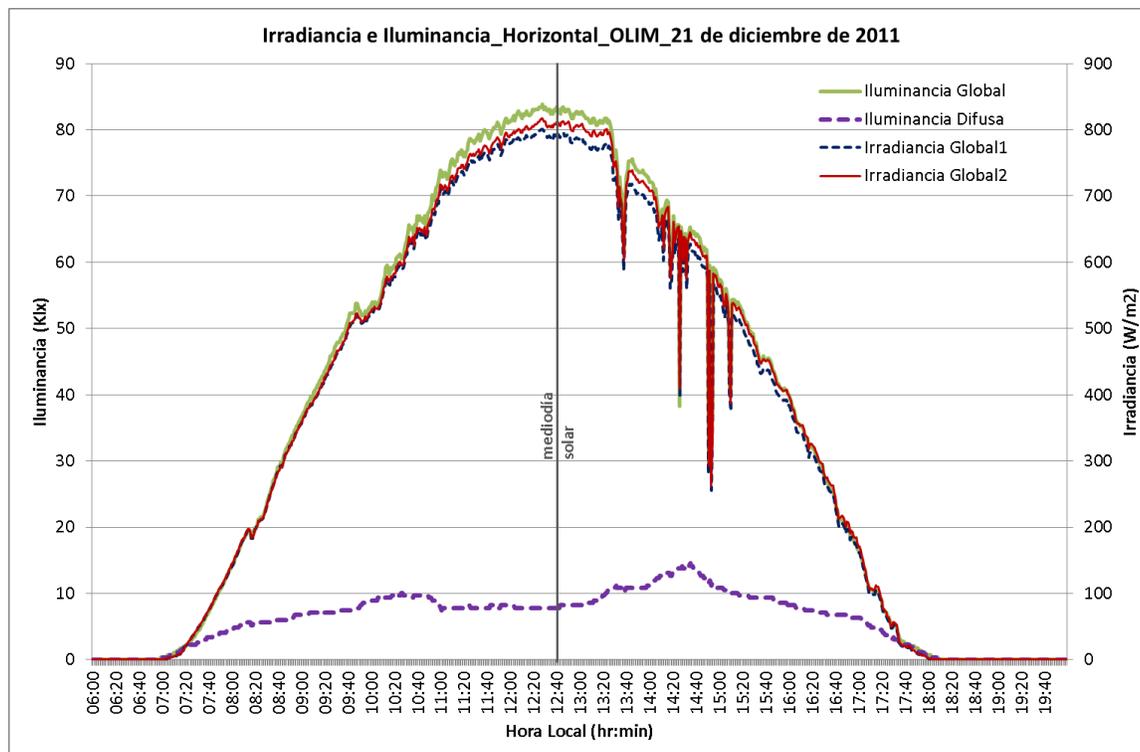


Gráfica 11. Irradiancia Global e iluminancia global y Difusa, 22 de diciembre de 2011.

Gráfica 12. Irradiancia Global e iluminancia global y Difusa, 23 de diciembre de 2011

En los días cercanos al solsticio de invierno, se puede observar puntualmente lo que se dijo anteriormente, en que las condiciones climatológicas determinan los valores de irradiancia e iluminancia, puesto que para el 22 de diciembre la irradiancia máxima fue de  $807 \text{ W/m}^2$  y la iluminancia registrada en ese mismo instante fue de  $82.4 \text{ klx}$ , mientras que el 23 de diciembre la irradiancia máxima fue de  $803 \text{ W/m}^2$  y la iluminancia de  $83.4 \text{ klx}$ , es decir se obtuvieron  $1,000 \text{ lux}$  más con  $4 \text{ W/m}^2$  menos el 23 de diciembre en relación con el 22 de diciembre, y en la gráfica 12 se puede apreciar que en el medio día solar tuvo mayor presencia de nubes, tanto por la oscilación como por el incremento de la iluminancia difusa.

La altitud solar máxima en el mediodía solar para el 22 de diciembre fue de  $47.15^\circ$  y para el 23 de diciembre fue de  $47.15^\circ$ . En invierno la altura solar es menor que en el resto del año. El mediodía solar ocurre alrededor de las 12:35 para este periodo presentado de mediciones.



Gráfica 13. Irradiancia e Iluminancia para el solsticio de invierno en latitud de estudio.

Tabla 5. Número de horas de luz solar en el solsticio de invierno 21 de diciembre de 2012.

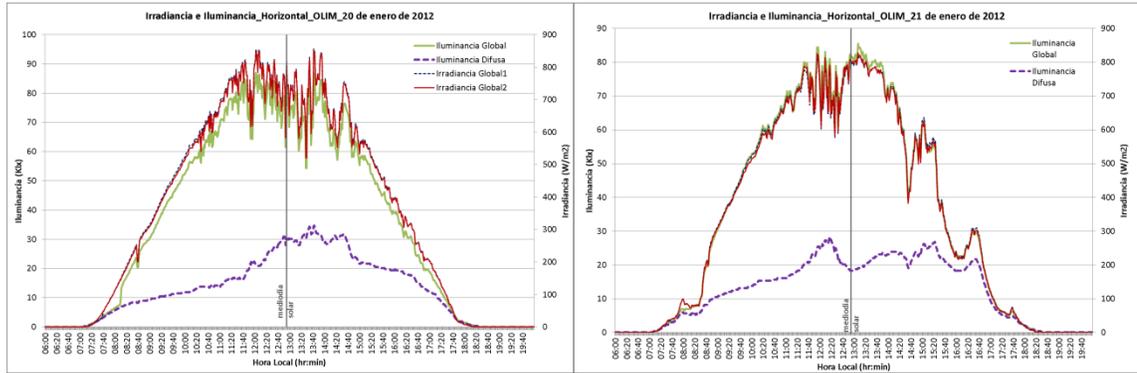
MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	07:01	06:26
Hora de amanecer según cálculo	07:06	06:31
Hora de atardecer según mediciones	18:03	17:28
Hora de atardecer según cálculo	18:03	17:28
Mediodía solar	12:34:37	12:00
Total Horas de Iluminación y radiación medidas:	11:02	

Tabla 6. Irradiancia e iluminancia máximas 21 de diciembre de 2012.

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	VALOR MÁXIMO REGISTRADO	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Irradiancia Global1 (W/m <sup>2</sup> )	801	12:28	11:53
Irradiancia Global2 (W/m <sup>2</sup> )	817	12:28	11:53
Iluminancia Global (Klx)	83.8	12:28	11:53
Iluminancia Difusa (Klx)	14.55	14:35	14:00

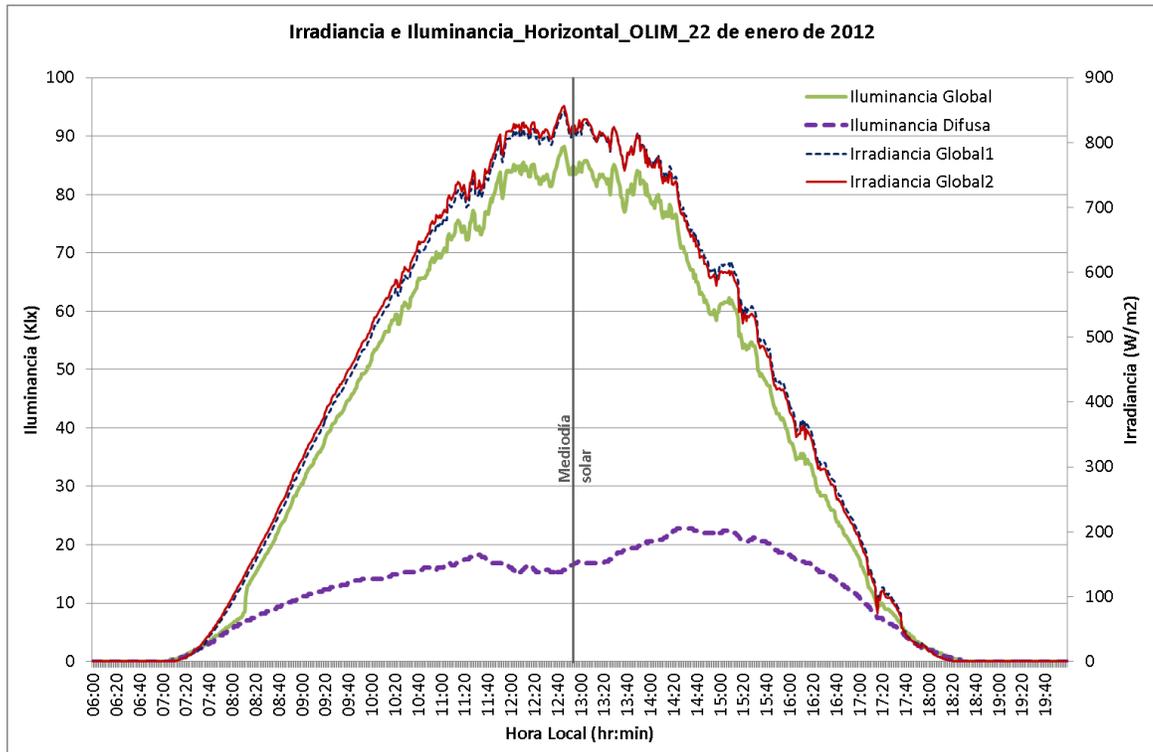
Altura solar máxima para el 21 de diciembre de 2011 al mediodía solar: 47.15°

ENERO DE 2012



En el mes de enero en los días entre el 20 y el 22 la iluminancia máxima es alrededor de los 850 W/m<sup>2</sup>, y la iluminancia se encuentra entre los 85.5 Klx y los 86.9 Klx. La altitud solar aumenta a los 50.5° en el mediodía solar.

Los días presentados son parcialmente nublados especialmente en el mediodía solar y por la tarde. El mediodía solar ocurre alrededor de las 12:47 p.m. Se selecciona el 22 de enero por se un día más despejado que el 20 y 21.



Gráfica 14. Irradiancia e iluminancia global y difusa para el 22 de enero de 2012.

Altura solar máxima para el 22 de enero de 2012 al mediodía solar: 50.91°

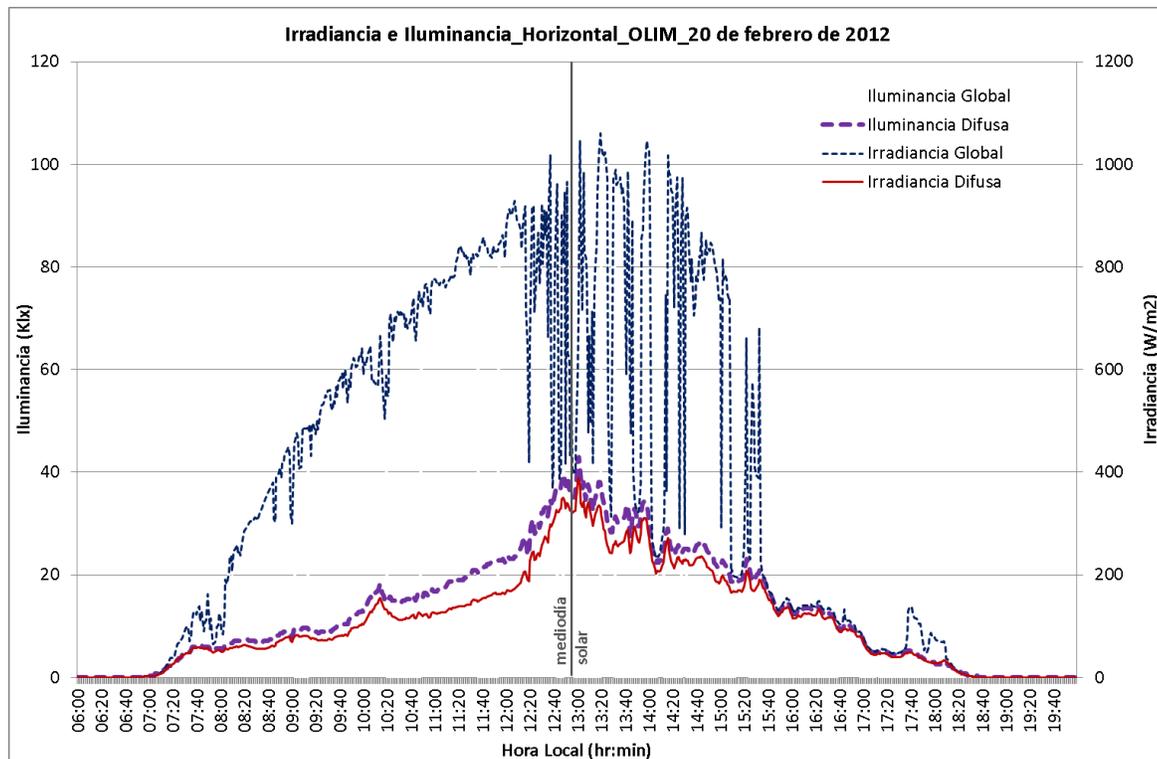
Tabla 7. Horas de luz solar para el 22 de enero de 2012.

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	07:11	06:22
Hora de amanecer según cálculo	07:13	06:24
Hora de atardecer según mediciones	18:21	17:32
Hora de atardecer según cálculo	18:23	17:34
Mediodía solar	12:48:04	12:00
Total Horas de Iluminación y radiación me	11:10	

Tabla 8. Irradiancia e Iluminancia máximas 22 de enero de 2012.

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	VALOR MÁXIMO REGISTRADO	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Irradiancia Global1 (W/m <sup>2</sup> )	848	12:46	11:57
Irradiancia Global2 (W/m <sup>2</sup> )	856	12:46	11:57
Iluminancia Global (Klx)	88.2	12:46	11:57
Iluminancia Difusa (Klx)	22.76	14:23	13:34

## FEBRERO DE 2012



Gráfica 15. Irradiancia e iluminancia globales y difusas 20 de febrero de 2012.

Tabla 9. Horas de luz solar para el 20 de febrero de 2012.

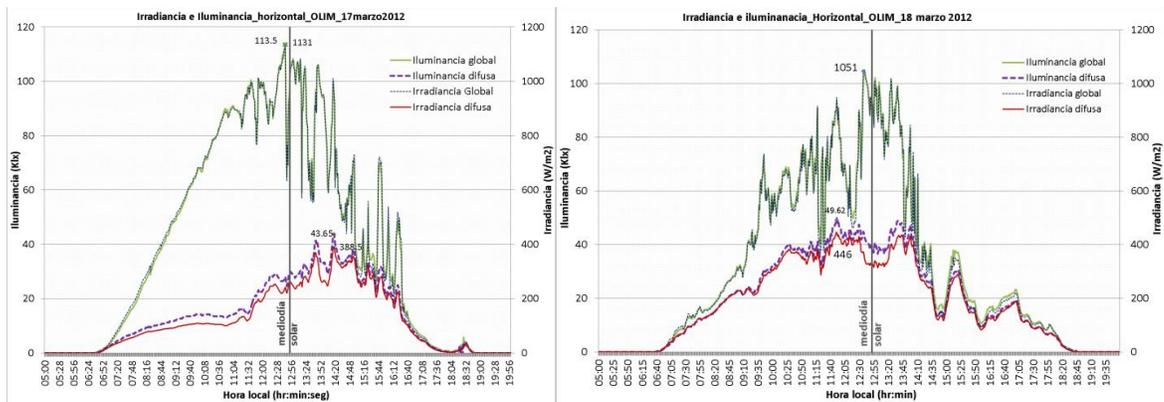
MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	06:57	06:06
Hora de amanecer según cálculo	07:02	06:11
Hora de atardecer según mediciones	18:36	17:45
Hora de atardecer según cálculo	18:38	17:47
Mediodía solar	12:50:19	12:00
Total Horas de Iluminación y radiación medidas:	11:39	

Tabla 10. Irradiancias e iluminancias máximas 20 de febrero de 2012

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	VALOR MÁXIMO REGISTRADO	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Irradiancia Global (W/m <sup>2</sup> )	1033	13:20	12:29
Irradiancia Difusa (W/m <sup>2</sup> )	388.9	13:01	12:10
Iluminancia Global (Klx)	104.6	13:20	12:29
Iluminancia Difusa (Klx)	42.91	13:01	12:10

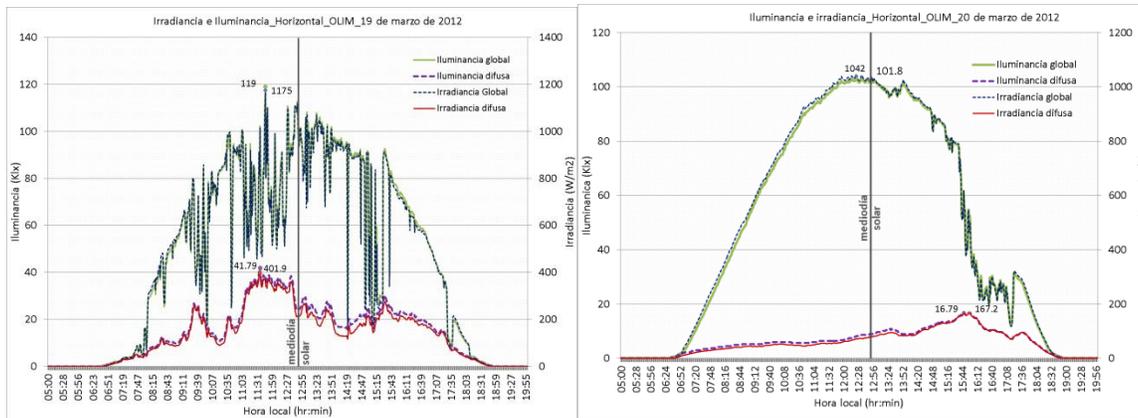
Debido al mantenimiento del Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio, para febrero se tienen pocas mediciones, por lo que se toma el 20 de febrero, sin embargo este día es parcialmente despejado antes del mediodía solar y después de él se vuelve día nublado, por lo que las mediciones de irradiancia e iluminancia difusas son muy altas y la irradiancia global disminuye drásticamente, no es un día que pueda tomarse como referencia del periodo estudiado, pero permite ver el incremento de irradiancia e iluminancia conforme se acerca al mes de marzo y abril. La altura solar máxima para el 20 de febrero de 2012 al mediodía solar: 59.65°

6.3 MARZO DE 2012. Equinoccio de primavera.



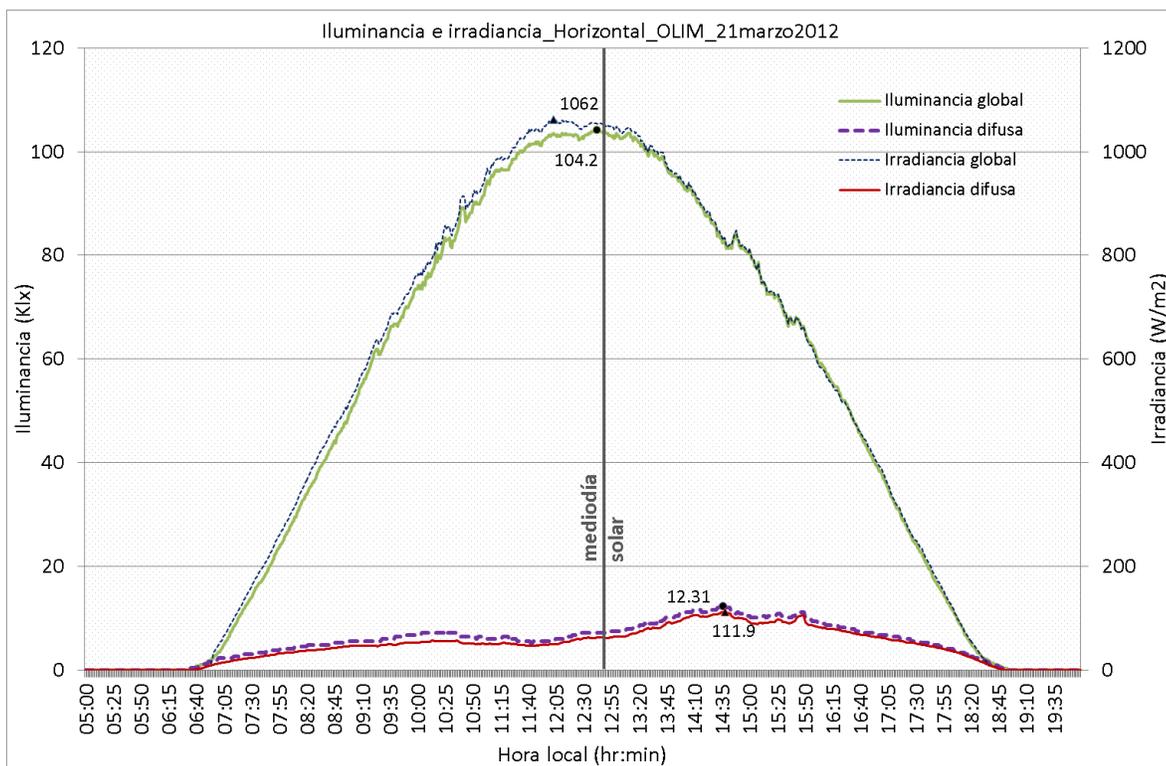
Gráfica 16. Irradiancias e iluminancias globales y difusas 17 de marzo de 2012.

Gráfica 17. Irradiancias e iluminancias globales y difusas 18 de marzo de 2012.



Gráfica 18. Irradiancias e iluminancias globales y difusas 19 de marzo de 2012.

Gráfica 19. Irradiancias e iluminancias globales y difusas 20 de marzo de 2012.



Gráfica 20. Irradiancias e iluminancias globales y difusas para el 21 de marzo de 2012.

En marzo de 2012 se presentaron días parcialmente nublado y el día que se consideró despejado fue el 21 de marzo, la gráfica 20 permite observar el comportamiento solar que puede considerarse ideal, puesto que la atenuación o variación debido a las condiciones climáticas tiene menor intervención que en los días anteriores graficados de los meses anteriores. Se puede ver que para el atardecer la iluminancia y la irradiancia difusas tienen el valor máximo con 12.31 klx y 111.9 W/m<sup>2</sup> respectivamente. La irradiancia global máxima supera los 1000 W/m<sup>2</sup> y la

iluminancia también es mayor a 100 Klx. El recurso solar en este mes abundante y el número de horas de luz llega a 12 horas (equinoccio de primavera).

**Tabla 11. Horas de luz solar para el equinoccio de primavera, 21 de marzo de 2012.**

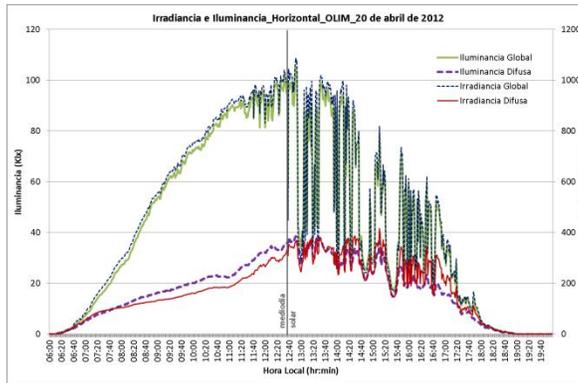
MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	06:40	05:56
Hora de amanecer según cálculo	06:39	05:55
Hora de atardecer según mediciones	18:49	18:05
Hora de atardecer según cálculo	18:48	18:04
Mediodía solar	12:43:42	
<b>Total Horas de Iluminación y radiación:</b>	<b>12:09</b>	

**Tabla 12. Irradiancias e Iluminancias máximas, 21 de marzo de 2012.**

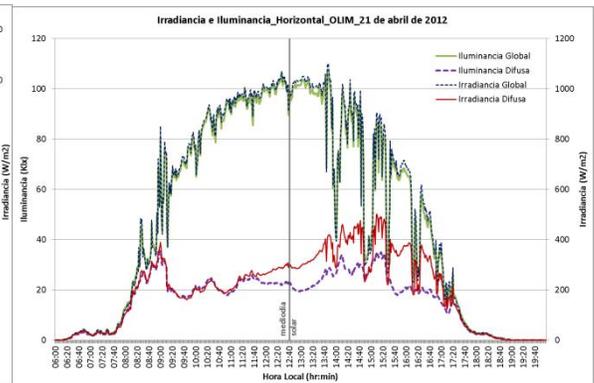
MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	VALOR MÁXIMO REGISTRADO	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Irradiancia Global (W/m2)	1062	12:03	11:19
Irradiancia Difusa (W/m2)	111.9	14:38	13:54
Iluminancia Global (Klx)	104.2	12:41	11:57
Iluminancia Difusa (Klx)	12.31	14:38	13:54

Durante ese periodo la altitud solar al mediodía solar para el 18 de marzo fue 70°, mientras que para el 21 de marzo fue de 71.19°.

**ABRIL DE 2012**

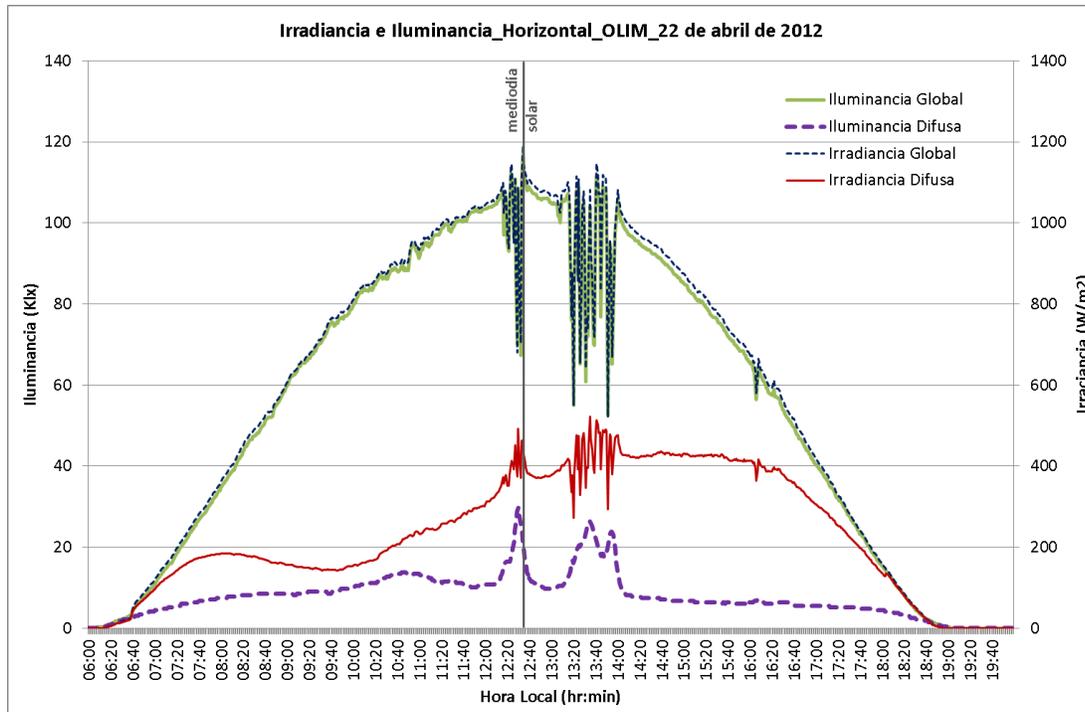


**Gráfica 21. Irradiancias e iluminancias globales y difusas 20 de abril de 2012.**



**Gráfica 22. Irradiancias e iluminancias globales y difusas 21 de abril de 2012.**

Para el 20 de abril la irradiancia global máxima fue 1008 W/m<sup>2</sup> y iluminancia máxima fue 98.5 klx, mientras que para el 21 de abril la irradiancia global máxima fue de 1100 W/m<sup>2</sup> y la iluminancia máxima de 107 klx. El mediodía solar ocurre alrededor de las 12:35 p.m. Estos días presentan mayor nubosidad por la tarde. La iluminación solar llega a 12 horas 44 minutos.



Gráfica 23. Irradiancia e Iluminancias globales y difusas para el 22 de abril de 2012.

Tabla 13. Total de horas de luz solar para el 22 de abril de 2012.

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Hora de amanecer según mediciones	06:12	05:37
Hora de amanecer según cálculo	06:14	05:39
Hora de atardecer según mediciones	18:56	18:21
Hora de atardecer según cálculo	18:57	18:22
Mediodía solar	12:34:55	12:00
Total Horas de Iluminación y radiación medidas:	12:44	

Tabla 14. Irradiancias e iluminancias máximas para el 22 de abril de 2012.

MEDICIÓN AZOTEA (OLIM)	VALOR MÁXIMO REGISTRADO	HORA LOCAL	TIEMPO SOLAR VERDADERO
Irradiancia Global (W/m <sup>2</sup> )	1193	12:34	11:59
Irradiancia Difusa(W/m <sup>2</sup> )	521.5	13:35	13:00
Iluminancia Global (Klx)	117.2	12:34	11:59
Iluminancia Difusa (Klx)	29.84	12:30	11:55

Altura solar máxima para el 22 de abril de 2012 al mediodía solar: 83.09°

El presente capítulo contiene información en dos vertientes principales:

1. Los cálculos realizados a través del Software alemán Dialux en la versión 4.7. Se obtuvo del fabricante del Sistema comercial el archivo con extensión .ies, que representa la fotometría del sistema, sin embargo consiste en un solo momento, aquel en el que el sol llega de manera directa al área de captación, de este cálculo se obtienen niveles de iluminación sobre el plano útil, paredes y mobiliario, pronosticando la productividad del sistema, misma que se comprobará o no en la fase experimental. Aquí se presentan los resultados del cálculo por software.
2. Modelos matemáticos de predicción de desempeño de STLN, propuestos por diversos investigadores, para su aplicación posterior a las mediciones realizadas en la fase de experimentación.



Se modeló y se colocaron las texturas de las superficies en el Software, con colores similares a los que se encuentran en el espacio estudiado, cuidando especialmente el coeficiente de reflexión. Se insertaron dos tramas de cálculo de iluminación, la primera a 0.75 cm y la segunda a 0.85 cm respecto del piso, en estas retícula se ubicaron puntos semejantes a las distancias a las que se colocaron los sensores en la fase experimental.

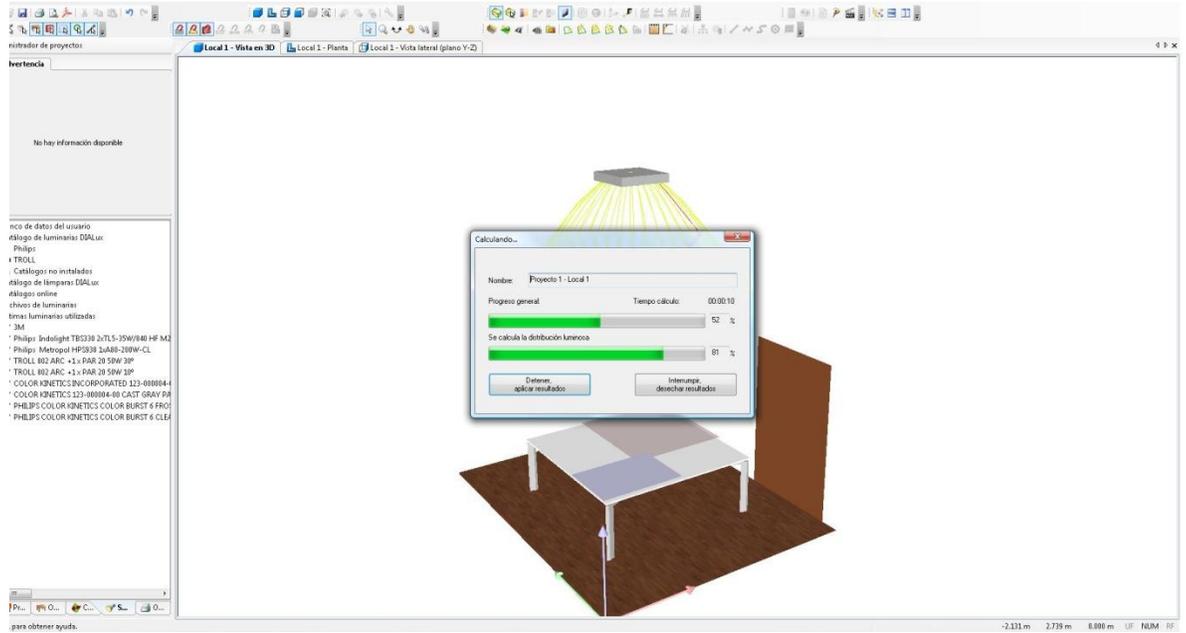
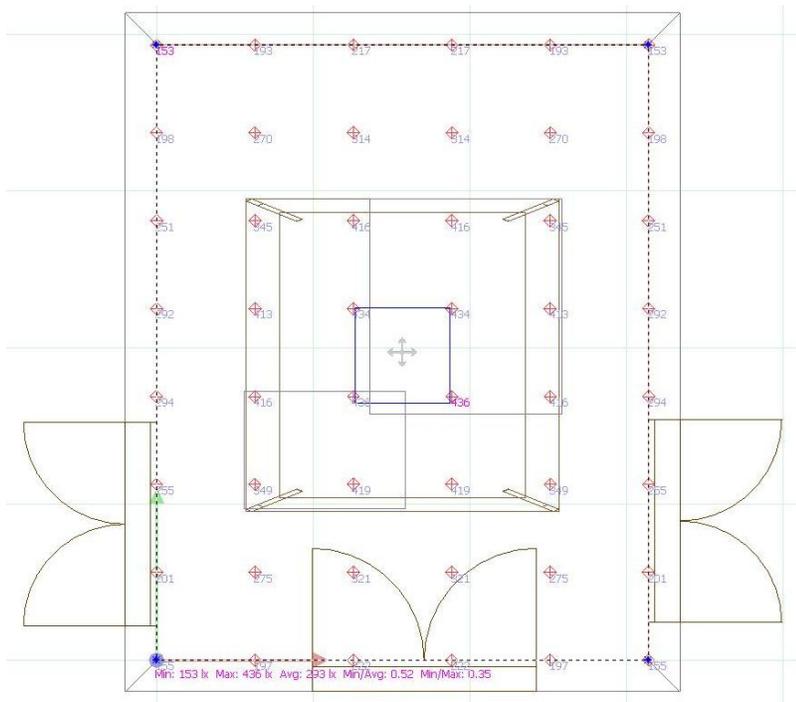


Imagen 1. Pantalla de cálculo de Software.

Los resultados obtenidos de los puntos de cálculo a 0.75 cm del piso fueron:

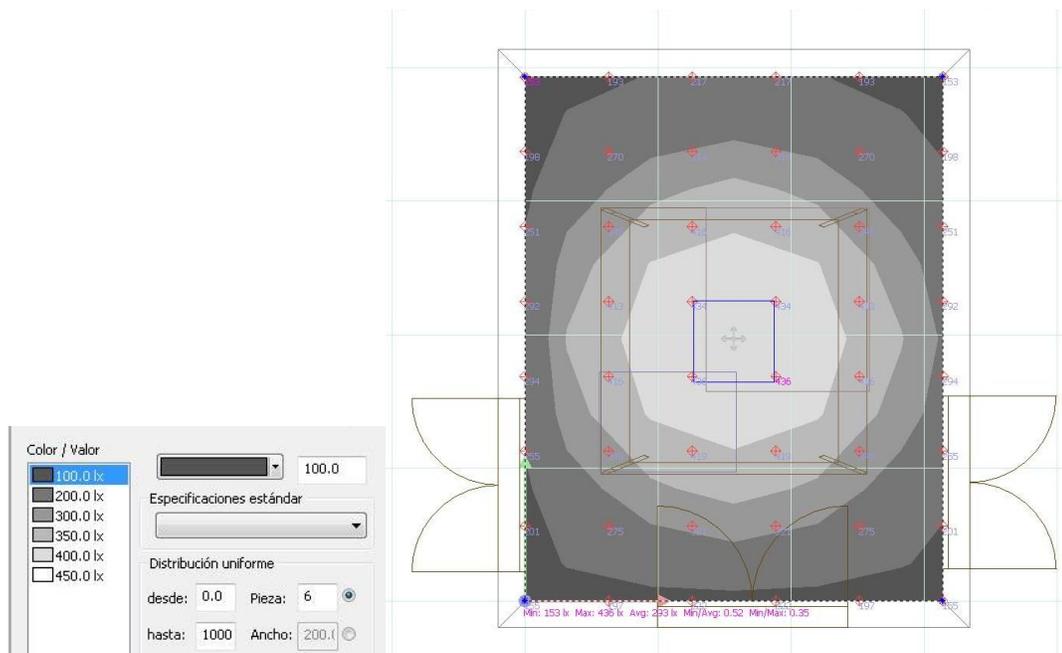


El valor máximo es calculado en 436 lx al centro y 153 lux en las esquinas de la habitación.

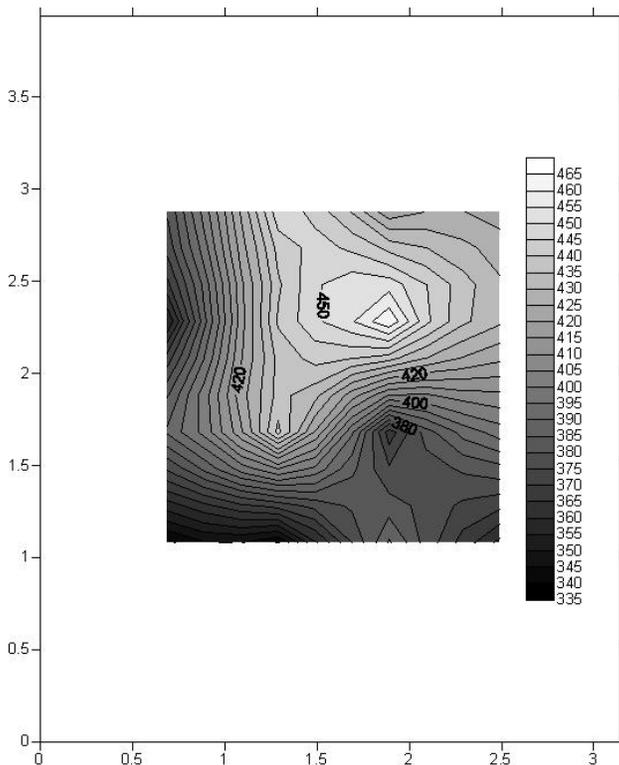
En la superficie de trabajo los niveles se encuentran arriba de 340 lux, en donde en las esquinas inferiores se observa perdida de luz por vanos de puertas, siendo los niveles más bajos de 349 lux.

La fotometría del proveedor muestra que el diseño del difusor deberá distribuir de mejor manera la luz en el espacio, a fin de evitar deslumbramiento en algunas zonas.

Si se compara la iluminancia calculada con la iluminancia máxima obtenida en la fase experimental del sistema completo con una longitud de 1.20 m, para que se encuentre a similar altura desde la salida lumínica en el techo y el plano de trabajo, se observa:



**Imagen 2. Cálculo con Isótopos**

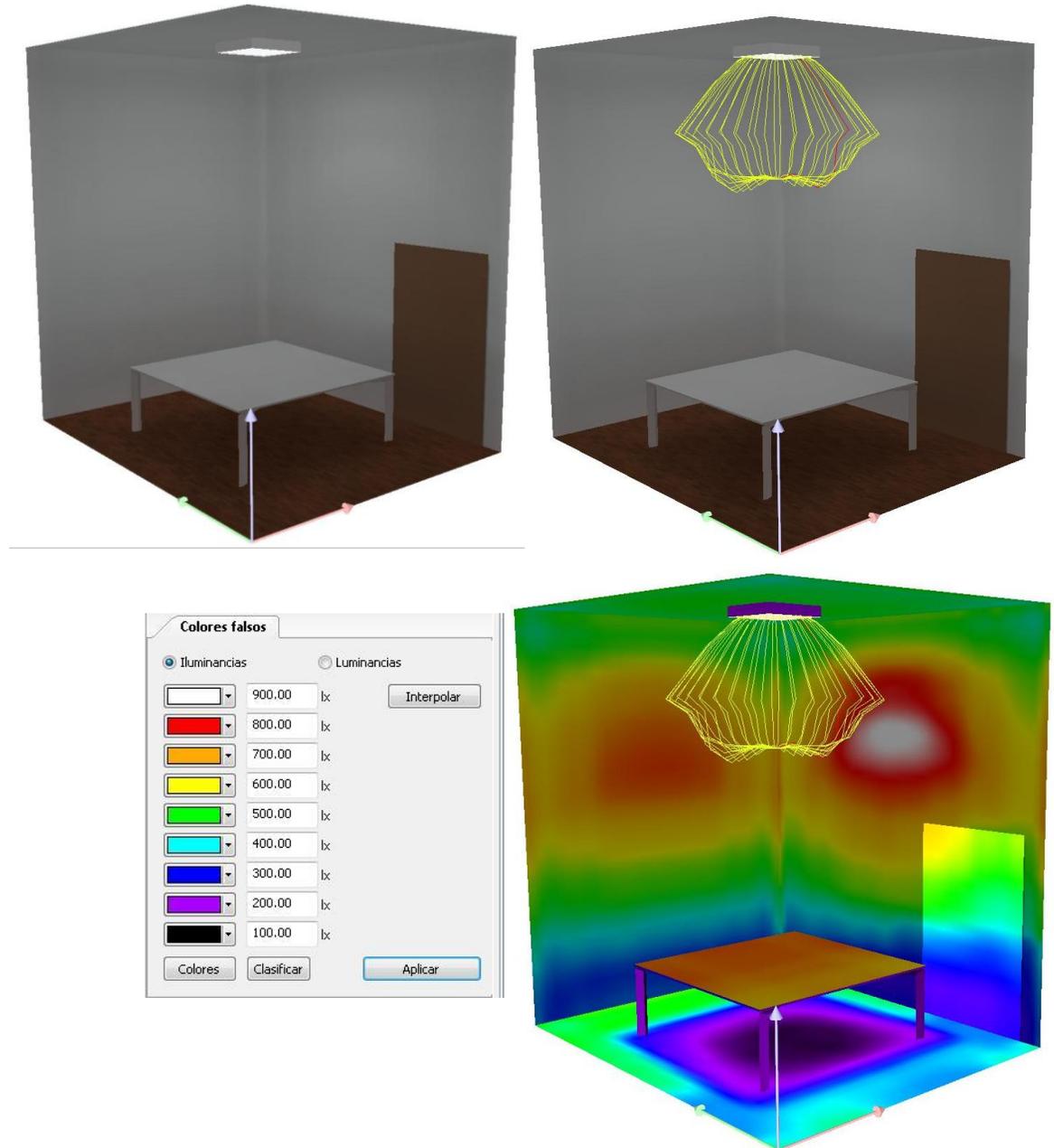


**Imagen 3. Distribución lumínica obtenida en experimentación a las 14 horas**

La distribución lumínica de experimentación que se asemeja al cálculo con la fotometría del proveedor son las obtenidas a las 11 am y las 14 horas, en donde los niveles de iluminación al exterior en la azotea del caso de estudio fueron de 74,667 lx y 77,437 lx respectivamente. Lo que representa porcentajes de transmisión del sistema entre 0.45% y 0.60% a las 11 horas y porcentajes entre 0.46 y 0.60% a las 14 horas. Datos que como se verá en la fase experimental no se sostendrán durante todo el día.

Imágenes de espacio de estudio con perspectiva del cálculo con software a partir de fotometría generada por el proveedor del

sistema comercial analizado.



**Imagen 4. Perspectiva 1 generada con programa de cálculo que muestra escala gráfica de niveles de iluminación**

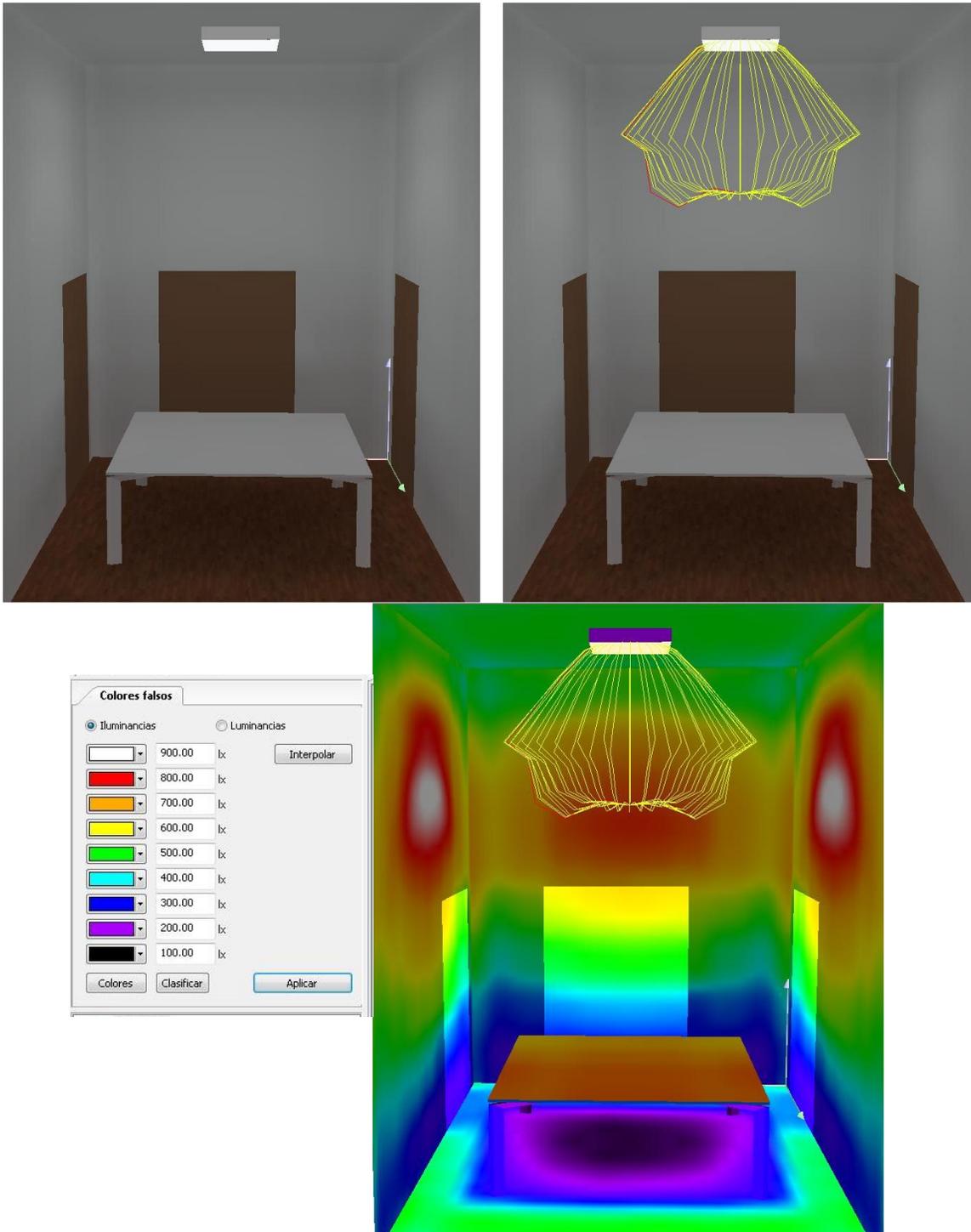


Imagen 5. Perspectiva 2 generada con programa de cálculo

## MODELOS DE PREDICCIÓN DE DESEMPEÑO DE LUMIDUCTOS

El investigador Eslovaco de la Academia de Ciencias Miroslav Kocifaj y otras personas desarrollaron un software para la evaluación de sistemas de transporte vertical de luz natural llamado HOLIGILM (Hollow light guide interior illumination method), el cual a través de una base de cálculo analítico, desarrolla diagramas de distribución lumínica al interior del ducto, mostrando cálculos de salida en el difusor, estos diagramas muestran el comportamiento del ducto frente a las distintas intensidades y ángulos de dirección del rayo lumínico respecto al eje del ducto, sin embargo este programa informático no se encuentra disponible por lo que se analizarán los modelos matemáticos o razonamientos en los que se basa.

De acuerdo con David Jenkins, investigador y profesor de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Napier en Edimburgo del Reino Unido, se pueden proponer modelos que predecirán los niveles de iluminación resultantes de un lumiducto de dimensiones dadas. En su artículo “Modelo matemático del desempeño de ‘lumiductos’ una solución a la luz natural”<sup>1</sup> describe el método de predicción de flujo luminoso de ductos de luz y también propone métodos de cálculo para tipos de cielo cubierto, la iluminancia resultante desde un flujo de luz dado.

**Desarrollo del modelo predictivo de flujo de luz.** Según el doctor Jenkins para llevar a cabo el cálculo es requerido conocer las dimensiones del ducto y su relación Longitud/diámetro. El objetivo del artículo es proponer un modelo matemático de predicción de desempeño de un lumiducto de dimensiones dadas, el cual calculará la iluminancia proveniente del lumiducto, a partir de conocer el flujo luminoso de entrada, es decir de la cantidad de luz disponible en la zona de captación del ducto.

En una primera etapa se llevaron a cabo mediciones en conjunto con la Universidad de Nottingham para ductos de una variedad de longitudes y un diámetro fijo de 300 mm. Los resultados mostraron que existe una relación entre la transmitancia y la longitud del ducto. A partir de estos resultados se establece que la luz que saldrá del ducto está dada simplemente por el producto de la iluminancia exterior por el área de la sección transversal del ducto. Por lo tanto para transmisión  $t$ , iluminancia exterior  $E$  y el radio del ducto  $r$ :

$$\text{Flujo luminoso} = tE\pi r^2 \quad (1)$$

Este modelo previo, no toma en cuenta las condiciones del cielo, en donde el tipo de luz (directa o difusa) genera una afectación aleatoria en la distribución observada debajo del difusor. Debido a ello este modelo matemático sólo es útil en condiciones de cielo cubierto y con iluminancias exteriores no mayores a 40,000 lx (40klx).

Se ajusta este modelo matemático para que considere la distancia vertical a partir del difusor hacia abajo y también considera cálculo preliminares para obtener niveles de iluminación en distancia horizontal a partir del centro del difusor.

Para la representación de estos gráficos, se utilizó el MS Excel en donde los valores de iluminancia son calculados en una red de puntos en dos dimensiones. Un simple programa VBA asigna a cada valor en lux un color para representar la distribución de la luz en una superficie.

<sup>1</sup> David Jenkins, Tariq Muneer. Revista Building and environment. Volúmen 38 (2003) / Páginas 965- 972

## MODELOS DE EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE LUMIDUCTOS

Un factor igual al anteriormente calculado es denominado por Baroncini<sup>2</sup> y sus colaboradores como Relación de iluminancia (Illuminance Ratio) determinado por:

$$\text{Relación de iluminancia} = \text{Iluminancia interior} / \text{iluminancia exterior} \quad (2)$$

Con este factor se puede graficar cada sensor medido en el plano de trabajo a fin de poder comparar el comportamiento de la luz emitida por un lumiducto a diferentes horas del día.

De acuerdo con Zhang y Muneer<sup>3</sup> citado para evaluar el desempeño de un lumiducto se debe calcular el Factor de Penetración de Luz de Día (DPF, Daylight Penetration Factor) que es obtenido a partir de conocer la iluminancia interna medida en un punto y la iluminancia total externa, ambas en el plano horizontal, que es la relación de iluminancia. Sin embargo el DPF también estará en función de la posición solar para determinar con qué ángulo incide el rayo solar, la reflectancia de la superficie interna del ducto, y la relación de aspecto definida por el coeficiente de la longitud y el diámetro.

$$\text{DPF} = (a_0 + a_1\alpha_s + a_2\alpha_s^2 + a_3k_t + a_4k_t^2 + a_5\alpha_s k_t) / D^2 \quad (3)$$

En donde:

Desde  $a_0$  hasta  $a_5$  son constantes dadas por los autores.  $a_0 = 356.7$ ;  $a_1 = -572.4$ ;  $a_2 = -1.2$ ;  $a_3 = -10.2$ ;  $a_4 = 42.8$ ; y  $a_5 = 0.5$ .

$\alpha_s$  es la altura solar

$k_t$  es es coeficiente obtenido de relacionar la irradiancia global entre la irradiancia en el tope de la atmósfera. Y;

D es la distancia desde el centro del difusor hasta el punto en que se está midiendo la irradiancia interior.

Por su parte el investigador de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Liverpool del Reino Unido, DJ Carter afirma que la cantidad de luz en la salida de un lumiducto depende básicamente de dos factores: de la iluminancia externa y de la geometría del lumiducto. Esto puede describirse también como la iluminancia exterior incidente en el colector por el área de la sección transversal del ducto. En términos generales puede determinarse que las ganancias de luz de un ducto depende de la cantidad de luz disponible en el exterior (iluminancia externa), de las características del sistema como transmitancia del material del domo, reflectividad y diámetro del ducto, etc. Y se pueden identificar claramente como pérdidas:

1. La longitud del ducto, recordando que el principio físico del funcionamiento de los lumiductos es llevar la luz por reflexión, por lo que cuanto mayor sea la longitud, mayor será el número de

<sup>2</sup> Paroncini, M. *et al.* "Monitoring a light pipe". Revista Solar Energy. Volúmen 81 (2007), pp. 1180-1186.

<sup>3</sup> Zhang, X. y Muneer, T. "A design guide for performance assessment of solar light pipes". Revista: Lighting Research and Technology. Volúmen 34. No. 2 (2002), pp. 149- 169.

reflexiones que deberá hacer el rayo de luz en cuestión y en cada reflexión se va perdiendo una fracción del flujo lumínico, dependiendo del factor de reflexión del material utilizado;

2. Las curvas que tenga el ducto y;

3. El difusor utilizado, puesto que del material, forma y acabado de este elemento depende la cantidad y la distribución de la luz que llega al final del ducto. Carter determina que es posible calcular la transmitancia del ducto a partir de la siguiente ecuación:

$$T=R^{L \tan g/d} \quad (4)$$

En donde:

T= transmitancia del ducto

R= Reflectancia del ducto

L= longitud del ducto

g= ángulo de la radiación incidente respecto al eje del ducto

d= diámetro efectivo del colector

Finalmente a partir del artículo de los investigadores David Jenkins y Tariq Muneer antes mencionado, deben conocerse cuatro datos importantes en el trabajo con datos de Sistemas de Transmisión de Luz Natural (STLN):

- a) el nivel de iluminación al exterior
- b) La longitud y diámetro del ducto
- c) La distancia de la salida lumínica del sistema al plano de trabajo
- d) Niveles de iluminación en el plano de trabajo

Que de cierta manera se pueden generalizar en tres vertientes:

1. Datos climáticos
2. Geométricos
  - a. Solar
  - b. Del Sistema
3. Operativos

Y se pueden resumir seis razonamientos importantes para cualquier cálculo o modelo matemático que quiera aplicarse a la predicción o evaluación del desempeño de lumiductos:

1. A partir del cálculo de la Relación de Aspecto (aspect ratio) que es el coeficiente obtenido de dividir la longitud total del ducto entre su diámetro, se puede deducir, que con un coeficiente de Relación de Aspecto grande que implica una longitud mucho mayor respecto al diámetro, la luz resultante será más difusa debido a que los rayos captados por

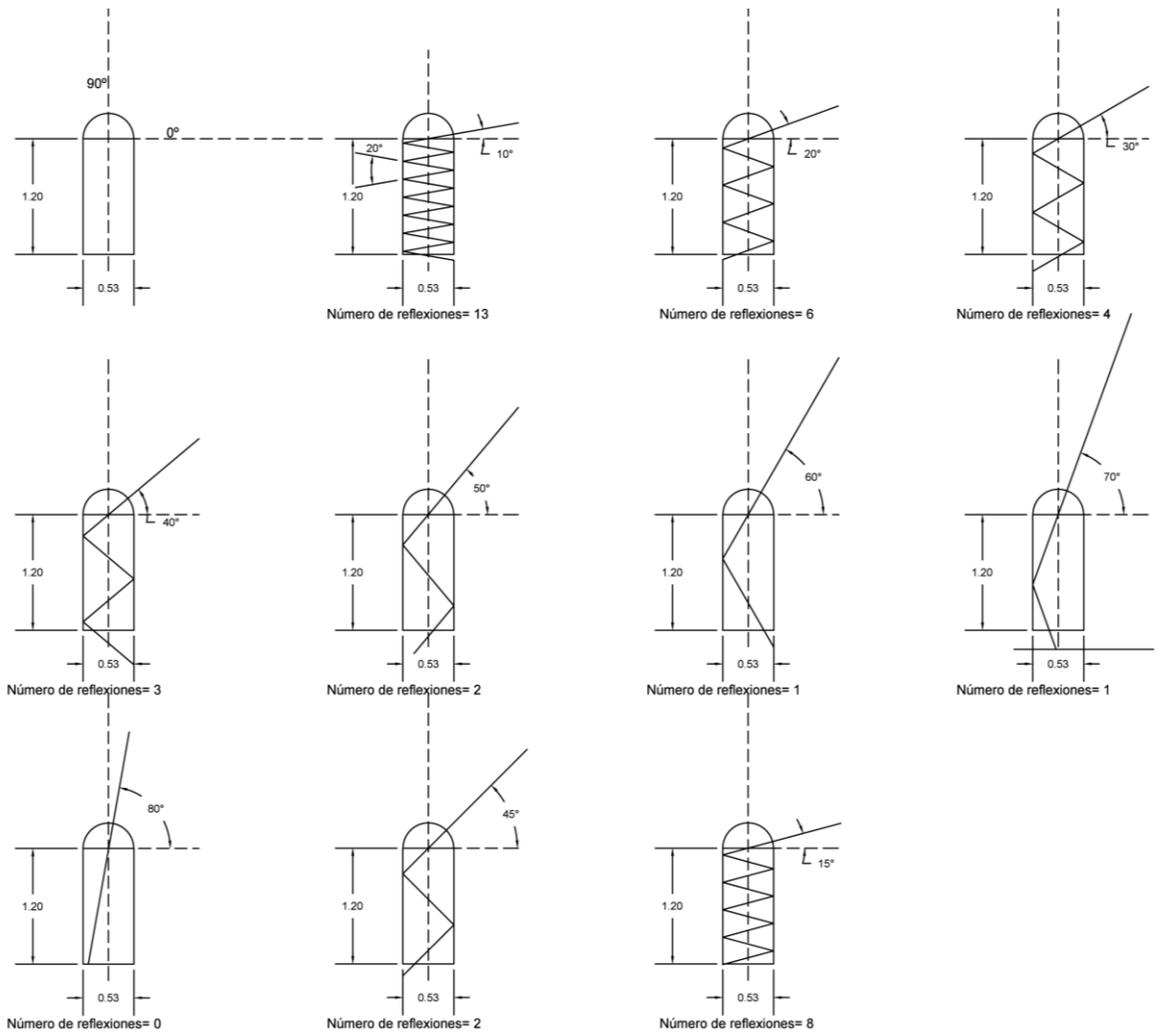
el sistema deberán realizar un gran número de reflexiones antes de llegar a la salida del difusor, cosa que no sucede cuando el coeficiente de Relación de Aspecto es un número pequeño.

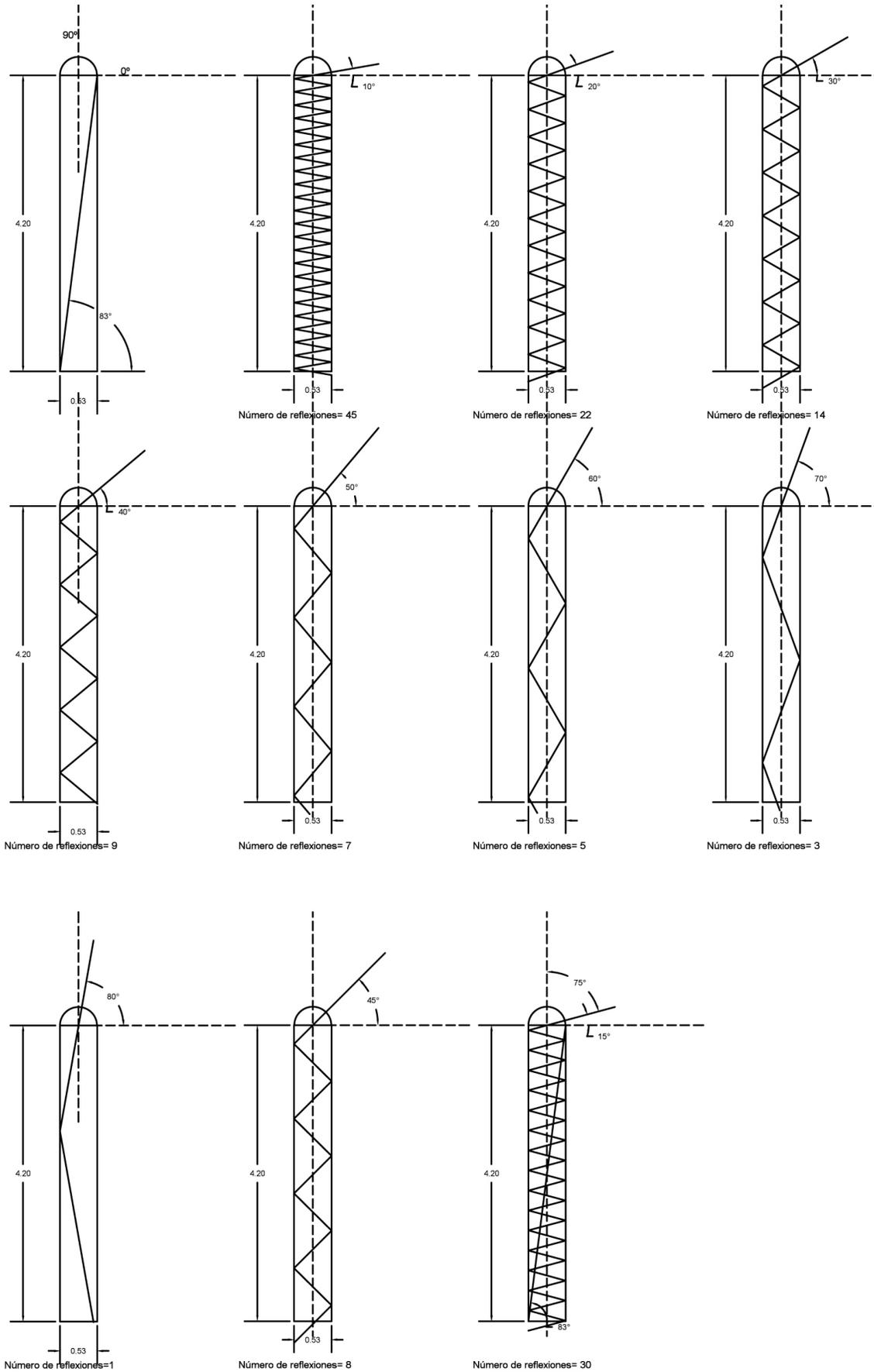
2. Bajo condiciones de cielo despejado el efecto de luz emitida por un STLN será aleatorio debido a que se introducirá luz directa. Mientras que bajo condiciones de cielo nublado la resultante será luz difusa y por esta razón es relativamente más sencillo desarrollar modelos de predicción de desempeño para esta condición.
3. El efecto de la luz directa a través del ducto será en “modelos de anillos”
4. La posición del sol afecta el ángulo en que la luz incide y entra en el ducto, lo que afecta el modo en que la luz viaja a través del ducto.
5. Para un cielo parcialmente nublado, los anillos de luz formados, variarán de posición y tamaño de acuerdo a las siguientes condiciones:
  - Geometría solar:
    - a. Altitud solar
    - b. Azimut
  - Geometría del ducto:
    - c. Longitud del ducto
    - d. Diámetro del ducto

**Tabla 1. Número de reflexiones de rayo solar de acuerdo al ángulo de incidencia para un ducto de 4.20 m de longitud.**

Ángulo de Incidencia ( $\theta$ ) de rayo	Ángulo Complementario ( $\alpha$ ) de rayo incidente	No. Reflexiones de rayo incidente
10	80	46
15	75	30
20	70	22
25	65	17
30	60	14
35	55	12
40	50	10
45	45	8
50	40	7
55	35	6
60	30	5
65	25	4
70	20	3
75	15	2
80	10	1
85	5	1

A continuación se hace un análisis gráfico del número de reflexiones que deberá hacer el rayo solar de acuerdo al ángulo de incidencia.





La fase experimental se llevó a cabo en tres etapas, en el periodo comprendido del 25 de diciembre de 2011 al 2 de febrero de 2012.

Como se menciona en la metodología, se analiza el desempeño de un sistema pasivo de transmisión de luz natural y determinar así el comportamiento de este tipo de sistemas en nuestra latitud de estudio. El sistema comercial consistió en un ducto altamente reflexivo de 55 cm de diámetro, con domo y difusor. Los experimentos fueron montados en la azotea del caso de estudio en el Centro Histórico de la Ciudad de México

En la primera fase se desarrolla en la azotea, en donde se hizo la comparación del ducto comercial con otros dos de diferentes acabados.

En la segunda fase se analizan los ductos instalados en diferentes días en el primer nivel del edificio, para conocer el comportamiento de la luz transmitida a través de los diferentes acabados.

Finalmente en la tercera fase se analiza a profundidad un sistema de transmisión de luz natural que se distribuye de manera comercial en nuestro país, se recabaron datos con domo, difusor, diferente longitud y bajo diferentes ángulos de captación de luz natural.

En este capítulo se presentan los resultados, primero se muestran las gráficas de cada experimento y posteriormente se establece la comparación.



## VIII. RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN



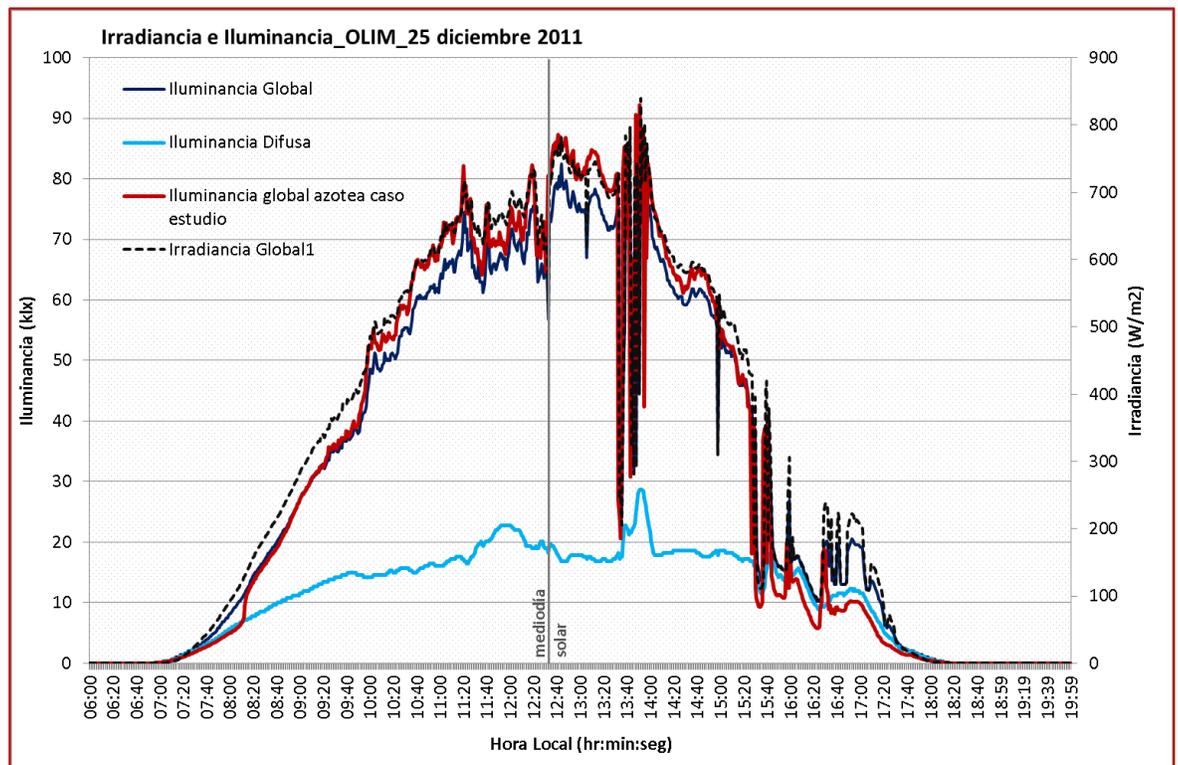
### 8.1 RESULTADOS FASE 1

Fase experimental 1



25 de diciembre de 2011	
Hora Local	Hora Solar
<b>AMANECER CALCULADO*</b>	
07:08:00	06:31:24
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:06:00	17:29:24
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:36:36	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
10:58:00	

El primer día de resultados que se obtuvo fue el 25 de diciembre, para este día, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) lo considera como día despejado. De acuerdo a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NOAA)<sup>1</sup>, el amanecer de ese día es calculado a las 7:08:55 a.m. de la hora local y el atardecer a las 18:04:25 del tiempo local, por lo tanto habrá 10 horas con 57 minutos de luz disponible para la latitud de estudio, la diferencia con los datos registrados es menor, ya que el amanecer ocurrió a las 7:05 de la hora local y el atardecer a las 18:09 horas. Así mismo de acuerdo con este cálculo, el mediodía solar ocurrió a las 12:36 p.m., que representa el momento en el que el sol se encuentra en su punto más alto, es decir el momento en el que el sol pasará por el meridiano del sitio de estudio. Esta información se compara con las mediciones hechas en el sitio (gráfica 1).

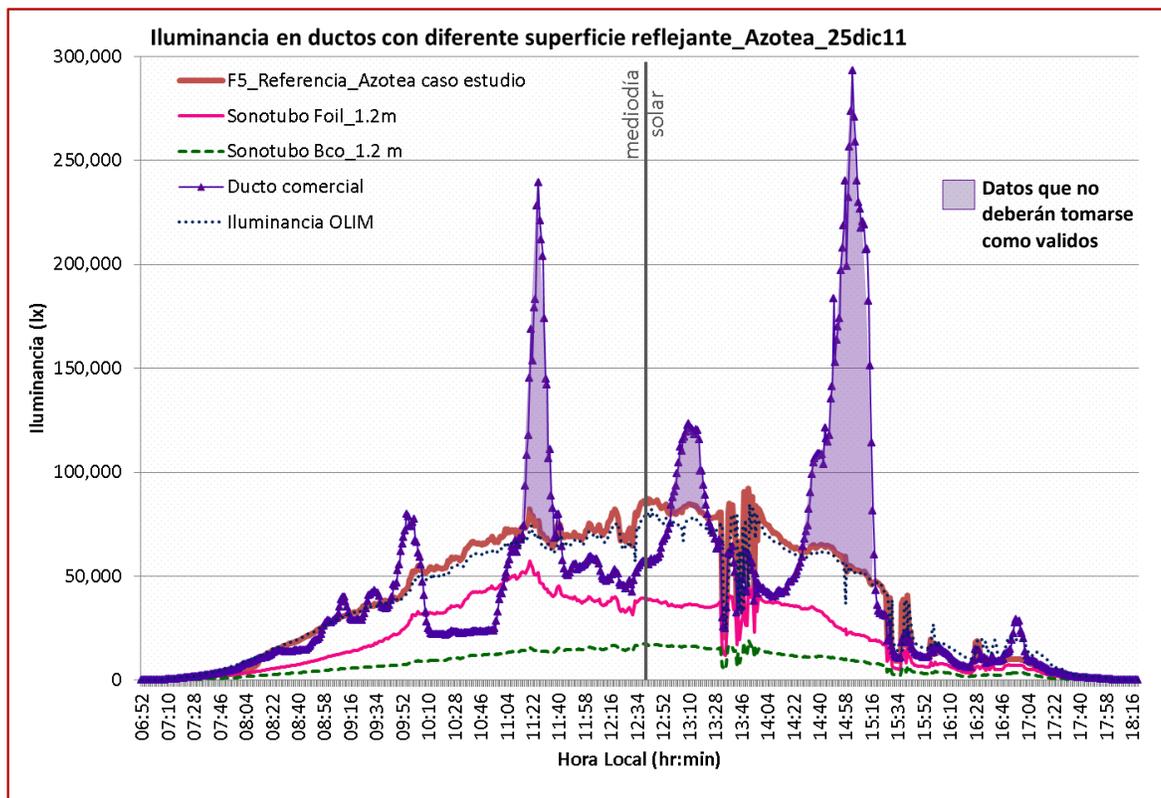


Gráfica 1. Irradiancia e iluminancia en sitio de estudio para el 25 de diciembre de 2012.

<sup>1</sup> <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>

Consultado el día 6 de mayo de 2012

A partir de la gráfica 1 se entiende que el día presenta nubosidad parcial, puesto que existen variaciones en la iluminancia en un periodo de tiempo muy breve, lo que es causado por el paso de las nubes, sin embargo se puede apreciar la tendencia a una curva parabólica que generaría un día completamente despejado, también se puede observar que por la tarde después de las 13:20 se incrementa la presencia de nubes, por lo que habrá de observarse el comportamiento de los ductos especialmente en ese lapso de tiempo. Así mismo, se resalta que al final del día solar, la azotea del caso de estudio recibe sólo luz del cielo y no directamente del sol, puesto que la curva se acerca más al valor de la luz difusa registrada en el OLIM, lo que repercutirá también en los resultados del desempeño de los ductos.



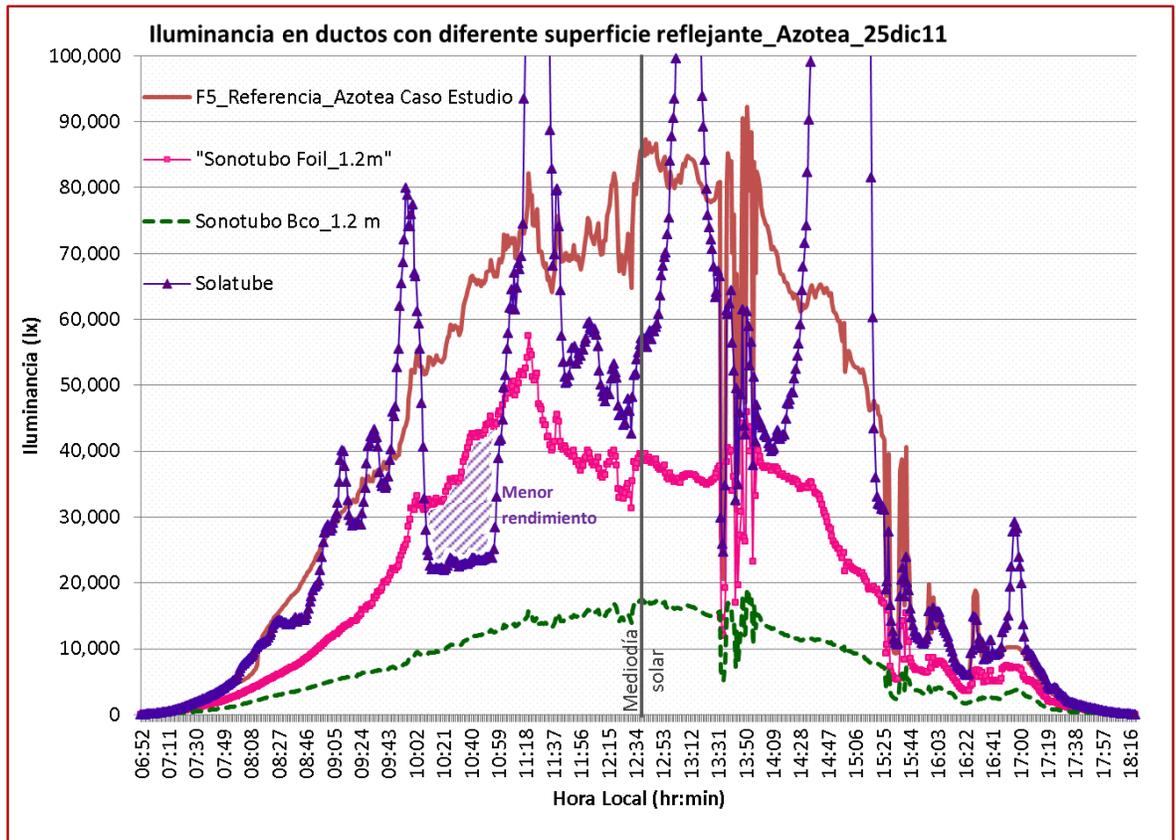
**Gráfica 2. Comparación del desempeño de los diferentes ductos.**

En esta gráfica se aprecia que la línea gruesa en rojo del fotómetro 5 denominado de “referencia” indica la luz disponible en la azotea. La iluminancia máxima es de 92,200 lux en el fotómetro de referencia y se observa que el ducto con menor rendimiento en transmisión de luz es el de color blanco, por lo que se pronostica que será el que menor luz lleve en profundidad si se incrementara su longitud o cuando el plano de trabajo se encuentre lejos de la salida lumínica, mientras que el forrado con Foil brillante y el ducto comercial presentan un mejor rendimiento. Sin embargo los ductos blanco y con Foil tienen un comportamiento completamente dependiente o relacionado con los niveles de iluminación disponibles, es decir si la iluminancia es mayor, estos ductos incrementan también los niveles de transmisión, y si la iluminancia disminuye, entonces estos ductos presentarán de manera proporcional un decremento. No ocurre así con el ducto comercial,

que presenta un comportamiento diferente o no correspondiente con la iluminancia, puesto que en ocasiones registra más cantidad de luz de la que se supone como disponible, se observó que este fenómeno es presentado por la concentración de rayos solares en un foco, este foco va cambiando a lo largo del día, por lo que en algún momento es concentrado sobre el sensor, lo que incrementa el nivel de luz (imagen 1). Estos valores en los que la luz es registrada como superior no deberán considerarse en el cálculo, por lo que en la gráfica 3 se omiten, lo que permite apreciar una tendencia simétrica en su comportamiento, presentando disminuciones importantes entre las 10 am y las 11 am, al mediodía solar y entre las 13 horas y las 14:30 horas.



Imagen 1. Concentración de rayo solar sobre sensor



Gráfica 3. Comparación de desempeño de ductos.

En la gráfica 3 entre las 10:02 y las 10:59 es en donde el ducto comercial es menos eficiente que el ducto forrado con Foil, pero en el resto del día, es el que mejores resultados en iluminancia presenta. Deberá observarse lo que sucede a nivel de plano de trabajo cuando la iluminancia es mayor que la disponible en la azotea, que podrá analizarse en la fase 3, en donde se prueba el ducto con el difusor.

Si se obtiene en porcentaje el rendimiento los diferentes ductos colocados en la azotea se obtiene:

AMANECER REGISTRADO				ATARDECER REGISTRADO			
Hora Local		06:52		Hora Local		18:20	
T.S.V.		06:16		T.S.V.		17:44	
	Fotómetro	Valor (lx)	%		Fotómetro	Valor (lx)	%
Referencia	105	21	100	Referencia	105	19	100
Foil	106	2	11.36	Foil	106	8	39.16
Blanco	107	1	2.50	Blanco	107	0	1.56
0.61 cm	108	3	15.64	0.61 cm	108	7	33.91
Solatube	109	16	75.93	Solatube	109	18	91.60

El 100% es considerado el fotómetro de referencia, que no está en el interior de ningún ducto, se encuentra situado en la azotea y estará midiendo la iluminancia que llega en ese nivel, a partir de este, los fotómetros en el interior de los diferentes ductos obtendrán su porcentaje de desempeño, del día de medición completo que se analiza, se eligen momentos clave, como el amanecer y el atardecer porque los ductos no recibirán luz directamente del sol, sino de la proveniente del cielo, así se podrá ver su comportamiento bajo la luz difusa. Pero en todos los casos, incluyendo el mediodía solar y el momento en que se registra la iluminancia máxima, el ducto comercial presenta mejor rendimiento.

MEDIODÍA SOLAR				ILUMINANCIA MÁXIMA EN AZOTEA			
Hora Local		12:36		Hora Local		13:51	
T.S.V.		12:00		T.S.V.		13:15	
	Fotómetro	Valor (lx)	%		Fotómetro	Valor (lx)	%
Referencia	105	83,276	100	Referencia	105	92,217	100
Foil	106	38,855	46.66	Foil	106	45,874	49.75
Blanco	107	17,078	20.51	Blanco	107	19,135	20.75
0.61 cm	108	30,799	36.98	0.61 cm	108	38,205	41.43
Solatube	109	54,968	66.01	Solatube	109	61,235	66.40

A partir de estos resultados, se puede predecir que en ese mismo orden se obtendrán los resultados sobre el plano de trabajo. Sólo falta determinar que niveles de iluminación se obtendrán y por cuanto tiempo pueden ser alcanzados los 300 lux mínimos para áreas de oficinas.

## 8.2. RESULTADOS FASE 2

### Fase experimental 2



La fase dos corresponde a cuatro momentos diferentes y que deberán compararse entre sí para comprender de manera integral el desempeño del ducto comercial, pues se compara con otros tres ductos de diferente acabado, las mediciones se hicieron a nivel de plano de trabajo. Aquí se presentan las gráficas de niveles de iluminación y su distribución o comportamiento a lo largo del día.

### Ducto blanco



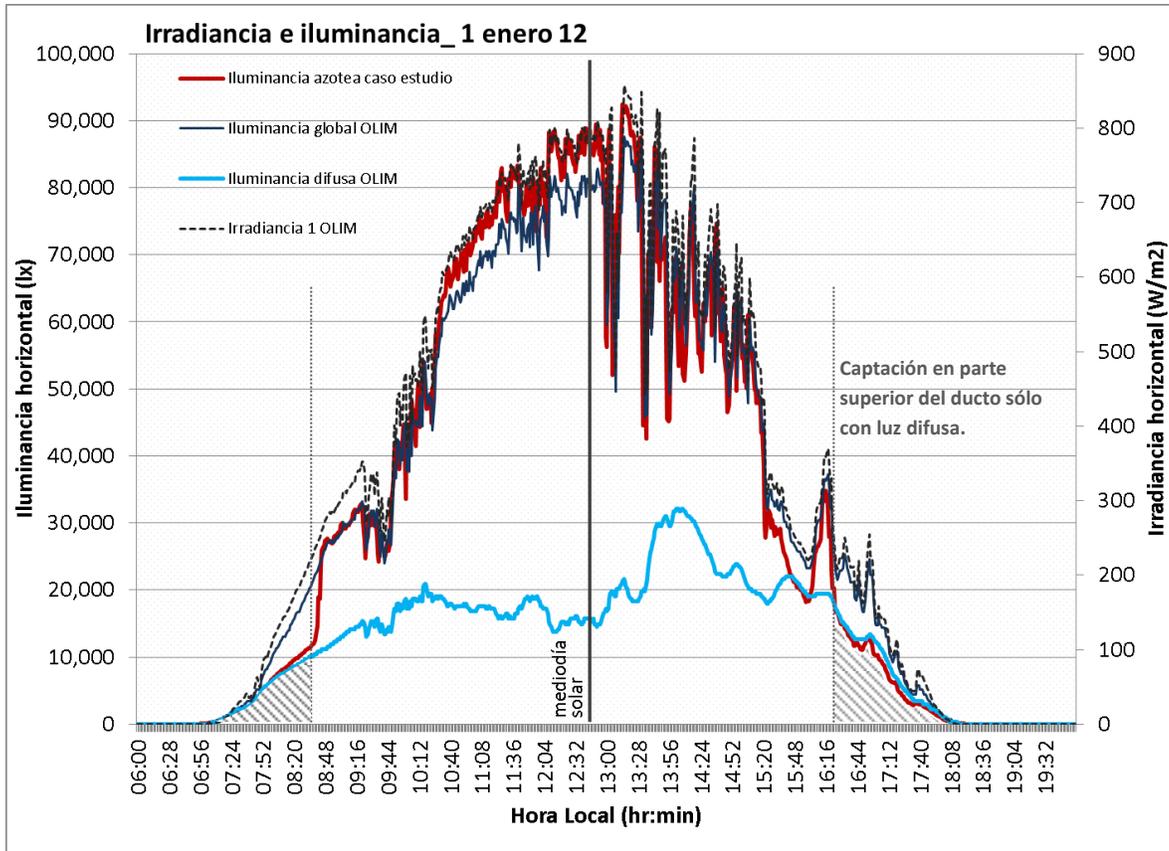
**DUCTO BLANCO**

El primer ducto analizado fue el de color blanco, forrado con Cartulina Couché Blanco brillante, probado el 1 de enero de 2012, para el cual el SMN no tiene los datos del tipo de cielo, mientras que el NOAA realiza el siguiente cálculo de horas de luz natural disponible:

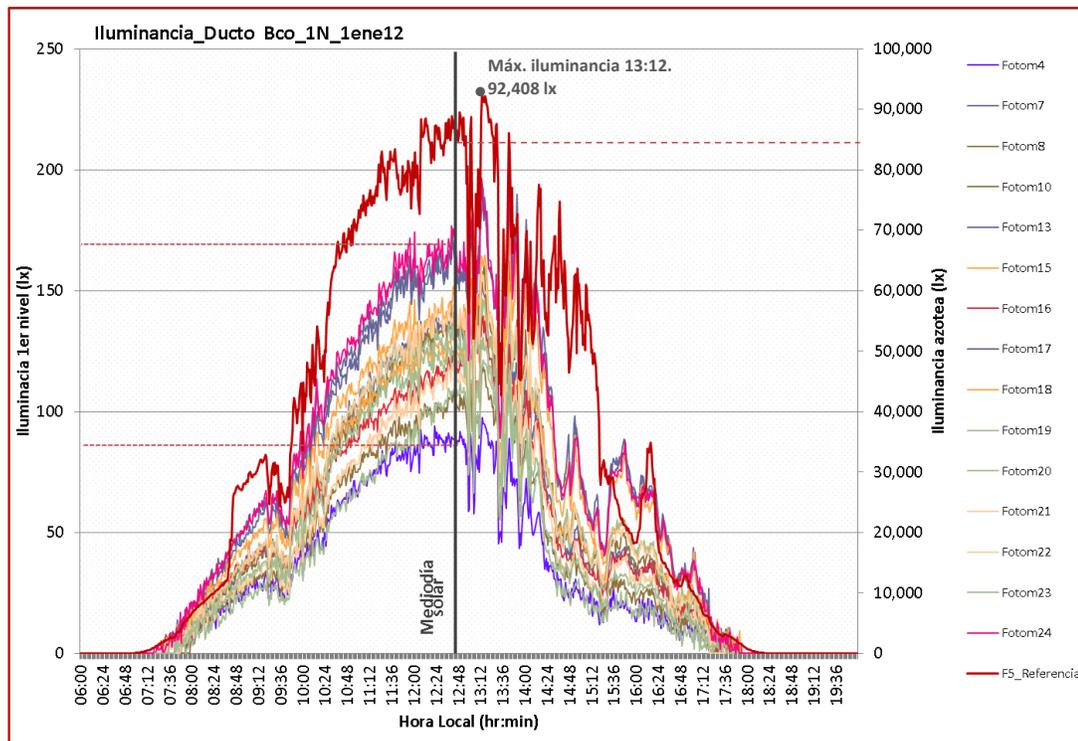
1 de enero de 2012	
Hora Local	Hora Solar
<b>AMANECER CALCULADO*</b>	
07:10:00	06:30:00
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:10:00	17:30:00
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:40:00	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
11:00:00	

Estos datos calculados no difieren mucho de las mediciones, pues el amanecer es registrado a las 7:07am de la hora local con 255 lux. Mientras que el atardecer o último registro de iluminancia que se tiene ocurre a las 18:12 horas con 183 lux. De estas 11 horas y 5 minutos de luz natural, deberá observarse cuántas cuanto tiempo a través de los diferentes acabados, logran llevarse al interior del espacio estudiado niveles superiores a 300 lux. Este nivel es alcanzado y superado rápidamente en el exterior, pues a partir de las 7:10 am ya se censan 359 lux, pero hasta ahora ninguna superficie transmite por reflexión el 100% de la luz captada. A continuación se presentan los resultados de la superficie de color blanca, este ducto está representando cuánta luz pasa por un boquete de la misma área del ducto comercial, para poder

llevar a cabo la comparación entre estos. Cabe señalar además que el color blanco es el más utilizado por los arquitectos en las superficies de los cubos de luz, plafones, etc.



Gráfica 4. Comparación de iluminancia en caso de estudio con la registrada en OLIM



Gráfica 5. Iluminancia sobre plano de trabajo, transmitida por ducto blanco.

En la gráfica 5 se debe resaltar que el nivel de iluminación en el interior nunca alcanza los 300 lux mínimos requeridos, sin embargo el momento de análisis para esta gráfica se da cuando el sol se encuentra en su punto más alto en ese día, en donde la radiación solar es poco menor a 90,000 lux disponibles en la azotea del caso de estudio, mientras que en el espacio debajo de ella, la luz que llega al plano de trabajo a través del sonotubo es arriba de 150 lux en el valor más alto y el más desfavorable menor a 100 lux, con lo que no existen suficientes niveles de iluminación para el uso de oficina de acuerdo a las Normas Oficiales y con las recomendaciones de la IESNA.

Mediodía solar					
Posición		HL:	12:40 T.S.V.		12:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	86	4	0.10	
1.29	2.88	138	7	0.16	
1.89	2.88	138	8	0.16	
2.49	2.88	106	10	0.12	
0.69	2.28		11	0.00	
1.29	2.28	163	24	0.19	
1.89	2.28	163	13	0.19	
2.49	2.28	128	15	0.15	
0.69	1.68	118	16	0.14	
1.29	1.68	161	17	0.19	
1.89	1.68	141	18	0.17	
2.49	1.68	129	19	0.15	
0.69	1.08	105	20	0.12	
1.29	1.08	112	21	0.13	
1.89	1.08	136	22	0.16	
2.49	1.08	119	23	0.14	
		VALOR (lx)	%	Klx	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		81,700	100	81.7	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		84,922	104		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		15,680 lx		15.68	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		779.3 W/m2			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		775.9 W/m2			

Estos datos pueden comprenderse de manera más amplia en la tabla anterior, en la cual se resumen los datos registrados en el mediodía solar, en donde se compara la iluminancia entre diferentes niveles: a) en el Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio (OLIM) que como se menciona en la metodología, es medido en la azotea del quinto nivel de un edificio y representará el 100%; b) la iluminancia en la azotea del caso de estudio (CE), en el edificio de 2 niveles y; c) los niveles de iluminación en los fotómetros colocados en retícula en el plano de trabajo, el porcentaje de estos representado en la tabla es tomado respecto de la iluminancia en la azotea del caso de estudio, para conocer la cantidad de luz que llega en la entrada del ducto (área de captación) y la que llega en el lugar en donde la necesitamos que es el plano de trabajo, se presentan los valores en lux y el porcentaje, en donde debe enfatizarse que no logra reflejarse gran cantidad de luz a través de esta superficie, pues el porcentaje de transmisión oscila entre 0.10 % y 0.19% este nivel más alto se da en los sensores que se encuentran más cerca del centro debajo de la salida lumínica (ver en metodología colocación de los fotómetros), mientras que en la azotea están disponibles en el mediodía 84, 922 lx .

MÁXIMA ILUMINANCIA CE				
Posición		HL:	13:14 T.S.V.	12:34
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE
0.69	2.88	98	4	0.11
1.29	2.88	153	7	0.17
1.89	2.88	158	8	0.17
2.49	2.88	117	10	0.13
0.69	2.28		11	0.00
1.29	2.28	188	24	0.20
1.89	2.28	184	13	0.20
2.49	2.28	147	15	0.16
0.69	1.68	139	16	0.15
1.29	1.68	194	17	0.21
1.89	1.68	162	18	0.18
2.49	1.68	140	19	0.15
0.69	1.08	118	20	0.13
1.29	1.08	128	21	0.14
1.89	1.08	154	22	0.17
2.49	1.08	126	23	0.14
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		79,690	100	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		92,408	116	
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		21,270 lx		22.77
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		776.1 W/m <sup>2</sup>		
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		774.4 W/m <sup>2</sup>		

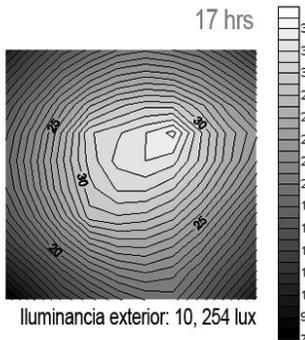
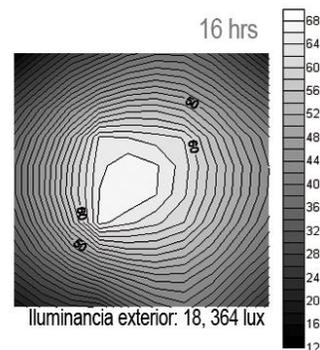
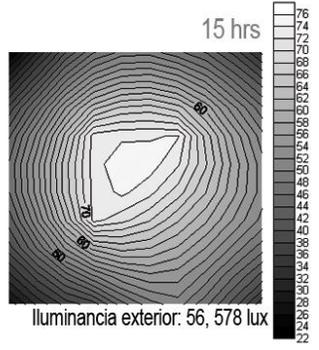
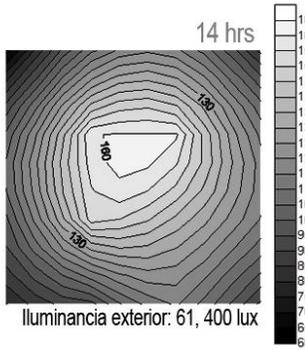
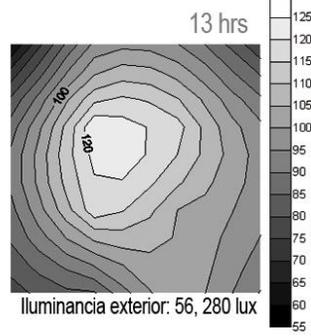
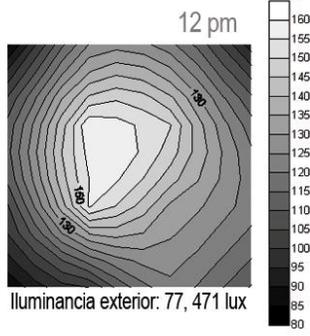
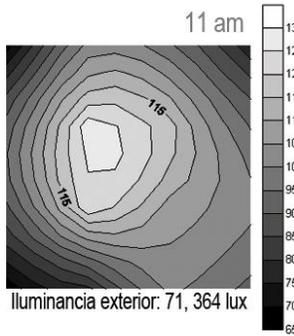
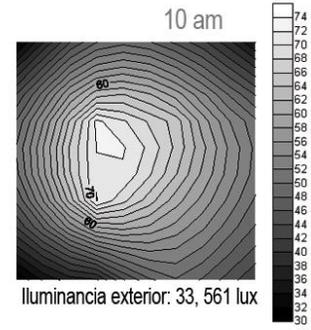
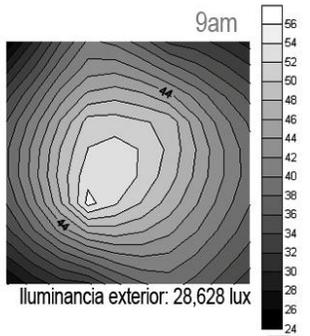
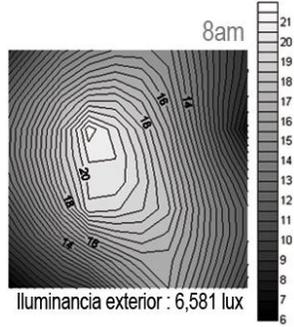
En el momento en que ese día se presenta la iluminancia máxima, que ocurre después del mediodía solar, en la azotea del caso de estudio hay 92,408 lx, mientras que en la iluminancia global del Observatorio hay 79,690 lx, fenómeno que es inverso al pronosticado, puesto que en niveles superiores es menor la obstrucción de construcciones en zonas urbanas, además que a mayor altura mayor nivel de radiación solar y con ello mayor iluminancia; sin embargo desde el primer día de medición se observa que este fenómeno ocurre entre las 10 y las 15 horas, considerando que el contexto inmediato que contiene a la azotea de estudio contribuye a la ganancia de luz por reflexión de las superficies construidas, que son blancas.

En el interior de la edificación, incrementan también los niveles de iluminación, que oscilan entre 98 lx y 194lx que de manera correspondiente representan el 0.11% y el 0.21% en transmisión. De la misma manera que en el mediodía solar, los niveles más altos se miden en los fotómetros cercanos al centro de la salida de luz, situación que se mantiene en el amanecer y el atardecer (ver las tablas complementarias en la sección de anexos). Este aspecto es remarcable, pues como se verá en el ducto comercial y el ducto forrado con película mirror cromm no ocurre así, pues la mancha de luz va cambiando conforme va variando la posición del sol.

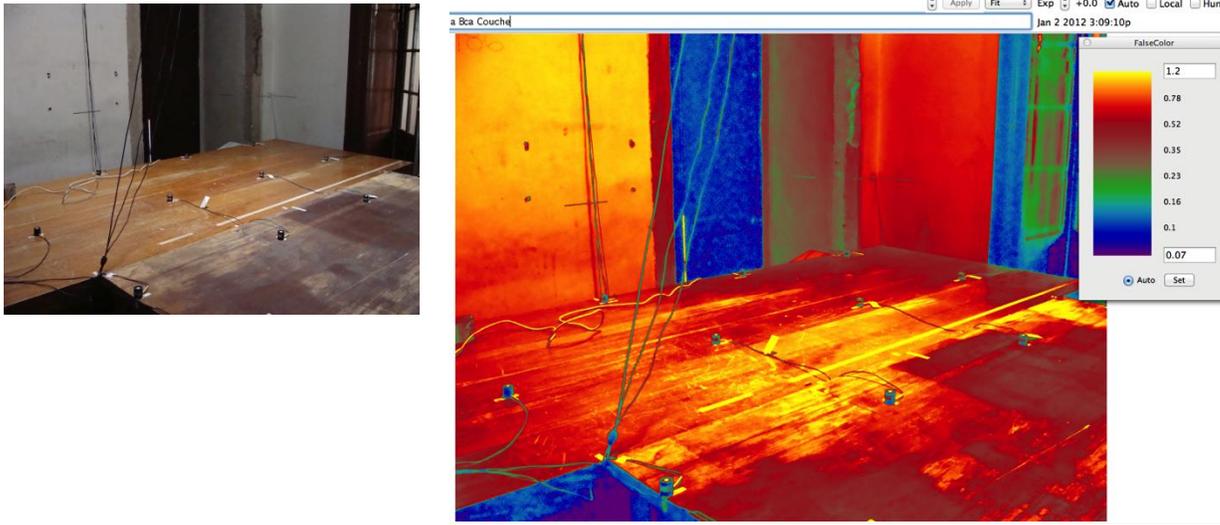
En este día de medición el fotómetro 11 presentó problemas, por lo que no se cuenta con mediciones para ese punto en el plano de trabajo, pero que fue calculado por promedio, con el software Surfer con el que se realizaron las gráficas de iluminancia horaria sobre el plano de trabajo.

ILUMINANCIA HORARIA EN PLANO DE TRABAJO

DUCTO BLANCO



## RESULTADOS DE IMÁGENES HDR



En las imágenes HDR representadas en colores falsos, se puede interpretar de manera gráfica, la distribución lumínica en el espacio estudiado, en donde la mancha de luz natural presenta mayor intensidad al centro del área de trabajo.

Así mismo, si se comparan las superficies, existe una pérdida de luz en acabados oscuros como la madera de las puertas que se encontraban en el espacio analizado.

Para el ducto con acabado blanco, que representaría la cantidad de luz que entra por un hueco de las mismas dimensiones del Sistema de Transmisión de Luz Natural a probar, se concluye que no brinda los suficientes niveles de iluminación establecidos por la reglamentación nacional, que como se mencionó en el marco teórico deberá ser superior a 250 lux y de 300 lux cuando sea necesario apreciar detalles, por lo que hacer un vano en el plano horizontal con esas dimensiones no será suficiente para aprovechar la luz natural a nivel de plano de trabajo, que se encuentra a 0.75 m respecto del nivel de piso y a 3.34 m de distancia de la salida lumínica en el techo (ver sección de metodología de trabajo)

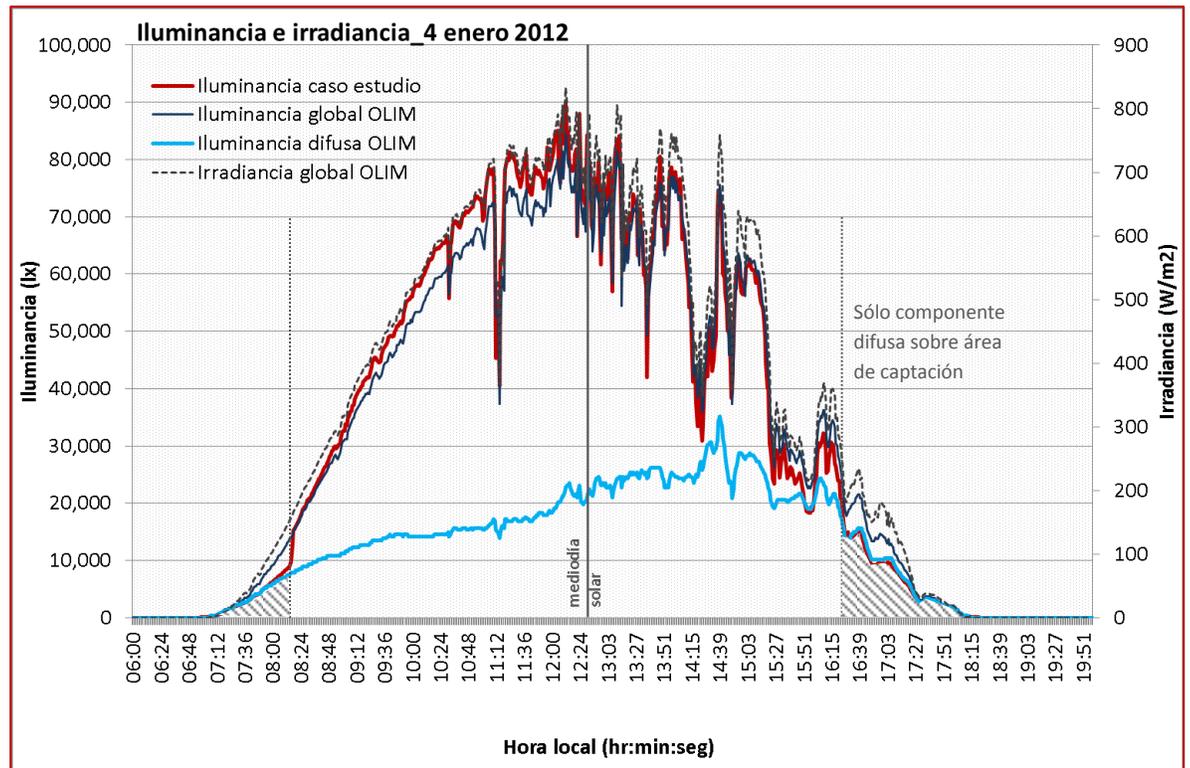


**DUCTO COMERCIAL**

El segundo ducto en instalarse fue el comercial, se montó el 4 de enero de 2012, para ese día el SMN lo consideró como despejado. Sin embargo al compararlo con las mediciones hechas in sitio, se observa mayor nubosidad por la tarde.

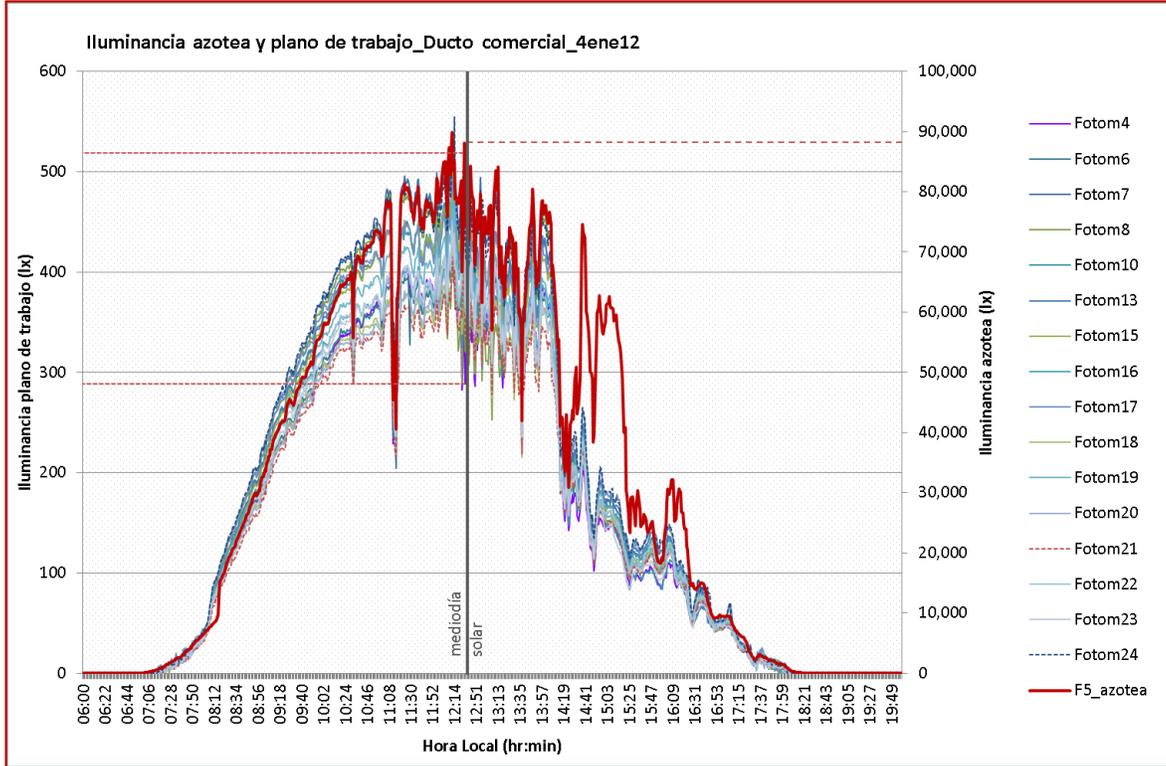
4 de enero de 2012	
Hora Local	Hora Solar
<b>AMANECER CALCULADO*</b>	
07:11:00	06:29:37
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:11:00	17:29:37
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:41:23	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
11:00:00	

El amanecer es calculado a las 7:11 am y es registrado a las 7:07 am en caso de estudio con 207 lux, sin embargo en el interior la medición en todos los fotómetros comienza a las 7:22 am de la hora local, cuyo ajuste con la hora solar es de 41 minutos para ese día. El atardecer de acuerdo a los datos medidos ocurre a las 18:12 con 207 lux, pero en el interior dejo de haber luz natural desde las 18:02 de la hora local, teniendo entre 10lx y 1 lx en el área de trabajo, mientras que en la azotea había aún 1,227 lx disponibles.



Gráfica 6. Comparación de iluminancia de caso de estudio y OLIM.

En la gráfica 6 se subraya que la azotea de estudio tiene obstrucción de luz directa en el amanecer hasta las 8:24, en el que existe un incremento. Es en ese mismo instante que supera el nivel de iluminación medido en el Observatorio y a las 16:15 horas se tiene únicamente iluminación difusa sobre el área de captación del sistema.



Gráfica 7. Desempeño de ducto comercial sobre plano de trabajo.

Mediodía solar					
Posición		HL:	12:41 T.S.V.		12:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	359	4	0.48	
1.29	2.88	428	7	0.57	
1.89	2.88	320	8	0.43	
2.49	2.88	362	10	0.48	
0.69	2.28	352	6	0.47	
1.29	2.28	412	24	0.55	
1.89	2.28	399	13	0.53	
2.49	2.28	401	15	0.54	
0.69	1.68	367	16	0.49	
1.29	1.68	392	17	0.52	
1.89	1.68	332	18	0.44	
2.49	1.68	376	19	0.50	
0.69	1.08	353	20	0.47	
1.29	1.08	333	21	0.44	
1.89	1.08	357	22	0.48	
2.49	1.08	364	23	0.49	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		70,820	100	70.82	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		74,819	106		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		20,160 lx		20.16	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		701.6 W/m2			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		698.6 W/m2			
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado			

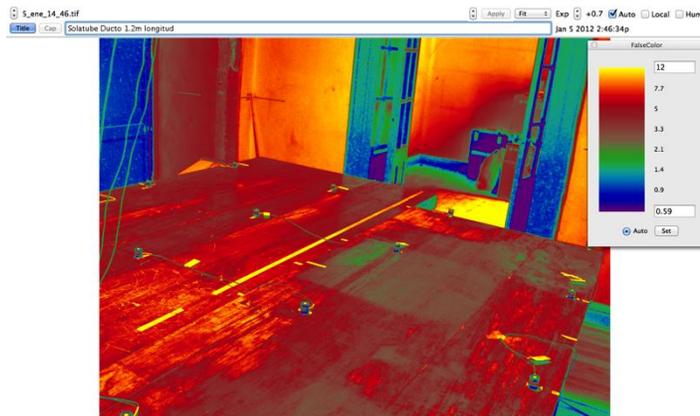
En el punto más alto del sol para el 4 de enero hay un valor de 74,819 lx disponibles, mientras que la luz en el interior a nivel del plano de trabajo se encontró en 428 lux y el valor más bajo en el mismo momento se encontró en 320 lx, por lo que se considera que el sistema funciona adecuadamente permitiendo aprovechar la luz natural entre las 9:00 a.m y las 14:00 horas, periodo en el que se mantienen los 300 lux mínimos para el uso de oficina.

MÁXIMA ILUMINANCIA CE				
Posición		HL:	12:12 T.S.V.	
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE
0.69	2.88	435	4	0.48
1.29	2.88	534	7	0.59
1.89	2.88	406	8	0.45
2.49	2.88	495	10	0.55
0.69	2.28	438	6	0.49
1.29	2.28	519	24	0.58
1.89	2.28	500	13	0.56
2.49	2.28	501	15	0.56
0.69	1.68	455	16	0.51
1.29	1.68	491	17	0.55
1.89	1.68	423	18	0.47
2.49	1.68	474	19	0.53
0.69	1.08	444	20	0.49
1.29	1.08	415	21	0.46
1.89	1.08	451	22	0.50
2.49	1.08	444	23	0.49
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		84,500	100	84.5
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		89,823	106	
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		22,770 lx		22.77
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		833 W/m2		
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		826 W/m2		
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado		

En la iluminancia máxima de 89, 823 lx el nivel de transmisión se encuentra entre 0.45% en las esquinas de la mesa de trabajo y el 55% al centro. Sin embargo. Como podrá observarse en las gráficas de distribución lumínica, la mayor intensidad lumínica se presenta en el lado norte de la mesa.



IMAGEN HDR

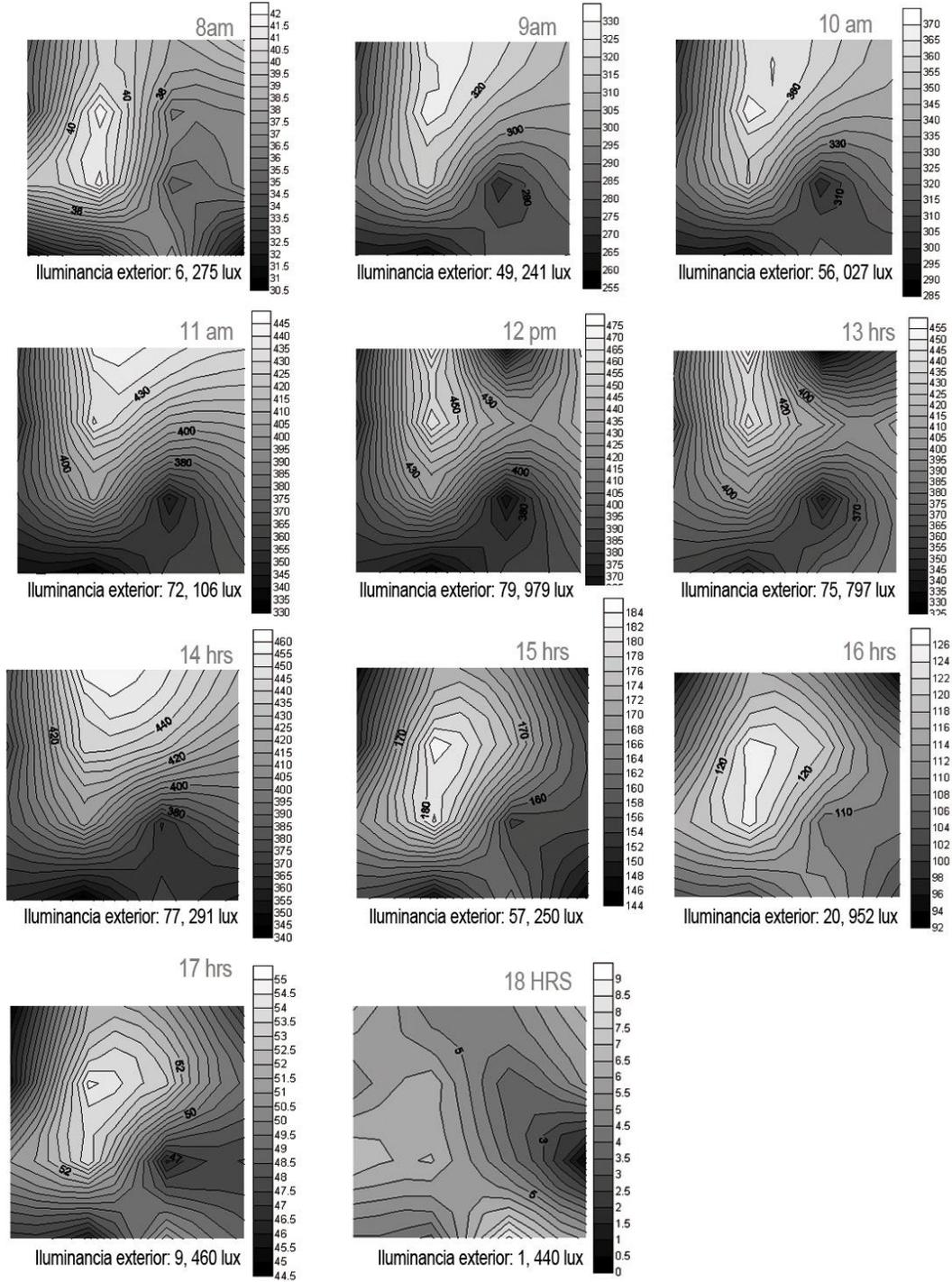


En la imagen HDR se observa en la escala gráfica que existe una gran diferencia en los niveles respecto del ducto blanco analizado anteriormente. Y se distribuye también de una manera más uniforme. En las fotografías de la derecha, que fueron tomadas casi en el mismo instante, se aprecia de manera visual la manera en que se distribuye la luz en el espacio a través de diferentes superficies que la transmiten por reflexión.

Los niveles de iluminación superiores a 300 lx se alcanzan con este ducto desde las 9 am y se terminan entre las 14:00 y las 15:00 horas, lo que en términos energéticos podría representar un ahorro durante ese periodo. Teniendo en cuenta la gráfica 6 se ve que el sistema tiene un

desempeño óptimo bajo iluminación directa, pero no con la componente difusa de iluminación natural.

Illuminancia horaria sobre plano de trabajo utilizando ducto comercial como STLN.



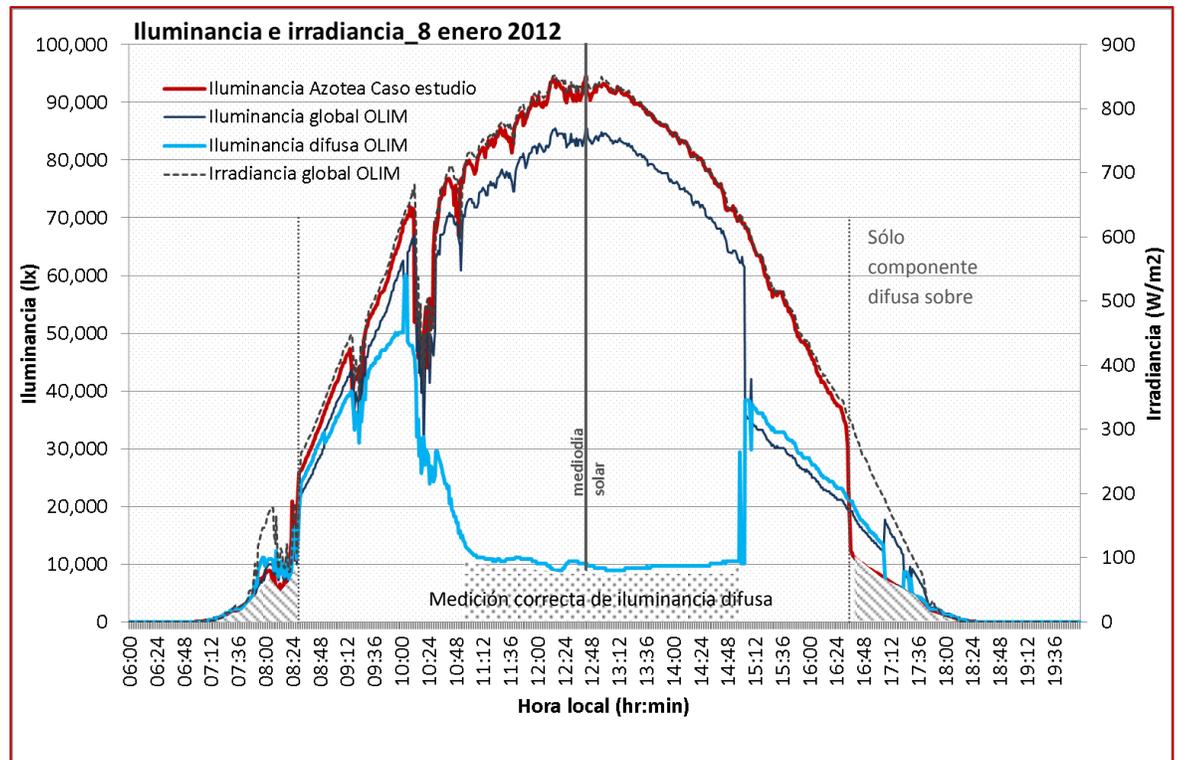


**DUCTO FORRADO CON FOIL BRILLANTE.**

En el análisis de este día se percibe despejado por la tarde y se observa mayor nubosidad entre las 8:00 a.m. y 11:00 a.m. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) lo establece de manera general como día despejado.

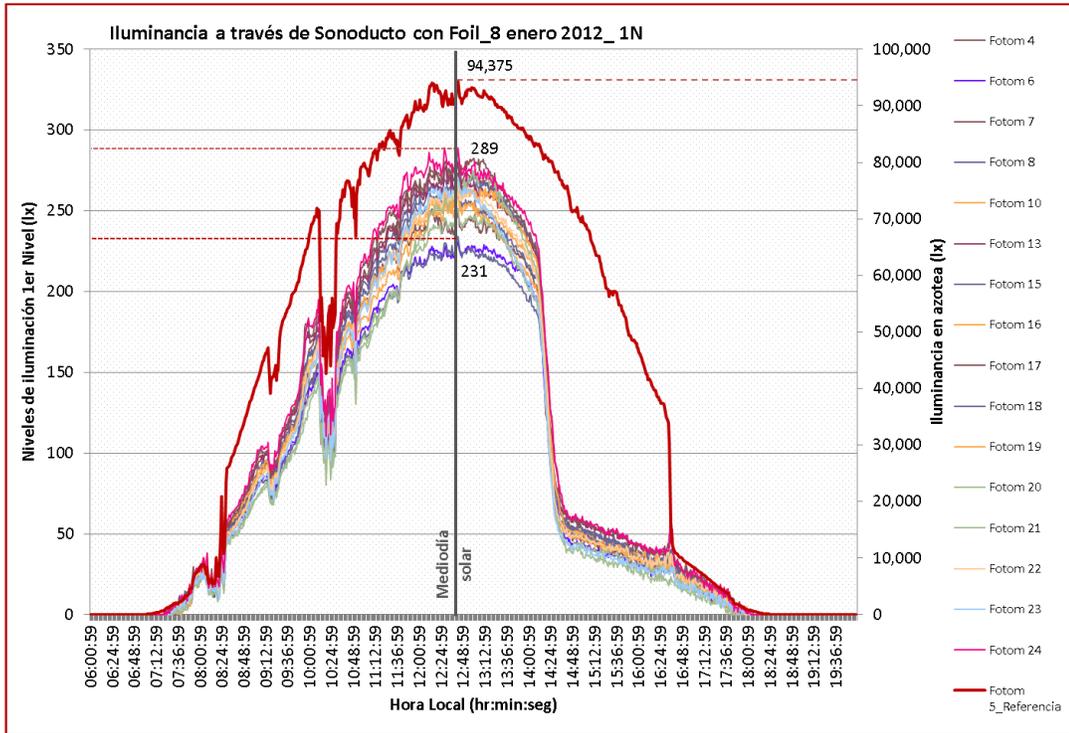
8 de enero de 2012	
Hora Local	Hora Solar
<b>AMANECEER CALCULADO*</b>	
07:12:00	06:28:52
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:14:00	17:30:52
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:43:08	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
11:02:00	

En este día por mantenimiento al Observatorio sólo se tienen datos correctos de luz difusa entre las 10:40 y las 13:00 horas, por lo que los datos en la gráfica 8 solo deberán tomarse en ese intervalo de tiempo. Sin embargo siguiendo irradiancia e iluminancia globales del OLIM y al compararla con la iluminancia global medida en la azotea del caso de estudio, se puede observar, al igual que las gráficas anteriores, que antes de las 8:00 am y después de las 16:30 horas el sistema recibirá únicamente luz difusa.



**Gráfica 8 Comparación de Iluminancias para el 8 de enero para la prueba del ducto de acabado con Foil.**

En los resultados de Foil, se encuentra que los niveles de iluminación más altos registrados se encuentran por debajo de los 300 lx, aun cuando se tienen poco más de 90,000 lx disponibles en el momento en que el sol se encuentra en su punto más alto en el recorrido del 8 de enero de 2012. Sin embargo deja clara la posibilidad de generar alternativas de ductos reflexivos o de generar diseños con nuevos materiales económicamente viables para la conducción de luz natural en espacios que requieran iluminación entre 230 lx y 280 lx.



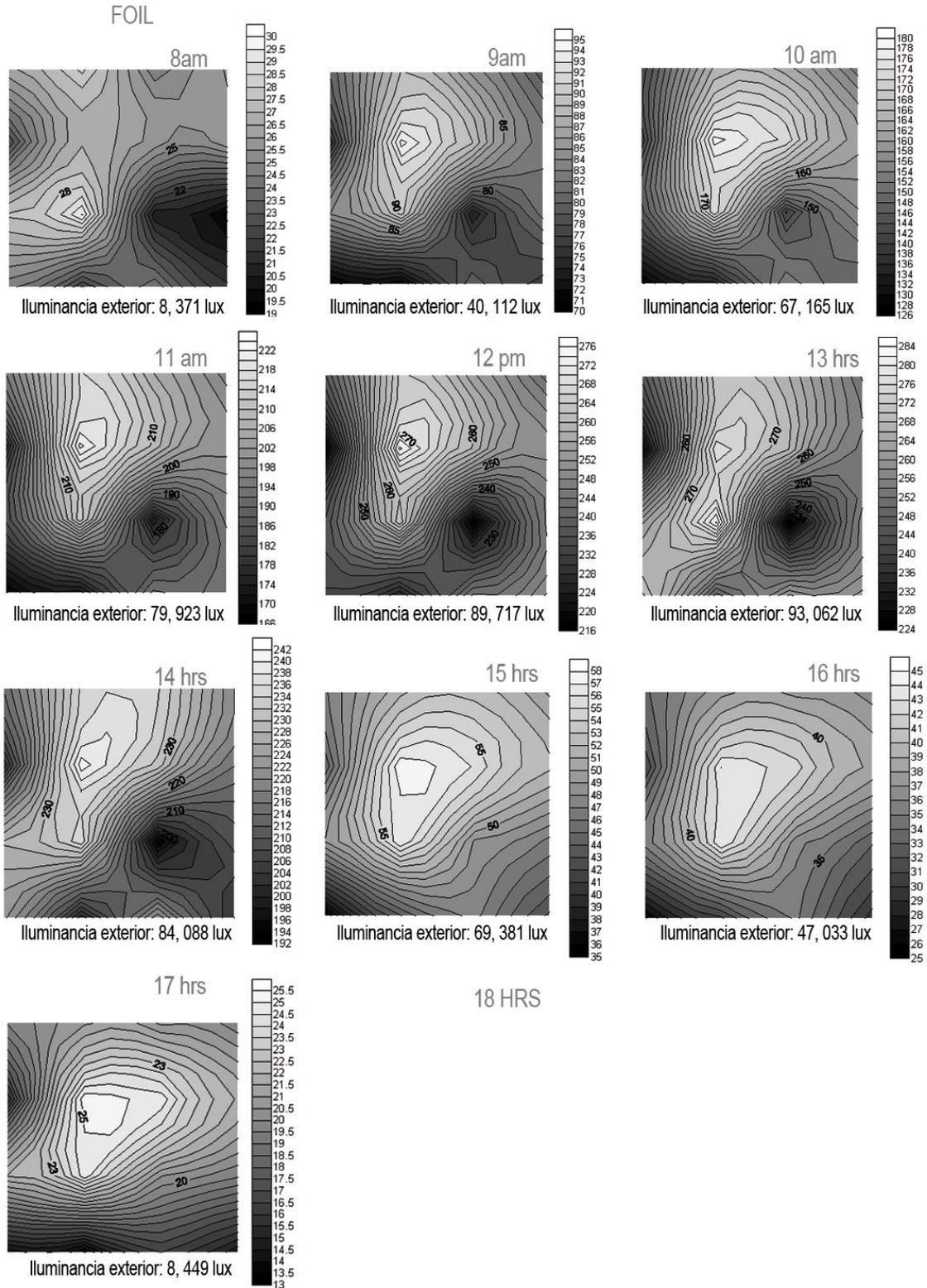
Mediodía solar y máxima iluminancia caso estudio					
Posición		HL:	12:43 T.S.V.		12:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	251	4	0.27	
1.29	2.88	278	7	0.29	
1.89	2.88	273	8	0.29	
2.49	2.88	259	10	0.27	
0.69	2.28	230	6	0.24	
1.29	2.28	289	24	0.31	
1.89	2.28	280	13	0.30	
2.49	2.28	264	15	0.28	
0.69	1.68	265	16	0.28	
1.29	1.68	286	17	0.30	
1.89	1.68	234	18	0.25	
2.49	1.68	265	19	0.28	
0.69	1.08	270	20	0.29	
1.29	1.08	250	21	0.27	
1.89	1.08	267	22	0.28	
2.49	1.08	270	23	0.29	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		85,500	100	85.5	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		94,375	110		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		10,080 lx		10.08	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		849 W/m2			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		829 W/m2			
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado			

Gráfica 9. Desempeño de ducto con Foil sobre área de trabajo.

En este día la iluminancia máxima en azotea coincidió con el mediodía solar y en general el ducto presenta un menor rendimiento que el ducto comercial y mayor al ducto blanco, oscilado entre 0.24% y 0.31% en transmisión.

Se obtienen niveles de iluminación superiores a los 200 lx entre las 11:00 y las 14:00 horas y el nivel máximo de luz en el plano de trabajo va cambiando a lo largo del día, sin embargo si se dividiera el plano de trabajo en dos, se ve que siempre hay mayor luz sobre la mitad poniente (izquierda).

Iluminancia horaria en plano de trabajo, bajo luz transmitida por el ducto con acabado interior con Foil.

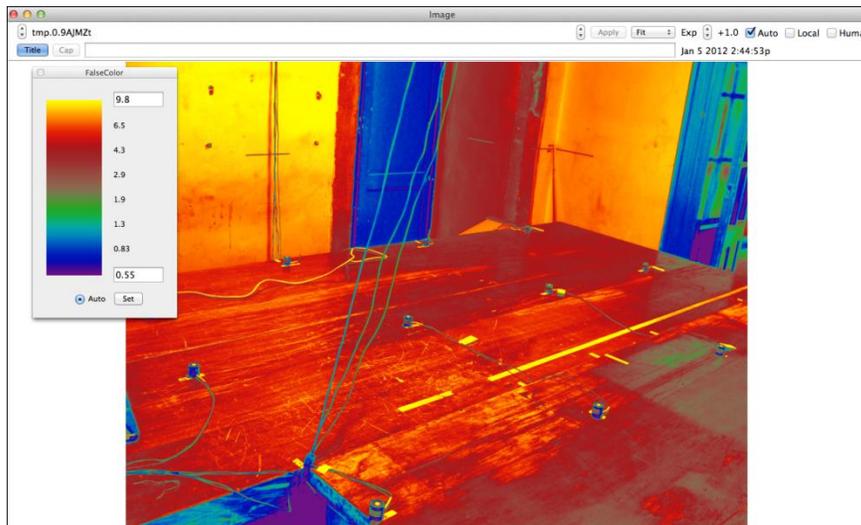


Con el acabado Foil que es más reflexivo que el blanco, pero menor que la película utilizada en el interior del ducto del sistema comercial, se parecía que los niveles de iluminación superiores a 250 lux se logran únicamente entre las 12:00 y las 14:00 horas, por lo que se requiere de iluminación artificial complementaria, sin embargo esta iluminación deberá ser menor que en un espacio sin aportación de luz natural, es por ello que aún en estos casos sigue contribuyendo a un ahorro energético y al bienestar de las personas.

En la imagen HDR en falsos colores se aprecia una distribución uniforme de la luz natural en el espacio arquitectónico y especialmente sobre el plano de trabajo, por lo que se puede apreciar que bajo una luz transmitida con un ducto con acabado en Foil es una luz más uniforme que en el sistema comercial, es decir con menor contraste.

Este tipo de imágenes también permite apreciar la manera en que las superficies reflejan en mayor o menor medida la luz captada, de acuerdo a si los acabados son de colores claros u oscuros respectivamente, como el color de la madera de las puertas y ventanas del caso de estudio, que a diferencia de las paredes blancas no permiten la transmisión de la luz.

Imagen HDR de distribución lumínica sobre plano de trabajo, bajo luz transmitida por ducto con acabado Foil.





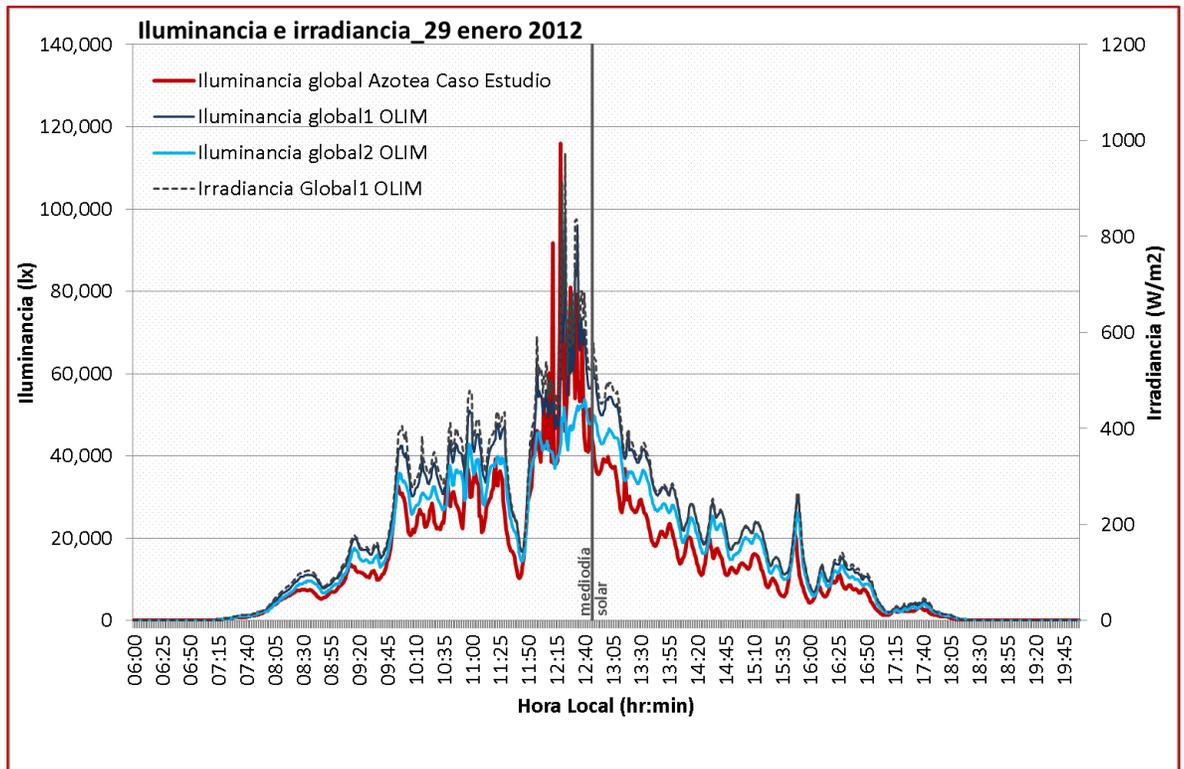
**SONOTUBO CON PELÍCULA CHROME MIRROR**

Este es el último ducto que se probó en la fase experimental dos, y fue el que presentó mejores resultados de los ductos hechos in situ para comparación con sistema comercial, estos resultados abren una posibilidad de manufactura in situ, alternativo al sistema comercial.

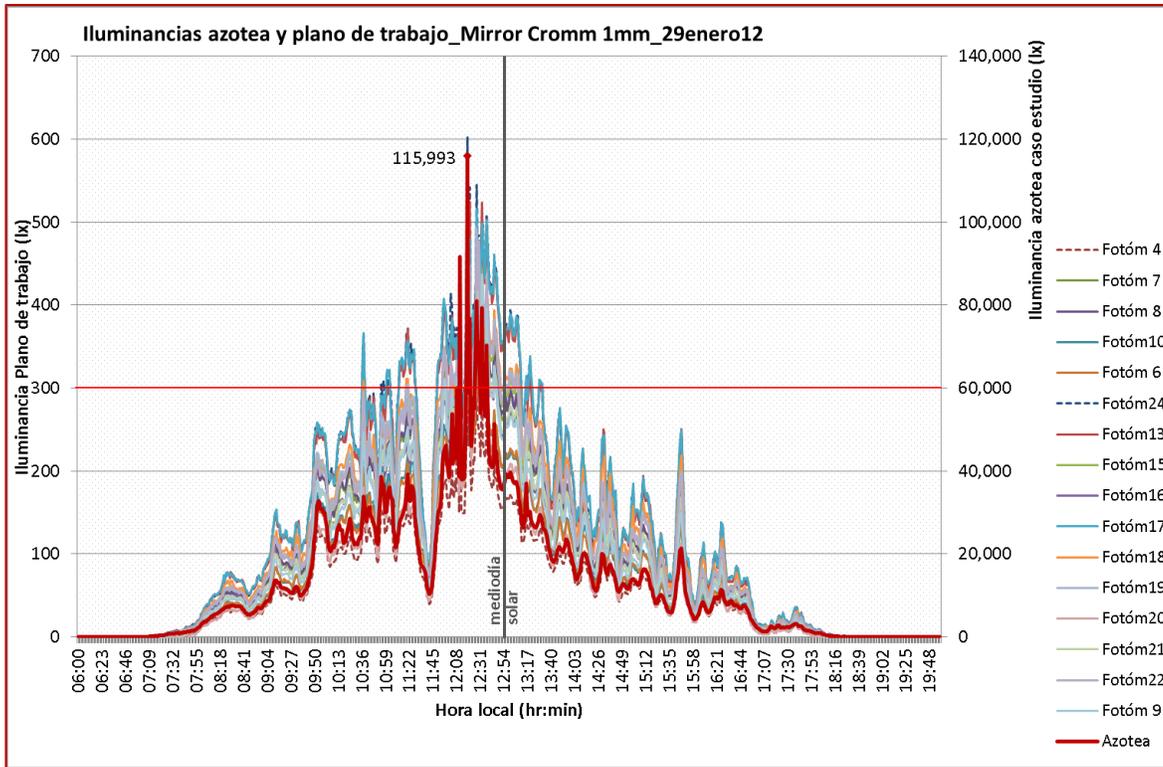
29 de enero de 2012	
Hora Local	Hora Solar
<b>AMANECER CALCULADO*</b>	
07:12:00	06:22:21
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:27:00	17:37:21
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:49:39	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
11:15:00	

Como se observa en la gráfica 10, este es un día completamente nublado, y únicamente en horas cercanas al mediodía solar incrementan tanto la irradiancia como la iluminancia teniendo máximas de 465.5 W/m<sup>2</sup> y 50,000 lux respectivamente.

El amanecer ocurre en el sitio a las 7:16 horas y el atardecer registrado en las mediciones ocurre a las 18:19 horas.



**Gráfica 10. Comparación de iluminancia de caso de estudio y OLIM para el 29 de enero de 2012**



Gráfica 11. Desempeño de ducto con Chrome Mirror en área de trabajo

MÁXIMA ILUMINANCIA CE					
Posición		HL:	12:19 T.S.V.		11:30
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	394	4	0.34	
1.29	2.88	525	7	0.45	
1.89	2.88	516	8	0.44	
2.49	2.88	451	10	0.39	
0.69	2.28	419	6	0.36	
1.29	2.28	603	24	0.52	
1.89	2.28	562	13	0.48	
2.49	2.28	530	15	0.46	
0.69	1.68	497	16	0.43	
1.29	1.68	582	17	0.50	
1.89	1.68	481	18	0.41	
2.49	1.68	556	19	0.48	
0.69	1.08	527	20	0.45	
1.29	1.08	503	21	0.43	
1.89	1.08	564	22	0.49	
2.49	1.08	542	9	0.47	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		50,290	100	50.29	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		115,993	231		
<b>Iluminancia glob 2 OLIM:</b>		44,430 lx		44.43	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		465.5 W/m2			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		416.5 W/m2			
<b>Tipo de cielo SMN:</b>	Nublado				

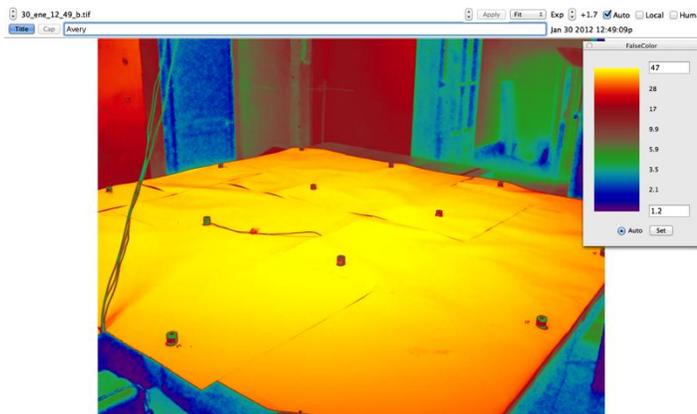
En la gráfica 11 se muestra que el comportamiento de la iluminancia en el interior tiene un comportamiento similar a la iluminancia exterior, situación que no se observó en las gráficas anteriores para las mediciones después de las 16:15. Y a pesar de se un día nublado, en el interior se alcanzan niveles de iluminación superiores a 450 lux en la mayor parte del plano de trabajo.

MEDIODÍA SOLAR				
Posición		HL:	12:49 T.S.V.	12:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE
0.69	2.88	171	4	0.43
1.29	2.88	300	7	0.76
1.89	2.88	303	8	0.77
2.49	2.88	228	10	0.58
0.69	2.28	231	6	0.59
1.29	2.28	399	24	1.01
1.89	2.28	394	13	1.00
2.49	2.28	318	15	0.81
0.69	1.68	273	16	0.69
1.29	1.68	400	17	1.02
1.89	1.68	338	18	0.86
2.49	1.68	330	19	0.84
0.69	1.08	202	20	0.51
1.29	1.08	279	21	0.71
1.89	1.08	320	22	0.81
2.49	1.08	267	9	0.68
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		58,830	100	58.83
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		39,391	67	
<b>Iluminancia global 2 OLIM</b>		49,640 lx		49.64
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		546 W/m2		
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		469.7 W/m2		
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Nublado		

Al mediodía solar los niveles de iluminación interior van de los 202 lux el mínimo y 400 lux el máximo. Siendo los puntos más desfavorables las esquinas del plano de trabajo.

Los niveles iguales o superiores a 250 lux se dan entre las 10 am y las 13 horas, pero la iluminancia externa es menor el día de experimentación con este ducto respecto de los días anteriores, por lo que se hace la relación de iluminancia interior con exterior, siendo entre 0.43% el mínimo y 1.00 el máximo, los datos en que se supere la unidad no deberán tomarse en cuenta, pues en este caso estará ocurriendo el fenómeno observado en la fase 1 con el ducto comercial en que hay concentración de rayos sobre los sensores.

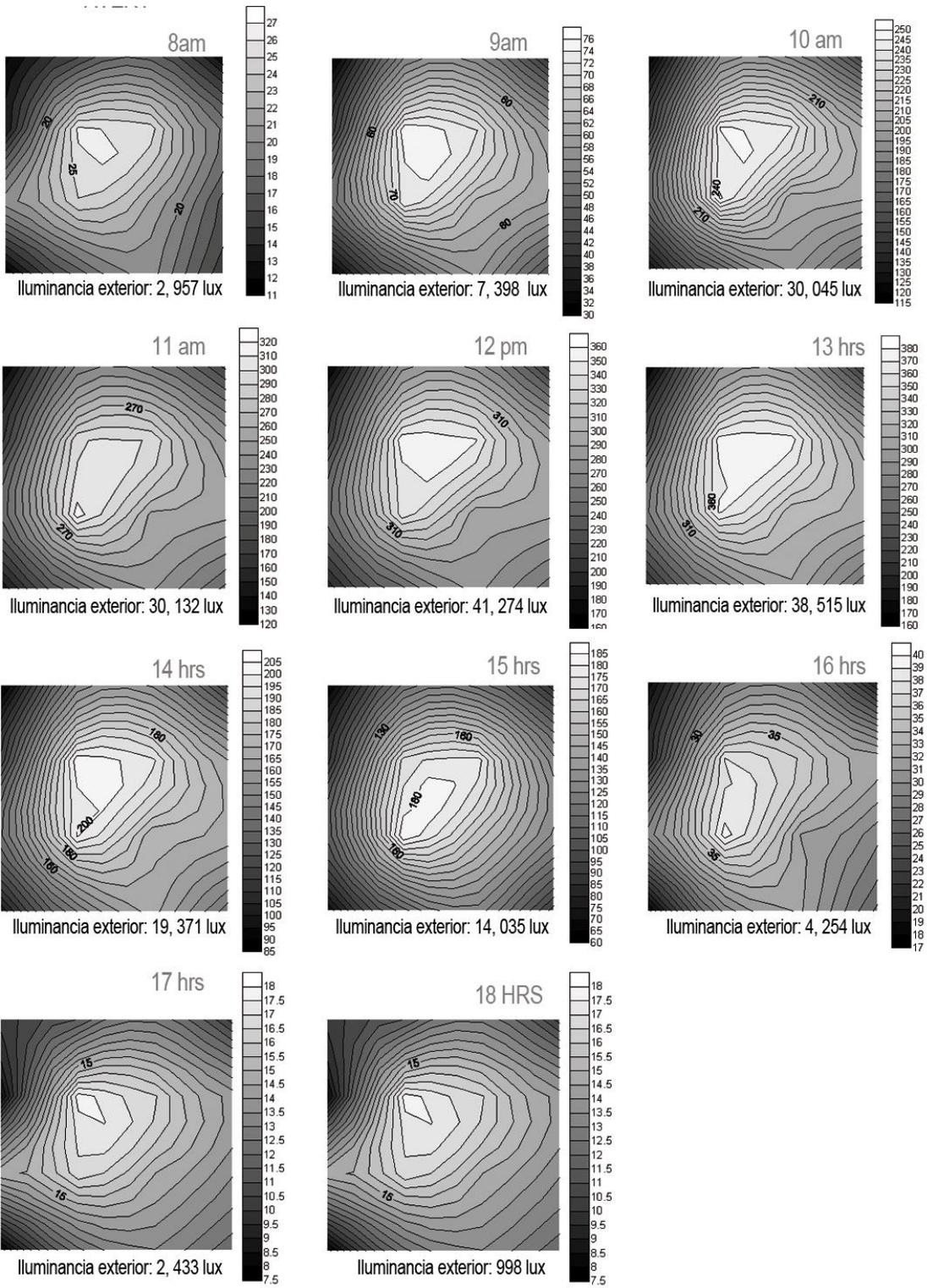
**IMAGEN HDR DE CHROME MIRROR**



La distribución lumínica sobre el plano de trabajo es uniforme, como puede apreciarse en la imagen HDR.

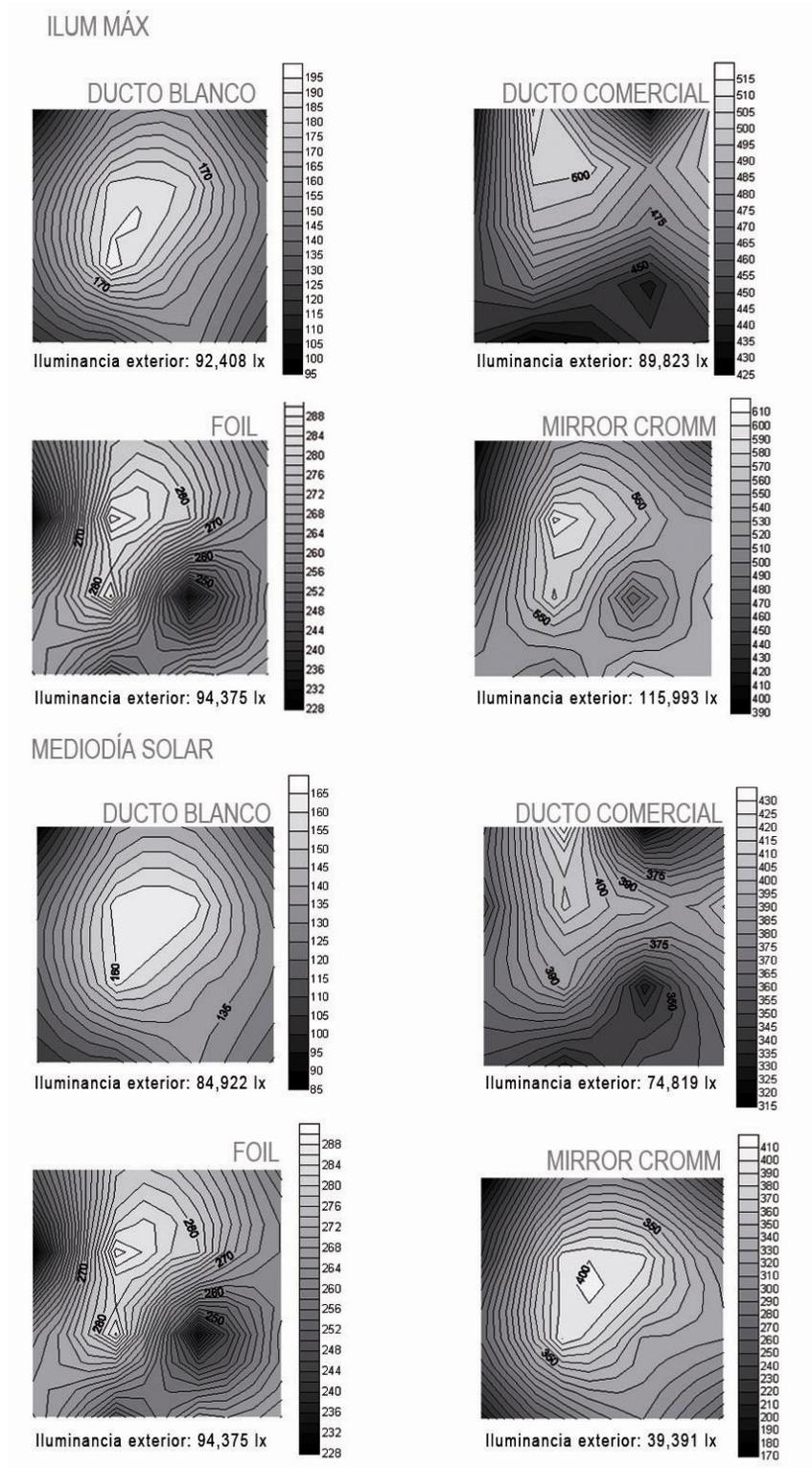


Distribución lumínica horaria de Ducto con Chrome Mirror en área de trabajo

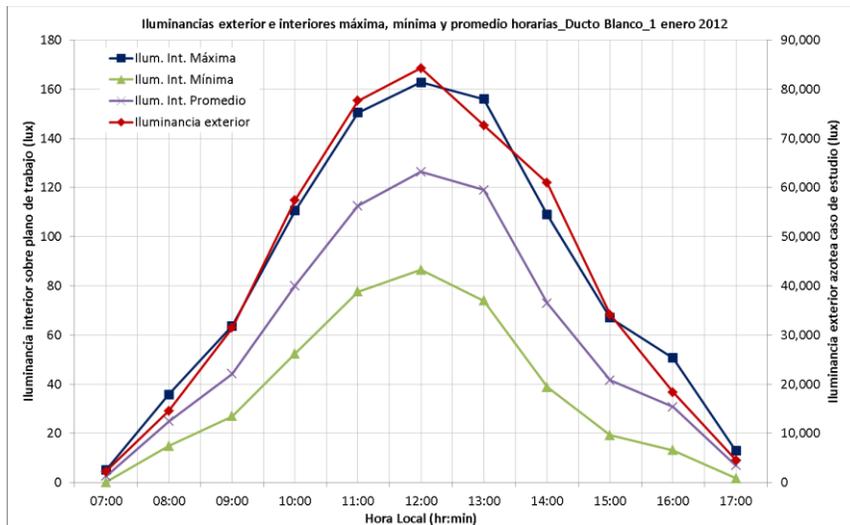


## COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE DUCTOS EN FASE 2

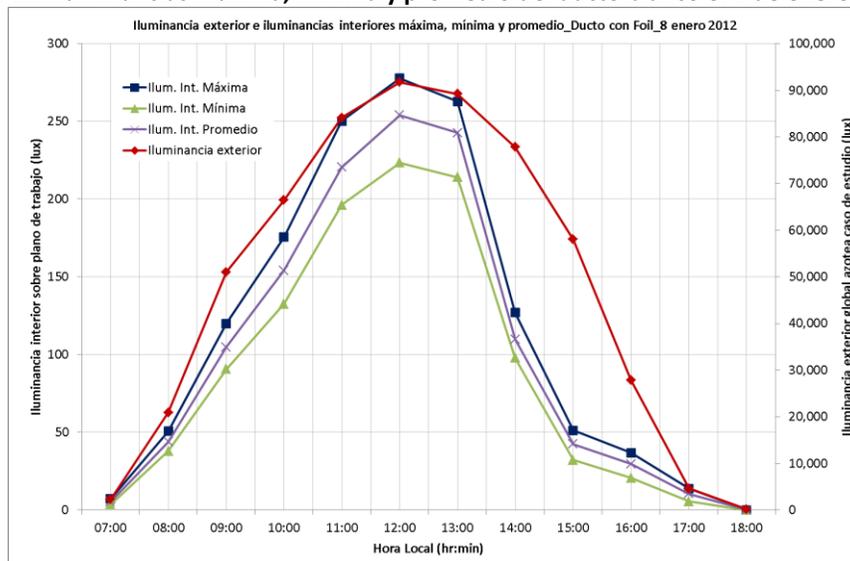
Comparación de distribución lumínica en momentos de iluminancia máxima y mediodía solar en cada caso .



Se presentan a continuación las gráficas obtenidas a partir de los datos promediados cada hora durante la presencia de luz solar entre las 7:00 y las 18:59 horas, de tal manera que se obtuvieron promedios por cada 60 registros, por ejemplo entre las 7:00 y las 7:59 se obtuvo el promedio de las mediciones del fotómetro 4 y ese valor representa a las 7:00 am para ese sensor, se hizo lo mismo con los registros de cada sensor y a partir de ahí se obtuvo el valor máximo, el mínimo y el promedio sobre el plano de trabajo en cada hora, se compara con el promedio de la iluminancia global exterior horaria de la azotea del caso de estudio. Las gráficas resultantes son las siguientes:



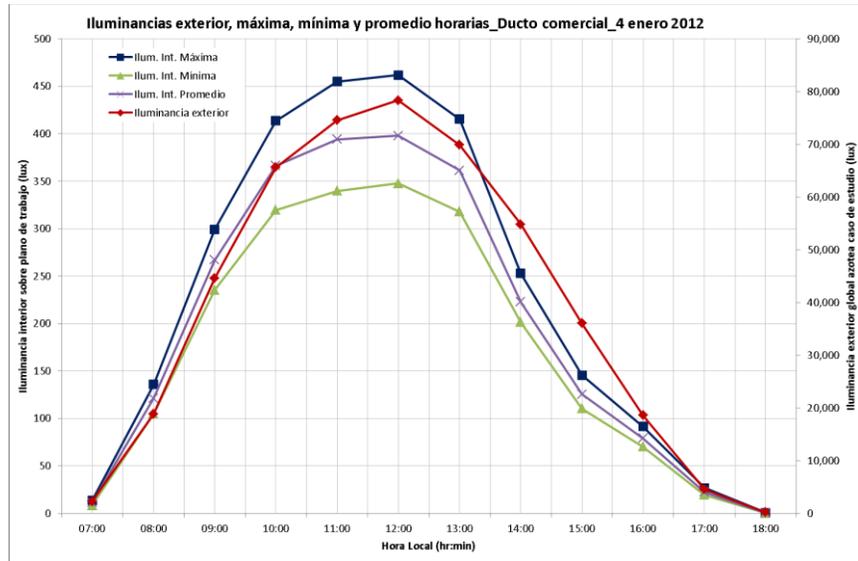
**Gráfica 12. Iluminancias máxima, mínima y promedio del ducto blanco el 1 de enero de 2012**



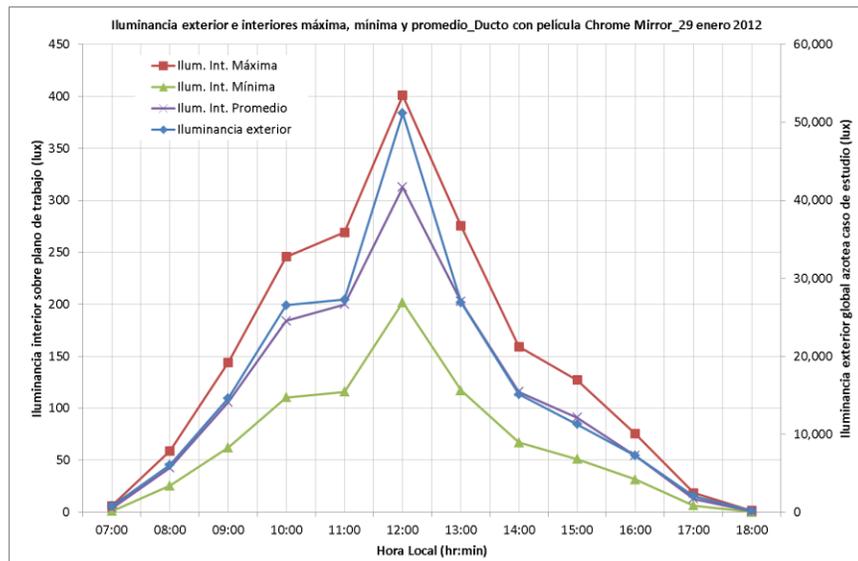
**Gráfica 13. Iluminancias máxima, mínima y promedio del ducto con película Foil el 8 de enero de 2012**

En la gráfica 12 se presentan los resultados del ducto blanco, este primer ducto sólo representa la cantidad de luz que entra por un vano de las mismas dimensiones que un ducto del Sistema de Transmisión de Luz Natural (STLN). Como se observa no alcanza los niveles requeridos para oficina de entre 250 y 300 lux y con niveles de iluminación disponibles en el exterior superiores a 80,000 lux en el punto máximo, sólo se logran 170 lux máximo y 80 lux en el punto más desfavorable

sobre el plano de trabajo, por lo que se descarta el uso de vanos de color blanco como opción para llevar luz natural en profundidad, se hace la comparación con el ducto de película Foil, que es el segundo de menor rendimiento de acuerdo a los resultados presentados anteriormente, en la gráfica 13 se puede ver que tiene mejor desempeño que el ducto blanco, pero que sólo cumple con la norma durante la iluminación máxima, y que tiene un descenso muy rápido después de las 14:00 horas, que es cuando deja de recibir luz directa en el área de captación, por lo que se puede concluir que estos sistemas tienen un desempeño óptimo bajo luz directa, pero no bajo luz difusa.



**Gráfica 14. Iluminancias máxima, mínima y promedio de ducto de sistema comercial TLN. Enero 4 de 2012**



**Gráfica 15. Iluminancias máxima, mínima y promedio de ducto con película Chrome Mirror el 29 de enero de 2012**

Al comparar el ducto del Sistema comercial de Transmisión de Luz Natural con el ducto con película Mirror Chrome se determina que el primero logra mantener los niveles requeridos

durante seis horas, mientras que el segundo únicamente por cuatro horas. Sin embargo se vuelve a observar en la gráfica 14 que al sistema le afecta no recibir luz directa y descienden de manera considerable los niveles de iluminación en el interior. Este descenso se parecía en menor magnitud en la gráfica 15 debido a que es un día nublado y el sistema recibe únicamente luz difusa durante todo el día. Esta información se complementa con las tablas presentadas a continuación en las que se presenta el ángulo de incidencia del rayo solar y el número de reflexiones que éste hace en el interior del ducto.

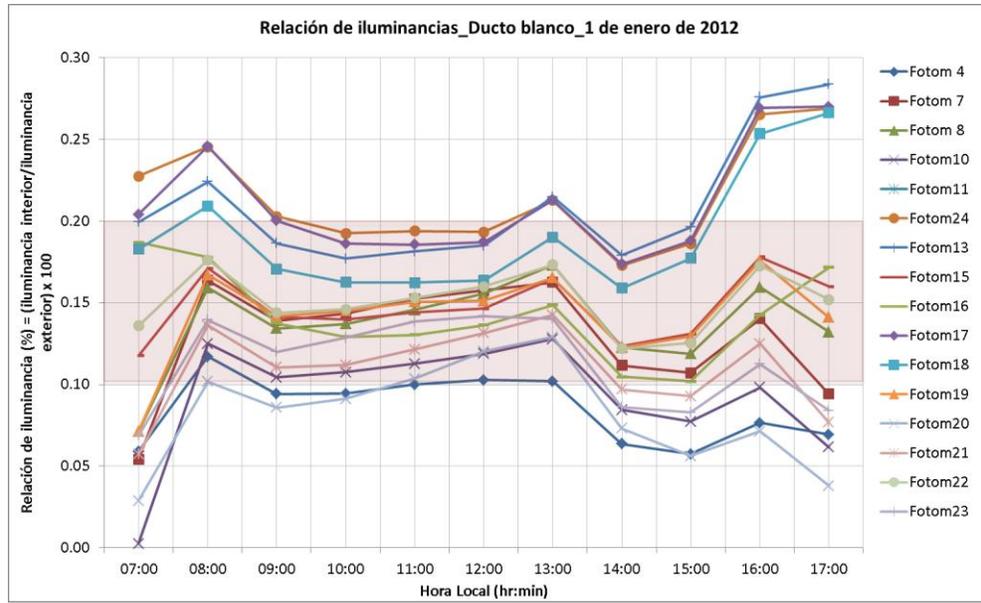
## RELACIÓN DE ILUMINANCIAS.

En las gráficas anteriores se presentan los resultados en lux debido a que es en esta unidad en que se determina si cumple o no con el desempeño esperado, sin embargo en las siguientes gráficas se determinará el factor denominado Relación de Iluminancia que relaciona la iluminancia interior con la exterior para obtener en porcentaje el rendimiento de cada ducto, esta gráficas fueron obtenidas del cociente del promedio horario de la iluminancia interior registrado en cada sensor colocado en el plano de trabajo y el promedio de la iluminancia global exterior en la azotea del caso de estudio.

Se obtienen además los ángulos solares promedio por cada hora y se hace el cálculo del número de reflexiones que tendrá que hacer el rayo solar en el interior del ducto, esperando ver los resultados descritos por otros autores que experimentaron con este tipo de sistemas, en los que se afirma que entre mayor número de reflexiones deba hacer el rayo solar en el interior del ducto se obtendrán iluminancias menores y una luz más uniforme sobre el plano de trabajo, mientras que con menor número de reflexiones se obtendrán niveles de iluminación superiores y una distribución menos uniforme, es decir habrá mayor contraste entre un punto de medición y otro.

Finalmente en la tabla se presenta la relación de cielo, que determina si el día es nublado, parcialmente nublado o despejado al relacionar la irradiancia difusa con la irradiancia global, esta escala es propuesta por IESNA y se describió en la sección 1.3 del marco teórico y aquí se aplica al caso de estudio con las mediciones obtenidas en el OLIM, puesto que en la azotea del caso de estudio únicamente se hicieron mediciones de iluminancia global.

Este factor no fue obtenido para ángulos bajos pues así lo establece la Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norteamérica (IESNA, por sus siglas en inglés), debido a que para ángulos solares bajo la irradiancia global es de valores muy cercanos a la irradiancia difusa y se puede apreciar en las gráficas 4, 6, 8 y 10, por lo que el valor representaría un cielo nublado. La escala es para coeficientes menores o iguales 0.3 es considerado cielo despejado, para valores entre 0.4 y 0.7 será considerado parcialmente nublado y para valores superiores a 0.8 se considerará como día nublado y en ningún caso el coeficiente superará a 1.



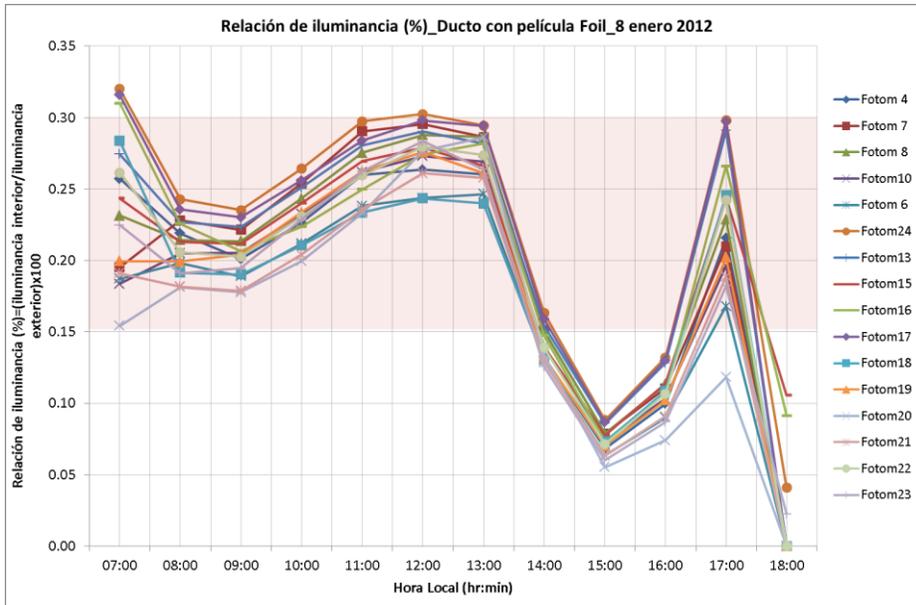
Gráfica 16. Relación de iluminancia interior/iluminancia exterior para ducto blanco 1 de enero de 2012

1 de enero					
Hora Local	Altitud Solar	azimuth	No. Reflexiones int. Ducto	Relación de cielo	Tipo de cielo
07:00	3.36	116.02	38		
08:00	15.68	122.26	8	0.5	parcialmente nublado
09:00	27.01	130.68	4	0.5	parcialmente nublado
10:00	36.72	142.24	3	0.3	Despejado
11:00	43.77	157.75	2	0.2	Despejado
12:00	46.89	176.67	2	0.2	Despejado
13:00	45.32	196.20	2	0.3	Despejado
14:00	39.44	213.03	3	0.4	parcialmente nublado
15:00	30.48	225.86	4	0.5	parcialmente nublado
16:00	19.59	235.23	6	0.6	parcialmente nublado
17:00	7.68	242.11	17		

En la gráfica 16 se aprecia que los fotómetros 24, 13, 17 y 18 que se encuentran al centro de la mesa de trabajo, por debajo del ducto son los que mejor desempeño tienen. La mayor frecuencia de los valores ocurre entre 0.10 y 0.20 %.

La altitud solar máxima para ese día es de 47° que ocurre a las 12:36 y el número de veces que el rayo solar incidirá en la superficie interna del ducto para ser reflejada es dos y es cuando hay mayores niveles de

iluminación, mientras que a las 7:00 a.m. de acuerdo a la gráfica 12 es cuando hay menores niveles de iluminación. Se calculó bajo la misma ecuación Relación de iluminancia= (iluminancia interior en un punto dado/iluminancia exterior) x 100 para conocer cuál sería el coeficiente requerido para obtener los 300 lux en el interior y con los niveles de iluminancia exterior que se dieron para ese día, es decir Relación de iluminancia=(300 lux/iluminancia exterior) x 100. De acuerdo a esta suposición sólo sería posible alcanzarlo entre las 9:00 am y las 15:00 horas, puesto que el coeficiente fuera de esas horas es superior a 1, es decir deberían transmitir más del 100% para alcanzar los 300 lux, lo que implicaría que más que transmisión deberá darse la concentración de rayos lumínicos. La relación de iluminancia necesaria para los 300 lux entre las 9 y las 15 horas debería ser: 0.95 a las 9:00, 0.52 a las 10:00, 0.38 a las 11:00, 0.35 a las 12:00, 0.41 a las 13:00, 0.49 a las 14:00 y 0.87 a las 15:00.



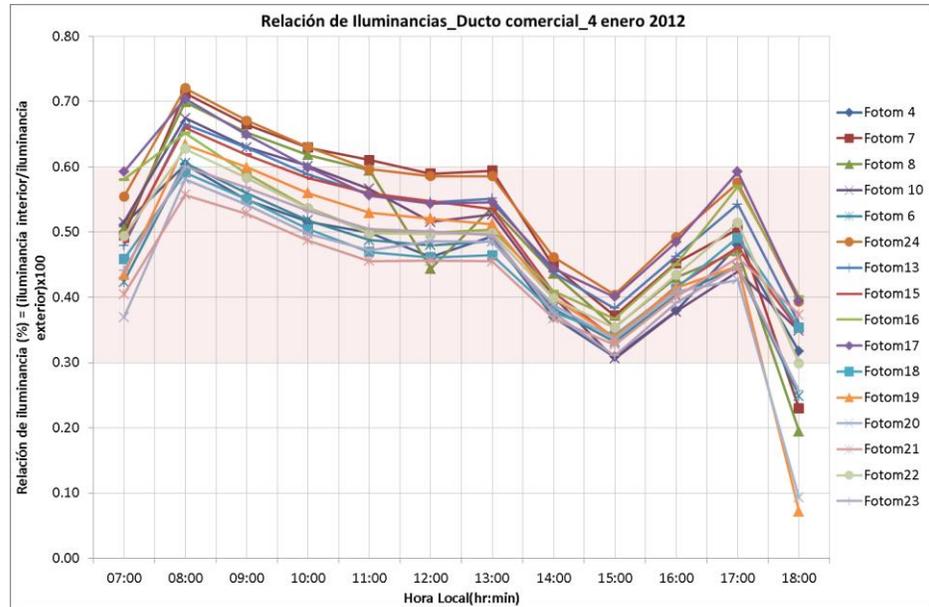
Gráfica 17. Relación de iluminancias para ducto con película Foil el 8 de enero de 2012

8 de enero					
Hora Local	Altitud Solar	azimuth	No. Reflexiones int. Ducto	Relación de cielo	Tipo de cielo
07:00	2.97	115.04	43		
08:00	15.42	121.20	8		
09:00	26.91	129.37	4	0.9	Nublado
10:00	36.85	140.80	3	0.5	parcialmente nublado
11:00	44.19	156.42	2	0.1	Despejado
12:00	47.61	175.55	2	0.1	Despejado
13:00	46.26	195.51	2	0.1	Despejado
14:00	40.50	212.79	3	0.1	Despejado
15:00	31.55	225.94	4		
16:00	20.63	235.50	6		
17:00	8.64	242.51	15		

El Foil presentó relación de iluminancia entre 0.15 y 0.30. El ángulo de altitud solar máxima fue de 48° en el medio día solar, momento en el que el rayo solar debió realizar 2 reflexiones para alcanzar la salida del ducto y en donde se dan los niveles de iluminancia interior más altos. Es un día más despejado que el día en que se probó el ducto blanco.

Y de acuerdo al cálculo de relación de iluminancias para alcanzar niveles de 300 lux sobre plano de trabajo para la iluminancia exterior presentada el 8 de enero, debió ser:

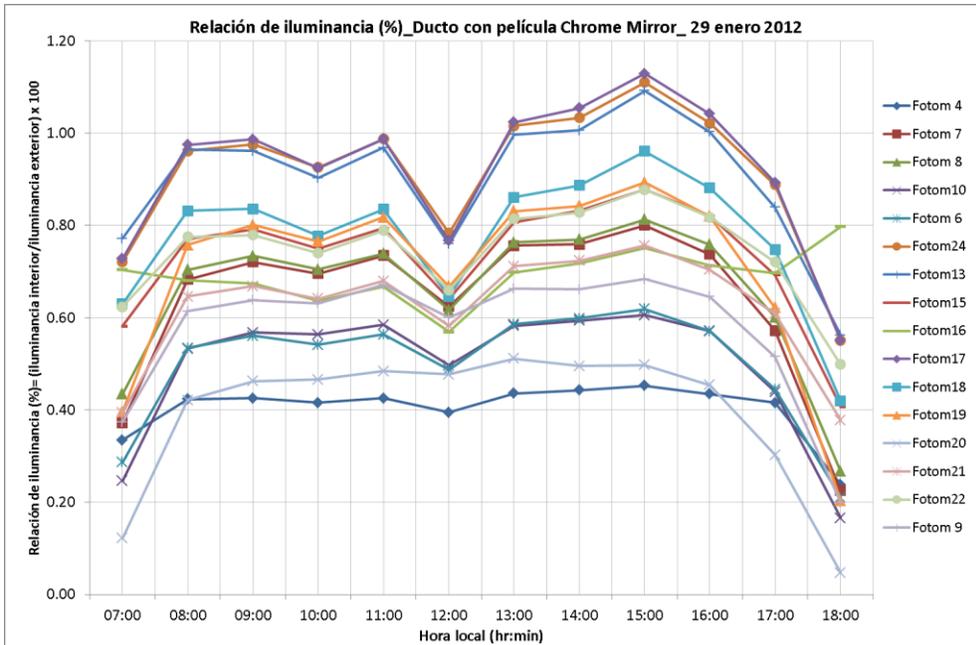
0.59 a las 9:00; 0.45 a las 10:00; 0.35 a las 11:00; 0.32 a las 12:00; 0.33 a las 13:00; 0.38 a las 14:00 y 0.51 a las 15:00. Fuera de esos horarios no es posible llevar niveles de iluminación adecuados con iluminación natural en niveles inferiores con las películas utilizadas durante la experimentación, por lo que se deberá contemplar el uso de iluminación artificial pero sólo como complemento de la luz natural.



Gráfica 18. Relación de iluminancias para ducto con ducto comercial.

4 de enero					
Hora Local	Altitud Solar	azimuth	No. Reflexiones int. Ducto	Relación de cielo	Tipo de cielo
07:00	3.18	115.635	40		
08:00	15.54	121.84	8	0.5	parcialmente nublado
09:00	26.94	130.21	4	0.3	Despejado
10:00	36.75	141.71	3	0.2	Despejado
11:00	43.92	157.19	2	0.2	Despejado
12:00	47.17	176.18	2	0.3	Despejado
13:00	45.70	195.87	2	0.4	parcialmente nublado
14:00	39.88	212.89	3	0.5	parcialmente nublado
15:00	30.93	225.85	4	0.6	parcialmente nublado
16:00	20.04	235.30	6	0.7	parcialmente nublado
17:00	8.09	242.24	16		

El coeficiente de la relación de iluminancias para el ducto comercial se encuentra entre 0.30 y 0.60 % que es en donde se da la mayor frecuencia de valores promedio. Es el de mejor rendimiento en el mayor número de horas posible de llevar iluminación natural en profundidad. Sin embargo se observa el mismo fenómeno que en los casos anteriores, sólo es posible aprovechar la luz natural entre las 9:00 y las 15:00 horas. En este rango el ducto comercial supera la relación de iluminancias requerida para alcanzar los 300 lux y por lo tanto el desempeño es óptimo. Durante este día el número de reflexiones máxima que hace el rayo solar es de 40 a las 7:00 am en donde la altura solar es de 3.18 en promedio y aún al mediodía el rayo solar incide en dos ocasiones en la superficie interna del ducto. Es un día parcialmente nublado.



Gráfica 19. Relación de iluminancias para ducto con película Chrome Mirror el 29 de enero de 2012

29 de enero					
Hora Local	Altitud Solar	azimuth	No. Reflexiones int. Ducto	Relación de cielo	Tipo de cielo
07:00	3.16	110.47	41		
08:00	16.10	116.51	8	0.9	nublado
09:00	28.24	124.58	4	0.9	nublado
10:00	39.02	135.88	3	0.9	nublado
11:00	47.35	151.83	2	0.9	nublado
12:00	51.66	172.59	2	0.8	nublado
13:00	50.74	194.97	2	0.9	nublado
14:00	44.88	214.27	2	0.9	nublado
15:00	35.56	228.51	3	0.9	nublado
16:00	24.22	238.56	5	0.9	nublado
17:00	11.79	245.84	11		

Este ducto es el único que alcanzó porcentajes de transmisión superiores al 1% en los sensores del centro del plano de trabajo que son los fotómetros 24, 13 y 17 (ver sección V metodología de trabajo), se coincide con la gráfica 11 y con los diagramas de distribución lumínica que a las 15:00 horas es cuando se presentan los niveles de iluminancia interior máxima, es posible que el contexto inmediato en el área de captación ayude a incrementar la iluminancia interna al tener un muro blanco en el lado norte que sirve como pantalla en donde se reflejan los rayos solares provenientes del sur en esta época del año, por lo que puede aportar al incremento de luz natural disponible en el caso de estudio, esto también se ve reflejado en las gráficas en las que se compara la iluminancia global medida en el observatorio y a iluminancia global en la azotea del caso de estudio, en la que en algunos momentos del día esta última presenta mayores niveles a pesar de encontrarse 3 niveles abajo del OLIM, por lo que se concluye que en la colocación de STLN es importante considerar al contexto inmediato como fuentes de iluminación indirecta o reflejada.

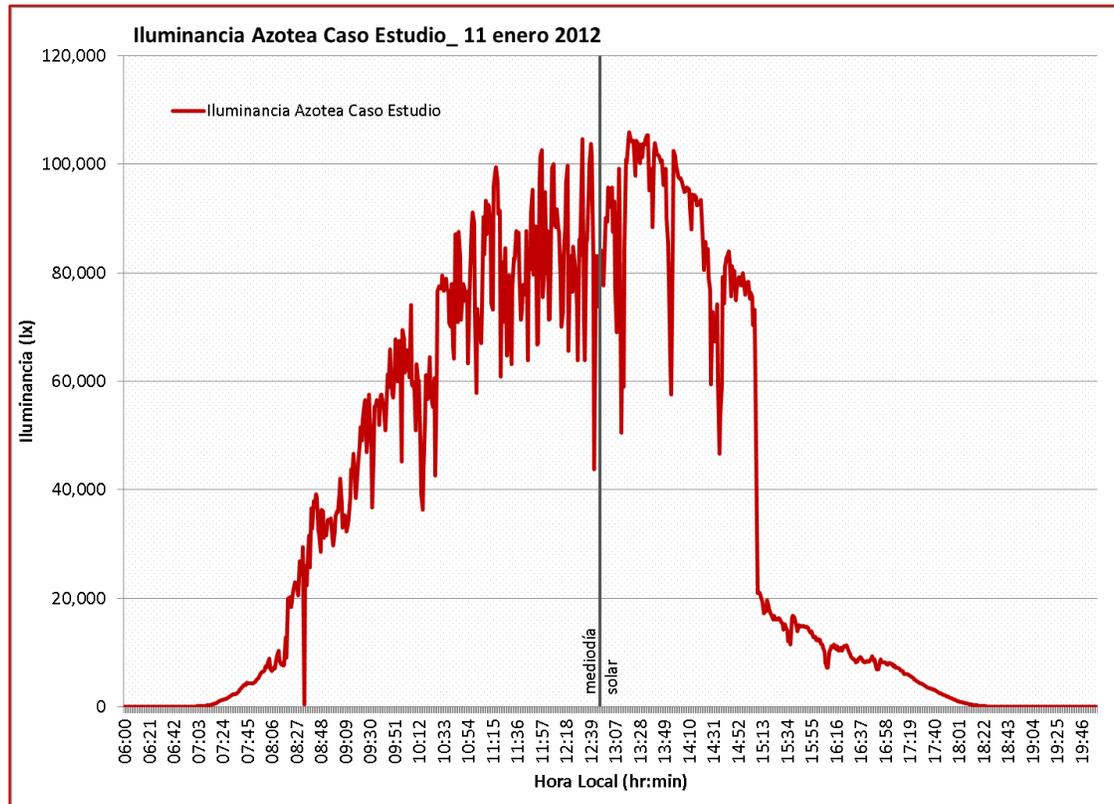
### 8.3 RESULTADOS DE FASE 3\_DESEMPEÑO DE SISTEMA COMERCIAL



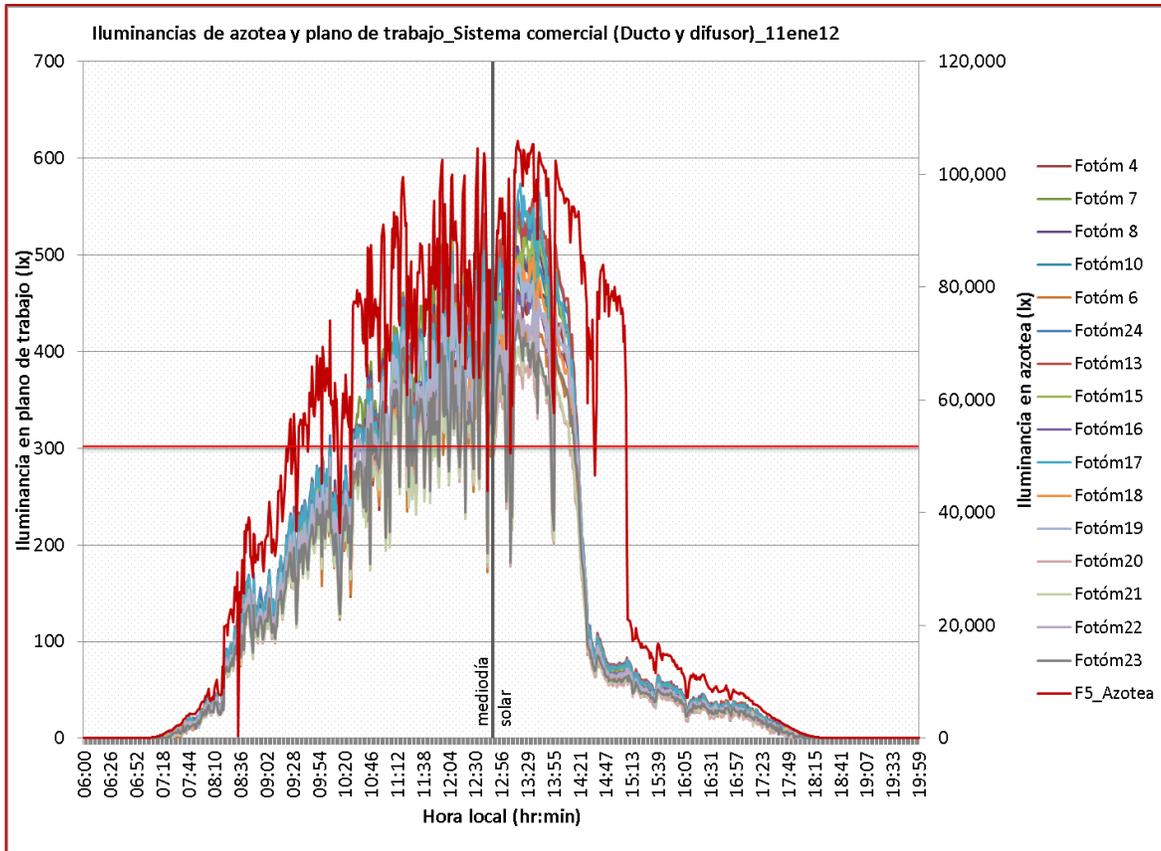
#### 1. DUCTO Y DIFUSOR COMERCIAL.

<b>11 de enero de 2012</b>	
<b>Hora Local</b>	<b>Hora Solar</b>
<b>AMANECER CALCULADO*</b>	
07:13:00	06:28:38
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:16:00	17:31:38
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:44:22	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
11:03:00	

Para este día no se cuentan con datos del OLIM debido a que se encontraba en mantenimiento, sin embargo el SMN determina a este día como despejado, pero en los registros se observa que fue un día con fuerte presencia de nubes porque existen muchas variaciones de iluminancia en periodos de tiempo muy breves, lo que indica que para este día deben analizarse los datos hora por hora para conocer el comportamiento del difusor del sistema comercial.



Gráfica 20. Registro de iluminancia en azotea de caso de estudio. 11 de enero de 2012



Gráfica 21. Rendimiento de ducto con difusor en plano de trabajo.

Mediodía solar					
Posición		HL:	12:44 T.S.V. 12:00		
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	348	4	0.42	
1.29	2.88	422	7	0.51	
1.89	2.88	433	8	0.52	
2.49	2.88	395	10	0.48	
0.69	2.28	327	6	0.39	
1.29	2.28	425	24	0.51	
1.89	2.28	439	13	0.53	
2.49	2.28	394	15	0.47	
0.69	1.68	343	16	0.41	
1.29	1.68	407	17	0.49	
1.89	1.68	359	18	0.43	
2.49	1.68	377	19	0.45	
0.69	1.08	318	20	0.38	
1.29	1.08	323	21	0.39	
1.89	1.08	352	22	0.42	
2.49	1.08	335	23	0.40	
		VALOR (lx)	%	Klx	
		Iluminancia gl Azotea CE:	83,044	100	
Tipo de cielo SMN: Despejado					

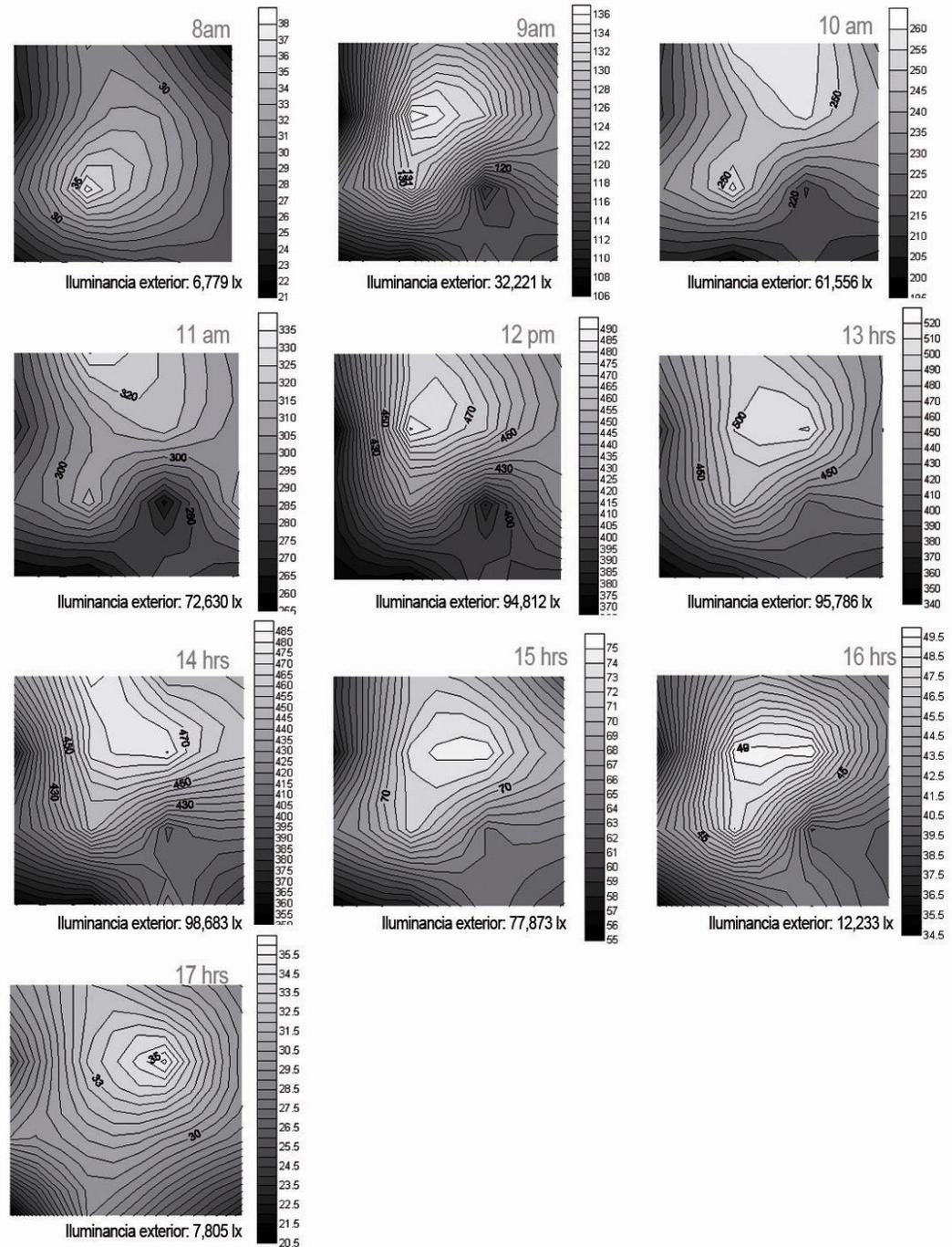
MÁXIMA ILUMINANCIA CE					
Posición		HL:	13:19 T.S.V. 12:35		
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	464	4	0.44	
1.29	2.88	534	7	0.50	
1.89	2.88	509	8	0.48	
2.49	2.88	482	10	0.46	
0.69	2.28	440	6	0.42	
1.29	2.28	557	24	0.53	
1.89	2.28	547	13	0.52	
2.49	2.28	498	15	0.47	
0.69	1.68	459	16	0.43	
1.29	1.68	562	17	0.53	
1.89	1.68	494	18	0.47	
2.49	1.68	490	19	0.46	
0.69	1.08	386	20	0.36	
1.29	1.08	405	21	0.38	
1.89	1.08	441	22	0.42	
2.49	1.08	433	23	0.41	
		VALOR (lx)	%	Klx	
		Iluminancia gl Azotea CE:	105,898	100	
Tipo de cielo SMN: Despejado					

Al hacer la comparación de la iluminancia en el plano de trabajo proveniente ducto y la proveniente del ducto con el difusor, se observa que el rendimiento los niveles de iluminación disminuyen con el uso del difusor, pero la distribución de luz en el plano de trabajo es más

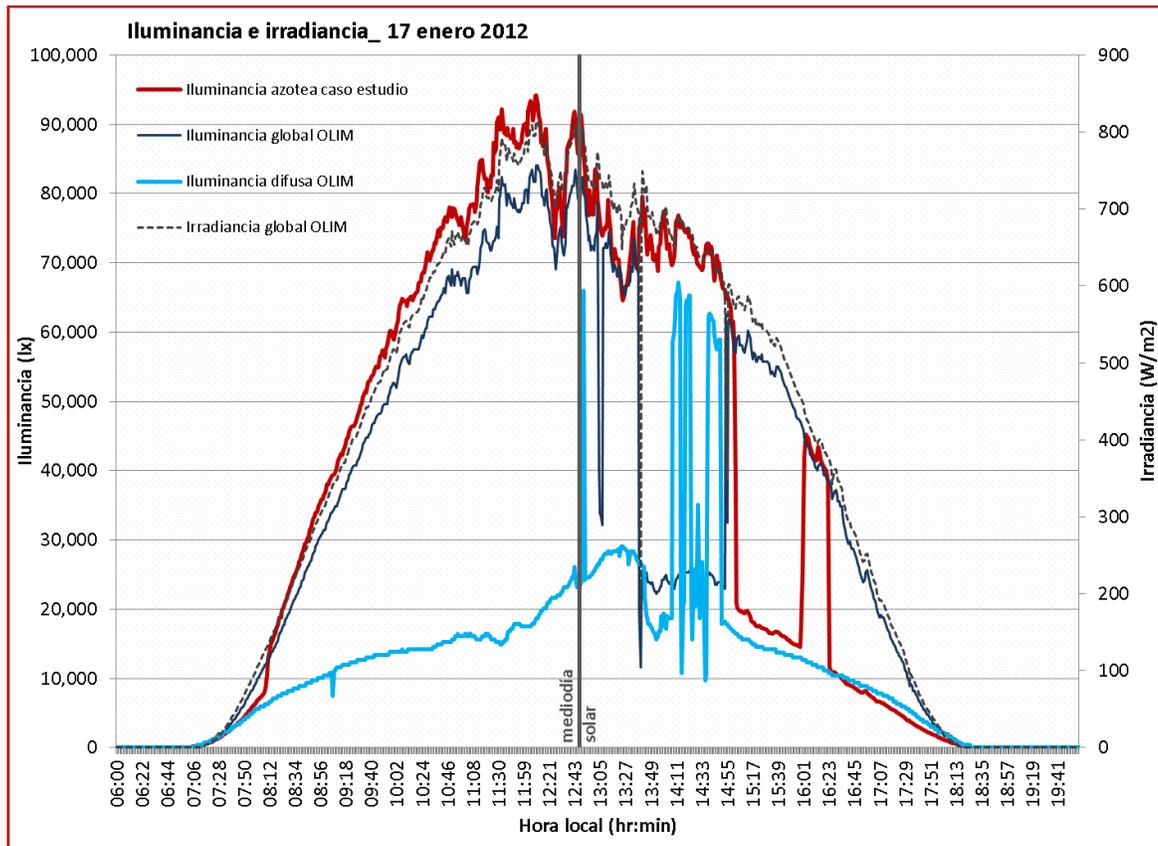
uniforme. Y se conserva el número de horas en que este sistema provee de luz natural al espacio arquitectónico con suficientes niveles de iluminación según reglamentación mexicana.

Distribución lumínica del ducto con el difusor comercial en plano de trabajo

DIFUSOR Y DUCTO SISTEMA COMERCIAL



## 2. SISTEMA COMERCIAL COMPLETO (Domo, ducto y difusor)

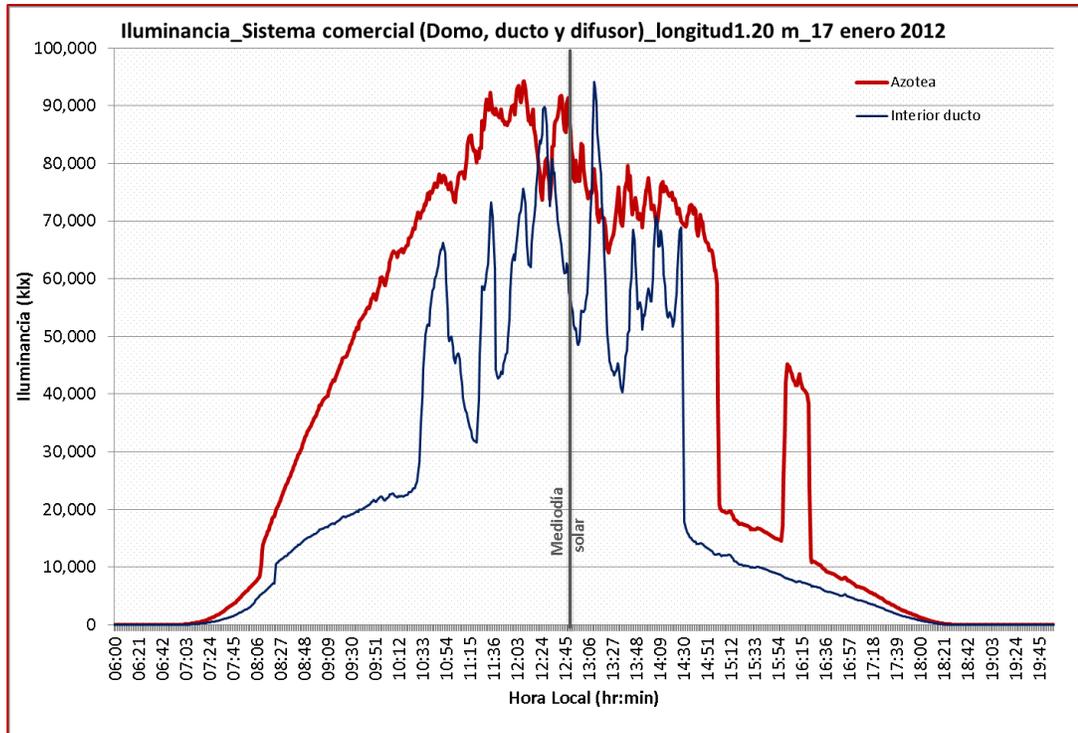


Gráfica 22. Iluminancia del 17 de enero de 2012 para el análisis del sistema comercial completo

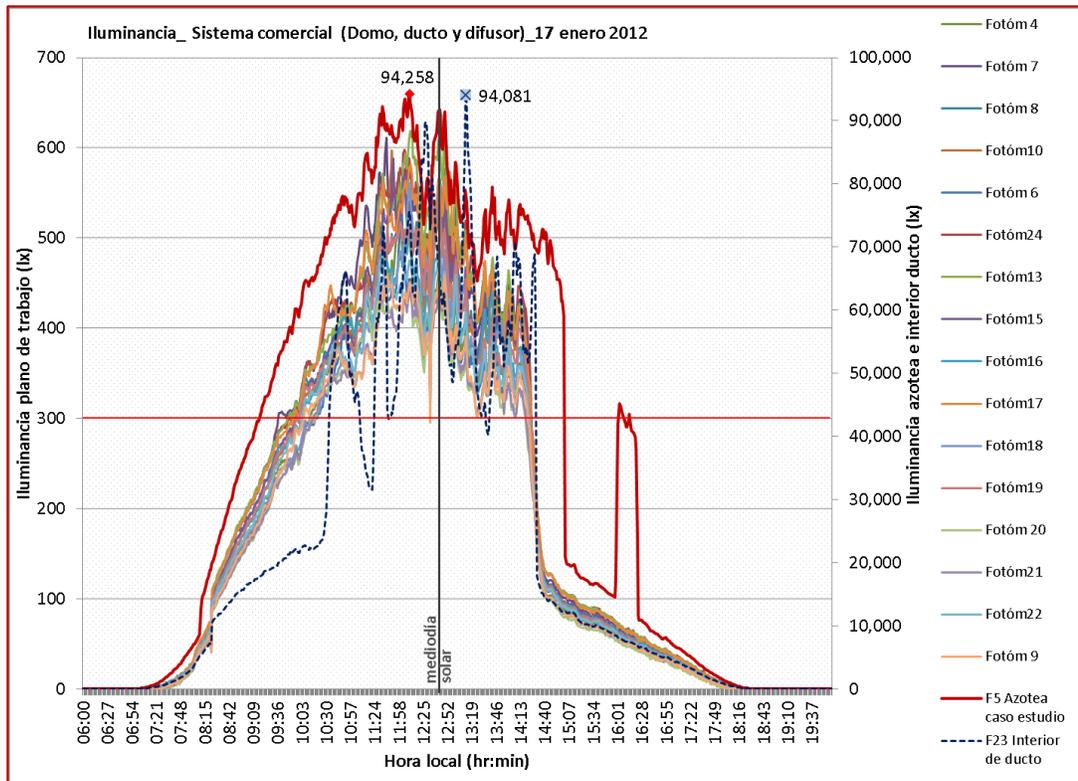
17 de enero de 2012	
Hora Local	Hora Solar
<b>AMANECER CALCULADO*</b>	
07:13:00	06:26:26
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:20:00	17:33:26
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:46:34	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
11:07:00	

En la gráfica 22 se observa una caída en la medición de la iluminancia en el caso de estudio, entre las 14:30 y las 16:00 horas, después vuelve a aumentar, por lo que no deberá considerarse en ese lapso de tiempo, pues debe tratarse de horas en que se trabajó en la azotea de estudio y que se obstruyó por error el sensor o que se cambió de posición, ya que este comportamiento es irregular al compararse con las gráficas anteriores. Así mismo las mediciones de iluminancia difusa contienen algunos errores a las 12:45 y entre las 13:30 y las 15:00 horas, por lo que no deberán utilizarse específicamente ese lapso para ningún tipo de cálculo o como base para alguna suposición.

De manera general se observa el 17 de enero como un día parcialmente nublado.



Gráfica 23. Comparación de iluminancia en azotea e interior del ducto.



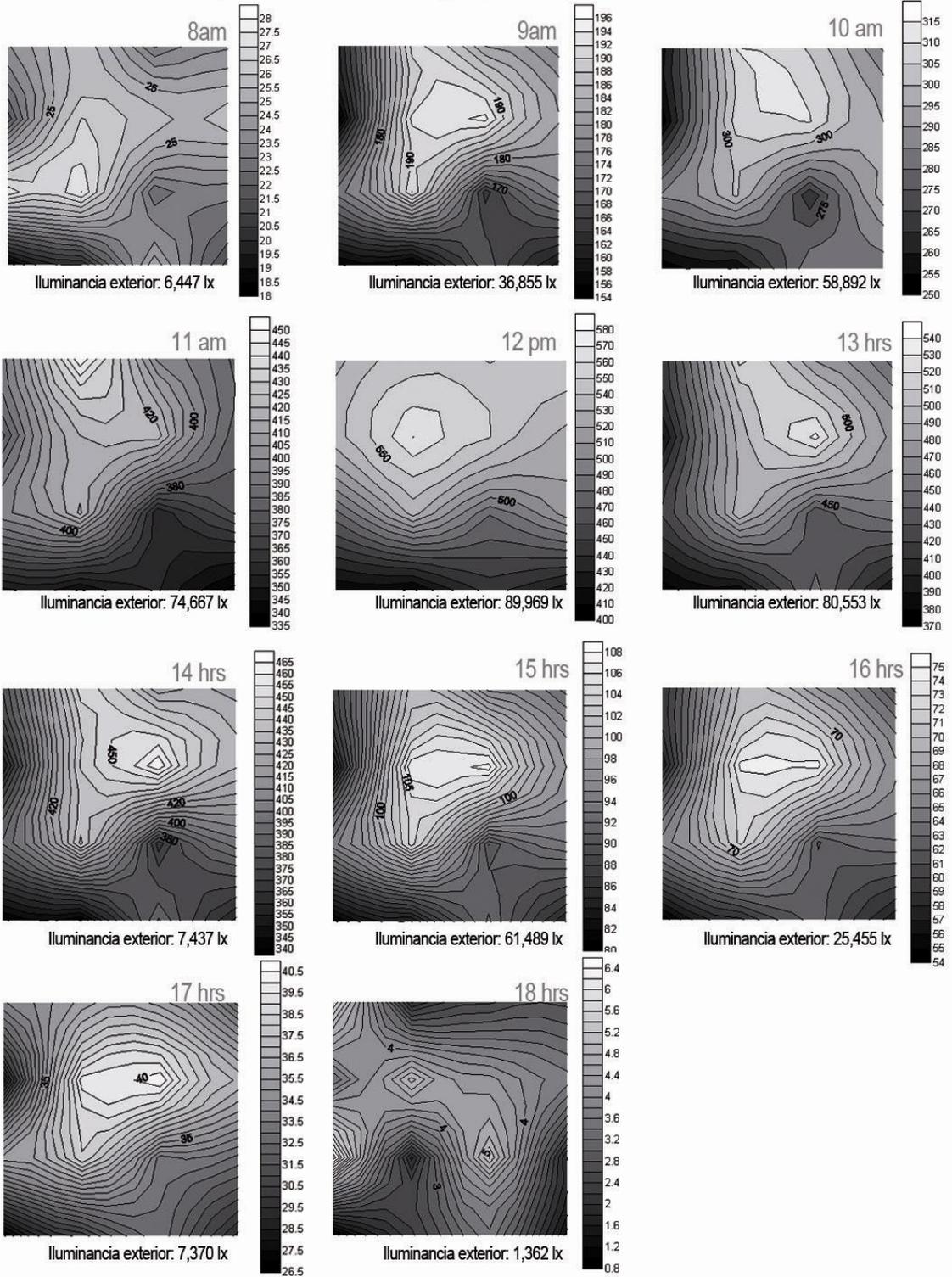
Gráfica 24 Rendimiento de sistema comercial completo (domo, ducto y difusor) en zona de trabajo

MEDIODÍA SOLAR					MÁXIMA ILUMINANCIA CE								
Posición		HL:	12:47 T.S.V.		12:00		Posición		HL:	12:10 T.S.V.		11:23	
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE			X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE		
0.69	2.88	432	4	0.51			0.69	2.88	499	4	0.53		
1.29	2.88	533	7	0.62			1.29	2.88	572	7	0.61		
1.89	2.88	540	8	0.63			1.89	2.88	530	8	0.56		
2.49	2.88	495	10	0.58			2.49	2.88	535	10	0.57		
0.69	2.28	415	6	0.49			0.69	2.28	454	6	0.48		
1.29	2.28	529	24	0.62			1.29	2.28	582	24	0.62		
1.89	2.28	565	13	0.66			1.89	2.28	616	13	0.65		
2.49	2.28	508	15	0.59			2.49	2.28	534	15	0.57		
0.69	1.68	450	16	0.53			0.69	1.68	505	16	0.54		
1.29	1.68	530	17	0.62			1.29	1.68	578	17	0.61		
1.89	1.68	458	18	0.54			1.89	1.68	554	18	0.59		
2.49	1.68	479	19	0.56			2.49	1.68	512	19	0.54		
0.69	1.08	409	20	0.48			0.69	1.08	438	20	0.46		
1.29	1.08	428	21	0.50			1.29	1.08	439	21	0.47		
1.89	1.08	436	22	0.51			1.89	1.08	472	22	0.50		
2.49	1.08	425	9	0.50			2.49	1.08	451	9	0.48		
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>					<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>		
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		78,660	100	78.66			<b>Iluminancia global OLIM:</b>		84,100	100	84.1		
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		85,425	109				<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		94,258	112			
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		23,140 lx		23.14			<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		18,660 lx		18.66		
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		777.7 W/m2					<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		814 W/m2				
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		773.3 W/m2					<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		809 W/m2				
<b>TIPO CIELO SMN:</b>		Despejado					<b>TIPO CIELO SMN:</b>		Despejado				

Al hacer la comparación de la distribución lumínica horaria sobre el plano de trabajo en los días en que se colocó únicamente el ducto del sistema comercial con un domo común y sin difusor, posteriormente el ducto y el difusor del sistema comercial y finalmente el domo, el ducto y el difusor, se observa que el ducto por si mismo es altamente eficiente, cuando se suma el uso del difusor los niveles de iluminación descienden, pero la distribución lumínica es más uniforme y las pérdidas no son significativas, por lo que se mantienen las horas de eficiencia del sistema, finalmente cuando se coloca el domo del sistema comercial se incrementan los niveles de iluminación, por lo que se concluye que la geometría del mismo funciona como un lente concentrador que redirige los rayos solares al interior del ducto, por lo que en esta fase se considera importante el diseño geométrico y la transmitancia del material utilizado en el domo, aspectos que determinarán la eficiencia en la fase de captación.

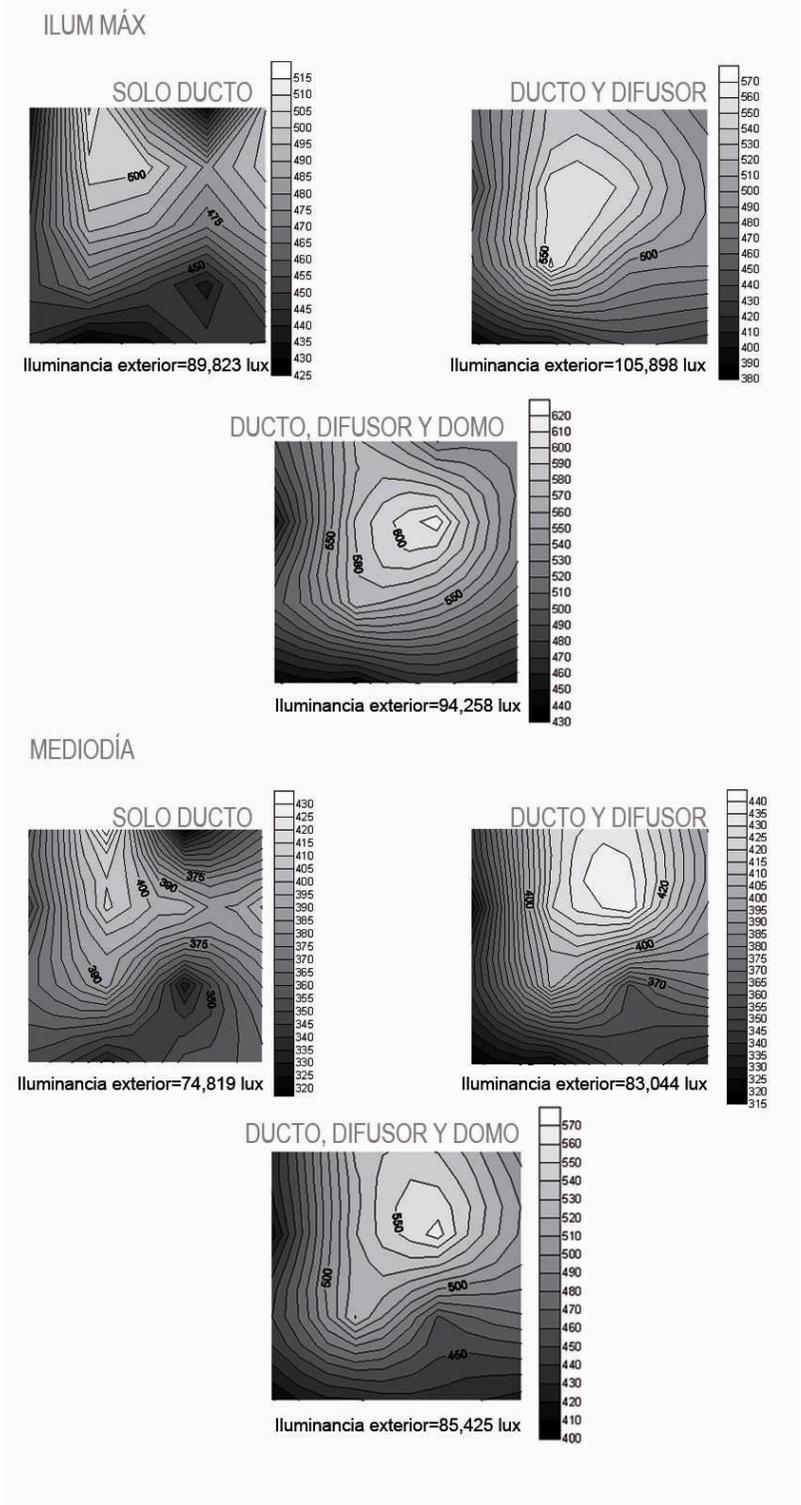
Distribución lumínica horaria para sistema comercial completo (domo, ducto y difusor) en longitud de 1.20 m para el día 17 de enero de 2012.

SISTEMA COMPLETO (domo, ducto 1.2m de longitud y difusor)

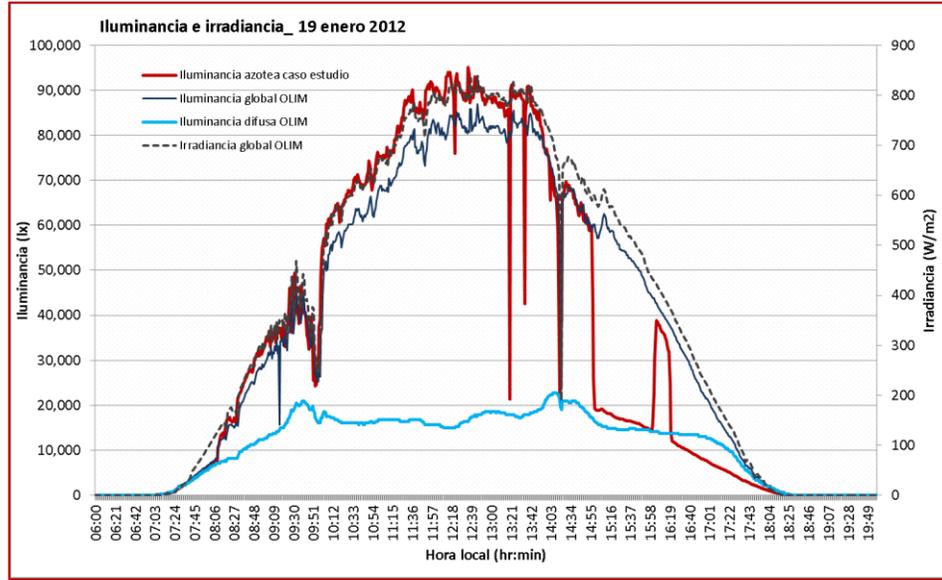




COMPARACIÓN DE SISTEMA COMERCIAL COMPLETO (domo, ducto y difusor)

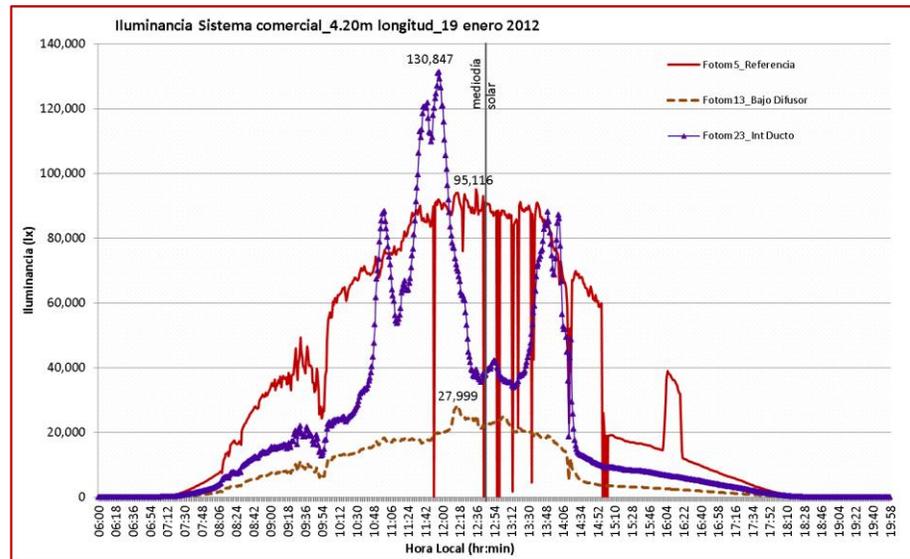


**SISTEMA COMERCIAL CON 4.20 m DE LONGITUD**



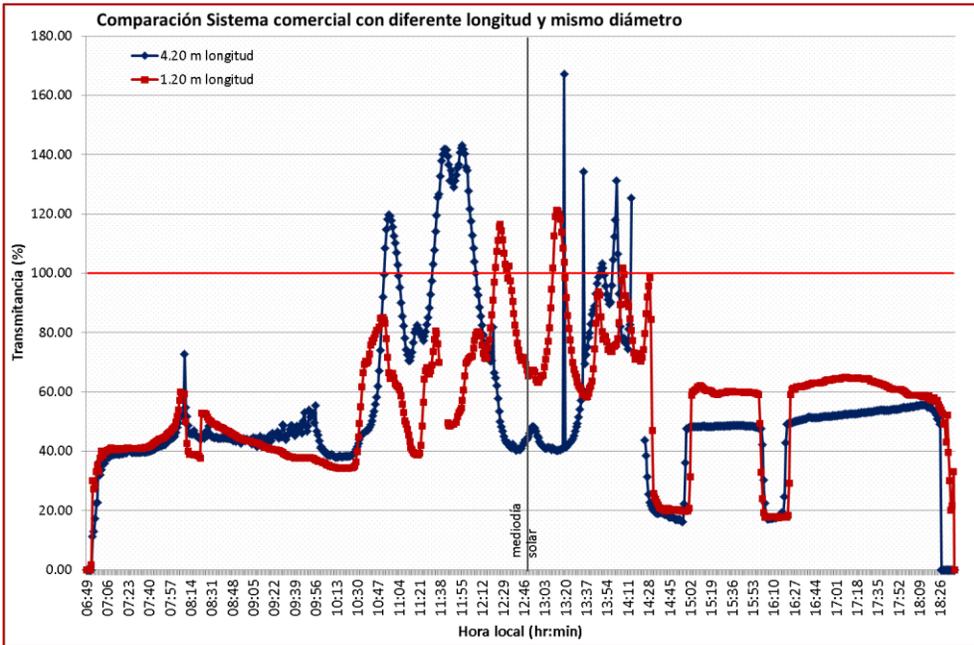
Gráfica 25 Irradiancia e iluminancia para el 19 de enero de 2012, para la prueba del sistema comercial con longitud de 4.20 m.

19 de enero de 2012	
Hora Local	Hora Solar
<b>AMANECEER CALCULADO*</b>	
07:13:00	06:25:48
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:21:00	17:33:48
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:47:12	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
11:08:00	

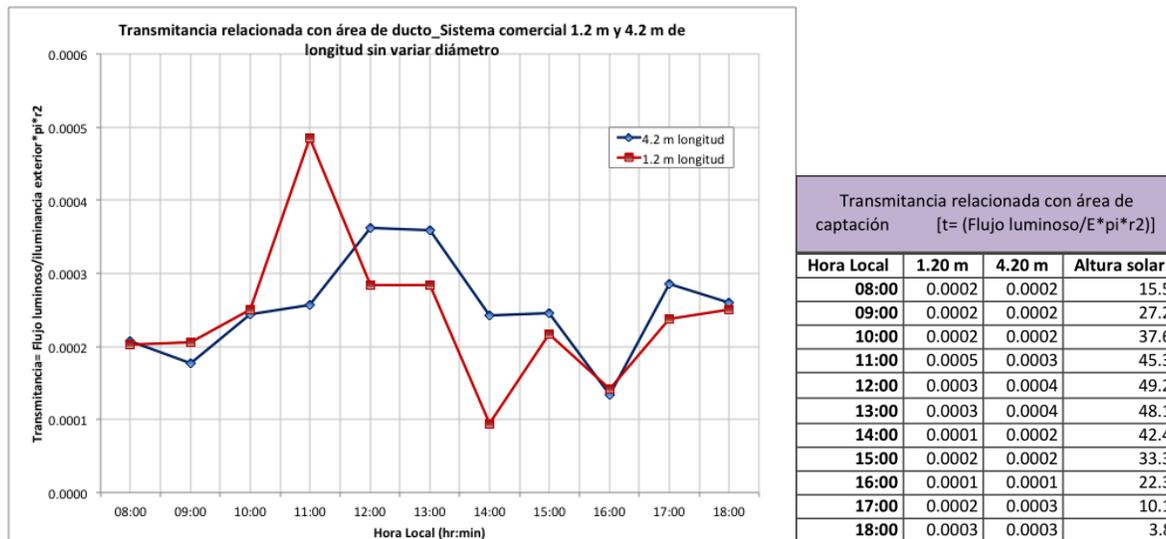


Gráfica 26. Comparación de iluminancias de sistema comercial en Azotea (zona de captación) interior del ducto y debajo del difusor.

La gráfica 26 se permite observar la proporción en que disminuye la luz cuando viaja a través del ducto y pasa por el difusor, sin embargo los niveles de iluminación son muy altos. Se indican valores máximos, que no ocurren en el mismo momento. La iluminancia máxima en la azotea ocurre cerca del mediodía solar, mientras que se vuelve a presentar el fenómeno de concentración de rayos solares sobre el sensor en el interior del ducto. El nivel máximo de iluminancia debajo del difusor es casi 28,000 lx.



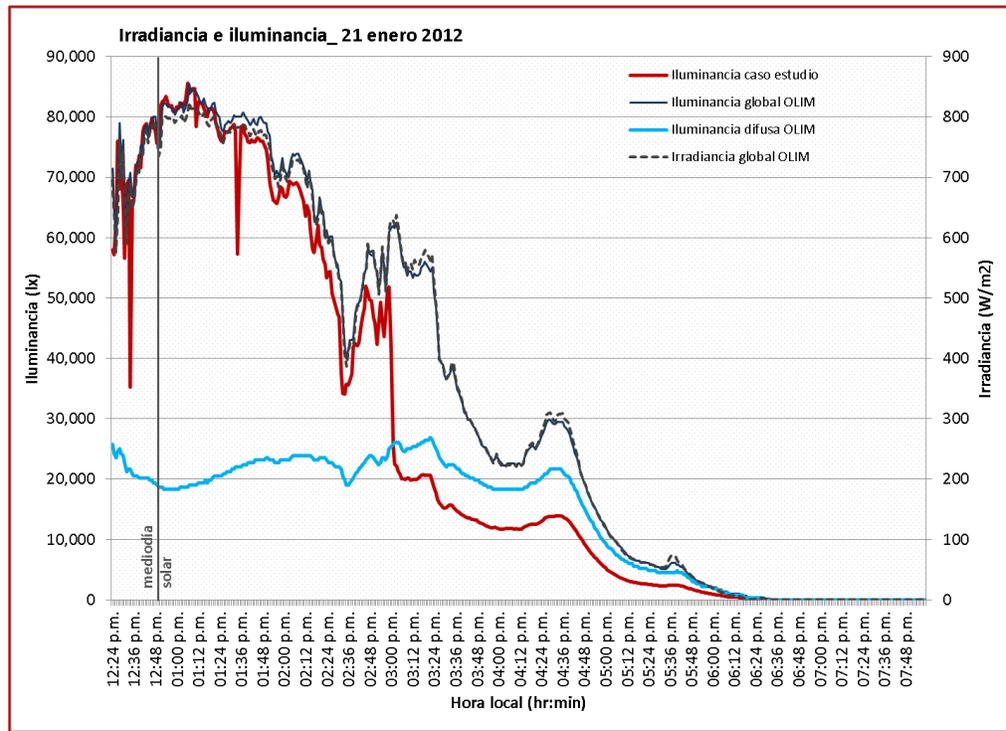
Gráfica 27 Comparación del rendimiento del sistema cuando existe una variación en la longitud



Gráfica 28. Comparación de transmittancia en ductos de sistema comercial de 1.20 m y 4.20 m

**CAPTACIÓN A 45°**

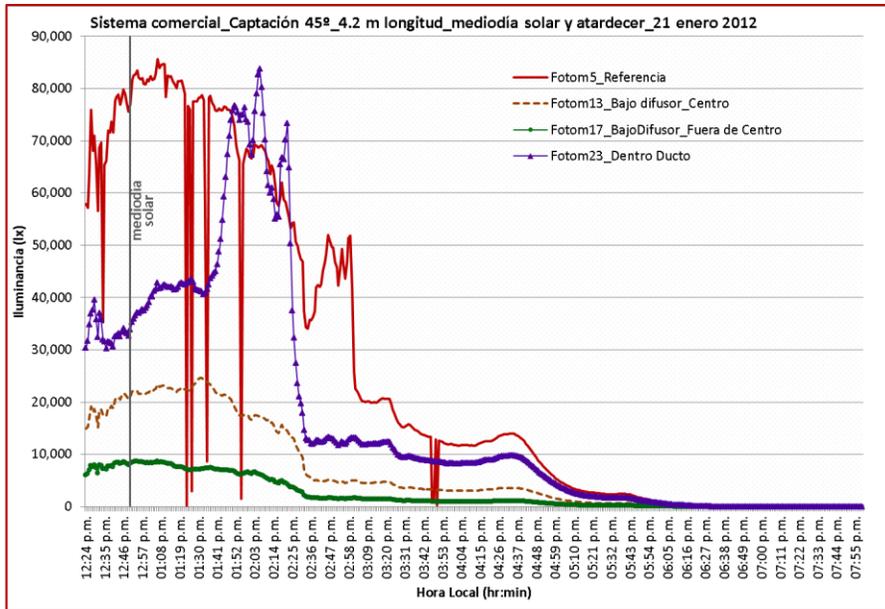
Las siguientes gráficas modifican el sistema al incluirle un codo de 45° en la zona de captación para redirigirla debido a que el sol tiene un recorrido la mayor parte del año en el sur. En este primer esbozo de modificación del ángulo de captación sólo se usó el de 45° por representar un contraste amplio con la captación horizontal utilizada mayormente en estos sistemas, pero en futuras investigaciones se sugiere obtener el punto medio del recorrido solar entre las diferentes estaciones del año, es decir el medio entre los meses de diciembre y mayo. Garantizando de esta manera que todo el año reciba iluminación solar directa. Se presentan los resultados en diferentes días, debido a que no se obtuvo un día completo de mediciones a causa de enfrentarse con días de lluvia y a que la instalación era efímera, sin embargo se muestran datos de anteriores o posteriores al mediodía solar.



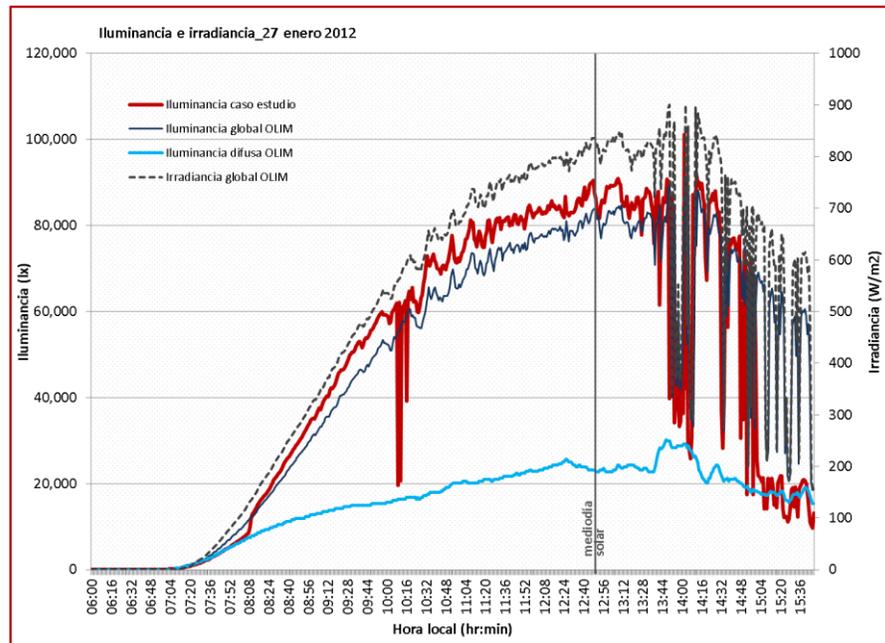
**Gráfica 29. Irradiancia e iluminancia del mediodía al atardecer del 21 de enero de 2012**

21 de enero de 2012	
Hora Local	Hora Solar
<b>AMANE CER CALCULADO*</b>	
07:13:00	06:25:12
<b>ATADECER CALCULADO*</b>	
18:22:00	17:34:12
<b>MEDIO DÍA SOLAR*</b>	
12:47:48	12:00:00
<b>HORAS DE SOL</b>	
11:09:00	

En la gráfica 27 se aprecia de manera más precisa que a partir de las tres de la tarde el domo recibe sólo luz difusa, pues debido a la sombra y obstáculo que le da la construcción de al lado.

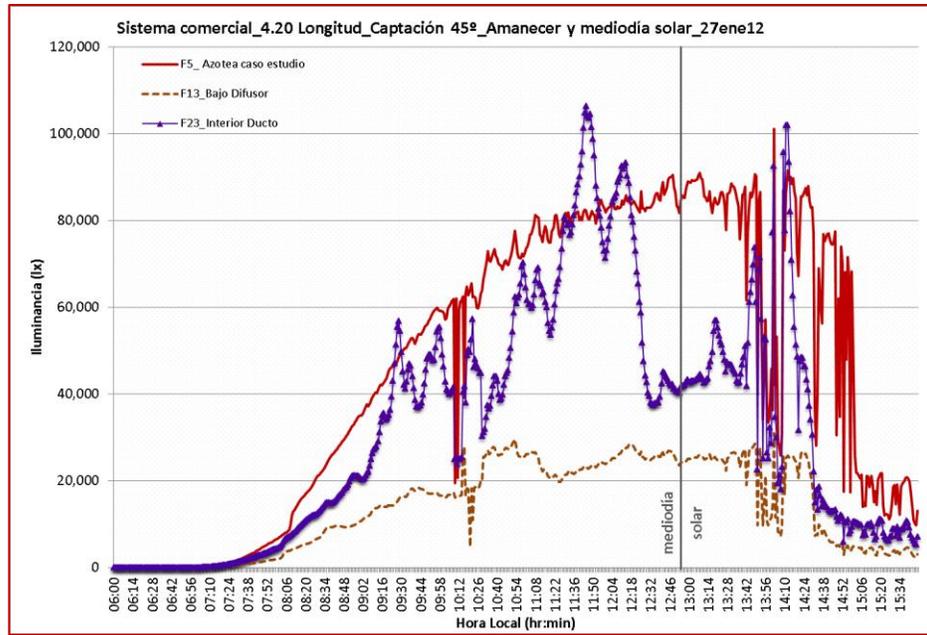


**Gráfica 30** Referencia de iluminancias en zona de captación, interior de ducto y difusor para el 21 de enero de 2012

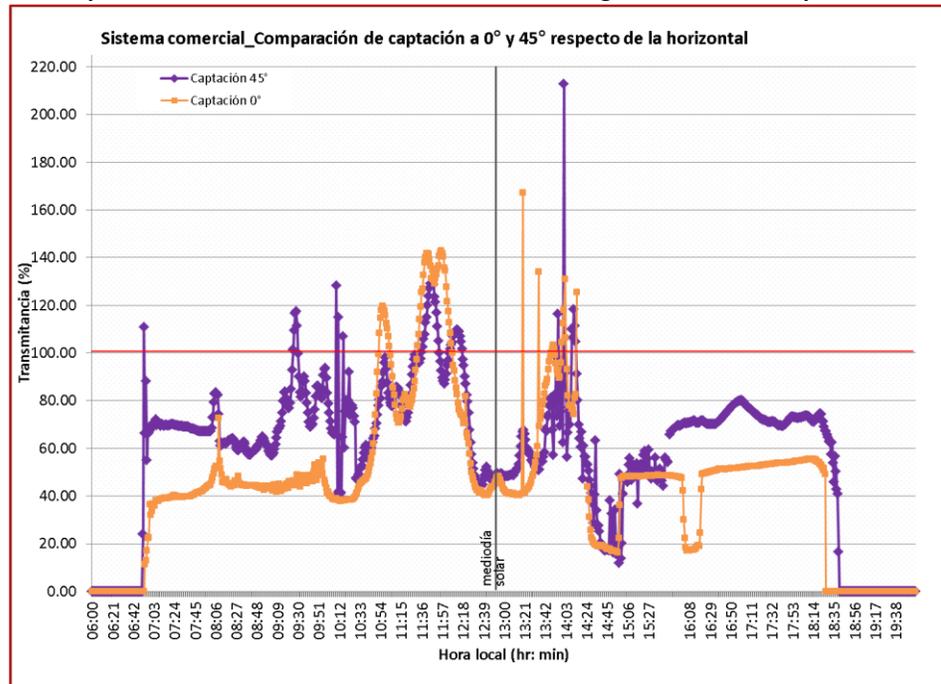


**Gráfica 31.** Iluminancia e irradiancia de amanecer y mediodía del 27 de enero

El amanecer y atardecer calculados para el 27 de enero es a las 7:13 horas y 18:26 de la hora local respectivamente, ocurriendo el mediodía solar a las 12:49:16 por lo que el número de horas con presencia solar fue de 11 horas 13 minutos.



Gráfica 32 Desempeño de sistema comercial con variación de ángulo en zona de captación



Gráfica 33. Comparación de sistema comercial cuando existe una variación en el ángulo de captación

Se observa en la gráfica 33 que el rendimiento del sistema aumenta con la captación a 45° durante casi todo el día, excepto a las 11:00 y a las 13:00 horas, sin embargo esta inclinación en la captación le beneficiará en el invierno debido a que el sol tiene un recorrido principalmente en el sur, pero deberá proponerse un ángulo que también beneficie en verano en donde el recorrido solar tiene presencia en el norte, de tal manera que ese ángulo será la media entre la altura solar máxima al mediodía del solsticio de verano y la altura solar máxima del solsticio de invierno.



## CONCLUSIONES DE FASE EXPERIMENTAL



La fase experimental se llevó a cabo en tres etapas, en el periodo comprendido del 25 de diciembre de 2011 al 2 de febrero de 2012. El objetivo fue analizar el desempeño de un sistema pasivo de transporte de luz natural y determinar así el comportamiento de este tipo de sistemas en nuestra latitud de estudio. El sistema consistió en un ducto altamente reflexivo de 55 cm de diámetro, de marca “Solatube”. Los experimentos fueron montados en la azotea del caso de estudio en el Centro Histórico de la Ciudad de México

En la primera fase se hizo la comparación de dicho ducto con otros dos de diferentes acabados.

En la segunda fase se analizan los ductos instalados en diferentes días en el primer nivel del edificio, para conocer el comportamiento de la luz transmitida a través de los diferentes acabados.

Finalmente en la tercera fase se analiza a profundidad el sistema de transporte de luz comercial “Solatube”, se recabaron datos con domo, difusor, diferente longitud y bajo dos diferentes ángulos de captación de luz natural.

De la fase experimental se puede concluir:

1. Se concluye que los sistemas pasivos, a base de ductos con paredes internas altamente reflectantes que se distribuyen de manera comercial en nuestro país, son viables en la latitud de estudio, en cuanto a rendimiento o desempeño.
2. En el periodo analizado, correspondiente al invierno en la latitud de estudio, presentó el reto de ser la época del año con menor número de horas de luz, y aún en este caso, se obtuvieron en promedio 9 horas por día de buen rendimiento del sistema, lo que implica un ahorro energético considerable en el uso de oficinas.
3. Con una captación de 45° respecto de la horizontal, y orientado al sur, se beneficia la ganancia de luz al interior a través del sistema para el atardecer y el amanecer
4. En el medio día solar, se obtuvieron mejores resultados con un ángulo de 0° respecto de la horizontal.
5. Cuando se prolonga la longitud del sistema de 1.20m a 4.20m existe una pérdida de luz, especialmente después del mediodía, sin embargo estas pérdidas no representan de ninguna manera ineficiencia del sistema en una longitud de 4.20 metros, puesto que los niveles se registraron en todo momento por encima de los requeridos en aplicaciones arquitectónicas de oficina.

En esta sección del documento se presentan cifras oficiales de la CFE de la distribución energética en nuestro país por entidad y por sector.

Posteriormente se establece el análisis del consumo eléctrico en oficina de arquitectura ubicada en el caso de estudio, presentando su facturación por mes.

Finalmente se hace el cálculo de energía eléctrica requerida para sólo iluminación de un espacio igual al analizado en la fase experimental para brindar los niveles de luz establecidos para el uso de oficinas, a partir de ahí se establece el número de horas en que este sistema de iluminación artificial puede ser sustituido por el uso de luz natural.



## 9.1 Demanda eléctrica por sector en México.

De acuerdo a la CFE, en México la demanda de energía eléctrica se encuentra dividida en los siguientes sectores y porcentajes:

**Tabla 1. Clientes por Sector (%) en México. CFE**

Sector	Porcentaje
Doméstico	88.23%
Agrícola	0.42%
Industrial	0.81%
Comercial	9.91%
Servicios	0.63%

Estas cifras son relevantes porque dejan ver cómo se distribuye la demanda de energía eléctrica en nuestro país, sin embargo del porcentaje presentado se deberá considerar cuál es la demanda por el uso de iluminación artificial, para generar un diagnóstico que permita proponer el uso de nuevos sistemas como los presentados en esta investigación, para mitigar el impacto ambiental por el uso de combustibles para la generación de energía. Así como recordar el bienestar de las personas.

**Tabla 2. Estadística comercial por entidad Federativa. CFE Septiembre de 2010**

Estados	Usuarios	Ventas MWh
<b>Distrito Federal</b>	2,782,360	9,882,136
<b>Nuevo León</b>	1,560,894	11,825,947
<b>Jalisco</b>	2,399,609	8,510,983
<b>México</b>	3,449,459	11,891,263

Es notorio que la demanda aumenta en las grandes Ciudades como el Distrito Federal, Guadalajara y Monterrey, pero deberá considerarse en qué medida se debe al uso de energía para iluminación por los casos expuestos anteriormente de edificaciones que no reciben asoleamiento adecuado, debido a inadecuada orientación generada por el contexto urbano o incumplimiento en la reglamentación, en cuanto a dimensiones de ancho de calles respecto a la altura promedio de las edificaciones, y finalmente a la falta de patios de iluminación y ventilación al interior de los predios; factores que de alguna manera fomentarán la necesidad de iluminación artificial, en horas que podrían ser de aprovechamiento de radiación solar.

## 9.2 Consumo eléctrico en despacho de arquitectura en caso de estudio

Finalmente la evaluación de los costos de la energía, influirán en la recuperación económica al hacerse instalación de sistemas alternativos, que aprovechen la luz solar, de manera directa, como para almacenamiento. Haciendo el análisis de Costo- beneficio y plazo de recuperación en la inversión inicial por instalación de tecnología. A continuación se presenta la facturación eléctrica de la oficina de arquitectura ubicada en el caso de estudio, y posteriormente se hace un cálculo en Software de cuánto es el consumo energético sólo por el uso de iluminación artificial. Finalmente se hace una comparación en costos incluyendo el remplazo por tiempo de vida y ahorro energético en el caso del Sistema de Transmisión de Luz Natural.

Tabla 3. Facturación eléctrica de oficina de arquitectura en sitio de estudio.

TARIFA	PERIODO	CONSUMO BIMESTRAL (kWh)		\$/kWh	COSTO \$
1	12 noviembre de 2010 a 14 de enero de 2011	Básico	150	0.709	106.35
		Intermedio	107	0.852	91.16
		Total	257		197.51
DAC	10 de marzo de 2011 a 11 de mayo de 2011	Básico	461	3.349	1,543.89
				Cargo fijo	148.42
		Total	461		1,692.31
DAC	11 de mayo de 2011 a 11 de julio de 2011	Básico	452	3.516	1,589.23
				Cargo fijo	149.88
		Total	452		1,739.11
1	11 de julio de 2011 a 12 de septiembre de 2011	Básico	150	0.725	108.75
		Intermedio	100	1.213	121.30
		Excedente	72	2.561	184.39
		Total	322		414.44
1	11 de noviembre de 2011 a 12 de enero de 2012	Básico	150	0.733	109.95
		Intermedio	29	0.888	25.75
		Total	179		135.70
1	12 de enero de 2012 a 13 de marzo de 2012	Básico	150	0.737	110.55
		Intermedio	100	1.237	123.70
		Excedente	84	2.61	219.24
		Total	334		453.49
1	15 de mayo de 2012 a 12 de julio de 2012	Básico	150	0.745	111.75
		Intermedio	76	0.906	68.86
		Total	226		180.61
1	12 de julio de 2012 al 12 de septiembre de 2012	Básico	150	0.749	112.35
		Intermedio	130	0.912	118.56
		Excedente	79	2.664	210.46
		Total	359		441.37

### 9.3 Cálculo de consumo eléctrico por Luz Artificial en el espacio analizado y de experimentación.

Se hace cálculo en Software alemán Dialux para determinar el número de lámparas y luminarios necesarios para lograr los 300 lx mínimos requeridos sobre el plano de trabajo según reglamentación para el uso de oficinas. El espacio modelado en el Software es el mismo que se analizó durante la fase de experimentación, cuyas dimensiones en planta son de 3.14 x 3.94 y altura de 4.09 m, el plano de trabajo se colocó también a 0.75 m mismo que en la experimentación, es un espacio sin ventanas y sin aportación de luz natural (ver planos en sección V Metodología de trabajo). Los datos se suponen para un despacho de arquitecto, en donde se desarrollan actividades en computadora y ocasionalmente se requiere observar detalles de dibujo impreso, se consideran 10 horas de uso diario, durante 6 días a la semana. En las tablas se considera un factor de coincidencia igual a 1 debido a que es un espacio sin ventanas y sin aportación de luz natural, por lo que durante todo el tiempo de uso del espacio es necesario hacer uso de luz artificial. Finalmente se contrasta el costo por cada sistema de iluminación propuesto utilizado de manera común en espacios de oficinas. No se consideró el cálculo realizado para 500 lux, sin embargo son los niveles que alcanzó el Sistema de Transmisión de Luz Natural usado en la fase de experimentación durante dos horas al día en el periodo de invierno.

#### Escenario 1. Luminarios para dos lámparas T12 de 56W cada una.

El primer escenario analizado es el más desfavorable debido a que es una tecnología que es obsoleta y que en poco tiempo estará prohibida por norma, sin embargo es una realidad que aún es utilizada en muchos espacios arquitectónicos por diferentes causas, entre ellas falta de inversión en el remplazo por tecnologías de menor consumo y por lo tanto más eficientes o implemente por falta de un diagnóstico energético que permite conocer cuánta energía y de qué manera la utilizan las edificaciones, por lo tanto a falta de datos mensurables que nos generen un panorama de consumo-uso de energía eléctrica es poco probable que se pueda tener un plan de cambio de tecnologías.

Las características del luminario utilizado en el cálculo y de acuerdo a fabricante<sup>1</sup> son: Longitud 182mm, diámetro 38 mm, temperatura de color 6500K, flujo luminoso promedio 3350 lm y potencia de 56W.

En la NOM-028-ENER-2010 se establece la eficacia mínima que deben tener los diferentes tipos de lámparas, en la sección 5.2 se determinan las condiciones mínimas que deben cumplir las Fluorescentes Lineales, para las cuales se instauran las siguientes propiedades para las utilizadas en el cálculo:

<sup>1</sup> Philips Lighting México. Catálogo General de Lámparas 2010-2011. [www.lighting.philips.com.mx](http://www.lighting.philips.com.mx) consultado en agosto de 2012.

Tabla 4. Eficacia mínima para lámparas fluorescentes lineales NOM-028-ENER-2010 tablas 5 y 6.

Longitud nominal cm	Temperatura de color (K)	Etapa 1		Etapa 2	
		Eficacia mínima (lm/W)	Entrada en vigor	Eficacia mínima (lm/W)	Entrada en vigor
<b>Para lámparas fluorescentes de diámetro mayor a 15mm y menor a 25mm</b>					
146	Menor a 4500	87	Febrero 2011	90	Diciembre 2012
<b>Para lámparas de diámetro mayor o igual a 25mm</b>					
122	Menor a 4500	85	Febrero 2011	88	Diciembre 2012
183	Mayor a 4500	83	Febrero 2011	83	Diciembre 2012

Si se hace la estimación de la eficacia luminosa de la T12 utilizada en el escenario 1 se puede notar que  $3350 \text{ lm} / 56\text{W} = 67.86 \text{ lm/W}$  no cumple con la norma que indica  $83 \text{ lm/W}$  mínimo y que tiene como límite de vigencia para su cumplimiento diciembre de 2012, por lo que ya no puede ser alternativa de uso en ningún espacio arquitectónico.

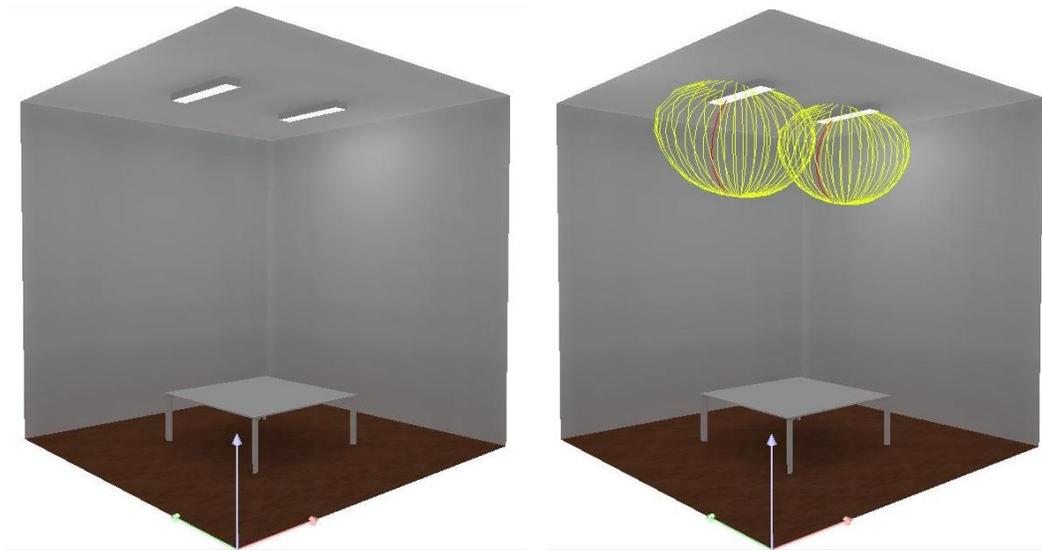


Imagen 1. Cálculo de luminarios para lámparas T12 de 56W cada una para lograr 300 lx sobre plano de trabajo

Se requirieron dos luminarios para satisfacer los requerimientos lumínicos, es decir, cuatro lámparas T12 de 56W cada una, de acuerdo a catálogo de fabricante el balastro requerido tendrá un consumo de 77W por cada luminario (por cada dos lámparas). Utilizando esta tecnología se deberá hacer una inversión por remplazo cada cuatro años de acuerdo a uso supuesto anteriormente.

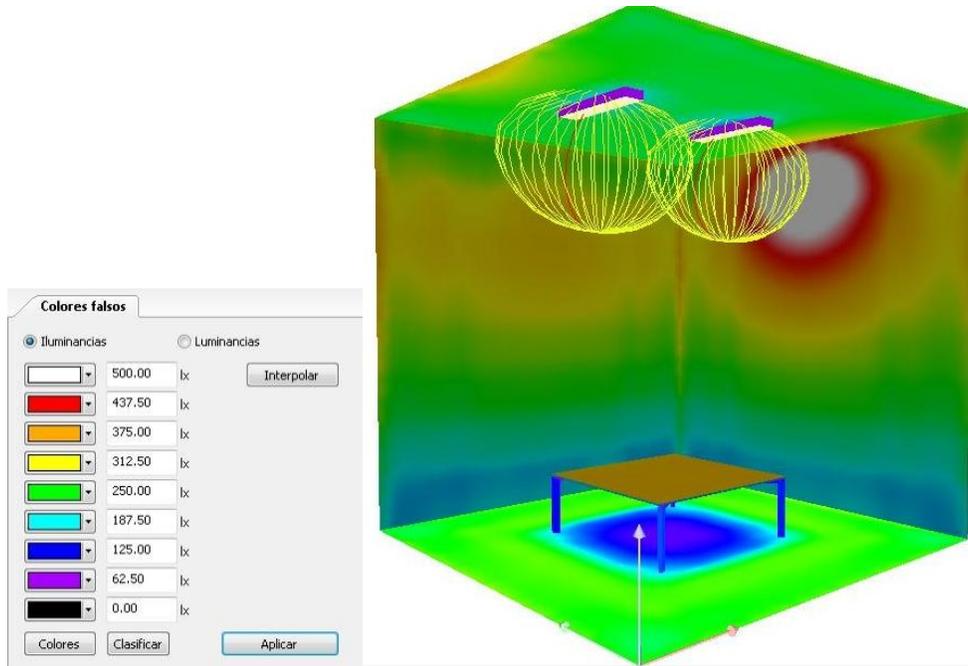


Imagen 2. Distribución lumínica en espacio arquitectónico en colores falsos de luminarios para T12 de 56W.

Tabla 5. Cálculo de consumo energético para oficina representada en la imagen anterior.

CAPACIDAD INSTALADA (SÓLO ILUMINACIÓN ARTIFICIAL)					CONSUMO		
Tipo de luminaria	Cantidad de luminarias	Potencia total requerida por luminaria(W)	KW instalados	Factor de coincidencia	Total kW demandados	h/d	kWh/mes
T12(2 X 56W)	2	189	0.378	1	0.378	10	98.20
Tiempo promedio de vida de las lámparas T12:				12,000 horas			
Años de vida según uso calculado:				4 años			

**Escenario 2. Luminarios para dos lámparas T8 de 32W cada una.**

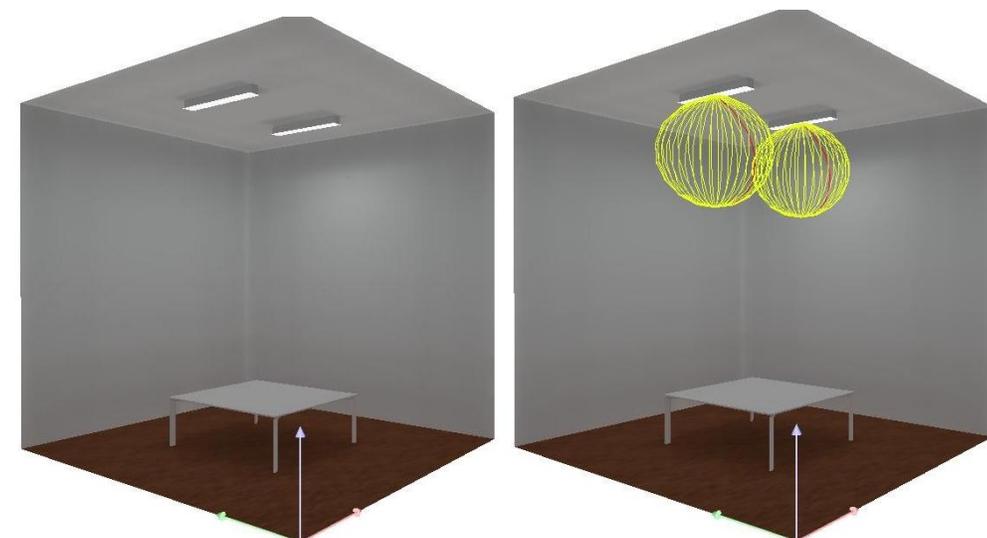


Imagen 3. Cálculo de número de luminarios requeridos para 300 lx sobre plano de trabajo utilizando por luminario dos lámparas T8 de 32W cada una y su respectiva fotometría.

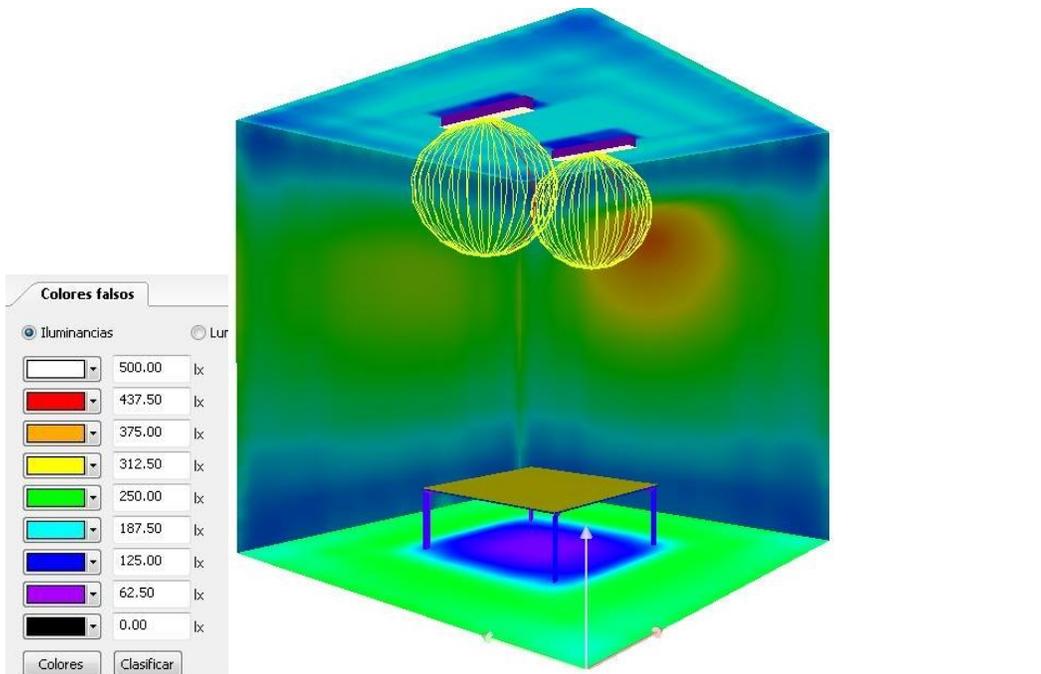


Imagen 4. Distribución lumínica en colores falsos producida por luminarios para dos lámparas T8 de 32W.

Tabla 6. Consumo eléctrico de luminarios que utilizan T8 de 32W.

CAPACIDAD INSTALADA (SÓLO ILUMINACIÓN ARTIFICIAL)					CONSUMO		
Tipo de luminaria	Cantidad de luminarias	Potencia total requerida por luminaria(W)	KW instalados	Factor de coincidencia	Total kW demandados	h/d	kWh/mes
T8(2 X 32W)	2	127	0.254	1	0.254	10	65.99
Tiempo promedio de vida de las lámparas T8:				20,000 horas			
Años de vida según uso calculado:				6 años			

El luminario propuesto para el escenario dos es aquel que utiliza dos lámparas fluorescentes lineales T8 de 32W cada una, se requirieron dos luminarios para generar iluminación uniforme de 300lx sobre plano de trabajo, de hecho como puede observarse en la imagen en colores falsos, se alcanzan niveles de 375 lx, por lo que queda sobrado, sin embargo con una sola luminaria se lograban únicamente 240 lx. La altura de las edificaciones ubicadas en el Centro Histórico como el caso de estudio superan los cuatro metros, factor que influye en que se requerirá más potencia para lograr niveles de iluminación aceptables para actividades visuales en las que se requiera observar detalles medianos.

De acuerdo con el fabricante, las lámparas T8 de 32W tienen una longitud de 121 mm, un diámetro de 26mm, y producen un flujo luminoso de 2800 lm, la temperatura de color propuesta es de 4100 K, por lo que su eficacia luminosa es de  $2800\text{lm}/32\text{W} = 87.5 \text{ lm/W}$ , por lo que según la tabla 5 de la NOM-028-ENER-2010 pasa la norma en la primera fase de su aplicación, pero no la segunda, por lo que también es considerada una tecnología obsoleta y que sin embargo aún es utilizada en muchos espacios arquitectónicos, por lo que se incluyó en el cálculo para resaltar la

importancia de las estrategia y tecnologías que aprovechan la luz natural. En la tabla 7 se consideró además la potencia del balastro requerido para el funcionamiento de las fluorescencias lineales, siendo este de 63W por luminario (un balastro por cada dos lámparas T8 de 32W).

**Escenario 3. Luminarios para dos lámparas T5 de 35W cada una.**

De acuerdo al cálculo de iluminación artificial necesario para generar 300 lx sobre plano de trabajo, se requerirán dos luminarias que utilizan dos lámparas T5 de 35W cada una, tipo de luminaria comúnmente utilizada en oficinas privadas y de tecnología más reciente.



**Imagen 5. Disposición de luminarios para lámparas de T5 para lograr iluminación uniforme de 300 lux sobre plano de trabajo. En la derecha se muestra la fotometría del luminario.**

Según fabricante anteriormente mencionado, las lámparas T5 de 35 W tienen una longitud de 146mm, un diámetro de 16mm y producen un flujo luminoso de 3395 lm, y se propone una temperatura de color de 4000 K, por lo que su eficacia luminosa es de  $3395\text{lm} / 35\text{W} = 97 \text{ lm/W}$ , por lo que cumple ampliamente con la NOM-028-ENER-2010 que establece 90 lm/W para la segunda etapa de entrada en vigor. Es importante señalar que también de acuerdo a datos de fabricantes, las lámparas T5 contienen menor cantidad de mercurio que las T8 y T12, elemento utilizado en este tipo de tecnología y altamente contaminante, además de que las Fluorescencias lineales T5 han ido mejorando su eficacia (mayor flujo luminoso con menor potencia requerida), por lo que de las propuestas generadas hasta el momento es la que más se recomienda.

El balastro utilizado para el funcionamiento tiene una potencia de 17.5W por cada dos lámparas T5 de 32W, que fue incluido en la potencia total requerida por luminario de la tabla 8.

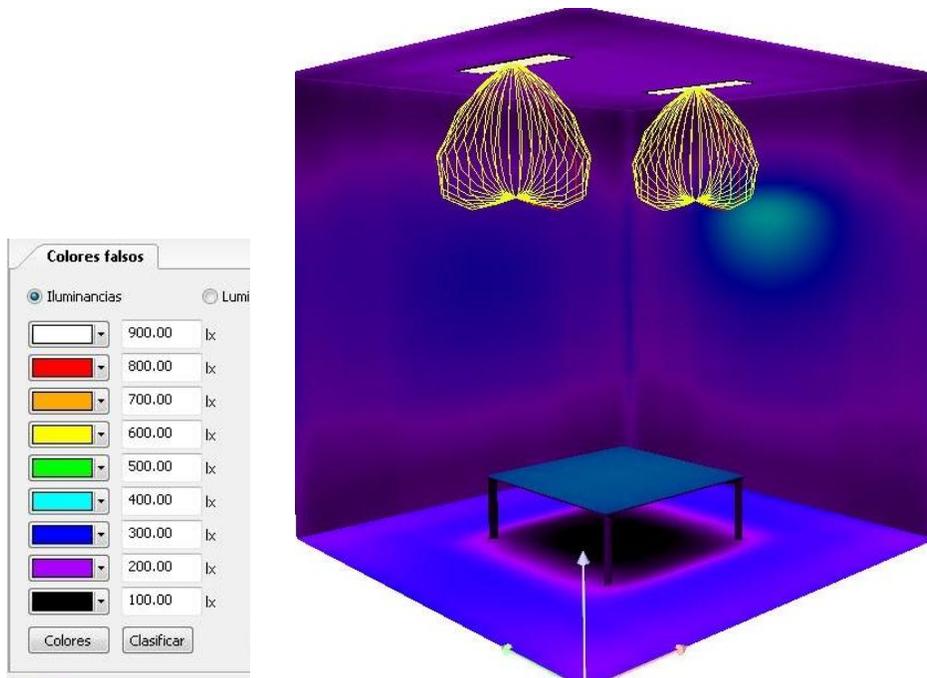


Imagen 6. Espacio arquitectónico en colores falsos que muestra la distribución lumínica y su escala.

Cabe señalar que el sistema de luz natural en momentos de mayor iluminancia en el exterior alcanza niveles cercanos a los 500 lx, lo cual en el sistema artificial con esta tecnología requeriría del doble de luminarias y con ello el doble en consumo eléctrico durante las dos horas en que en sistema de luz natural sostiene estos niveles.

Tabla 7. Análisis de consumo energético en el uso del sistema de iluminación artificial 3 propuesto.

CAPACIDAD INSTALADA (SÓLO ILUMINACIÓN ARTIFICIAL)					CONSUMO		
Tipo de luminaria	Cantidad de luminarias	Potencia total requerida por luminaria(W)	KW instalados	Factor de coincidencia	Total kW demandados	h/d	kWh/mes
T5(2 X 35W)	2	150	0.3	1	0.3	10	77.94
Tiempo promedio de vida de las lámparas T5:				25,000 horas			
Años de vida según uso calculado:				8 años			

Si se utilizan lámparas T5 se consumirán 45.46 kWh al mes. Las horas de vida útil que en promedio tienen estas lámparas son 20,000, por lo que al utilizarlas diariamente diez horas durante seis días a la semana, se estima que cada seis años deberá realizarse una inversión por remplazo.

#### Escenario 4. Iluminación con tecnología LED

En la tecnología LED se calcula el uso de 3 luminarios para lograr niveles de 300 lux sobre plano de trabajo, y niveles inferiores en las esquinas de la habitación. Esta tecnología es la que tienen mayor número de horas de vida promedio estimado en 45,000 y el menor consumo energético posible de 36.63 kWh/mes, sin embargo se requiere un mayor número de luminarios para lograr

los niveles y como se verá en la sección de costos, la inversión inicial es también superior a las otras alternativas de iluminación artificial.



Imagen 7. Apariencia del espacio arquitectónico iluminado con tecnología LED y correspondiente fotometría.

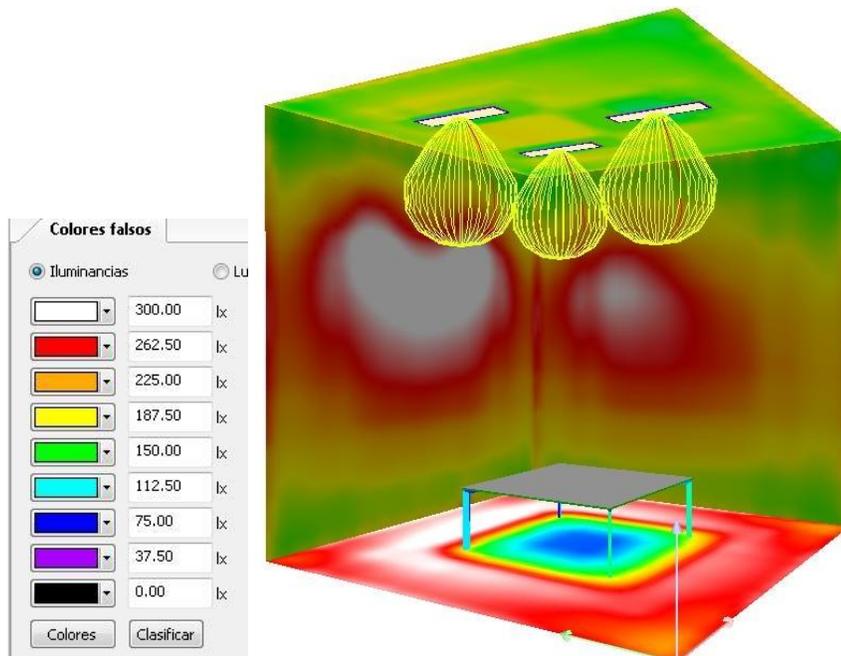


Imagen 8. Distribución lumínica en colores falsos y escala utilizando luminarios de lámparas lineales de LED's de 47W por luminario.

Tabla 8. Consumo energético de luminarios de LED's

CAPACIDAD INSTALADA (SÓLO ILUMINACIÓN ARTIFICIAL)					CONSUMO		
Tipo de luminaria	Cantidad de luminarias	Potencia total requerida por luminaria(W)	KW instalados	Factor de coincidencia	Total kW demandados	h/d	kWh/mes
LED(2 X 15W)	3	47	0.141	1	0.141	10	36.63
Tiempo promedio de vida de las lámparas LED:				45,000	horas		
Años de vida según uso calculado:				14	años		

Los datos técnicos del luminario utilizado son: utiliza dos lámparas que sustituyen a las fluorescencias lineales, cada lámpara está constituida por 48 LED's que consumen 15W, sin embargo requiere una fuente de poder para su funcionamiento, por lo que la potencia de cada luminario es de 47W en total. Su tiempo de vida útil es superior a los sistemas empleados anteriormente, por lo la reinversión por remplazo es de 14 años.

En esta última propuesta de iluminación artificial, se considera la tecnología que ha ido ganando terreno en su utilización, debido a que requieren de una potencia mínima para su funcionamiento, sin embargo es en años recientes que han logrado generar un flujo lumínico suficiente para aplicaciones de iluminación general y han logrado cubrir aspectos importantes como el índice de reproducción cromática (IRC), que es un indicador medido en escala de 0 a 100, que determina cómo reproducidos los colores y apreciados por el ojo humano bajo diferentes fuentes de luz, siendo anteriormente las lámparas incandescentes las que por su espectro electromagnético continuo las que mejor índice de reproducción cromática tenían con valor igual a 100 dentro de las fuentes artificiales, porque deberá recordarse que la luz solar es la fuente absoluta de Reproducción Cromática (ver marco teórico en la sección 1.1)

Debido a que la tecnología de Estado Sólido o comúnmente llamada LED está en continuo mejoramiento y reciente auge, la NOM-028-ENER-2010 no la regula, por lo que debe ponerse especial atención a la calidad en la manufactura, para garantizar que cumplan con los requerimientos mínimos con los que cumplen las lámparas anteriores: Flujo luminoso, potencia, años de vida útil en que mantienen un flujo luminoso mínimo, índice de reproducción cromática, uniformidad en la temperatura de color, etc.

La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) establece especificaciones para lámparas de Diodos Emisores de Luz (LED)<sup>2</sup> integradas para uso en interiores, pero esta guía no aplica para lámparas LED que pretendan sustituir a fluorescencias lineales como las que se utilizaron en el cálculo pero que podría servir temporalmente como referencia puesto que se establecen las condiciones mínimas o de tolerancia para lámparas LED que sustituyan a incandescentes o fluorescentes compactas, en ella se especifica que el IRC será igual o mayor a 80, para la temperatura de color de 4000 K sólo podrá tener un rango de variación de  $\pm 250$  K, una

<sup>2</sup> Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía

<http://www.conuee.gob.mx/conuee/espleds2011.pdf> consultado en octubre de 2012.

garantía mínima de 3 años en defectos de fabricación, y en la eficacia luminosa para lámparas omnidireccionales para iluminación general de 18W de potencia será de 52lm/W.

### 9.4 Costos

#### COSTOS POR SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA Y CONSUMO ELÉCTRICO POR ILUMINACIÓN ARTIFICIAL.

De acuerdo a las tarifas de CFE para entre el 2010 y el 2012:

Tabla 9. Cargo por kWh. CFE Diciembre de 2010-Diciembre de 2012.

	Mes	\$/kWh Menores a 140 kWh		\$/kWh Mayores a 140 kWh		
		Básico (hasta 75 kWh)	Intermedio (de 75 kWh a 140 kWh)	Básico (hasta 75 kWh)	Intermedio (de 75 kWh a 140 kWh)	Excedente
2010	Dic	0.709	0.852	0.709	1.181	2.497
2011	Feb.	0.713	0.858	0.713	1.189	2.513
	Abr.	0.717	0.864	0.717	1.197	2.529
	Jun.	0.721	0.870	0.721	1.205	2.545
	Ago.	0.725	0.876	0.725	1.213	2.561
	Oct.	0.729	0.882	0.729	1.221	2.577
	Dic	0.733	0.888	0.733	1.229	2.593
2012	Feb	0.737	0.894	0.737	1.237	2.610
	Abr	0.741	0.900	0.741	1.245	2.628
	jun	0.745	0.906	0.745	1.253	2.646
	Ago	0.749	0.912	0.749	0.912	2.664
	Oct	0.753	0.918	0.753	0.918	2.682
	Dic	0.757	0.924	0.757	0.924	2.700

Se hace el costo por consumo energético para cada tecnología propuesta, por lo que se genera una línea base bimestral, observando el periodo de facturación presentado en la tabla 3, se aplican las tarifas de los meses que determinan los costos.

El consumo base bimestral para cada tipo de escenario es:

Consumo base bimestral (kWh/bimestral)			
(T12)	(T8)	(T5)	(led)
196.4	131.98	155.88	73.26

Como se observa, los luminarios de T12 superan el consumo básico de 140 kWh/ bimestral que se establece para el uso doméstico, tarifa 01 en la que se encuentra actualmente la oficina analizada

en el caso de estudio, por lo que es considerada DAC y se aplican las tarifas \$/kWh mayores 140 kWh.de la tabla 9.

De acuerdo al consumo y a las tarifas aplicables se tiene un costo bimestral:

**Tabla 10. Cargo bimestral por consumo energético**

		Costo bimestral \$			
	Mes	(T12)	(T8)	(T5)	(led)
2010	Dic	270.77	101.72	122.08	51.94
2011	Feb.	272.49	102.36	122.87	52.23
	Abr.	274.22	103.01	123.66	52.53
	Jun.	275.94	103.65	124.44	52.82
	Ago.	277.66	104.29	125.23	53.11
	Oct.	279.38	104.93	126.01	53.41
	Dic	281.11	105.57	126.80	53.70
2012	Feb	282.88	106.22	127.58	53.99
	Abr	284.72	106.86	128.37	54.29
	jun	286.55	107.50	129.15	54.58
	Ago	265.70	108.14	129.94	54.87
	Oct	267.41	108.78	130.72	55.16
	Dic	269.12	109.42	131.51	55.46

A partir de la tabla 10 se obtiene el promedio de costo bimestral y el incremento entre un año y otro, de tal manera que a partir del 2011 el cargo bimestral promedio en el uso de luminarios con T5 será de \$103.97 y para el 2012 aumentará \$3.21, por lo que se deberá pagar en promedio \$107.82, este incremento se aplicará durante los siguientes años.

**Tabla 11. Base de costo por consumo energético bimestral**

		Costo bimestral \$			
		(T12)	(T8)	(T5)	(led)
2011	Prom	<b>276.800</b>	<b>103.969</b>	<b>126.796</b>	<b>53.700</b>
	Máx	<b>281.11</b>	<b>105.57</b>	<b>126.80</b>	<b>53.70</b>
	Min	<b>272.49</b>	<b>102.36</b>	<b>122.87</b>	<b>52.23</b>
	Dif	<b>8.62</b>	<b>3.21</b>	<b>3.93</b>	<b>1.47</b>
2012	Prom	<b>276.06</b>	<b>107.82</b>	<b>129.54</b>	<b>54.73</b>
	Máx	<b>286.55</b>	<b>109.42</b>	<b>131.51</b>	<b>55.46</b>
	Min	<b>269.12</b>	<b>106.22</b>	<b>127.58</b>	<b>53.99</b>
	Dif	<b>17.43</b>	<b>3.21</b>	<b>3.93</b>	<b>1.47</b>

**Costos de inversión y consumo energético de propuestas de iluminación artificial.**

Los precios de los luminarios y de las lámparas se tomaron de tiendas en línea que venden este tipo de productos, tomando el costo intermedio entre el producto más caro y el más barato, de tal manera que se consideraron:

**Tabla 12. Costos por luminarios y lámparas**

Luminarios		Lámparas	
Gabinete para 2 lámparas T12	505.00	T12	139.00
Gabinete para 2 lámparas T8	1,399.00	T8	235.00
Gabinete para 2 lámparas T5	750.00	T5	160.00
Gabinete para 2 lámparas LED	4,000.00		

**Comparativa de costos por Tecnología y Consumo eléctrico en 20 años tiempo que ha transcurrido desde la primera instalación de un Sistema de Transmisión de Luz Natural en México y que ha funcionado sin presentar decremento en flujo luminoso, sin embargo aún no se tiene límite en tiempo de vida.**

T12		T8	
Inversión inicial luminario	1,010.00	Inversión inicial luminario	2,798.00
Inversión inicial lámparas	556.00	Inversión inicial lámparas	940.00
Subtotal	1,566.00	Subtotal	3,738.00
Sustitución de lámparas cada 4 años hasta los 20 años de vida en comparación con STLN:	2,780.00	Sustitución de lámparas cada 6 años hasta los 20 años de vida en comparación con STLN:	3,133.33
Cargo por consumo eléctrico en 20 años	33,388.40	Cargo por consumo eléctrico en 20 años	12,540.60
Total	37,734.40	Total	19,411.93

T5		LED'S	
Inversión inicial luminario	1,500.00	Inversión inicial luminario	12,000.00
Inversión inicial lámparas	640.00	Reinversión por cambio de luminarios a los 14 años de uso	17,142.86
Subtotal	2,140.00	Cargo por consumo eléctrico en 20 años	6,473.40
Sustitución de lámparas cada 8 años hasta los 20 años de vida en comparación con STLN:	1,600.00	Total	23,616.26
Cargo por consumo eléctrico en 20 años	15,294.60		
Total	19,034.60		

### Costos por selección de Sistemas de Transmisión de Luz Natural

Sistema Comercial	
Costo total de sistema	\$36,200.00
Total longitud (m)	9.00
Tramos de 1.20 m	7.5
Costo difusor	\$900.00
Costo de domo	\$10,660.00
Costo por tramo de 1.20m Sistema	\$3,285.33

Horas de STLN
6 horas

Tabla 13. Costos de Sistema de Transmisión de Luz Natural

El STLN es autónomo durante 6 horas, manteniendo niveles de iluminación entre 250lux y 550 lux por seis horas en el día de prueba en época de invierno y días parcialmente nublados, condiciones que son las más desfavorables en el sitio de estudio.

Tabla 14. Costo de película utilizada en comparación con el sistema comercial en la etapa 2 de la fase experimental

Sistema genérico con Sonotubo y película Chrome Mirror	
Costo Sonotubo	\$750.00
Longitud de Sonotubo (m)	3
Tramos de 1.2 m	2.5
Costo por tramo de 1.20m de	\$300.00
Película Reflexiva Chrome Mirror (Con ancho de 1.30m)	\$228.00
Metros lineales por 1.20 de sonotubo	2
Costo por tramo de 1.20m de sonotubo con Avery	\$456.00
<b>Total de tramo 1.2 de sistema</b>	<b>\$756.00</b>

Durante la segunda etapa de la fase experimental, se comparó el sistema comercial con dos películas reflexivas, siendo la Chrome Mirror la obtuvo resultados similares al sistema comercial, por lo que la tendencia sería una fabricación de STLN in situ, sin embargo deberán buscarse nuevas alternativas de películas reflexivas y materiales más ligeros, la Chrome Mirror tiene un tiempo de vida muy corto de 2 años y pierde reflexividad por su exposición a la radiación solar, sin embargo actualmente existen en el mercado internacional películas como 3M Radiant Mirror Film que mantienen la reflectancia al 93% durante 14 años aproximadamente.

De acuerdo con la Normatividad del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica, la especificación para el sello B, sello que se da a los productos o sistemas que no producen por sí mismos un ahorro energético o generación de energía, pero que contribuyen al ahorro de energía por su uso o aplicación, en el documento de "Especificación para Películas de Control Solar"<sup>3</sup> en la

<sup>3</sup> Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica: [www.fide.org.mx](http://www.fide.org.mx) Consultado en octubre de 2012.

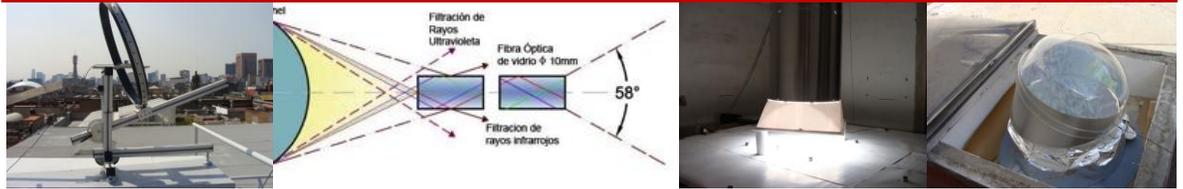
sección 5.1.2 para películas de control solar metalizadas reflexivas se establece que la duración mínima que deben cubrir como garantía es de 5 años, por lo que cualquier material que se proponga como alternativa deberá cumplir con el sello B FIDE.

### Ahorro energético y económico por uso de STLN

Tabla 15. Costo por uso de energía eléctrica

	(T12)	(T8)	(T5)	(led)
kWh/bimestral sólo por iluminación complementaria al STLN				
	62.35	52.79	62.35	29.31
Costo bimestral (\$) por uso de energía eléctrica para iluminación complementaria al STLN				
Promedio 2011	57.34	38.17	45.14	21.22
incremento anual	1.61	1.16	1.37	0.64
Promedio 2012	59.26	39.44	46.58	21.89
Años de vida útil de lámparas utilizadas sólo como complemento de iluminación de STLN				
	10 años	16 años	20 años	36 años
Costo en 20 años por iluminación artificial como complemento de STLN				
Cargo por consumo eléctrico en 20 años (\$)	6,913.00	4,603.60	5,444.20	2,559.20
<b>COSTO TOTAL EN 20 AÑOS POR ILUMINACIÓN ARTIFICIAL COMPLEMENTARIA AL STLN (INCLUYE INVERSIÓN INICIAL DE LUMINARIOS, REPLAZO DE LÁMPARAS POR VIDA ÚTIL Y COSTO OPR CONSUMO ENERGÉTICO)</b>	<b>9,591.00</b>	<b>10,221.60</b>	<b>8,224.20</b>	<b>14,559.20</b>
Costo de iluminación artificial sin utilización de STLN en 20 años	<b>37,734.40</b>	<b>19,411.93</b>	<b>19,034.60</b>	<b>23,616.26</b>
<b>Ahorro económico por uso de STLN</b>	<b>28,143.40</b>	<b>9,190.33</b>	<b>10,810.40</b>	<b>9,057.06</b>

## CONCLUSIONES GENERALES Y PROPUESTA



El objetivo principal de esta tesis fue dar a conocer estrategias de iluminación natural, especialmente investigar sobre una propuesta para aportar luz solar en aquellos espacios ya construidos en los que no es posible tener acceso a ventanas o tragaluces, o aquellos en los cuales estas estrategias no son suficientes para proveer los niveles de iluminación adecuados a las actividades a realizar. El uso de Sistemas de Transmisión de Luz Natural (**STLN**) general tal alternativa y se comprueba en la investigación la hipótesis en la cual se afirma que es posible satisfacer las necesidades lumínicas por medio de luz natural a través de la tecnología, reduciendo la demanda eléctrica en los espacios arquitectónicos de la Ciudad de México, sin embargo como se comprobó en la fase experimental, estos sistemas en la estación de invierno en la latitud de estudio son capaces de mantener niveles de iluminación adecuados durante seis horas al día, por lo que se requerirá de iluminación complementaria en las horas adicionales para el uso de oficina, pero aún en esos casos se está contribuyendo al ahorro energético al tratarse de consumos menores por ser únicamente complemento y no fuente primaria de iluminación. Además del bienestar físico y psicológico de las personas que la luz natural conlleva.

Se concluye que los sistemas pasivos, a base de ductos con paredes internas altamente reflectantes que se distribuyen de manera comercial en nuestro país, son viables en la latitud de estudio, en cuanto a rendimiento o desempeño. Con la prolongación del ducto de 1.20m a 4.20m se comprobó un descenso en los niveles de iluminación, especialmente después del mediodía, sin embargo estas pérdidas no representaron una ineficiencia del sistema para una longitud de 4.20 metros. En el invierno la captación a 45° respecto de la horizontal y orientado al sur presentó mejores resultados, excepto en el mediodía solar que funcionó mejor la captación a 0°.

La presente investigación se inserta en las etapas primarias en el uso de STLN, representando una base sólida para futuras investigaciones, ya que se establecen los conceptos básicos de funcionamiento de este tipo de sistemas y se someten a experimentación los principios de funcionamiento. Después del estudio de los diferentes STLN se considera que el análisis de materiales novedosos, altamente reflexivos y ligeros es punto medular para el desarrollo y diseño de nuevos sistemas que permitan el beneficio al mayor número de usuarios en el edificio de instalación. Se desarrolló el análisis como los métodos propuestos en la literatura del tema, que consiste en un estudio por fases: Captación, transmisión y distribución de la luz, desmembrando los materiales, procesos físicos y las variables que intervienen en cada una de ellas, a partir de ello podrán realizarse nuevas propuestas de menores dimensiones, de mayor eficiencia u optimización de recursos y de mejora en la reducción de impacto ambiental y de costos.

Es necesario que el arquitecto y las personas en general conozcan los requerimientos lumínicos de los lugares que diseña y que habitamos, para que se genere una cultura de espacios iluminados adecuadamente de acuerdo a las necesidades de la población a la que se diseña. Para ello es indispensable que se conozcan estrategias y sistemas de iluminación, así como cuestiones de normatividad y percepción, garantizando que se proyectarán espacios arquitectónicos saludables.

## BIBLIOGRAFÍA



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguado, Edward y Burt James Weather and Climate Ed. Pearson prentice hall, 2007
- Ander, Gregg D. Daylighting Performance and Design. Ed. John Wiley and Sons. Estados Unidos 2003, p. 6
- Argento, Carlos. Oftalmología General. Introducción para especialistas. Ed. Corpus. Rosario, Argentina 2007. Pp. 23-27.
- Baker, Nick y Steemers, Koen. Daylight design of buildings. Ed. James y James. Hong Kong 2002, pp.63- 65
- Barry, Roger G. y Chorley, Richard J. Atmosphere, Weather and Climate. Ed. Routledge. Gran Bretaña 2003, p. 33
- Bjorn, Berge. The ecology of building materials. Ed. Architectural Press. Gran Bretaña 2000, p. 77 y 78
- Boubekri, Mohamed. Daylight, Architecture and Health. Building Design Strategies. Ed. Elsevier. Gran Bretaña 2008, p. 64 y 65.
- Cetto, Ana María. La luz en la naturaleza y en el laboratorio. Colección la Ciencia para Todos. Fondo de Cultura Económica. 3ª edición. México 2003
- Chiron de la Casinière, Alain y Cachorro Revilla, Victoria E. La radiación solar en el sistema tierra- atmósfera. Universidad de Valladolid.
- Díaz Enciso, María Elena. Óptica Aplicada Programada. Instituto Politécnico Nacional. México 1999, pp.27-29, 33-35 y 61-63.
- Galindo, Ignacio. Irradiación solar global en la República Mexicana: Valores horarios medios. UNAM. México 1999
- Giménez, Fernando; *Et. al.* "Diseño de lentes difractivas fractales". Universidad Politécnica de Valencia. Documento en línea: [http://diog.webs.upv.es/publicaciones/pdfs/2007\\_ACC\\_229.pdf](http://diog.webs.upv.es/publicaciones/pdfs/2007_ACC_229.pdf) . Consultado el día 5 de septiembre de 2012.
- Günter D. Roth. Meteorología. Formaciones nubosas y otros fenómenos meteorológicos. Ed. OMEGA. Barcelona 2003, 21-33
- Häckel, Hans. Nubes. Ediciones Omega. Barcelona 2006, p. 7
- Hecht, Jeff. City of light. The story of fiber optics. Oxford University Press. Nueva York 1999, pp. 12- 27
- Hetch, Eugene. Óptica. Versión castellana de editorial Pearson educación. 3ª Edición. Madrid 2000, p. 198
- Holahan, Charles J. Psicología Ambiental. Un enfoque general. Ed. Limusa. México 2005, pp. 159- 161
- Ibañez Plana, M. *Et al.* Energías Renovables. Tecnología Solar. Ed. Mundi- Prensa. Madrid 2004, p. 23.

- IESNA Lighting Handbook. Reference and Application. 9ª Edición
- IESNA. Lighting Ready Reference. Capítulo 4 Light, Óptics and Luminaire Performance. 4a edición. Estados Unidos 2003, p 41
- Manual del vidrio Saint- Gobain. Ed. Plazola. México 2002, p. 30.
- McGuiness, Stein y Reynolds. Mechanical and Electrical Equipment for Buildings. Ed. John Wiley and Sons. Estados Unidos 2003, pp. 1114 y 1115.
- Muhlia V., Agustín. Notas del curso: solarimetría. 30 Semana Nacional de Energía Solar. Veracruz, Veracruz. ANES 2 a 6 de octubre de 2006.
- Pattini, Andrea. Capítulo 11. Luz natural e iluminación de interiores. p 7. <http://www.herrera.unt.edu.ar>. Consultado: 27 de enero de 2011.
- Philips Lighting México. Catálogo General de Lámparas 2010- 2011, p.78
- Rüdiger Ganslandt y Harald Hofmann. Traducción Ranveig Winteg. Manual. Cómo planificar con luz. Ed. ERCO-Vieweg. Versión en español. España 2008, pp. 85- 87
- Sánchez Maza, Miguel Ángel (coordinador). Energía solar fotovoltaica. Ed. Limusa. México 2008, p. 9
- Santa Maurice, Matt (editor). Advances in Passive Cooling. Universidad de Atenas. p. 94
- Scholberg, Philip .Traducción Arq. S. Milner. Nuevas técnicas en la construcción. Capítulo Metales livianos. Librería y editorial Alsina. Argentina 1954. pp 214- 215.
- Szokolay, Sven V. Environmental Science Handbook for Architects and Builders. Ed. The Construction Press Ltd. Estados Unidos 1980, pp. 79-81.
- Tornquist, Jorrit. Traducción de Rosa María Oyarbide Color y luz. Teoría y Práctica. Ed. Gustavo Gili. Barcelona 2008, pp 40- 47.
- Totten, George E. Y MacKenzie, D. Scott (editores). Handbook of aluminum. Metalurgia Física y Procesos. Volumen 1. Ed. Marcel Dekker. Nueva York 2003. Pp. 54-57.
- Un Vitruvio ecológico. Principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible. Gustavo Gili. Barcelona 2010, p. 84.

## TESIS

- Guadarrama Gándara, Cecilia. Luz natural. Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Posgrado Facultad de Arquitectura. UNAM 2011
- Jaramillo Salgado, Oscar Alfredo. Tesis doctoral. Transporte de energía radiativa a través de fibras ópticas. Teoría y experimentación. Centro de Investigación en Energía, UNAM. Temixco 2002, pp. 24- 37

- Martins Mogo de Nadal Gisela An experimental setup to evaluate the daylighting performance of an advanced light pipe for deep-plan office buildings Universidad de Texas A & M
- Pingueras, Lorenzo E. Contribución a la teoría de diseño y la tecnología de las lentes de Fresnel para su uso como concentradores en aplicaciones fotovoltaicas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Telecomunicación. 1982. pp. 18- 80
- Torres Tur, Elías. Luz Cenital. Tesis Doctoral. COAC Publicaciones. Barcelona 2004, p. 15
- Valeriano Flores, Arturo. Iluminación natural en la arquitectura. Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México 2010, pp. 45- 48

## ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

- Alejandro Mesa, Mariela Arboit y Carlos de Rosa. “Disponibilidad de luz natural en el exterior de una edificación”. Revista: Architectural Science Review. Volumen 53. No. 2 (2010). pp. 224- 237
- Baharuddin, Stephen; S.Y. Lau y Ramli Rahim. “Daylight availability in Hong Kong: classification into three sky conditions”. Revista: Architectural Science Review. No. 53 (2010), pp.396 y 397.
- C. Baroncini, O. Boccia, F. Chella, P. Zazzini. “Análisis experimental sobre un modelo a escala 1:2 de un ducto de luz doble, un dispositivo tecnológico innovador para la transmisión de luz natural”. Solar Energy. Vol. 84 (2010). Pp 296- 307
- Carter, D.J. y Marwae, M. Al. “ User attitudes toward tubular daylight guidance systems”. Revista: Lighting Research and Technology. Vol. 41 (2009), p. 71.
- Darula Stanislav y Kittler, Richard. “CIE general sky standard defining luminance distributions” Instituto de Construcción y Arquitectura de Eslovaquia . Consultado en [www.google.com](http://www.google.com) el día 29 de septiembre de 2011.
- David Jenkins, Tariq Muneer. “Modelo matemático del desempeño de ‘lumiductos’ una solución a la luz natural”. Revista Building and environment. Volúmen 38 (2003). Páginas 965- 972
- DJ Carter. “Medición y Predicción del desempeño de sistemas pasivos de ductos de luz solar”. REVISTA: Lighting Res. Technology. Volúmen 34, 1 (2002)/ Páginas 39- 52
- Ferrón, Leandro; *et. al.* “Disponibilidad comercial de sistemas de transporte de luz natural”. Revista: Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9, 2005. Impreso en la Argentina.
- Flynn, Larry. *A run to daylight*. Building desing and construction. Vol. 42. No. 10. Octubre de 2001, pp. 53 y 54.

- Jeong Tai Kim y Gon Kim. "Overview and new developments in optical daylight systems for building a healthy indoor environment". Revista Building and Environment. Vol. 45 (2010), p. 256.
- Kribus, Abraham; Zik, Ory y Karni, Jacob. "Optical fibers and solar power generation" Revista: Solar Energy. Vol. 68, No. 5 (2010), p. 406
- Murdoch, J.; Harrold, R. y Goldsbury, C.J. (Editores). Ready reference. IESNA. 3ª edición. Estados Unidos 1996.
- Oakley, G. "Daylight performance of lightpipes". Revista: Solar Energy. Vol. 69. No. 2 (2000), p. 89
- Paroncini M., Calcagni, F. Y Corvaro, F. Monitoring of a light pipe system. Revista Solar Energy. Vol.81 (2007), pp. 1180-1186.
- Swift, P.D.; *et. al.* "Hotspots in cylindrical mirror light pipe description and removal". Revista: Lighting Research and Technology. Vol. 38. No. 1 (2006), p.19
- Tripanagnostopoulos, Y. *Et. al.* "The Fresnel lens concept for solar control of buildings". Revista: Solar Energy. Vol. 81 (2007), pp. 661-675
- Zhang, X. y Muneer, T. "A design guide for performance assessment of solar light pipes". Revista: Lighting Research and Technology. Volúmen 34. No. 2 (2002), pp. 149- 169

## PÁGINAS WEB

- Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española. [www.rae.es](http://www.rae.es) Consultado el 27 de agosto de 2012
- <http://www.iguzzini.com/html/es/558.html> . Consultado: 28 de noviembre de 2010.
- Hora: 18:41 pm
- [www.solatube.com](http://www.solatube.com).
- [www.himawari-net.co.jp](http://www.himawari-net.co.jp) Consultado el 30 de agosto de 2012.
- Comisión Federal de Electricidad. (22 de octubre de 2010): <http://www.cfe.gob.mx>
- <http://www.cfe.gob.mx/QUIENESSOMOS/ESTADISTICAS/Paginas/Indicadoresdegeneración.aspx>
- Servicio Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mx> en la sección de glosario para la definición de 'Estado del Cielo según la cobertura de nubosidad'. Consultado: 23 de agosto de 2012
- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NOAA). <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/> . Consultado el día 6 de mayo de 2012

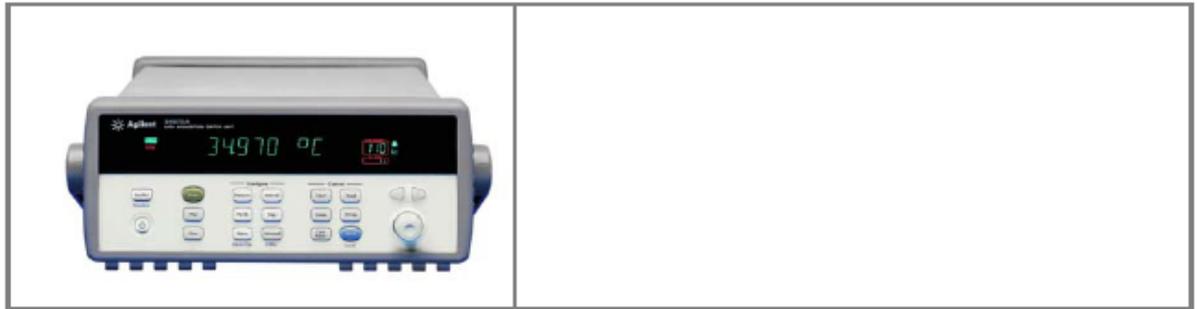
**ANEXOS**



## EQUIPOS DE MEDICIÓN

## ADQUISIDOR DE DATOS

MARCA:	Agilent	No. SERIE:	MY44015688
MODELO:	34901A	No. INVENTARIO UNAM:	2215389

**DESCRIPCIÓN:**

Unidad de adquisición de datos, con capacidad para tres tarjetas de 20 canales cada una (tres módulos multiplexor).

Fecha de calibración: Abril de 2011

**Conexión:** Interfaz GPIB/ USB

**Software:** Bench Link Data Logger 3. Versión 4.1

**Importante:** Instalar antes del software la aplicación I.O.Libraries. La versión de Software 4.1 sólo es compatible con la versión de Windows Vista Pro

Sitio en internet de fabricante: <http://www.home.agilent.com>

**PIRANÓMETRO**

MARCA:	Kipp Zonen	No. SERIE:	102048/ 100399/ 100370
MODELO:	CMP 11/ CMP 21	No. INVENTARIO UNAM:	2317485/ 2309392/ 2309393

	MEDICIÓN	UNIDADES
	Radiación global	w/m2

**RESUMEN DESCRIPCIÓN:**

Para medición de Radiación global, y con el uso de arillo sombreador o albedo, permite la medición de radiación difusa y reflejada.

El fabricante recomienda su uso para Investigación.

**Conexión:** Los cables se conectan a un canal del Datalogger, de acuerdo a diagrama de conexión establecido en la programación del datalogger, está compuesto de Línea (rojo, Hi), Neutro (azul, Low) y Tierra física. (Ver manual en sección 2.5)

**Software:** PC200W (Software controlador del Datalogger CR1000 Campbell)

**Importante:** Nivelación requerida en montaje a través de ajuste de tornillo, cambio de Desecante si se encuentra transparente, limpieza de burbuja de lectura diaria para correcta medición.

Número de sensibilidad (sensitivity) de última calibración, especificado en hoja de constancia de servicio se introduce en el software para correcta lectura de mediciones (ver manual en sección 3.1)

Sitio en internet de fabricante: <http://www.kippzonen.com>

**FOTÓMETRO**

MARCA:	Li-cor	No. SERIE:	PH8089/ PH8113
MODELO:	210-LS	No. INVENTARIO UNAM:	2215405/ 2215429

	MEDICIÓN	UNIDADES
	Iluminación	Klux

**DESCRIPCIÓN:**

26 Sensores de iluminación Li-210LS, curva de respuesta igual a la del ojo humano CIE, de acuerdo a plano de colocación puede medir luz proveniente de la bóveda celeste o reflejada de superficies.

**Conexión:** Se cuenta con cable adaptador multivoltaje con terminación en Plug para ser compatible con Multiplexor, o dejando los cables expuestos se puede llevar a cabo conexión a canal de Datalogger Línea(Hi) , Neutro (Low) y Tierra física (Ground)

**Software:** PC200W (Software controlador del Datalogger CR1000 Campbell)

**Importante:** Limpiar sensor diariamente, mientras se encuentra en uso, para evitar lecturas incorrectas. Cuando no esté en uso verificar que se encuentre protegido por tapa de plástico y dentro de esponja.

Número de sensibilidad (sensitivity) de última calibración, especificado en hoja de constancia de servicio se introduce en el software para correcta lectura de mediciones (ver manual, pág....)

Sitio en internet de fabricante: <http://www.licor.com>  
Li- cor. Sección environmet

**MULTISENSOR**

MARCA:	Vaisala	No. SERIE:	F3230004
MODELO:	WXT520	No. INVENTARIO UNAM:	2317484

	<b>MEDICIÓN</b>	<b>UNIDADES</b>
	Temperatura	°C / °F
	Velocidad de viento	m/s
	Dirección de viento	Grados 0°-360°
	Humedad relativa	%
	Precipitación	mm
	Presión atmosférica	mmHg / inHg

**DESCRIPCIÓN:**

Estación meteorológica para las 6 mediciones básicas del clima, con indicador de Norte para montaje en poste, evitando obstrucciones del contexto.

**Conexión:** A datalogger en un canal a través de Línea (Hi), Neutro (Low) y Tierra física (Ground).

**Software:** PC200W (Software controlador del Datalogger CR1000 Campbell)

**Importante:** Verificar que durante montaje el indicador apunte al norte geográfico para obtención correcta de datos.

Sitio en internet de fabricante: <http://www.vaisala.com>

DUCTO BLANCO\_1 ENERO 2012

MAÑANA					
Posición		HL:	07:59:00	T.S.V.	07:19:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	6	4	0.10	
1.29	2.88	7	7	0.11	
1.89	2.88	12	8	0.19	
2.49	2.88	4	10	0.06	
0.69	2.28		11	0.00	
1.29	2.28	18	24	0.29	
1.89	2.28	15	13	0.25	
2.49	2.28	10	15	0.16	
0.69	1.68	11	16	0.17	
1.29	1.68	18	17	0.28	
1.89	1.68	16	18	0.26	
2.49	1.68	9	19	0.14	
0.69	1.08	6	20	0.09	
1.29	1.08	9	21	0.14	
1.89	1.08	15	22	0.24	
2.49	1.08	8	23	0.13	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		9,240	100		
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		6,313	68		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		5,974 lx			
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		102.2 W/m2			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		100.7 W/m2			
<b>Tipo de cielo SMN:</b>					

DUCTO BLANCO\_1 ENERO 2012

TARDE					
Posición		HL:	17:19:00	T.S.V.	16:39:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	1	4	0.02	
1.29	2.88	6	7	0.11	
1.89	2.88	5	8	0.08	
2.49	2.88	4	10	0.07	
0.69	2.28		11	0.00	
1.29	2.28	16	24	0.29	
1.89	2.28	27	13	0.47	
2.49	2.28	9	15	0.16	
0.69	1.68	10	16	0.17	
1.29	1.68	13	17	0.24	
1.89	1.68	13	18	0.23	
2.49	1.68	10	19	0.18	
0.69	1.08	3	20	0.05	
1.29	1.08	4	21	0.07	
1.89	1.08	9	22	0.17	
2.49	1.08	3	23	0.05	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		10,940	100		
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		5,706	52		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		6,718 lx			
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		114.3 W/m <sup>2</sup>			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		112.8 W/m <sup>2</sup>			
<b>Tipo de cielo SMN:</b>					

Iluminancias horarias promedio\_ Ducto blanco\_ 4 de enero de 2012

Iluminancia exterior	Fotom 4		Fotom 7		Fotom 8		Fotom 10		Fotom 11		Fotom 13		Fotom 15		Fotom 16		Fotom 17		Fotom 18		Fotom 19		Fotom 20		Fotom 21		Fotom 22		Fotom 23	
	1	2	1	2	1	2	0	1	2	3	4	5	3	4	4	5	4	5	4	5	4	5	2	3	1	2	1	2	3	2
2,229	17	24	23	18	36	33	25	26	36	31	36	26	31	24	15	20	26	20	26	31	24	15	20	26	20	26	20	26	20	
14,601	30	44	42	33	64	59	44	43	63	54	63	43	54	45	27	35	45	38	45	54	45	27	35	45	38	45	38	45	38	
31,438	54	82	79	62	111	102	80	74	107	93	107	74	93	83	52	64	84	74	84	93	83	52	64	84	74	84	74	84	74	
57,465	78	118	113	87	150	141	112	101	144	126	144	101	126	117	80	94	119	107	119	126	117	80	94	119	107	119	107	119	107	
77,645	86	133	131	100	163	156	123	115	158	138	158	115	138	127	101	111	135	119	135	138	127	101	111	135	119	135	119	135	119	
84,262	74	118	126	93	154	156	120	108	155	138	155	108	138	120	94	104	126	102	126	138	120	94	104	126	102	126	102	126	102	
72,660	39	68	75	51	105	109	75	64	106	97	106	64	97	75	45	59	74	52	74	97	75	45	59	74	52	74	52	74	52	
60,956	20	37	41	26	64	67	45	35	64	61	64	35	61	44	19	32	43	28	43	61	44	19	32	43	28	43	28	43	28	
34,188	14	26	29	18	49	51	33	26	49	47	51	26	47	32	13	23	32	21	32	47	32	13	23	32	21	32	21	32	21	
18,383	3	4	6	3	12	13	7	8	12	12	13	7	8	6	3	7	7	4	7	12	6	3	7	7	4	7	4	7	4	
4,549																														

		Relación de Iluminancias_ Ducto Blanco_ 1 de enero de 2012															
		Fotom 4	Fotom 7	Fotom 8	Fotom 10	Fotom 11	Fotom 24	Fotom 13	Fotom 15	Fotom 16	Fotom 17	Fotom 18	Fotom 19	Fotom 20	Fotom 21	Fotom 22	Fotom 23
07:00	0.06	0.05	0.07	0.00	0.23	0.20	0.12	0.19	0.20	0.18	0.07	0.03	0.06	0.14	0.07	0.14	0.07
08:00	0.12	0.16	0.16	0.12	0.25	0.22	0.17	0.18	0.25	0.21	0.17	0.10	0.14	0.18	0.14	0.18	0.14
09:00	0.09	0.14	0.13	0.10	0.20	0.19	0.14	0.14	0.20	0.17	0.14	0.09	0.11	0.14	0.14	0.14	0.12
10:00	0.09	0.14	0.14	0.11	0.19	0.18	0.14	0.13	0.19	0.16	0.15	0.09	0.11	0.15	0.15	0.15	0.13
11:00	0.10	0.15	0.15	0.11	0.19	0.18	0.14	0.13	0.19	0.16	0.15	0.10	0.12	0.15	0.15	0.15	0.14
12:00	0.10	0.16	0.16	0.12	0.19	0.18	0.15	0.14	0.19	0.16	0.15	0.12	0.13	0.16	0.16	0.16	0.14
13:00	0.10	0.16	0.17	0.13	0.21	0.21	0.16	0.15	0.21	0.19	0.17	0.13	0.14	0.17	0.14	0.17	0.14
14:00	0.06	0.11	0.12	0.08	0.17	0.18	0.12	0.10	0.17	0.16	0.12	0.07	0.10	0.12	0.10	0.12	0.09
15:00	0.06	0.11	0.12	0.08	0.19	0.20	0.13	0.10	0.19	0.18	0.13	0.06	0.09	0.13	0.09	0.13	0.08
16:00	0.08	0.14	0.16	0.10	0.27	0.28	0.18	0.14	0.27	0.25	0.18	0.07	0.13	0.17	0.17	0.17	0.11
17:00	0.07	0.09	0.13	0.06	0.27	0.28	0.16	0.17	0.27	0.27	0.14	0.04	0.08	0.15	0.08	0.15	0.08

DUCTO SOLATUBE\_4 ENERO 2012

MAÑANA					
Posición		HL:	07:22:00	T.S.V.	06:41:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	6	4	0.47	
1.29	2.88	5	7	0.42	
1.89	2.88	5	8	0.46	
2.49	2.88	1	10	0.05	
0.69	2.28	4	6	0.32	
1.29	2.28	5	24	0.39	
1.89	2.28	6	13	0.49	
2.49	2.28	4	15	0.31	
0.69	1.68	7	16	0.58	
1.29	1.68	6	17	0.52	
1.89	1.68	2	18	0.17	
2.49	1.68	4	19	0.31	
0.69	1.08	1	20	0.04	
1.29	1.08	5	21	0.38	
1.89	1.08	4	22	0.30	
2.49	1.08	2	23	0.16	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		1,711	100	1.711	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		1,171	68		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		1,494 lx		1.494	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		12.54	W/m2		
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		12.12	W/m2		
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado			

DUCTO SOLATUBE\_4 ENERO 2012

TARDE					
Posición		HL:	18:02:00	T.S.V.	17:21:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	7	4	0.56	
1.29	2.88	8	7	0.66	
1.89	2.88	5	8	0.38	
2.49	2.88	6	10	0.48	
0.69	2.28	5	6	0.37	
1.29	2.28	7	24	0.56	
1.89	2.28	10	13	0.80	
2.49	2.28	9	15	0.74	
0.69	1.68	8	16	0.62	
1.29	1.68	10	17	0.83	
1.89	1.68	9	18	0.73	
2.49	1.68	1	19	0.12	
0.69	1.08	3	20	0.20	
1.29	1.08	7	21	0.61	
1.89	1.08	6	22	0.52	
2.49	1.08	6	23	0.48	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		1,710	100	1.71	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		1,227	72		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		1,493 lx		1.493	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		15.27	W/m <sup>2</sup>		
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		15.14	W/m <sup>2</sup>		
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado			

DUCTO SOLATUBE \_4 ENERO 2012

INICIO DE 300 LX					
Posición		HL:	10:01:00	T.S.V.	09:20:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	305	4	0.54	
1.29	2.88	369	7	0.65	
1.89	2.88	365	8	0.64	
2.49	2.88	353	10	0.62	
0.69	2.28	308	6	0.54	
1.29	2.28	375	24	0.66	
1.89	2.28	351	13	0.62	
2.49	2.28	347	15	0.61	
0.69	1.68	323	16	0.57	
1.29	1.68	359	17	0.63	
1.89	1.68	302	18	0.53	
2.49	1.68	334	19	0.59	
0.69	1.08	298	20	0.52	
1.29	1.08	294	21	0.52	
1.89	1.08	323	22	0.57	
2.49	1.08	317	23	0.56	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		52,360	100	52.36	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		56,811	109		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		14,190 lx		14.19	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		520.6 W/m <sup>2</sup>			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		514 W/m <sup>2</sup>			
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado			

DUCTO SOLATUBE\_4 ENERO 2012

FIN DE 300 LX					
Posición		HL:	14:09:00	T.S.V.	13:28:00
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	318	4	0.48	
1.29	2.88	383	7	0.58	
1.89	2.88	380	8	0.57	
2.49	2.88	361	10	0.54	
0.69	2.28	312	6	0.47	
1.29	2.28	375	24	0.56	
1.89	2.28	364	13	0.55	
2.49	2.28	347	15	0.52	
0.69	1.68	322	16	0.48	
1.29	1.68	354	17	0.53	
1.89	1.68	304	18	0.46	
2.49	1.68	323	19	0.49	
0.69	1.08	305	20	0.46	
1.29	1.08	288	21	0.43	
1.89	1.08	315	22	0.47	
2.49	1.08	302	23	0.46	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		66,720	100	66.72	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		66,441	100		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		20,160	lx	20.16	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		665.6	W/m <sup>2</sup>		
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		661.1	W/m <sup>2</sup>		
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado			

		Iluminancias promedio horarias 1 de enero de 2012																	
	iluminancia exterior	Fotom 4	Fotom 7	Fotom 8	Fotom 10	Fotom 6	Fotom 24	Fotom 13	Fotom 15	Fotom 16	Fotom 17	Fotom 18	Fotom 19	Fotom 20	Fotom 21	Fotom 22	Fotom 23		
07:00	2,266	12	11	11	12	10	13	11	11	13	13	10	10	8	9	11	10		
08:00	18,852	114	134	132	127	114	136	125	124	123	133	111	120	109	105	118	113		
09:00	44,601	245	296	291	281	249	299	280	276	263	290	245	267	241	236	260	253		
10:00	65,619	338	413	406	394	340	414	386	382	352	393	331	367	326	320	352	349		
11:00	74,570	372	455	443	422	364	445	416	417	374	415	350	395	352	340	371	376		
12:00	78,327	362	462	348	404	376	459	428	429	391	426	361	408	380	357	389	392		
13:00	69,902	345	415	376	368	340	410	385	374	352	382	324	358	339	318	348	346		
14:00	54,802	202	245	239	220	210	253	240	224	224	243	207	218	213	201	219	206		
15:00	36,052	111	134	127	110	119	146	138	122	132	145	123	122	121	118	127	112		
16:00	18,584	70	84	80	70	75	92	86	77	84	90	77	77	76	74	81	73		
17:00	4,520	22	23	21	20	20	26	25	22	26	27	22	20	19	21	23	20		
18:00	173	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0		

Relación de Iluminancias horarias 1 de enero de 2012																
	Fotom 4	Fotom 7	Fotom 8	Fotom 10	Fotom 6	Fotom 24	Fotom 13	Fotom 15	Fotom 16	Fotom 17	Fotom 18	Fotom 19	Fotom 20	Fotom 21	Fotom 22	Fotom 23
07:00	0.51	0.50	0.51	0.51	0.42	0.55	0.48	0.49	0.58	0.59	0.46	0.43	0.37	0.40	0.49	0.44
08:00	0.60	0.71	0.70	0.67	0.61	0.72	0.67	0.66	0.65	0.70	0.59	0.63	0.58	0.56	0.63	0.60
09:00	0.55	0.66	0.65	0.63	0.56	0.67	0.63	0.62	0.59	0.65	0.55	0.60	0.54	0.53	0.58	0.57
10:00	0.52	0.63	0.62	0.60	0.52	0.63	0.59	0.58	0.54	0.60	0.50	0.56	0.50	0.49	0.54	0.53
11:00	0.50	0.61	0.59	0.57	0.49	0.60	0.56	0.56	0.50	0.56	0.47	0.53	0.47	0.46	0.50	0.50
12:00	0.46	0.59	0.44	0.52	0.48	0.59	0.55	0.55	0.50	0.54	0.46	0.52	0.49	0.46	0.50	0.50
13:00	0.49	0.59	0.54	0.53	0.49	0.59	0.55	0.54	0.50	0.55	0.46	0.51	0.49	0.45	0.50	0.50
14:00	0.37	0.45	0.44	0.40	0.38	0.46	0.44	0.41	0.41	0.44	0.38	0.40	0.39	0.37	0.40	0.38
15:00	0.31	0.37	0.35	0.31	0.33	0.40	0.38	0.34	0.37	0.40	0.34	0.34	0.34	0.33	0.35	0.31
16:00	0.38	0.45	0.43	0.38	0.40	0.49	0.46	0.42	0.45	0.48	0.41	0.41	0.41	0.40	0.43	0.39
17:00	0.48	0.50	0.47	0.44	0.45	0.58	0.54	0.48	0.57	0.59	0.49	0.45	0.43	0.46	0.51	0.45
18:00	0.32	0.23	0.19	0.35	0.25	0.39	0.36	0.35	0.40	0.39	0.35	0.07	0.09	0.37	0.30	0.26

DUCTO CON FOIL\_8 ENERO 2012

Mañana					
Posición		HL:	07:38	T.S.V.	06:55
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	5	4	0.20	
1.29	2.88	2	7	0.08	
1.89	2.88	4	8	0.19	
2.49	2.88	4	10	0.19	
0.69	2.28	2	6	0.09	
1.29	2.28	9	24	0.38	
1.89	2.28	12	13	0.52	
2.49	2.28	8	15	0.34	
0.69	1.68	8	16	0.35	
1.29	1.68	8	17	0.37	
1.89	1.68	7	18	0.33	
2.49	1.68	2	19	0.10	
0.69	1.08	1	20	0.02	
1.29	1.08	5	21	0.22	
1.89	1.08	8	22	0.37	
2.49	1.08	5	23	0.24	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		2,395	100	2.395	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		2,229	93		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		2,240 lx		2.24	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		24.28	W/m2		
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		23.48	W/m2		
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado			

DUCTO CON FOIL\_8 ENERO 2012

Tarde					
Posición		HL:	17:41	T.S.V.	16:58
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	6	4	0.19	
1.29	2.88	5	7	0.15	
1.89	2.88	5	8	0.18	
2.49	2.88	3	10	0.11	
0.69	2.28	5	6	0.17	
1.29	2.28	8	24	0.26	
1.89	2.28	8	13	0.26	
2.49	2.28	8	15	0.27	
0.69	1.68	8	16	0.26	
1.29	1.68	8	17	0.28	
1.89	1.68	8	18	0.25	
2.49	1.68	7	19	0.24	
0.69	1.08	5	20	0.16	
1.29	1.08	4	21	0.15	
1.89	1.08	9	22	0.29	
2.49	1.08	7	23	0.23	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		5,812	100	5.812	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		3,015	52		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		3,731 lx		3.731	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		66.51	W/m2		
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		63.94	W/m2		
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Despejado			

**Iluminancias horarias promedio\_ Ducto Foil\_ 8 de enero de 2012**

Iluminancia	Fotom 4	Fotom 7	Fotom 8	Fotom 10	Fotom 6	Fotom 24	Fotom 13	Fotom 15	Fotom 16	Fotom 17	Fotom 18	Fotom 19	Fotom 20	Fotom 21	Fotom 22	Fotom 23	
Hora Local																	
07:00	2,252	6	4	5	4	7	6	5	7	7	6	4	3	4	6	5	
08:00	20,891	46	48	45	43	51	47	45	47	49	40	42	38	38	43	40	
09:00	51,014	103	113	109	105	120	114	108	105	117	97	104	91	91	103	99	
10:00	66,448	150	169	162	154	176	167	160	149	170	140	155	133	136	153	152	
11:00	84,104	219	244	232	220	250	236	227	210	239	196	221	196	198	218	221	
12:00	91,741	242	271	264	250	278	266	256	252	273	223	253	254	240	257	260	
13:00	89,239	232	256	256	240	263	251	237	252	263	214	233	255	230	244	235	
14:00	77,800	103	117	118	109	127	120	109	115	124	101	103	104	101	108	98	
15:00	58,032	40	46	46	42	37	50	45	43	50	42	41	32	37	42	35	
16:00	27,886	28	31	32	29	37	36	32	30	36	30	29	21	25	30	24	
17:00	4,614	10	10	11	9	14	13	11	12	14	11	9	5	9	11	8	
18:00	169	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

		Relación de iluminancias_Ducto con Foil_8 de enero de 2012															
Hora Local	Fotom 4	Fotom 7	Fotom 8	Fotom 10	Fotom 6	Fotom 24	Fotom 13	Fotom 15	Fotom 16	Fotom 17	Fotom 18	Fotom 19	Fotom 20	Fotom 21	Fotom 22	Fotom 23	
07:00	0.26	0.20	0.23	0.18	0.19	0.32	0.27	0.24	0.31	0.32	0.28	0.20	0.15	0.19	0.26	0.22	
08:00	0.22	0.23	0.21	0.21	0.20	0.24	0.23	0.21	0.23	0.24	0.19	0.20	0.18	0.18	0.21	0.19	
09:00	0.20	0.22	0.21	0.21	0.19	0.24	0.22	0.21	0.21	0.23	0.19	0.20	0.18	0.18	0.20	0.19	
10:00	0.23	0.25	0.24	0.23	0.21	0.26	0.25	0.24	0.22	0.26	0.21	0.23	0.20	0.20	0.23	0.23	
11:00	0.26	0.29	0.28	0.26	0.24	0.30	0.28	0.27	0.25	0.28	0.23	0.26	0.23	0.24	0.26	0.26	
12:00	0.26	0.30	0.29	0.27	0.24	0.30	0.29	0.28	0.27	0.30	0.24	0.28	0.28	0.26	0.28	0.28	
13:00	0.26	0.29	0.29	0.27	0.25	0.29	0.28	0.27	0.28	0.29	0.24	0.26	0.29	0.26	0.27	0.26	
14:00	0.13	0.15	0.15	0.14	0.13	0.16	0.15	0.14	0.15	0.16	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.13	
15:00	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.09	0.09	0.08	0.07	0.09	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	
16:00	0.10	0.11	0.11	0.10	0.09	0.13	0.13	0.11	0.11	0.13	0.11	0.10	0.07	0.09	0.11	0.09	
17:00	0.22	0.21	0.23	0.20	0.17	0.30	0.29	0.24	0.27	0.30	0.25	0.20	0.12	0.19	0.24	0.18	
18:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	

DUCTO CON MIRROR CROMM\_29 ENERO 2012

MAÑANA					
Posición		HL:	07:29	T.S.V.	06:40
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	3	4	0.36	
1.29	2.88	2	7	0.23	
1.89	2.88	2	8	0.35	
2.49	2.88	0	10	0.00	
0.69	2.28	0	6	0.01	
1.29	2.28	4	24	0.62	
1.89	2.28	5	13	0.72	
2.49	2.28	5	15	0.63	
0.69	1.68	6	16	0.78	
1.29	1.68	6	17	0.78	
1.89	1.68	5	18	0.69	
2.49	1.68	1	19	0.09	
0.69	1.08	0	20	0.00	
1.29	1.08	2	21	0.34	
1.89	1.08	5	22	0.71	
2.49	1.08	2	9	0.31	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		1,026	100	1.026	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		718	70		
<b>Iluminancia glob2 OLIM:</b>		747 lx		0.747	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		7.831 W/m2			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		6.815 W/m2			
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Nublado			

## DUCTO CON MIRROR CROMM\_29 ENERO 2012

TARDE					
Posición		HL:	18:02	T.S.V.	17:13
X	Y	VALOR	FOTÓMETRO	% respecto CE	
0.69	2.88	5	4	0.53	
1.29	2.88	5	7	0.50	
1.89	2.88	5	8	0.50	
2.49	2.88	1	10	0.13	
0.69	2.28	4	6	0.45	
1.29	2.28	9	24	0.99	
1.89	2.28	7	13	0.75	
2.49	2.28	5	15	0.58	
0.69	1.68	8	16	0.80	
1.29	1.68	6	17	0.68	
1.89	1.68	6	18	0.61	
2.49	1.68	4	19	0.45	
0.69	1.08	1	20	0.07	
1.29	1.08	6	21	0.59	
1.89	1.08	8	22	0.89	
2.49	1.08	4	9	0.37	
		<b>VALOR (lx)</b>	<b>%</b>	<b>Klx</b>	
<b>Iluminancia global OLIM:</b>		1,369	100	1.369	
<b>Iluminancia gl Azotea CE:</b>		939	69		
<b>Iluminancia difusa OLIM:</b>		1,120 lx		1.12	
<b>Irradiancia 1 OLIM:</b>		12.53 W/m <sup>2</sup>			
<b>Irradiancia 2 OLIM:</b>		11.36 W/m <sup>2</sup>			
<b>Tipo de cielo SMN:</b>		Nublado			

**Iluminancias horarias promedio\_Ducto con Chrome Mirror\_ 29 de enero de 2012**

Hora Local	Illum ext	Fotom4	Fotom7	Fotom8	Fotom10	Fotom6	Fotom24	Fotom13	Fotom15	Fotom16	Fotom17	Fotom18	Fotom19	Fotom20	Fotom21	Fotom22	Fotom9
07:00	769	3	3	3	2	2	6	6	4	5	6	5	3	1	3	5	3
08:00	6,049	26	41	43	32	32	58	58	47	41	59	50	46	25	39	47	37
09:00	14,616	62	105	107	83	82	143	141	116	99	144	122	117	68	98	114	93
10:00	26,555	110	185	187	150	144	246	240	199	169	246	206	203	124	170	197	168
11:00	27,249	116	200	201	159	154	269	264	216	182	269	228	223	132	185	215	183
12:00	51,150	202	319	315	254	249	401	389	328	291	392	330	341	244	298	337	307
13:00	26,892	117	203	205	157	158	273	268	217	188	275	232	224	137	191	219	178
14:00	15,113	67	115	116	90	91	156	152	126	108	159	134	127	75	109	125	100
15:00	11,267	51	90	92	68	70	125	123	99	85	127	108	101	56	85	99	77
16:00	7,230	31	53	55	41	41	74	73	59	52	75	64	59	33	51	59	47
17:00	2,060	9	12	12	9	9	18	17	14	14	18	15	13	6	13	15	11
18:00	170	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0

**Relación de iluminancias\_ Ducto con Chrome Mirror\_29 de enero de 2012**

Hora Local	Fotom4	Fotom7	Fotom8	Fotom10	Fotom6	Fotom24	Fotom13	Fotom15	Fotom16	Fotom17	Fotom18	Fotom19	Fotom20	Fotom21	Fotom22	Fotom9
07:00	0.33	0.37	0.43	0.25	0.29	0.72	0.77	0.58	0.70	0.73	0.63	0.40	0.12	0.39	0.62	0.37
08:00	0.42	0.68	0.70	0.53	0.53	0.96	0.96	0.77	0.68	0.97	0.83	0.76	0.42	0.65	0.78	0.61
09:00	0.43	0.72	0.73	0.57	0.56	0.98	0.96	0.79	0.67	0.99	0.84	0.80	0.46	0.67	0.78	0.64
10:00	0.42	0.70	0.70	0.56	0.54	0.93	0.90	0.75	0.64	0.92	0.78	0.77	0.47	0.64	0.74	0.63
11:00	0.43	0.73	0.74	0.58	0.56	0.99	0.97	0.79	0.67	0.99	0.84	0.82	0.48	0.68	0.79	0.67
12:00	0.39	0.62	0.62	0.50	0.49	0.78	0.76	0.64	0.57	0.77	0.65	0.67	0.48	0.58	0.66	0.60
13:00	0.44	0.76	0.76	0.58	0.59	1.02	1.00	0.81	0.70	1.02	0.86	0.83	0.51	0.71	0.81	0.66
14:00	0.44	0.76	0.77	0.59	0.60	1.03	1.01	0.83	0.72	1.05	0.89	0.84	0.50	0.72	0.83	0.66
15:00	0.45	0.80	0.81	0.61	0.62	1.11	1.09	0.88	0.75	1.13	0.96	0.89	0.50	0.76	0.88	0.68
16:00	0.43	0.74	0.76	0.57	0.57	1.02	1.00	0.82	0.71	1.04	0.88	0.82	0.45	0.70	0.82	0.65
17:00	0.42	0.57	0.60	0.44	0.45	0.89	0.84	0.69	0.70	0.89	0.75	0.62	0.30	0.61	0.72	0.52
18:00	0.24	0.23	0.27	0.17	0.21	0.55	0.56	0.41	0.80	0.55	0.42	0.20	0.05	0.38	0.50	0.20