



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**

APROVECHAMIENTO DE LA LUZ NATURAL, A TRAVÉS DE VIDRIOS DE ALTA  
TECNOLOGÍA, EN UNA OFICINA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN ARQUITECTURA

En el campo de conocimiento de Tecnologías

P R E S E N T A

Arq. Claudia Ivette Gómez Pérez

TUTORA PRINCIPAL

Dra. Cecilia Genoveva Guadarrama Gándara

Facultad de Arquitectura, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dra. Doris Abigail Chi Pool

Universidad de las Américas Puebla, UDLAP

Dra. Adriana Lira Oliver

Facultad de Arquitectura, UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX., febrero 2023



INSTITUTO  
DE INVESTIGACIONES  
HISTÓRICAS



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



## **TUTORA PRINCIPAL**

Dra. Cecilia Genoveva Guadarrama Gándara

Facultad de Arquitectura, UNAM

## **SINODALES**

Dra. Doris Abigail Chi Pool

Universidad de las Américas Puebla, UDLAP

Dra. Adriana Lira Oliver

Facultad de Arquitectura, UNAM

Dr. Mauro Valdés Barrón

Instituto de Geofísica, UNAM

Dr. David Morillón Gálvez

Instituto de Ingeniería, UNAM





## *Dedicatoria*

A mi mamá y papá:

Por confiar en mí, por apoyar e impulsar cada uno de mis sueños. Por su amor infinito y aliento en cada paso que doy. Gracias por ser mis cimientos y no soltarme, esto es por y para ustedes. Los amo para siempre

A mi hermano y hermana:

Porque siempre han creído y confiado en mí, por impulsarme e inspirarme cada día. Gracias por ser mis rayitos de Sol, los admiro y amo con el alma.

*Son luz en mi vida...*



## *Agradecimientos*

A mi alma máter, la UNAM, por estos años de estar en sus aulas, incluso en la virtual.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación.

Al Laboratorio de Iluminación Arquitectónica por el préstamo del equipo para avanzar con la simulación.

A Alejandra, Noelia y Arturo por la información arquitectónica proporcionada.

A los maestros, maestras, doctores, doctoras de este posgrado, porque cada uno ha sido parte importante de este proceso y les he aprendido mucho.

Un especial agradecimiento a la Dra. Cecilia Guadarrama, por su dedicación, dirección y entusiasmo para el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir su tiempo y conocimiento conmigo durante estos años.

Gracias a mi Comité Tutor, la Dra. Doris y la Dra. Adriana, ha sido un placer y un gusto aprender de dos grandes mujeres y profesionistas. En especial gracias a la Dra. Doris porque desde el primer momento me apoyó y contribuyó con esta investigación. Gracias a mis sinodales, el Dr. Mauro y Dr. David por sus comentarios y por haberse sumado a este equipo de trabajo.

Gracias a mis compañeros y compañeras porque aprendí mucho de cada uno, incluso a la distancia. En especial gracias, Lucía, por compartir tu conocimiento y amistad, por alentarme y haber concluido juntas esta etapa.

Gracias a mis amigos que han estado cerca de una u otra forma en cada etapa; a esas mujeres y amigas que me han inspirado a lo largo de la vida y a quienes admiro mucho: Ana, Marlenne, Alejandra, Noemi, Ana Laura, Abril, Andrea, Annie, Nancy e Irma; gracias por estar y permanecer. Mi cariño para todas y todos ustedes.

Por último, agradezco infinitamente a mi familia, ya que nada de esto sería posible sin ellos. Los amo siempre.

*Para cerrar con broche de oro...*

*¡Gracias vida!*

*Porque el Sol siempre vuelve a salir y deberíamos estar agradecidos por eso.*



## *In memoriam*

De Venustiano Pérez

Porque de tu últimas palabras para mí fueron “tú puedes” y no sabías lo que se venía, pero esas palabras han estado presentes cada día.



“

La luz ha sido motivo de las más bellas y variadas expresiones. Desde siempre la humanidad ha vivido atraída por los fenómenos luminosos, ha jugado y experimentado con ellos, ha buscado entenderlos y ha hecho uso de ellos. A través de esa singular ventana que son nuestros ojos, la luz nos ha permitido conocer y entender mejor el mundo y aprovechar su belleza.

CETTO, 1996

”





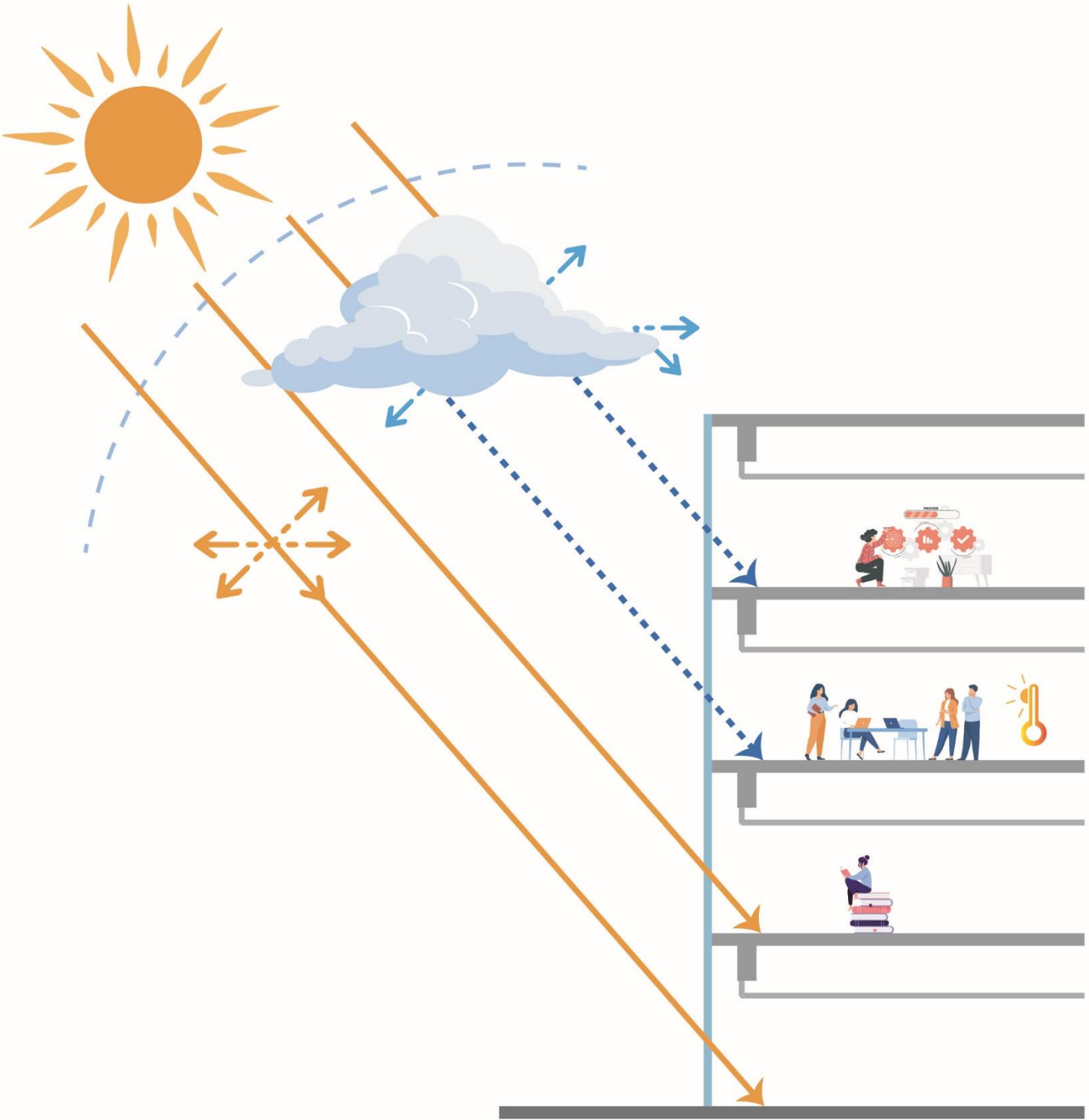
## TABLA DE CONTENIDO

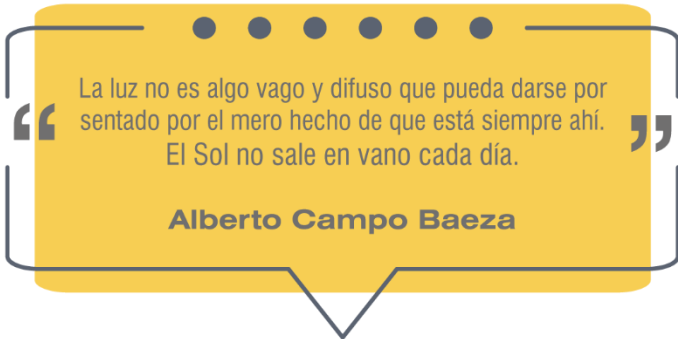
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 1: LA LUZ NATURAL .....</b>	<b>23</b>
1.1 Radiación solar .....	25
1.2 Climatología .....	30
1.2.1 Tipos de cielo.....	35
1.3 Componente directo: trayectorias solares.....	39
1.4 Componente difuso de la luz natural .....	42
1.5 Aprovechamiento eficiente del recurso lumínico .....	44
Conclusiones.....	51
<b>CAPÍTULO 2: VIDRIOS DE ALTA TECNOLOGÍA .....</b>	<b>53</b>
2.1 Origen del vidrio.....	55
2.2 Componente lumínico lateral.....	57
2.3 Distribución de la luz.....	63
2.4 Componentes de un vidrio .....	71
2.5 Vidrios de alta tecnología.....	74
Conclusiones.....	78
<b>CAPÍTULO 3: CONFORT LUMÍNICO .....</b>	<b>79</b>
3.1 Definición de confort lumínico .....	81
3.2 Niveles de iluminación .....	84
3.3 Métricas aplicables a la luz natural .....	90
Conclusiones.....	99
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....</b>	<b>101</b>
4.1 Flujo de trabajo .....	103
4.2 Caso de estudio .....	109
4.2.1 Ubicación.....	110
4.2.2 Descripción del contexto .....	115
4.2.3 Condicionantes del edificio .....	116
4.3 Simulación asistida por computadora .....	120
4.3.1 Archivo climático para la simulación: EPW .....	131
4.3.2 Parámetros para cálculo de iluminancia .....	135
4.3.3 Parámetros para cálculo de iluminancia anual.....	142
4.3.4 Parámetros para cálculo de deslumbramiento .....	146
Conclusiones.....	153

<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....</b>	<b>155</b>
5.1    Presentación de los resultados.....	157
5.1.1    Resultados de iluminancias .....	157
5.1.2    Resultados de iluminancia anual .....	164
5.1.3    Resultados de deslumbramiento.....	167
5.2    Evaluación de los resultados .....	173
5.2.1    Evaluación de iluminancias .....	173
5.2.2    Evaluación de iluminancias anuales .....	176
5.2.3    Evaluación de deslumbramiento.....	178
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y APORTACIONES .....</b>	<b>181</b>
6.1    Conclusiones.....	183
6.2    Aportaciones.....	188
6.2.1    Futuras líneas de investigación .....	189
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>191</b>
Figuras.....	198
Tablas.....	200
<b>ANEXOS.....</b>	<b>201</b>
Anexo 1.....	203
Gráficas de iluminancia de los planos de trabajo.....	203
Anexo 2.....	211
Niveles de iluminancia de los planos de trabajo.....	211
Anexo 3.....	212
Deslumbramiento con el vidrio original.....	212
Anexo 4.....	218
Deslumbramiento con el vidrio SKN 176.....	218



# **INTRODUCCIÓN**





“La luz no es algo vago y difuso que pueda darse por sentado por el mero hecho de que está siempre ahí. El Sol no sale en vano cada día.”

**Alberto Campo Baeza**

La luz natural es un tema que se ha estudiado por años en la comunidad científica. En el Posgrado de Arquitectura de la UNAM el tema se ha estudiado desde distintas perspectivas con el objetivo de conocer mejor este recurso para una correcta aplicación dentro de la arquitectura. La luz natural es proporcionada por la naturaleza y viene del Sol, por lo que es un recurso inagotable. Usar la luz natural tiene múltiples beneficios, su aprovechamiento dependerá de factores como la ubicación, el día y la hora en la que nos encontremos, lo que la hace única según el lugar y momento.

A causa de la crisis ambiental que hemos vivido en las últimas décadas la luz natural se ha vuelto importante y aprovecharla en los espacios interiores es vital, ya que las personas pasamos la mayor parte de nuestro tiempo en el interior. Los espacios de oficina no son la excepción, ya que se tienen jornadas de entre 8 y 10 horas; entonces “si los seres humanos pasamos la mayor parte de nuestro tiempo en espacios interiores, debemos estar en un estado de comodidad, permanecer en lugares que nos hagan sentir bien y que nos motiven a realizar cada una de nuestras actividades” (Gómez, 2022). Con el ingreso de luz natural habría efectos positivos sobre los trabajadores, al disminuir el cansancio, mejorar su rendimiento y mantenerlos en un mejor estado de ánimo. Por otro lado, el uso de la luz natural ayuda a reducir el uso de los sistemas artificiales tanto de iluminación como de calefacción y esto lleva a la disminución del gasto energético. En Estados Unidos, de acuerdo con el Departamento de Energía (DOE) citado en Lechner (2015, p.403), la iluminación consume alrededor del

25% de la electricidad de todos los edificios y el 40% corresponde a edificios comerciales; aproximadamente la mitad de toda esa electricidad podría ahorrarse si empleamos luz natural. Si aprovechamos la luz natural, en los edificios de oficinas, podríamos contribuir al ahorro de energía para reducir el porcentaje estimado por la DOE, además de disminuir los efectos de incomodidad visual y aportar a la sustentabilidad.

Ahora bien, la luz incide sobre las fachadas de los edificios y es a través de ésta que entra la luz al interior. Los materiales utilizados en las construcciones cambian constantemente, a causa de las tendencias y la temporalidad, así pues en los últimos años uno de los materiales predominantes para el recubrimiento de fachadas ha sido el vidrio, en México y el mundo, principalmente en los edificios corporativos de gran altura. Su uso se debe sobre todo a la estética y limpieza que proporciona en las fachadas, además de la rapidez de su colocación, la versatilidad que proporciona al diseño y que es uno de los materiales que permite la transmisión de luz. Es cierto que el uso del vidrio nos proporciona ciertas ventajas sobre otros materiales, pero en esta investigación se detectó la problemática de que al tener una superficie vidriada de casi el 100% existe un deslumbramiento al interior de las oficinas, lo que genera incomodidad en los trabajadores; motivo por el que utilizan elementos de protección solar al interior, como son las persianas y con esto bloquean el paso de la luz natural, esta acción los lleva a utilizar sistemas artificiales —tanto de luz como de calefacción— incluso en horas innecesarias.

Derivado de lo anterior, si se siguiera utilizando el vidrio como material predominante en el recubrimiento de los edificios deberíamos buscar soluciones óptimas para iluminar de forma natural el espacio interior controlando su incidencia para evitar excesos de luz y calor. Si bien, la entrada de luz y calor están íntimamente relacionados, para este trabajo sólo nos enfocamos en la primera y en cómo aprovecharla. Para ello se realizó el análisis de la eficiencia de la transmisión de luz con el porcentaje de transmitancia visible de tres vidrios de alta tecnología para evaluar su respuesta lumínica y distribución; estos vidrios



se comparan con uno de características similares al existente en una oficina dentro de un edificio corporativo en la Ciudad de México.

De los diversos estudios que se han realizado entorno a la luz natural es que sabemos cómo se comporta, cómo se distribuye y cómo incide en un sitio durante todo el año. Cuando comprendemos cómo trabaja y cómo se distribuye podemos reducir tanto el deslumbramiento como el sobrecalentamiento al diseñar y aplicar estrategias lumínicas. Dicho lo anterior, esta investigación tiene relevancia porque partimos de una orientación en específico —suroeste— donde buscamos determinar con qué vidrio se aprovecha y distribuye mejor la luz natural. Se hará la evaluación con vidrios de alta tecnología porque, como ya se mencionó, se utiliza este material en los recubrimientos de los edificios corporativos para brindar una imagen limpia y mantener la estética en el edificio. Y si la tendencia de utilizar vidrios prevalecerá por más años, es importante usar de forma consciente los vidrios de alta tecnología. También aprovechar lo que hoy en día se oferta, ya que la tecnología avanza y con esto se amplían las alternativas que tenemos para dar mejores soluciones al aprovechamiento de la luz natural.

En cuanto a los alcances de esta investigación, se busca cumplir con tres objetivos, el general, el específico y el metodológico. El primero es evaluar el porcentaje de transmitancia visible de los vidrios de alta tecnología en cuanto a su utilidad lumínica y deslumbramiento en una oficina de Torre Esmeralda I, en una jornada laboral de 8 a 18 horas. El segundo es probar que los niveles de iluminancia natural útil se mantienen en un rango de 300 a 3000 lux el 60% del tiempo de ocupación. El tercero es demostrar que mediante simulaciones por computadora se puede conocer el porcentaje de iluminancia útil y evaluar el deslumbramiento al interior de una oficina en Torre Esmeralda I. La hipótesis de esta investigación es que con el uso de un vidrio de alta tecnología se aprovecha la iluminancia natural hasta en un 60% del tiempo de ocupación, con niveles de 300 a 3000 lux, lo que disminuye el deslumbramiento al interior de una oficina en la Ciudad de México.



Por último, lo que se busca es obtener una metodología para la evaluación de la iluminancia por medio del porcentaje de transmitancia visible que tienen los vidrios de alta tecnología y cómo afecta en el deslumbramiento. Esta metodología podrá contribuir para que en un futuro en México se realicen las evaluaciones por medio de simulaciones por computadora y con estas llegar a un diseño lumínico donde se aproveche la luz natural el mayor tiempo posible. De tal manera que un espacio se ilumine de forma natural manteniendo niveles óptimos de iluminancia y de deslumbramiento.

Para el desarrollo de esta investigación es importante mencionar que se llevó a cabo durante un periodo de pandemia, razón por la que no estaban disponibles los laboratorios. Esta situación complicó las mediciones en sitio por las restricciones de acceso a la oficina, por lo que la pandemia fue una situación extraordinaria en el desarrollo de este trabajo, pues inicialmente se tenían planeadas mediciones en sitio y el plan de respaldo dada la contingencia sanitaria que se vivía en el mundo era realizar simulaciones. Fue así como el plan B se convirtió en el A y se tuvo que replantear la forma de trabajar y la simulación se volvió en el eje rector. Es importante mencionar que se buscaron programas que estuvieran aprobados ante la comunidad científica y que cumplieran con los requisitos de confiabilidad de las pruebas, incluso si eran simuladas.

Este trabajo se desarrolla en seis capítulos, donde se incluyen tres ejes teóricos: luz natural, vidrios de alta tecnología y confort lumínico; los cuales corresponden a los primeros tres capítulos del presente documento; los otros tres capítulos son la parte metodológica, los resultados con su pertinente evaluación y por último las conclusiones y aportaciones a las que se llegaron.

En el “**Capítulo 1: la luz natural**” se habla de la radiación solar, climatología, los tipos de cielo y el aprovechamiento lumínico natural; se destaca cómo se distribuye la luz natural, los beneficios que tiene en la salud y bienestar de las personas cuando ésta ingresa al interior de los espacios. El “**Capítulo 2:**

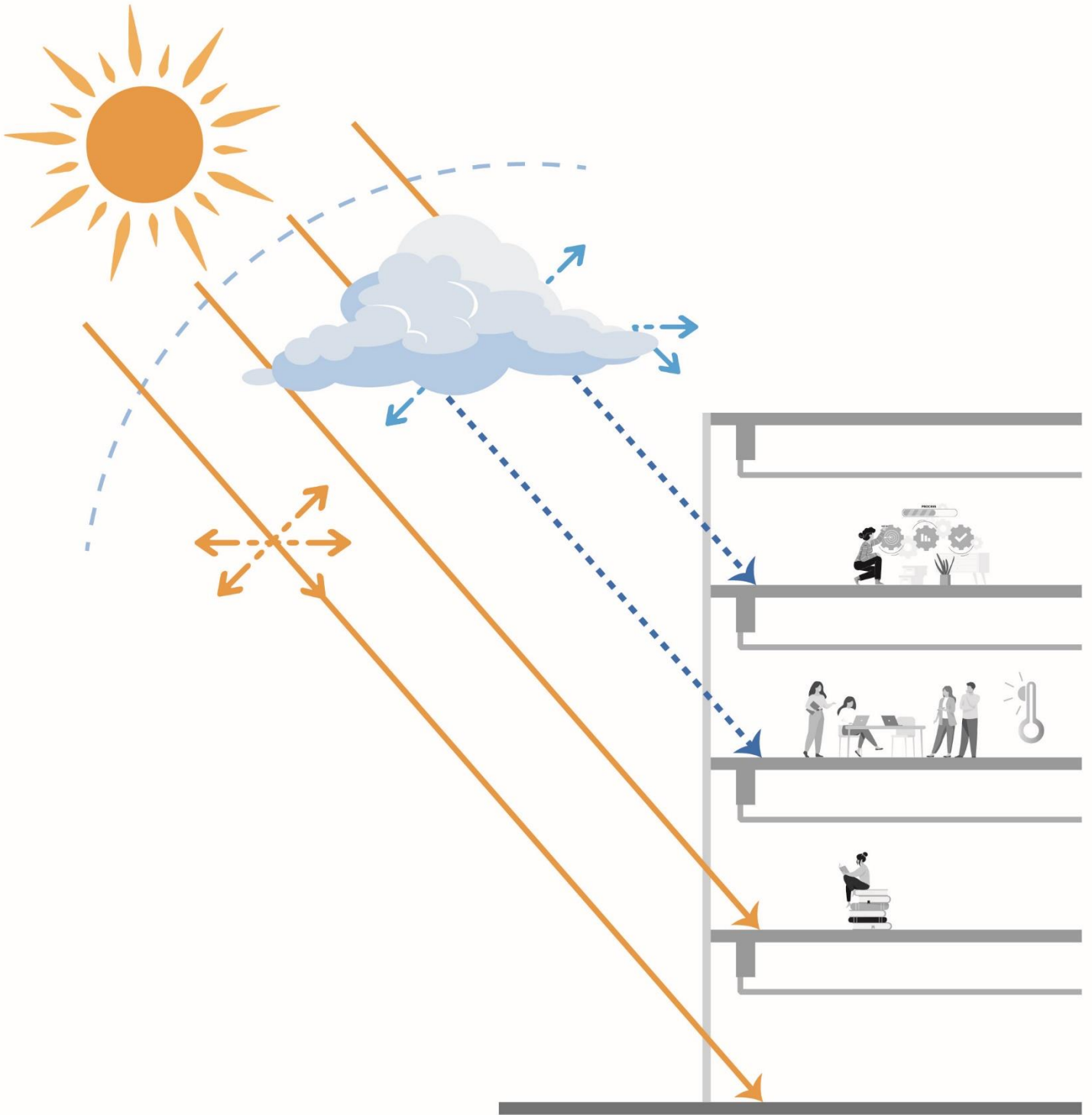


**vidrios de alta tecnología”** se aborda el origen del vidrio, el componente lumínico a través del vidrio, las formas de iluminar un espacio destacando la iluminación lateral, la distribución y las características de los vidrios de alta tecnología; todo esto en relación con el vidrio, pues es el elemento arquitectónico que va a filtrar y controlar la incidencia solar. En el **“Capítulo 3: confort lumínico”** es cómo nos vamos a sentir mejor o las condiciones lumínicas que se deben cumplir para lograr confort al interior de las oficinas, también se abarca la normativa que se debe cumplir para poder lograr estas condiciones de comodidad para las personas. Para el **“Capítulo 4: metodología”** se explican distintos aspectos de una investigación, cuáles son y por qué se determinó que esta investigación fuera de tipo cuantitativa; asimismo, se explican las variables que componen y rigen este trabajo. Además, se explica la metodología para el análisis lumínico con una simulación por computadora. En el **“Capítulo 5: resultados”** en primera instancia se presentan los resultados para después analizarlos, en ambos casos se seccionan en tres, el primero es para iluminancias, el segundo para iluminancia anual y el tercero para el deslumbramiento. Para cerrar está el **“Capítulo 6: conclusiones y aportaciones”** donde se cierra este trabajo y se exponen las futuras líneas de investigación. Después del capítulo 6 se presenta la bibliografía y los anexos.



# **LA LUZ NATURAL**

**CAPÍTULO 1**



## 1.1 Radiación solar

Cuando nos referimos a la luz natural, estamos hablando de la luz que proviene del Sol: estrella del universo capaz de emitir luz y que se encuentra aproximadamente a 150 millones de kilómetros de la Tierra, es el cuerpo celeste más brillante que podemos ver. El Sol ha jugado un papel importante en la historia de la humanidad, ya que las primeras culturas y civilizaciones lo reconocían como una deidad, tenían festividades y templos para honrarlo, lo que se comprueba incluso en algunas obras arquitectónicas. En México “los mayas denominaban *K'inich Ajaw* al dios del Sol, concebido como el generador del tiempo, la luz y el calor y los cuatro rumbos del universo. Entre los mexicas o aztecas se les conocía como *Tonatiuh* y era considerado líder del cielo” (Riveros *et al.*, 2012, p.12). A diferencia de aquellas culturas antiguas, la sociedad en la que vivimos, por desgracia, está tan inmersa en la tecnología que parece olvidar el valor y reconocimiento de los recursos naturales. Incluso olvidamos que el Sol es una de las fuentes de energía renovable más importante con la que contamos y que al ser un recurso inagotable —al menos por miles y miles de años más— su aprovechamiento puede ser infinito.

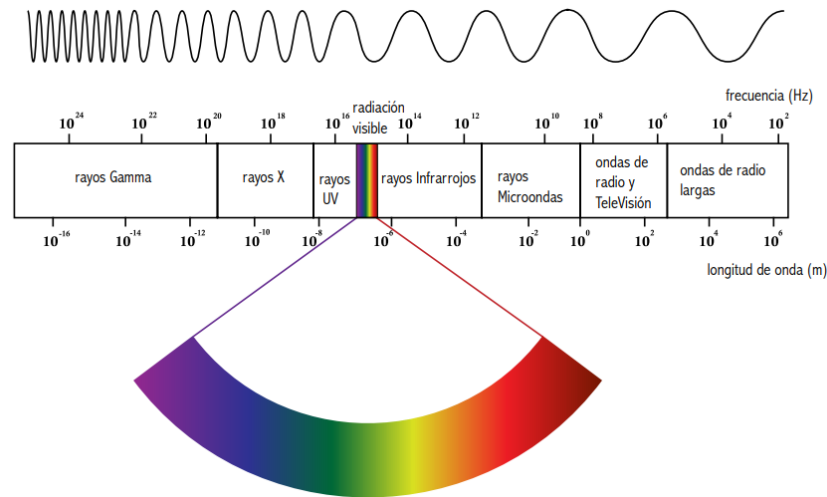
Ahora bien, la radiación solar es la energía emitida por el Sol y de la radiación que llega a la Tierra se estima que alrededor del “30% se refleja directamente en el espacio y el 20% en la superficie terrestre. El 46% restante se absorbe y se convierte en diferentes formas de energía, como la evaporación del agua, el viento y la radiación infrarroja lejana” (Reinhart, 2014, p.40). Cabe destacar que el Sol emite energía en forma de radiación de onda corta y cuando ésta se regresa al espacio exterior se da en forma de onda larga. Asimismo, la radiación se propaga mediante ondas electromagnéticas con diferentes longitudes, las cuales se dividen en: radiación ultravioleta, visible e infrarroja. En términos generales, la radiación ultravioleta es la que tiene influencia en la salud humana ya que al estar mucho tiempo al aire libre puede

causar cáncer de piel o cataratas, sin embargo, la capa de ozono filtra la mayor parte de esta radiación; la visible es la que conocemos como luz y es la que puede detectar el ojo humano; y finalmente la infrarroja es la que proporciona calor.

La propagación del campo electromagnético se da en forma de rayos. “Las ondas electromagnéticas transportan energía [...] en su combustión interna, el Sol consume energía y parte de esa energía llega hasta nosotros y nos permite vivir” (Tornquist, 2008, p.31). Por su parte, la Comisión Internationale de L’Eclairage [CIE] (2011, citado en Chi, 2021, p.35) indica que de toda la radiación solar el 7% corresponde a la radiación ultravioleta, la cual tiene ondas menores a los 380 nm; mientras que la visible abarca un 47% con ondas de entre los 380 nm a los 780 nm y, por último, un 46% es infrarroja, la cual comprende longitudes arriba de los 780 nm. De las tres regiones del espectro electromagnético (ver **Figura 1**), el visible es el más importante, porque como ya se mencionó es el que percibe el ojo humano, y es el que nos permite ver los objetos. Además, los objetos reflejan energía que resulta de las longitudes de onda reflejadas por los mismos objetos; emiten onda corta, media y larga, depende del tipo de onda el color que percibimos. El espectro visible tiene una longitud de onda que va del violeta (380 nm) al rojo (780 nm) estadísticamente hablando “se ha establecido que la mayor sensibilidad del ojo se sitúa alrededor del centro de tal espectro, o sea a 555 nm (amarillo-verde) en la visión diurna y a 510 nm en la visión nocturna.” (Tornquist, 2008, p.31). Cabe destacar que a la visión diurna se le conoce como fotópica, mientras que la nocturna es denominada escotópica. Finalmente, si queremos aprovechar la luz natural en los espacios interiores se debe hacer dentro del espectro visible.

**Figura 1**

**Espectro electromagnético**



Nota. Tomado de Lira y Guevara (s.f.).

Una vez aclarado el espectro electromagnético podemos seguir con el hecho de que el planeta Tierra se mueve entorno al Sol de forma elíptica, lo que genera los movimientos de rotación y traslación, los cuales determinan las horas y los días respectivamente. El movimiento de traslación es el más importante ya que determina el año y el cambio de las estaciones; aunado a este movimiento está la declinación solar y en conjunto estos elementos son los causantes del cambio de estaciones. La declinación solar de acuerdo con (Iqbal, 1983, p.6) se define como el ángulo entre una línea que une los centros del Sol y la Tierra con el plano ecuatorial cada día y en cada momento, esto da como resultado el cambio de estaciones, las cuales están marcadas por las siguientes fechas:

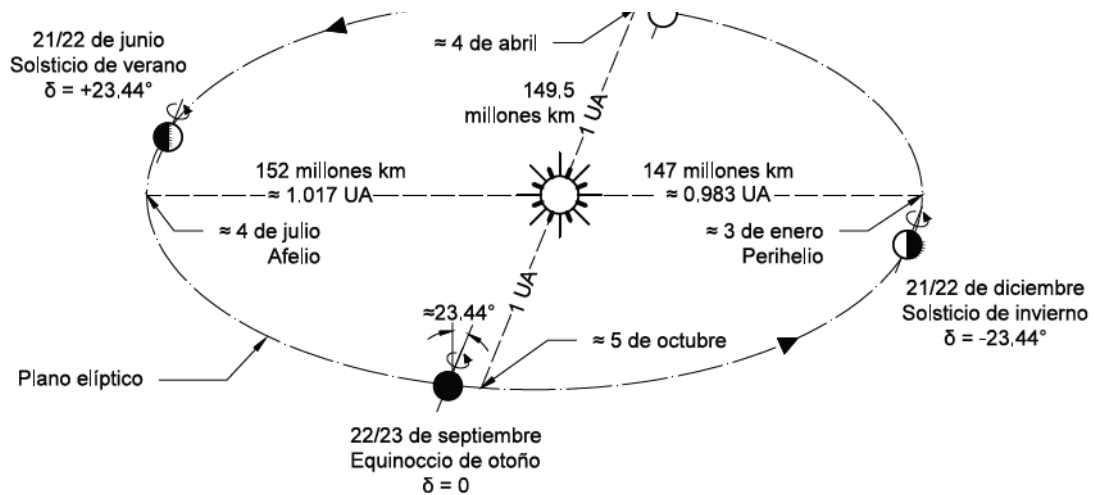
- **Equinoccio de primavera:** 20/21 marzo
- **Solsticio de verano:** 21/22 junio
- **Equinoccio de otoño:** 22/23 septiembre
- **Solsticio de invierno:** 21/22 diciembre



A causa del movimiento de la Tierra las distancias y ángulos de la Tierra al Sol son diferentes para cada época estacional (ver **Figura 2**) en los equinoccios la declinación solar tiene un ángulo de  $0^\circ$  y se encuentra a una distancia de 149.5 millones de km; mientras que en los solsticios su declinación es de  $23.44^\circ$ , positivo en verano con una distancia de 152 millones de km y negativo en invierno con una distancia de 147 millones de km al Sol. Debido a estas posiciones y movimientos, la cantidad de luz que recibimos es diferente cada día y cada momento del año, lo cual también depende de la ubicación geográfica.

**Figura 2**

**Movimientos de la Tierra alrededor del Sol**



Nota. Tomado de Guadarrama, (2017, p.38).

Derivado de la distancia que existe entre el Sol y la Tierra, la radiación que recibimos es menos intensa que si estuviéramos más cercanos al mismo. La energía solar que llega del exterior tiene un valor constante, conocido como constante solar y su valor es de  $1\ 367\ \text{W/m}^2$  y éste fue determinado en 1980. La radiación solar que se tiene en la superficie de la Tierra no es la misma que



la que está fuera de la atmósfera, debido a que cuando los rayos llegan a la Tierra sufren cambios al interactuar con los gases y partículas que forman la atmósfera terrestre; su atenuación dependerá de factores astronómicos, geográficos, geométricos, meteorológicos y efectos físicos y químicos, dichos factores son variables en el tiempo y espacio. Riveros *et al.* (2012, p.28) mencionan que los componentes atmosféricos que afectan la radiación solar son los gases constituyentes de la atmósfera, vapor de agua y otros gases, ozono, polvos y partículas suspendidas como los aerosoles.

De la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra se debe considerar que “las longitudes de onda reales presentes en la luz del día variarán a lo largo del día, con las condiciones meteorológicas, con la latitud y con la estación” (Boyce *et al.*, 2003, p.16). La radiación solar se divide básicamente en tres flujos: directo, difuso y global. La radiación directa “es la parte que se recibe directamente del Sol sin sufrir ninguna dispersión atmosférica” (Tejeda y Gómez, 2015, p.14), no obstante, Riveros *et al.*, (2012, p.40), mencionan que este flujo sufre atenuaciones en su trayecto a la superficie de la Tierra, debido a la interacción con sus diversos componentes. Por otro lado, en la radiación difusa influyen procesos de extinción como la absorción, dispersión, refracción y reflexión; lo que ayuda a distribuir la radiación directa para dar paso a la difusa “una gran parte de la radiación difusa que llega a la superficie terrestre, es dispersada principalmente por aerosoles y a menor medida por moléculas de aire” (Guadarrama, 2017, p.62). Asimismo, Tejeda y Gómez (2015, p.14) mencionan que esta radiación se recibe a través de las nubes, así como de la que proviene del cielo. Y que, de no haber radiación difusa, el cielo se vería negro aún de día, tal como sucede en la Luna. Por último, la radiación global es toda la radiación que llega a la Tierra, la cual se mide sobre una superficie horizontal con un ángulo de  $180^\circ$ , es el resultado de la radiación directa más la radiación difusa; cada componente que forma la radiación global varía con la altura del Sol, la

transparencia de la atmósfera y de la nubosidad. Por todo lo anterior, hay que considerar que:

El estudio de la iluminación natural supone la valoración de la iluminación generada por las fuentes naturales (Sol y cielo) en un punto determinado [...] tiene una alta variabilidad en función de una serie de parámetros meteorológicos, estacionales y geométricos de difícil sistematización. En base a estos parámetros los niveles de iluminación provenientes de las fuentes de luz natural tienen una alta variabilidad temporal y cuantitativa (Esquivias, 2017, p.153).

En términos geográficos, México se encuentra en el hemisferio norte en la zona intertropical, con unas coordenadas extremas que, de acuerdo con el INEGI, (2022) comprende una latitud norte de  $32^{\circ}43'06''$  y una latitud sur de  $14^{\circ}32'25''$ . Gracias a esta localización nuestro país cuenta con una importante variedad de recursos naturales. La incidencia de la luz natural, como ya sabemos, dependerá mucho del punto geográfico donde estemos, razón por la que México se encuentra en una situación privilegiada, ya que tenemos incidencia solar durante todo el año. Lo anterior nos obliga a conocer este recurso para poder explotarlo al máximo, por lo que debemos estudiarlo para poder hacer un uso adecuado y correcto de este recurso natural.

## 1.2 Climatología

Empecemos por definir el clima, el cual de acuerdo con el Diccionario de la Real Academia Española (DRAE) es el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región. Por otro lado, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) usa la definición que aparece en la *Guía de Prácticas de Climatología* y dice que es el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y la evolución del tiempo, en el curso de un periodo suficientemente



largo y en un dominio espacial determinado. Relacionado con esta última definición tenemos que el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) dice que el clima es el promedio de las condiciones atmosféricas durante largos periodos (30 años o más) en una región determinada, con lo que ya hacemos referencia a la climatología. “La climatología es una rama de la meteorología basada en la física experimental y en la geografía, en la cual el factor geográfico prevalece sobre el físico, por lo que se dice que la climatología es la parte geográfica de la meteorología” (Ayllón, 2003, p. 179).

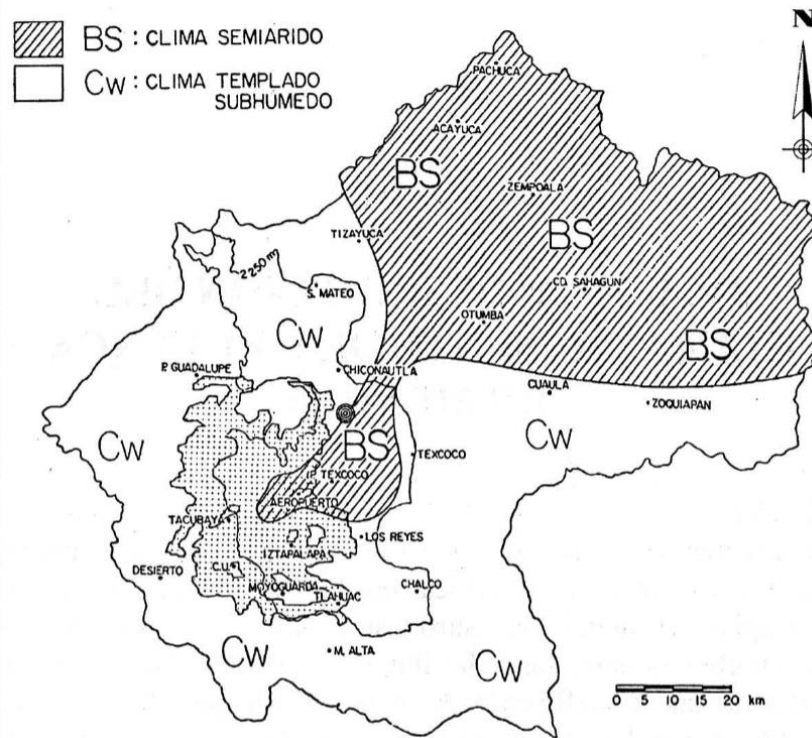
Derivado de que el clima es diferente para cada región, en 1900 el botánico y climatólogo Wladimir Köppen diseñó la que sería la clasificación climática más usada en la historia, debido a su simplicidad, rigor y facilidad de aplicación. Los principales criterios que consideró al diseñarla fueron la temperatura, las precipitaciones y la distribución de la vegetación. Esta clasificación tiene un número reducido de categorías —sólo cinco— pero son suficientes para abarcar el ámbito geográfico mundial: climas tropicales lluviosos, climas áridos, climas húmedos mesotérmicos, climas húmedos microtérmicos y climas polares. Sin embargo, ya que la clasificación de Köppen es a nivel mundial, fue en 1970 que la mexicana Enriqueta García elaboró una clasificación que corresponde únicamente al clima de la República Mexicana. La clasificación de García divide el clima en cinco principales grupos: húmedos, subhúmedos, semi-áridos, áridos y muy áridos.

Ahora bien, de acuerdo con la clasificación de climas de Köppen modificada por García, la Cuenca de México tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, a la que corresponde una nomenclatura de C(w<sub>0-2</sub>). Dentro de esta clasificación se identifican dos temporadas, las de lluvias y secas, siendo la primera en los meses de junio a octubre y la segunda de noviembre a mayo. No obstante, Jáuregui (2000, p.31) habla en especial del clima de la Cuenca de México (ver **Figura 3**) y lo describe de la siguiente forma:

El clima de la Cuenca de México es tropical (por su régimen de lluvias) atemperado por la altitud a la que se ubica en el centro del país. De acuerdo con una clasificación climática universal (Köppen) es templado en su porción centro y sur, y seco de tipo estepa en la parte norte y oriente. Zona semiárida (BS de Köppen) de la cuenca se encuentra enclavada en la porción centro-oriental de la ciudad.

**Figura 3**

*Los climas de la cuenca de México*



Nota. Recuperado de Jáuregui, (2000, p.32).

Para la clasificación de los climas se toman en cuenta factores y elementos climáticos, Ayllón (2003, p.180) señala que los elementos se pueden clasificar en dos tipos: geodinámicos y acuosos. Dentro de la primera clasificación están la temperatura, presión y viento; mientras que en el segundo están la humedad,



nubosidad y precipitación; de estos elementos la temperatura y la precipitación son los que ayudan a la clasificación de climas. Por otro lado, esta misma autora menciona que los factores que modifican los climas son: insolación, latitud, altitud, corrientes marinas, distribución de tierras y mares, vegetación y suelos, entre otros.

Cabe resaltar que las características relevantes y sobresalientes del clima tropical de la Cuenca de México se deben a factores como la latitud, su variada topografía, entre otros. Asimismo, hay elementos que juegan un papel importante en cuanto a la disponibilidad lumínica que recibimos, tales como la humedad, nubosidad, presión atmosférica y viento; a continuación, se describe cada uno, así como su relación con la radiación solar.

**Humedad:** es el indicador de la cantidad de vapor de agua que hay en el aire, además es uno de los más importantes al absorber la radiación solar incidente y la radiación reflejada.

**Presión atmosférica:** es el peso de la masa de aire por unidad de superficie, razón por la que a nivel de mar es mayor, por lo tanto, en el mar al tener mayor presión atmosférica y densidad del aire, la dispersión de la radiación es mayor.

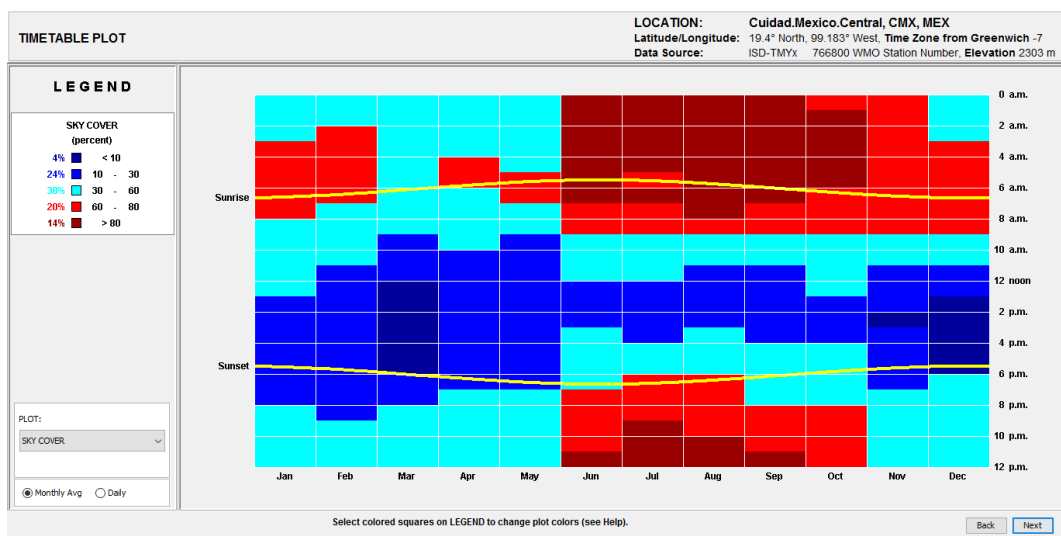
**Viento:** es el movimiento que tiene el aire en la atmósfera y su desplazamiento es de las zonas altas a las de baja presión. Es relevante conocer los flujos del viento, los cuerpos orográficos y el origen de los aerosoles atmosféricos cercanos al sitio de interés, ya que estos factores intervienen en la cantidad de energía de radiación recibida.

**Nubosidad:** las nubes pueden jugar con el enfriamiento y calentamiento del clima de acuerdo con su altura, ya que las nubes bajas provocan enfriamiento, mientras que las nubes altas provocan calentamiento. Además, son el elemento clave en la extinción de la radiación solar que incide en la Tierra, ya que la absorbe por vapor de agua, la dispersa y la refleja.

De los cuatro elementos climáticos mencionados, el que mayor importancia e influencia tiene sobre la distribución de la radiación solar es la nubosidad, ya que debido “al tipo de nube, la extensión de la capa nubosa y la posición de las nubes en la bóveda celeste respecto al Sol, determinan la cantidad de radiación solar y luz natural que recibe un sitio geográfico” (Guadarrama, 2017, p.60). Derivado del análisis de la **Figura 4** —que se obtuvo del programa *Climate Consultant*— se estima que en la Ciudad de México tenemos el 38% del año un cielo parcialmente nublado, por tener una cubierta nubosa de entre 30 y 60%, porcentaje que se da principalmente en la madrugada. No obstante, durante el día tenemos un 24% del tiempo un cielo despejado con un porcentaje de nubosidad de entre el 10 y 30%.

**Figura 4**

*Cubierta nubosa en la Ciudad de México*



Nota. Recuperado de Climate Consultant, (2021).

Es preciso señalar que la OMM en su Atlas Internacional de Nubes menciona que “la apariencia de una nube es determinada por sus dimensiones, forma, estructura, textura, luminancia y color” (OMM, s.f.). Las nubes están en



constante evolución y tienen infinidad de formas, sin embargo, existen características que se observan con frecuencia “lo que permite agrupar las nubes en un sistema general de clasificación. Esta clasificación se divide en géneros, especies y variedades” (OMM, s.f.).

La OMM (s.f.) considera que dentro de la clasificación de las nubes hay diez grupos principales, los cuales se denominan géneros, que a su vez se subdividen en especies, basándose en la forma y estructura de la nube. Para describir las disposiciones y grados de transparencia de los elementos visibles de las nubes se usan las variedades, pero una nube puede presentar características de más de una variedad. A su vez, las nubes se encuentran y clasifican de acuerdo con los niveles de altura a los que pueden llegar, ya que pueden ir desde el nivel del mar hasta la troposfera, dividiéndose en un nivel bajo, medio y alto –dichos niveles varían con la latitud. Además, “el flujo de radiación difusa es influido por el tipo y cantidad de nubes, es mayor a mediodía con la presencia de *altocúmulos* (Ac) y *altos tratus* (As) y disminuye si hay *nimbos tratus* (Nb) o *stratus* (St)” (Ayllón, 2003, p.37).

### 1.2.1 Tipos de cielo

Lo anteriormente expuesto tiene relevancia porque tanto la superficie que cubren las nubes como las características de su cubierta y el movimiento del Sol abren paso a la clasificación de los tipos de cielo. Sabemos que las condiciones climatológicas y la radiación solar son únicas para cada localidad, de las cuales hay que tener conocimiento pese a su diversidad. Por ello se impulsaron los estudios sobre la disponibilidad de la luz natural, ya que “desde el punto de vista de sus características distintivas, el cielo puede ser descrito por su distribución de luminancias, lo que permite su utilización en los cálculos y en el análisis de las condiciones del espacio interior” (Chi, 2017, p.32).



Para los estudios de iluminación natural y ganancia solar, el objetivo real de tener acceso a los datos de la radiación solar directa y difusa para poder reconstruir la distribución luminosa del cielo [...] La posición del Sol determina de dónde procede la radiación solar directa. El componente difuso se distribuye por el resto del hemisferio celeste. (Reinhart, 2014, p.52).

La caracterización de las fuentes de iluminación natural ha dado origen a la formulación de modelos de cielo, y es así como la *Illuminating Engineering Society (IES)* tiene una clasificación básica para los cielos, dividiéndolos en: despejado, parcialmente nublado y nublado. A su vez, de esta clasificación básica de la IES, surge la de la *International Commission on Illumination (CIE)*, en la cual se consideran quince tipos de cielo, a los que cinco corresponden al tipo nublado, cinco al parcialmente nublado y cinco al despejado, tal como se puede ver en la **Tabla 1**. Los cielos de la CIE se pueden utilizar para “modelar las condiciones del cielo basándose en datos de iluminancia y luminancia cenital medidos” (DiLaura *et al.*, 2011, p.7.11). Es importante tener conocimiento de la clasificación de los tipos de cielo porque han tenido una evolución significativa en el ámbito de los sistemas computacionales al incorporar la Modelación Climática de la Luz Natural (*Climate Based Daylight Modelling-CBDM*). A pesar de que los sistemas computacionales para simulaciones lumínicas están avanzados en cuanto a los tipos de cielo, algunos todavía nos permiten configurar este elemento, por lo que identificar y conocer las condiciones de cada clasificación puede ser de gran utilidad para la distribución luminosa y así determinar el mejor tipo para nuestra localidad de estudio.



**Tabla 1**

**Clasificación CIE de cielos**

<b>Tipo</b>	<b>Núm.</b>	<b>Distribución luminosa</b>
Nublado	1	Cielo cubierto con degradación abrupta de luminancia hacia el cenit y uniformidad acimutal.
	2	Cielo cubierto con degradación abrupta de luminancia y brillo ligero hacia el Sol.
	3	Cielo cubierto con degradación moderada y uniformidad acimutal.
	4	Cielo cubierto con degradación moderada y brillo ligero hacia el Sol.
	5	Cielo con luminancia uniforme.
Parcialmente nublado	6	Cielo parcialmente nublado con degradación uniforme y brillo ligero hacia el Sol.
	7	Cielo parcialmente nublado con degradación uniforme y mayor brillo en la región circunsolar.
	8	Cielo parcialmente nublado con degradación uniforme y distinción de la corona solar.
	9	Cielo parcialmente nublado con Sol obscurecido.
	10	Cielo parcialmente nublado con mayor brillo en la región circunsolar.
Despejado	11	Cielo blanco-azul con distinción de la corona solar.
	12	Cielo claro-CIE estándar con poca turbiedad lumínica.
	13	Cielo claro-CIE estándar con atmósfera contaminada.
	14	Cielo sin nubes, turbio y con amplia corona solar.
	15	Cielo blanco-azul, turbio con amplia región de corona solar.

Nota. Adaptado de apuntes de Guadarrama, (2020).

En 1991, la CIE creó el Programa Internacional de Medición de Luz Natural (*International Daylight Measurement Programme-IDMP*), estableciendo tres categorías de estaciones de medición: básica, general y de investigación. En las dos primeras, las principales cantidades

medidas son iluminancia y radiación, mientras que en la tercera se realiza una recolección continua de la distribución de luminancia de cielo, así como de iluminancia, radiación y otros datos meteorológicos (Tregenza, 1987; Dumortier, 1997, citado en Chi, 2017).

Ya con las estaciones de medición, en 1993 Perez, Seals y Michalsky crearon el modelo de cielo *All-Weather*, en el cual “los valores de irradiancia medidos en las estaciones meteorológicas se pueden convertir en valores equivalentes de iluminancia siempre que se tenga el valor de la eficacia luminosa de la radiación visible” (Chi, 2021, p.43), a partir de este modelo se puede caracterizar cualquier condición de cielo durante un periodo anual. El modelo *All-Weather* fue aprobado por la CIE en el año 2003, bajo el nombre de Cielo General Estándar CIE (*CIE Standard General Sky*).

*All-Weather* constituye dos modelos independientes que son el de la eficacia luminosa y el de la distribución de luminancias, las cuales demuestran “ser fiable y preciso para la obtención de la distribución de luminancias del cielo para cada momento del año registrado en el archivo climático. Es, por tanto, el modelo que más se acerca a la realidad local.” (Chi, 2017, p. 35). En esa misma línea, Reinhart (2018, p.17) menciona que mientras en las normas de la CIE e ISO se promueve la clasificación del cielo general de la CIE, la comunidad dedicada a las simulaciones energéticas prefiere usar el modelo de cielo de Perez. A pesar de que ambas clasificaciones se usan en diversos programas de simulación, Reinhart prefiere trabajar con el modelo *All-Weather*, principalmente por su combinación con los archivos climáticos.

Para la simulación de la luz natural los principales parámetros que se necesitan son latitud y longitud del sitio, las fechas de las que queremos el análisis lumínico y los valores de la irradiancia medida. “A lo largo de los últimos 100 años, se ha presentado una sucesión de distribuciones estandarizadas de luminancia del cielo, cada vez más refinadas, que tienen en cuenta la luz diurna difusa y la luz solar directa” (Reinhart, 2018, p.11). Estos datos se pueden obtener



a través de los archivos climáticos, por lo que el modelo *All-Weather* es una gran aportación. No obstante, “los modelos computaciones deben permitirle al investigador definir los varios cielos además de la referencia de los modelos del cielo de CIE (*International Commission on Illumination*)” (Baracho *et al.*, 2003) sin dejar de lado el hecho de que “las simulaciones digitales del cielo son uno de los factores más importantes en los cálculos de iluminación natural” (Yong *et al.*, 2016).

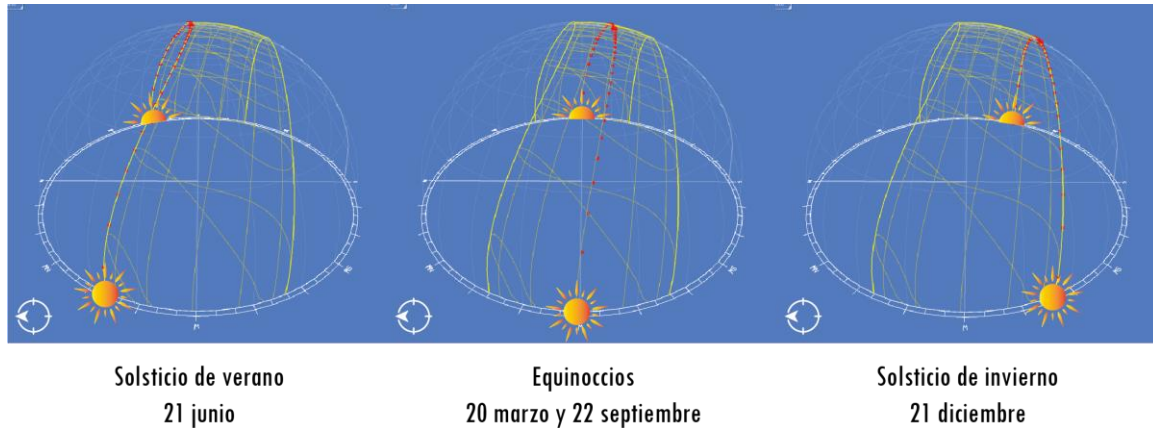
### 1.3 Componente directo: trayectorias solares

Como sabemos, la Tierra está en constante movimiento y como consecuencia de esto existen los movimientos de rotación y traslación, así como la declinación solar, lo que genera los cambios de estación. Lo anterior, es la razón por lo que la incidencia de los rayos solares tiene distinta inclinación a lo largo del año y del día, además de la ubicación geográfica de donde nos encontremos. Recordemos que la incidencia solar es única para cada sitio y momento, por lo que depende de dónde estemos situados y que “para poder calcular los impactos de la radiación es necesario, en primer lugar, conocer la cantidad de energía recibida que incide normalmente en relación con la altitud solar. En segundo lugar, el ángulo de incidencia sobre la superficie específica en cuestión” (Olgay, 1998, p.35).

El Sol sigue su trayectoria con diferentes inclinaciones de acuerdo con la época del año en que se encuentre, en los equinoccios (marzo y septiembre) el Sol sale en el Este para ocultarse en el Oeste y esto ocurre exactamente a las 6:00 y 18:00 horas respectivamente. En el Solsticio de verano (junio) el Sol sale en el noreste, para ocultarse en el noroeste; contrario a lo que pasa en el solsticio de invierno (diciembre) ya que el Sol sale en el sureste y se oculta en el suroeste (ver **Figura 5**).

**Figura 5**

**Trayectoria solar en la Ciudad de México**



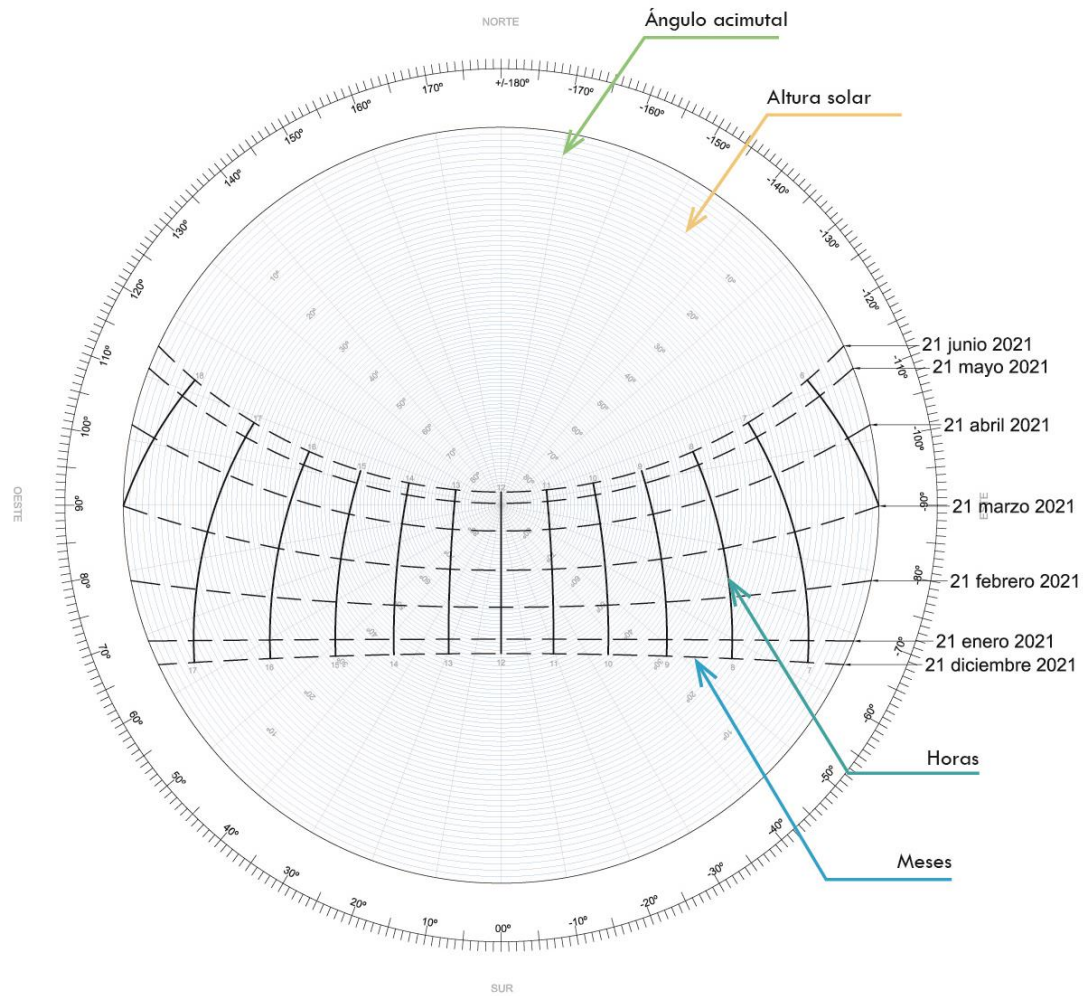
Nota. Adaptado de Marsh, (2019).

Los diagramas solares “muestran la bóveda celeste proyectada sobre un plano paralelo al horizonte. En los diagramas resultantes la línea del horizonte aparece como un círculo y el recorrido solar como una sucesión de curvas” (Olgyay, 1998, p.36) esto siempre deberá ir en relación con la forma de representación y la latitud. Para representar las trayectorias solares bidimensionales en un diagrama hay diferentes formas, las principales son la proyección equidistante, proyección ortográfica y proyección estereográfica. “Varios organismos han utilizado y recomendado el uso de gráficas solares estereográficas desde mediados del siglo XX” (Tejeda y Gómez, 2015, p.77) lo que la ha llevado a ser una de las gráficas más aceptadas por los expertos. Gracias a estas herramientas se puede leer la posición del Sol respecto a sus ángulos de incidencia para cualquier momento del año y en cualquier hora; para enfatizar, esta incidencia corresponde al flujo de radiación directa que llega a la superficie de la Tierra, recordemos que en este flujo los rayos llegan sin sufrir cambios. En la **Figura 6** podemos ver los principales elementos que componen una proyección estereográfica, dicha proyección fue elaborada con las coordenadas de la Ciudad de México.



Figura 6

Proyección estereográfica de la Ciudad de México



Para llevar a cabo el análisis de la luz natural debemos comprender en primera instancia las trayectorias solares del sitio de nuestro interés, las cuales no dejan de ser útiles pese al avance en programas computacionales especializados. Con las gráficas es posible predecir la incidencia del Sol al interior de un espacio, lo que nos ayudará a determinar cómo aprovecharlo, o bien, a definir un diseño eficaz con protecciones solares. De la misma manera, se usan para la proyección de sombras de los edificios, lo que ayudaría a planificar la separación entre las edificaciones con el objetivo de que todos

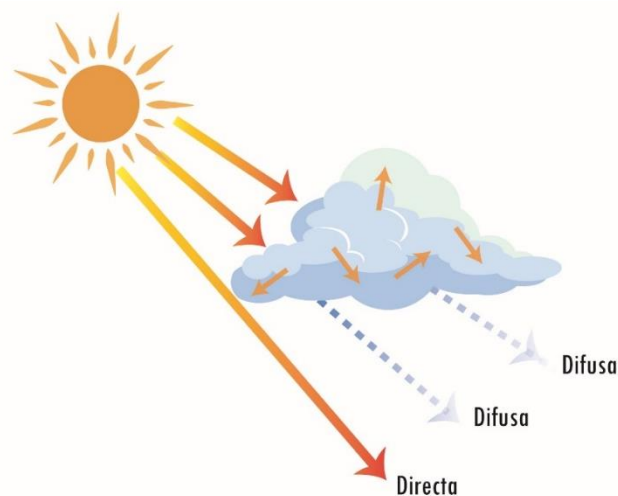
tengan acceso a la luz natural. Finalmente, podríamos decir que conocer cómo se mueve la Tierra entorno al Sol y cómo su radiación incide en nuestro planeta nos llevará a pensar en mejores estrategias de diseño, así como a generar un aprovechamiento máximo de este recurso inagotable: la luz natural.

## 1.4 Componente difuso de la luz natural

De los tres flujos de radiación solar —directo, difuso y global— podemos decir que “La luz natural difusa que proviene de la bóveda celeste y que, dependiendo del grado de nubosidad, puede tener aproximadamente la misma intensidad en diferentes direcciones” (Chi, 2021, p.37), esta relación se aprecia en la **Figura 7**. La luz natural siempre estará acompañada de ganancias solares, por lo que “el objetivo en el diseño es admitir suficiente luz natural, pero al mismo tiempo evitar las ganancias solares, sobre todo en el periodo de refrigeración. Esta aparente contradicción, a menudo es resuelta utilizando la luz natural difusa y evitando la luz solar directa” (Chi, 2017, p.59). Si controlamos la incidencia de luz directa podemos dar paso a la incidencia de luz difusa y así lograr niveles óptimos de comodidad visual al interior de las oficinas.

*Figura 7*

*Flujos de radiación directa y difusa*



Desde la etapa del diseño arquitectónico es importante que se considere el diseño lumínico natural, para así controlar el ingreso de la luz directa hacia los espacios interiores, de lo contrario, serán los mismos ocupantes los que se encarguen de eliminar o disminuir el ingreso de la luz natural; a su vez, los llevará a sustituir o complementar con iluminación artificial, esto únicamente genera una pérdida de uso útil de la luz natural. “La incidencia de luz difusa en un espacio intramuros proporcionaría valores lumínicos mínimos aceptables y relativamente estables, la estabilidad de estos dependería del tipo de cielo y nubosidad de este.” (Guadarrama, 2017, p.33). Aprovechar el recurso lumínico difuso significa que los usuarios podrán realizar sus actividades, evitar los altos contrastes lumínicos y el exceso de calor. Si el edificio no cumple con un diseño lumínico adecuado serán los mismos usuarios los que traten de controlarla, haciendo uso de protecciones solares al interior —que normalmente son persianas— lo que bloqueará el paso de la luz natural y hará que se recurra al uso de la iluminación artificial en horarios donde su uso no es necesario.

Guadarrama (2017, p.230) indica que es necesario analizar y aprovechar el flujo difuso disponible en la Cuenca de México para así poder iluminar naturalmente el interior de las edificaciones a favor del uso eficiente de las energías. Por lo que es importante considerar elementos como el emplazamiento, altura y forma del edificio, ya que ayudarán a “determinar las superficies expuestas a la radiación solar donde se abrirán los huecos, es decir la envolvente del edificio, y con ello la relación entre superficie acristalada y superficie de suelo del espacio que ilumina” (Esquivias, 2017, p.151).

Asimismo, Lechner (2015, p.406) señala también que la luz del día procedente de cielos despejados está formada principalmente por los dos componentes de la luz del cielo y la luz solar directa. La luz del cielo azul es difusa y de baja luminosidad, mientras que la luz solar directa es muy direccional y extremadamente brillante. Debido al potencial de



deslumbramiento, al brillo excesivo, y el sobrecalentamiento, a veces se asume que la luz solar directa debe excluirse de un edificio.

De entre las características que hacen al componente difuso de la luz natural el más eficaz es que “es más eficiente que el flujo global, y brinda más luz y menos calor por energía radiante” (Guadarrama, 2017, p.207); reduce los efectos de deslumbramiento y brinda una distribución uniforme al interior de los espacios. En la Cuenca de México contamos con un buen recurso lumínico, por lo que deberíamos saber aprovechar y manejar la luz natural difusa para mayor beneficio de los usuarios que habitan los espacios interiores, así estaríamos contribuyendo a la disminución del uso de la iluminación artificial llevándonos a un ahorro energético, acción que beneficia al medio ambiente. Conocer la luz natural no sólo significa saber de dónde viene, de qué lado sale y se oculta el Sol, sino que implica saber las horas efectivas en las que podemos aprovechar este recurso al interior y cuál es la forma más eficiente de hacerlo, con la finalidad de favorecer a las personas y al medio ambiente.

## **1.5 Aprovechamiento eficiente del recurso lumínico**

Ya que hemos hablado del comportamiento de la luz natural y de cómo el Sol y el cielo juegan un papel importante en su distribución, ahora desarrollaremos el tema de su aprovechamiento. Para esto iniciaremos con unos antecedentes históricos, los cuales hicieron que la luz natural retomara su importancia en el diseño.

La crisis energética de mediados de los años setenta hizo que se reexaminara el potencial de la iluminación natural. Al principio, sólo se hacía hincapié en las implicaciones energéticas, pero ahora la iluminación natural se valora también por sus posibilidades estéticas y su capacidad para satisfacer las necesidades biológicas y humanas. [...] en edificios como escuelas y oficinas se puede ahorrar alrededor del 70% de la



energía de iluminación mediante la iluminación natural [...] también puede reducir el consumo de energía de calefacción y refrigeración porque puede ser más fría que la iluminación eléctrica. (Lechner, 2015, p.403).

Pasados los años, en junio de 1992 se celebró la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, la cual “se convirtió en la mayor conferencia celebrada hasta ese momento. La Cumbre de la Tierra logró que al “medio ambiente” se le considerara como una prioridad a escala mundial” (Zeevaert, p.13). Más adelante, con la ya declarada crisis energética a nivel mundial, la población comenzó a tener consciencia de la necesidad de frenar esa realidad, para lograrlo se tenían que reducir las emisiones de dióxido de carbono. Por tal motivo se desarrollaron diferentes normativas y recomendaciones en cuanto a la eficiencia energética para así poder reducir su demanda y el consumo; con esta preocupación mundial “la luz natural reemerge como una estrategia importante para mejorar la eficiencia energética en la iluminación de interiores en la medida en que permite reducir el uso de la luz artificial” (Chi, 2017, p.25).

Una vez que la luz natural reemerge, se entiende que “la luz es una necesidad para el funcionamiento del sistema visual, pero si se utiliza de forma incorrecta, puede ser perjudicial para la salud” (Boyce *et al.*, 2003, p.45). Por consiguiente, cuando hacemos referencia a aprovechar el recurso lumínico natural debemos hacer sinergia con el diseño de iluminación, el cual ayudará a proporcionar grandes cantidades de luz, sin causar molestias ni deslumbramientos. No obstante, “una iluminación natural mal diseñada proporcionará cantidades inadecuadas de luz, por lo que habrá que recurrir a la iluminación eléctrica y a cantidades abundantes, lo que traerá incomodidad y deslumbramiento, así como fuertes sombras y reflejos” (Boyce *et al.*, 2003, p.17).

Esquivias (2017, p.116 y 117) expresa que fue hacia finales de los 90's, que la iluminación natural de los edificios empezó a cobrar mayor atención de la que había tenido anteriormente, lo que se debía a dos principales factores:

- A la creencia de que el ahorro de energía mediante el uso efectivo de la iluminación natural era un recurso que no estaba siendo explotado.
- Los datos que validaban los efectos positivos en los habitantes de un edificio al contar con iluminación natural, entre los que estaban el aumento de productividad, su salud y bienestar.

Como se dijo anteriormente, México posee una ubicación geográfica excepcional, contamos con un clima templado e incidencia solar todo el año, lo que nos coloca en una posición privilegiada respecto a otros países. De acuerdo con Tecnoenergía (2018) “a pesar de que México tiene un territorio 5.5 veces mayor que Alemania y una radiación 5.0 veces superior, la energía solar generada en el país europeo es 44.2 veces superior”. Entonces, si utilizamos el recurso lumínico natural debemos considerar que “el punto de partida para el aprovechamiento de luz natural en un diseño de iluminación es el conocimiento de la disponibilidad de luz exterior, tanto en sus niveles como en sus periodos de duración, de acuerdo con las horas del día y a las estaciones” (Pattini, 2006, p.9) el objetivo es poder hacerlo de forma adecuada para realmente sacar ventaja de esto.

Para aprovechar el recurso lumínico natural es fundamental reconocer dos variables; la primera tiene que ver con las particularidades climáticas, atmosféricas, estacionales y geográficas —donde la latitud es el factor más destacado. La segunda variable corresponde a las condiciones constructivas del entorno, donde intervienen los aspectos urbanos y la orientación (la cual requiere una estrategia distinta para cada punto cardinal). El entorno que rodea la edificación interfiere en la incidencia de los rayos solares, por consiguiente, debemos decir que es un factor que en la Ciudad de México influye mucho, a causa del aspecto urbano —me refiero a la irregularidad en las alturas— lo que hace que tengamos zonas urbanas con mayor o menor densidad. En esta irregularidad se ve afectada la incidencia de los rayos solares, lo que limita el aprovechamiento de la luz natural “la configuración y la forma de los edificios



en entornos urbanos de alta densidad es uno de los factores principales para obtener la incidencia correcta de la luz natural” (Valeriano, 2010, p.53). Las edificaciones colindantes pueden reflejar o absorber la luz, lo que hará que el comportamiento lumínico en el interior de un espacio se vea interferido.

Agregando a lo anterior, el sector de la construcción en ocasiones opta por lo más barato en cuanto a materiales —aún si se sabe que al final “lo barato sale caro”—y el uso del vidrio no es la excepción, por lo que usan los más económicos del mercado, lo que provoca que al interior de los edificios acristalados existan altos niveles de incomodidad visual en los usuarios. Al permitir el paso desmedido de luz natural, también se permite el paso de calor, esto se debe a que casi nunca se planea ni comprueba la proporción y relación entre la superficie acristalada y la disponibilidad lumínica.

“La luz del Sol debiera representar la fuente primaria de iluminación de los ambientes interiores y el objetivo de diseño para los arquitectos debiera enfocarse en maximizar su uso y aprovechamiento” (Díaz, 2021, p.133). En consecuencia, resulta crucial aprovechar la luz natural en los espacios interiores, por lo que Assaf (2006) menciona que hay que saber reconocer y diferenciar entre aprovechamiento potencial y aprovechamiento real, los cuales son factores determinantes para el aprovechamiento de la luz natural. En el aprovechamiento potencial interviene la cantidad de luz natural disponible del sitio de interés, así como los factores geográficos y climáticos, además de la cantidad de luz natural admitida al interior, lo cual depende del entorno, la orientación y la forma de las aberturas como las ventanas. Mientras que, en el aprovechamiento real, intervienen factores como la iluminación artificial y el control de ésta por parte de los usuarios, quienes determinan las horas que quieren y/o pueden aprovechar la entrada de luz natural en el interior de sus espacios. Este último punto en las oficinas es muy evidente, ya que en muchos casos pueden tener un buen ingreso de luz natural, pero todo el día deciden tener la iluminación

artificial en funcionamiento, lo que genera un sobrecalentamiento al interior y un gasto energético que resulta innecesario.

Los elementos que componen la envolvente tienen la función de admitir, controlar o prohibir la entrada de luz natural al interior. Es así como una de las principales estrategias de luz natural es permitir una adecuada cantidad de iluminación, la cual se puede lograr si conocemos el recurso lumínico y sabemos cómo incide sobre el edificio en cuestión. Si permitimos una adecuada entrada de luz, ésta se puede redirigir para que llegue de forma uniforme a todos los espacios interiores, evitando el exceso de luz natural que genera deslumbramiento y sobrecalentamiento. Pattini (2006) menciona que los beneficios que tiene la iluminación natural (en cuanto a la calidad y cantidad) sobre la iluminación artificial, pueden destacar:

- Que es provista por una fuente de energía renovable.
- Proporciona niveles de iluminancia más elevados en las horas diurnas.
- La luz solar directa introduce menos calor por lumen que la mayoría de las fuentes de iluminación eléctrica.

Asimismo, Pattini (2006) afirma que “una iluminación natural bien diseñada puede cumplir con los requerimientos de iluminancia de un local interior donde se realicen tareas visuales de complejidad media entre un 60-90% del total de horas de luz natural, lo que tiene un potencial de ahorro en energía eléctrica de hasta el 90% en edificios de uso diurno”. Si conocemos el recurso, lo analizamos y aplicamos de forma eficaz estaríamos logrando un significativo ahorro energético, gracias al buen diseño lumínico natural. A su vez, esto nos lleva a disminuir el gasto económico al reducir el uso de sistemas artificiales en horas innecesarias, lo que finalmente aminoraría el daño ambiental. Para alcanzar los niveles de iluminación natural requeridas y tener un ahorro energético considerable, deberíamos tomar en cuenta que la iluminancia que entra al espacio interior dependerá de tres factores externos, los cuales de acuerdo con



Zambrano y Prado (2016) serían la luz directa que proviene del Sol, la luz difusa derivada del cielo y la luz de las reflexiones de elementos externos del edificio.

Por otro lado, Lechner (2015, p.449 y 450) habla de diseñar con luz natural bajo principios generales, entre los que destacan incorporar el diseño lumínico natural con el arquitectónico y de ser posible considerar sistemas solares pasivos. Además, de ser posible hay que aprovechar la luz natural en la parte superior, esto se puede lograr con domos o con una entrada de luz cenital, siempre rectificando que la orientación sea la mejor de acuerdo con nuestra ubicación geográfica. Finalmente, cuando se trata de aprovechar la luz a través de ventanas hay que diseñar el edificio de tal forma que se pueda maximizar las áreas iluminadas durante el día, por lo que habrá que considerar además de la orientación, el tamaño de las ventanas y su proporción respecto al edificio.

Con lo expuesto anteriormente podríamos hablar de los objetivos de la luz natural, los cuales de acuerdo con Fernández (2006) son tres y éstos se pueden llevar a cabo si conocemos y aplicamos el recurso lumínico de forma adecuada. Los objetivos son:

1. Proporcionar la cantidad de luz necesaria para poder llevar a cabo una tarea específica de manera cómoda.
2. Crear un ambiente particular en el interior del edificio a través del juego de luces y sombras.
3. Ahorrar energía.

Tales objetivos se pueden corroborar mediante las simulaciones por computadora, las cuales nos ayudarán a determinar si se está aprovechando de forma eficiente o no la luz natural; las simulaciones son muy próximas a la realidad, además de que son un apoyo a la verificación de los niveles lumínicos si deseamos que nuestro edificio obtenga alguna certificación. De las certificaciones que dan puntos por aplicar la luz natural están *LEED* y *WELL*, para ambas es importante desarrollar una simulación por computadora para mostrar cómo es que ingresa la luz natural al espacio. En la certificación *LEED* se

evalúa la calidad de la iluminación natural a través de las métricas de la luz natural *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) y *Annual Sunlight Exposure* (ASE), al evaluar con estas métricas se pueden obtener tres puntos. De igual forma si se comprueba que los niveles están entre 300 y 3000 lux con mediciones en sitio, se darán tres puntos. La última opción para obtener dos puntos es comprobar que se cumple con al menos un 75% de la superficie con niveles lumínicos en un rango de 300 y 3000 lux. Mientras que en la certificación *WELL* se maneja distinto la puntuación, ya que se evalúa el diseño de la iluminación circadiana, el control de deslumbramiento y finalmente el acceso mejorado a la luz natural; para cada rubro donde interviene la luz natural se pueden dar hasta tres puntos. En *WELL* al implementar un plan mejorado de luz natural se considera que cumple si “los proyectos demuestran a través de simulaciones por computadora que se logra un sDA de 300,50% para el área en cada piso” (WELL, s.f.). Derivado de lo anterior, si se logra mantener los niveles en 300 lux >55% se dará un punto y si se logra >75% se darán dos puntos, ambos en la superficie ocupada.

“La simulación sDA, en relación con las certificaciones LEED [2] y WELL [3], busca que se alcancen los 300 Lux en un 55%-90% de la superficie ocupada del suelo durante el 50% de las horas de ocupación del proyecto (8:00 am – 6:00 pm)” (Olvera, s.f.). Más adelante veremos las simulaciones por computadora y qué es el ciclo circadiano, para comprender su relación con las certificaciones mencionadas. Por el momento podemos decir que estas certificaciones son importantes al incluir criterios de iluminación natural, ya que la mayoría se enfoca en la iluminación artificial, incluidas las normativas.

## Conclusiones

Para recapitular la luz natural es un recurso renovable, el Sol es el principal elemento que nos la brinda, y la incidencia que recibimos es distinta para cada lugar, para cada día y hora, lo que la hace única. Por lo anterior es que hay que comprender cómo inciden los rayos solares directos, lo que se logra a través de las gráficas solares, con las que podemos definir las mejores estrategias de diseño y control solar. Cuando se utilizan elementos de protección solar se controla el componente directo de la luz natural y permite el paso del difuso al interior de los espacios, así este se distribuye de forma uniforme.

Por otro lado, son los elementos climáticos los que juegan un papel importante en la incidencia de la luz natural, principalmente la nubosidad y es gracias a esto que se puede dispersar la luz. Asimismo, la nubosidad es el principal elemento que se toma en cuenta para la clasificación de los cielos y con esto caracterizar las regiones. Por lo anterior, y derivado del avance tecnológico en los sistemas computacionales, se llegó a la clasificación de cielos bajo el modelo All-Weather para su uso con el modelo CBDM que es importante en una simulación de iluminación natural.

La luz natural en las oficinas contribuye y favorece la productividad de los trabajadores, esto los mantiene en un estado de ánimo más positivo. Así como se expuso, la luz natural tiene múltiples beneficios sobre la artificial, por lo que aprovecharla es vital, pero sobre todo saber usarla, de lo contrario, sería contraproducente. Para comprobar la entrada y utilidad de luz natural en un espacio recurrimos a las simulaciones por computadora mediante un modelo CBDM, esta simulación podría ser necesaria si queremos obtener una certificación.

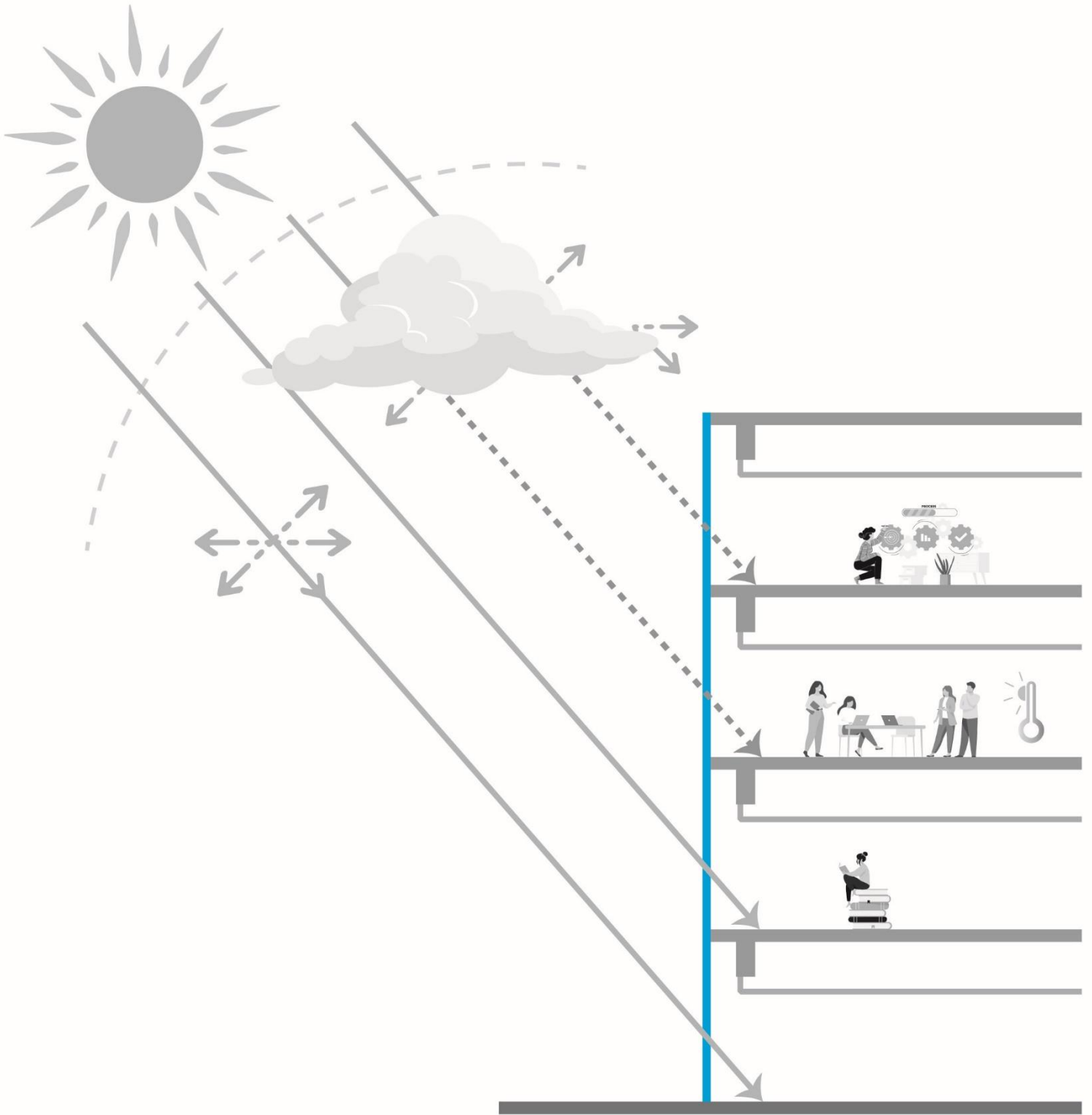
Finalmente, como se vio en este capítulo, muchos autores hacen hincapié en el ahorro energético al que nos puede llevar el emplear como fuente de iluminación principal la luz natural, lo que representa también un beneficio económico para las empresas. Si aprovechar de forma eficiente la luz natural se tiene un impacto positivo y beneficios en cuanto lo económico, el ahorro energético, el estado de ánimo y productividad de los trabajadores; son razones suficientes para aprender a aplicar y sacar provecho de este grandioso recurso natural.





# **VIDRIOS DE ALTA TECNOLOGÍA**

**CAPÍTULO 2**



## 2.1 Origen del vidrio

Para iniciar, es importante aclarar que cuando hablamos de cristal y vidrio, no estamos hablando de lo mismo, por lo que hay que partir de las diferencias entre estos dos y sobre ese entendido nos enfocaremos en el vidrio, específicamente en los vidrios de alta tecnología. Ahora bien, el cristal lo crea la naturaleza, por lo que se pueden dar de diferentes formas y la mayoría se crean a partir de la cristalización de gases a presión en las cavidades rocosas; mientras que todo aquello que se fabrica fundiendo, principalmente con arena de sílice, es vidrio. El *DRAE* define al vidrio como un “material duro frágil y transparente o traslúcido, sin estructura cristalina, obtenido por la fusión de arena silíceo con potasa y moldeable a altas temperaturas”. Por otro lado, la *ASTM* (*American Standard for Testing and Materials*) dice que el vidrio es “un producto inorgánico de fusión que se ha enfriado a una condición rígida sin cristalizarse”.

Los hallazgos más antiguos del vidrio se remontan a 7 000 a.C., en el periodo neolítico. De acuerdo con *Barrera* (s.f.) su descubrimiento fue accidental por unos marinos mientras preparaban su comida, al utilizar bloques de nitrato de sodio que llevaban; los cuales con el calor de las brasas fundió la arena y el carbonato de sodio, que al enfriarse dio como resultado el primer vidrio fabricado por el hombre. Por su parte, *Amstock* (1999, p.11) dice que el vidrio se usó por primera vez en Egipto para objetos decorativos antes del año 3 000 a.C., pero que fue alrededor del año 1 500 a.C. que su técnica de producción se perfeccionó tanto en Egipto como en el Cercano Oriente. Fue tras las conquistas romanas que llega a Europa, lugar donde se le empiezan a incorporar elementos para hacerlo más transparente y comienzan a darle un uso arquitectónico. En Roma fue donde se hizo la primera fábrica de soplado de vidrio y hasta la revolución industrial se siguieron desarrollando nuevos métodos para poder fabricar el vidrio de forma continua. La fabricación del vidrio alcanzó su máximo entre los siglos XV y XVII y es en la segunda mitad del siglo

XX (1952) cuando se patentan diferentes procesos, casi como el actual, el cual es el más utilizado y se conoce como “flotado”. Hoy en día el vidrio se puede encontrar en diferentes presentaciones, ya sea en color o con tinte, en distintos espesores que van desde 1 mm hasta los 25 mm, además de sus variadas dimensiones. Es un producto que se puede cortar y transformar al gusto y de acuerdo con las necesidades de cada proyecto, lo que da pauta a su evolución y uso en la industria de la construcción, porque brinda estética a las fachadas de los edificios.

Derivado de que los materiales que se emplean en la construcción se modifican constantemente, a causa de las tendencias y el avance tecnológico; en los últimos años uno de los materiales predilectos ha sido el vidrio. Su uso se debe a la facilidad que este material representa en cuanto a su rapidez, flexibilidad y ligereza, lo que ha permitido que se construyan edificios de gran altura, tal es el caso de los edificios corporativos. Para la envolvente de los edificios se debe tener un equilibrio entre el sonido, iluminación, ventilación y vistas al exterior; todo esto se puede lograr utilizando como material de recubrimiento el vidrio, sin embargo, esto “conlleva el riesgo de incrementar las cargas térmicas y de refrigeración” (Poirazis *et al.*, 2008). Si queremos lograr un aislamiento equilibrado Olgyay (1998, p.118) menciona que la forma más eficaz de reducir el flujo de calor es a través de las propiedades aislantes del material. La cantidad de aislamiento deseada se encuentra en relación directa con la diferencia que existe entre las condiciones térmicas exteriores y los requerimientos de control. “Los acristalados actúan como filtros selectivos, eligiendo cuáles longitudes de onda de la luz y de la energía térmica se transmitirán o reflejarán” (Amstock, 1999, p.390). Utilizar materiales de baja emisividad nos permite hacer el uso máximo de la luz natural disponible, reduciendo las cargas térmicas de calor en el verano y las pérdidas térmicas en invierno.

La tendencia de las fachadas acristaladas también se debe a que nos proporciona una imagen limpia desde el exterior, además de una relación visual del espacio interior-exterior. Cuando el acristalamiento es excesivo tiende a generar incomodidad visual al interior, por lo que los usuarios utilizan elementos de protección solar y con esto, no sólo bloquean el paso de la luz, sino que ya no permiten que se vea la limpieza que se busca de la fachada. Esquivias (2017, p.118) afirma que desde finales de los años 90 se ha avanzado en el análisis de la iluminación natural, lo que ha traído consigo el desarrollo de nuevos sistemas y materiales de acristalamiento para aprovechar la luz natural.

Derivado de lo anterior, nos tendríamos que plantear el hecho de que, si la tendencia en fachadas acristaladas permanecerá, hay que buscar y utilizar vidrios que sean capaces de aprovechar la luz natural y que eviten las ganancias de calor. Con una selección correcta de vidrio podríamos equilibrar la comodidad lumínica con la térmica, para los fines de esta investigación nos enfocamos en la primera, no obstante, van de la mano la una con la otra.

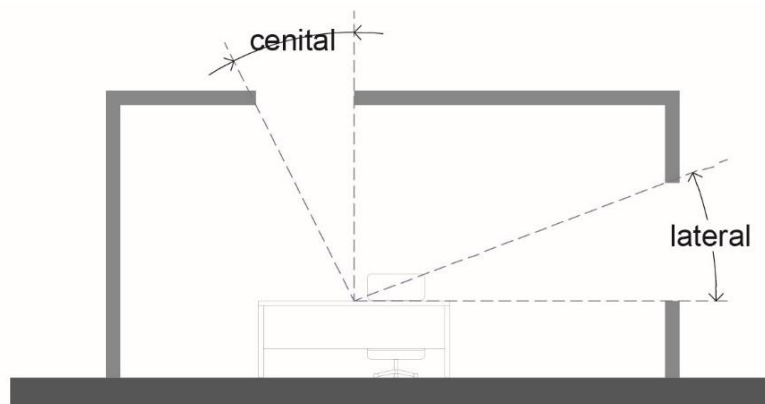
## **2.2 Componente lumínico lateral**

Un sistema de iluminación es aquel conjunto de elementos en una edificación que sirven para iluminar, ya que “la luz ha sido motivo de las más bellas y variadas expresiones. Desde siempre la humanidad ha vivido atraída por los fenómenos luminosos, ha jugado y experimentado con ellos, ha buscado entenderlos y ha hecho uso de ellos.” (Cetto, 1996, p.4). Para hacer uso de la luz en un espacio interior intervienen factores como la cantidad, calidad y distribución, así como del tamaño y orientación de las aberturas. Aunado a esto, “la luz natural está indisolublemente ligada a las ventanas y aberturas dentro de la envoltura exterior de un edificio, las dos no pueden no separarse con los enfoques típicos de diseño” (Boubekri, 2008, p.96). En una primera aproximación, podemos distinguir dos componentes de iluminación, el lateral y el cenital. De acuerdo con

Arias y Ávila (2004, p.69) para un plano de trabajo una iluminación cenital resulta más eficiente que las aberturas laterales, empero, no siempre se puede diseñar una iluminación cenital, razón por lo que lo más común es que sean de tipo lateral, tal es el caso de los edificios acristalados. Por otro lado, Pattini (2006) menciona que son tres los sistemas de iluminación, al que agrega un combinado —del cenital con el lateral— en la **Figura 8** se muestran aplicados estos sistemas y más adelante se explica cada uno, profundizando en el lateral.

**Figura 8**

*Iluminación obtenida en un plano de trabajo*



Nota. Adaptado de Arias y Ávila (2004, p.69).

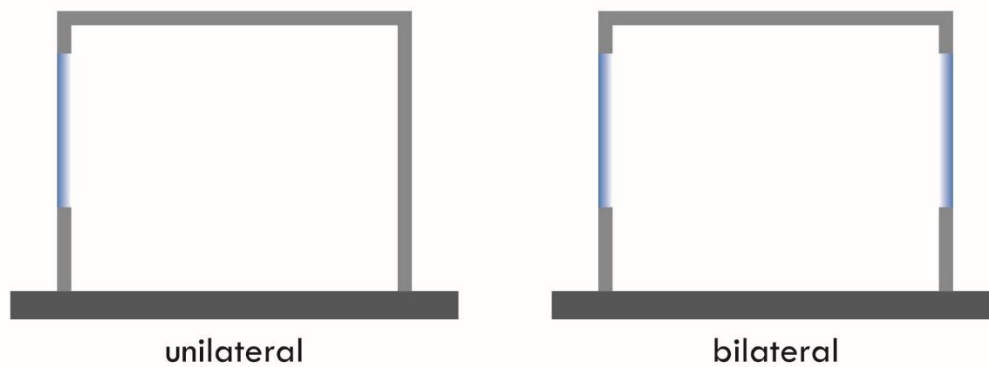
#### ▪ **Iluminación lateral**

Tal como su nombre lo indica, en este sistema la luz incide desde una abertura lateral, la iluminancia que se recibe en las zonas más apegadas a dicha abertura recibe mayor iluminación que las más alejadas. “Si nos movemos, alejándonos de la ventana, el valor de la iluminación directa decrece rápidamente y la proporción relativa de la componente indirecta (reflejada y difusa) se incrementa” (Pattini, 2006). Este sistema se puede aplicar de forma unilateral o bilateral, tal como se muestra en la **Figura 9**.



**Figura 9**

**Iluminación lateral**



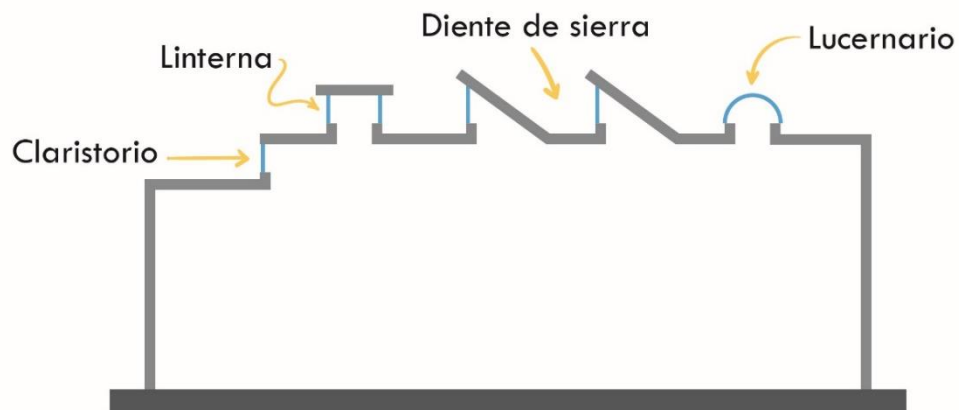
▪ **Iluminación cenital**

En este sistema se busca iluminar por la parte superior y se utiliza principalmente en edificios de gran profundidad, ya que ayuda a introducir más luz al interior. La iluminación cenital se puede aplicar de distintas formas, ya sea por medio de un sistema de claristorio, linterna, diente de sierra o lucernario, como se puede ver en la **Figura 10**. “La iluminación cenital puede también causar deslumbramiento si no está bien diseñada, pero a menudo es un problema de diseño más fácil de resolver que el de reducir el deslumbramiento procedente de ventanas laterales” (IDAE, 2005, p.38).



**Figura 10**

**Componentes de iluminación cenital**



Nota. Adaptado de Pattini (2006).

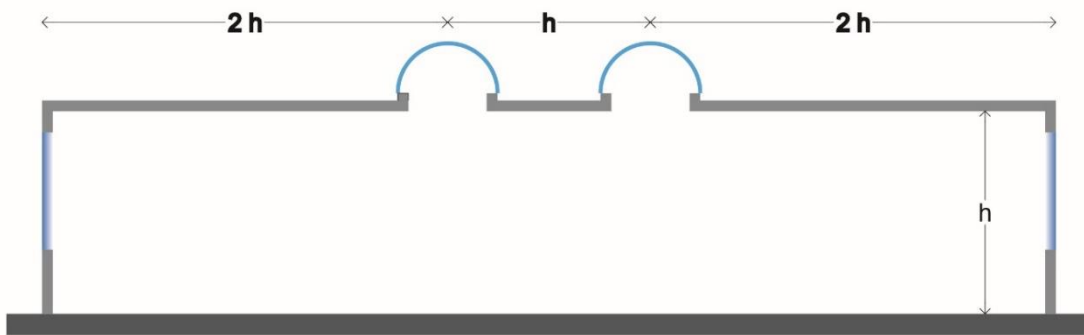
▪ **Iluminación combinada**

Este sistema incluye iluminación en techos y en muros (ver **Figura 11**), lo que sería una cenital y lateral respectivamente, en un cerramiento abovedado, se consideraría lateral si la abertura es menor a 2.5 m y por encima de esta altura ya se consideraría cenital. “En una iluminación combinada, la relación de la componente directa e indirecta de la iluminación puede ubicarse entre los dos extremos mencionados anteriormente” (Pattini, 2006).



**Figura 11**

**Iluminación combinada**



Nota. Adaptado de Chi (2021, p.110).

▪ **Profundidad del espacio**

Cuando se ilumina con un sistema lateral se establece un límite de profundidad para que la luz pueda ser distribuida de forma satisfactoria durante el día. Lo anterior puede marcar un límite en el diseño, en cambio, IDAE (2005, p.37) considera que esta limitación se puede contrarrestar usando ventanas altas en espacios altos, logrando que la luz natural alcance una mayor profundidad. Para una iluminación unilateral la profundidad del espacio **L** no deberá exceder el valor límite, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{L}{W} + \frac{L}{H_w} < \frac{2}{1 - R_b}$$

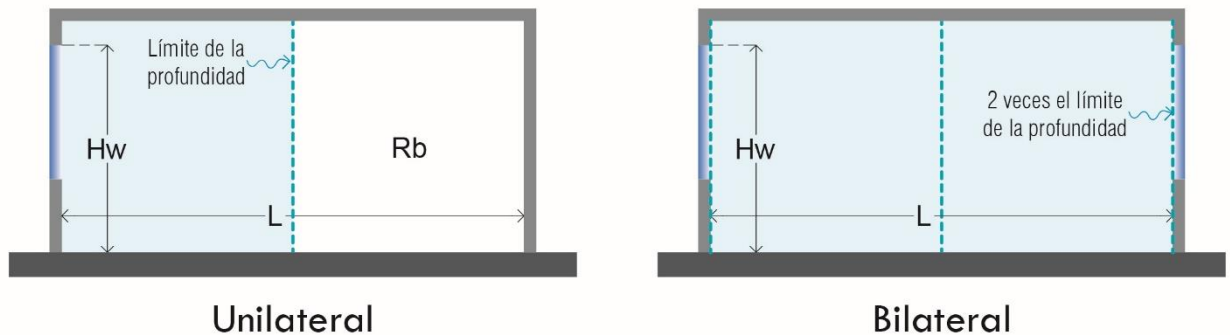
Donde **W** es la anchura de la sala, **H<sub>w</sub>** la altura de la parte superior de la ventana desde el nivel del suelo y **R<sub>b</sub>** la reflectancia promedio de las superficies en la mitad posterior de la sala (lejos de la ventana). Si **L** excede este valor, la mitad posterior de la sala tenderá a parecer sombría y se necesitará el alumbrado eléctrico suplementario. (IDAE, 2005, p.37).

Por el contrario, cuando la iluminación es bilateral, la profundidad máxima que puede ser iluminada de forma efectiva es dos veces la profundidad

del espacio  $L$ , contemplando desde la pared de la abertura hasta la otra pared con la otra abertura. En la **Figura 12** se ejemplifica la fórmula para ambos casos de iluminación lateral.

**Figura 12**

**Profundidad en el sistema lateral**



Nota. Adaptado de Chi (2021, p.109-111).

Todo tipo de iluminación se debe planear y diseñar con base en las dimensiones que tenga cada local al que le queremos integrar luz, debemos ser aún más cuidadosos cuando se trata de incorporar luz natural. Si limitamos la entrada de luz natural el espacio será oscuro, por ende, se requerirá el uso de iluminación artificial; por el contrario, si dejamos entrar mucha luz se generará incomodidad en las personas y harán lo posible por controlar el paso de la luz. Por lo anterior, se debe crear un balance con la entrada de luz que permitimos que pase al interior, es así como Pattini (2006) plantea los siguientes objetivos de diseño:

1. Minimizar el efecto de reducción de ingreso de radiación debido al ángulo de incidencia de la luz. Esto significa que los aventanamientos ubicados en la parte alta de los muros producen más iluminancia que una ventana más baja.



2. Minimizar el deslumbramiento sobre los planos de trabajo, resultante de la visión directa de la fuente de luz en las ventanas superiores.
3. Minimizar las ganancias de calor diurno durante el período de verano.
4. Controlar la penetración de luz solar directa sobre el plano de trabajo.
5. Controlar el contraste de claridad dentro del campo visual de los ocupantes, especialmente entre las ventanas y las superficies circundantes del local.
6. Maximizar la transmisión de luz por unidad de área vidriada (marcos y hojas de ventanas esbeltas).
7. Maximizar las ganancias térmicas diurnas en invierno para permitir la calefacción natural en los espacios.
8. Proveer sombra sobre las áreas vidriadas para evitar sobrecalentamientos estacionales o deslumbramientos según la orientación de la fachada donde está ubicada la ventana.

### **2.3 Distribución de la luz**

Normalmente, la ventana es la abertura que permite el paso de la luz a un espacio interior, pero en los edificios de oficinas acristalados se logra mediante el sistema de fachadas, donde el material predominante es el vidrio. El vidrio es ese elemento que nos protege de los factores externos como son el ruido y el viento, además nos permite tener vistas al exterior. “Los materiales transparentes tienen otro efecto interesante sobre la luz: la refractan. Esto significa que al entrar la luz en el material cambia su dirección de propagación” (Cetto, 1996, p.9).

Como ya se mencionó anteriormente, en la mayoría de los edificios acristalados se tiene una iluminación unilateral y de acuerdo con el IDAE (2005,

p.48) el acristalamiento puede clasificarse dependiendo de la relación que se tenga entre la superficie de la ventana y las superficies interiores del local, tomando en cuenta paredes, techos y pisos (ver **Tabla 2**). Cabe destacar que si tenemos un acristalamiento bajo o muy bajo lo más probable es que los niveles lumínicos sean extremadamente bajos; por el contrario, si tenemos un acristalamiento elevado o muy alto podríamos tener problemas de confort térmico y lumínico con deslumbramientos. Si en los edificios corporativos la superficie vidriada es de casi el 100% entonces debemos cuidar los problemas de confort térmico y deslumbramiento.

**Tabla 2**

**Porcentajes de acristalamiento**

<b>Nivel</b>	<b>Porcentaje</b>
Muy bajo	1%
Bajo	1-4%
Medio	4-10%
Elevado	10-25%
Muy alto	+25%

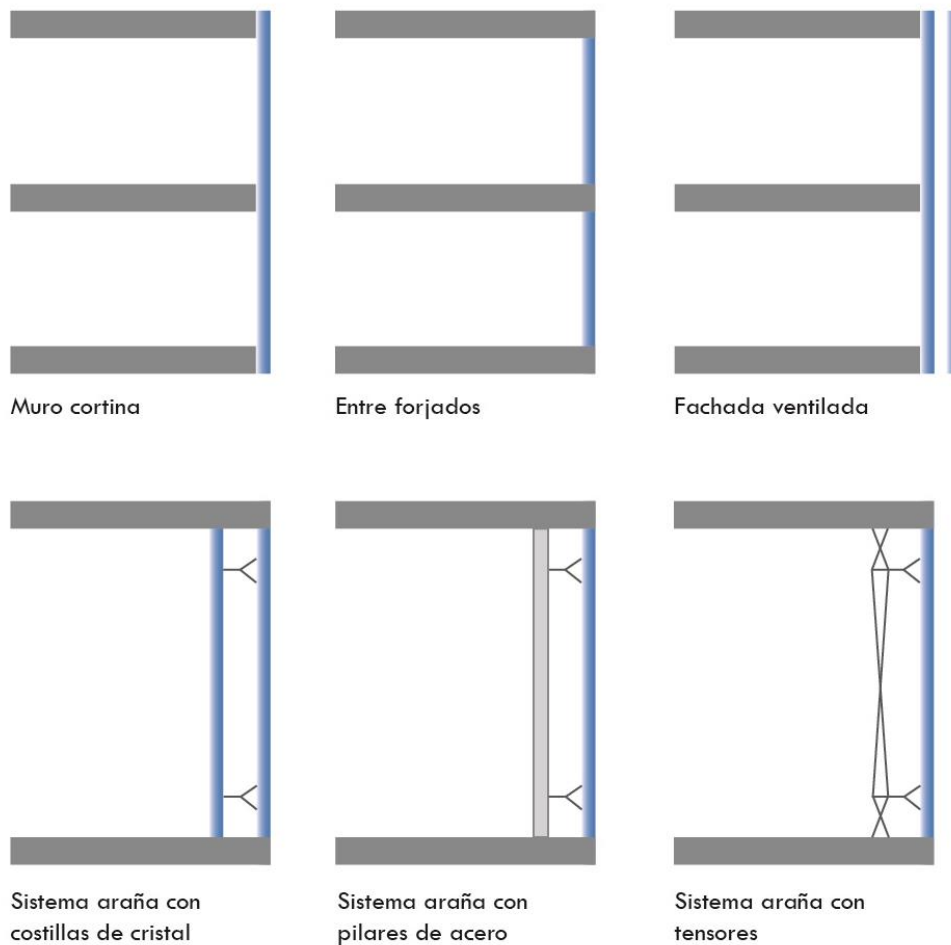
Nota. Adaptado de IDAE, 2005.

Ahora bien, en la Norma Europea EN 13830 citado en Morales (2017, p.60) fachada acristalada se define como la retícula de elementos constructivos verticales y horizontales, conectados conjuntamente y anclados en la misma estructura del edificio; los cuales se rellenan con paneles ligeros de cerramiento, de tal forma que se genera una superficie continua y ligera que delimita el espacio exterior del interior. Asimismo, Morales (2017, p.60) menciona que las fachadas acristaladas se pueden clasificar en muro cortina, fachada entre forjados, fachada ventilada y sistema araña; como se muestra en la **Figura 13**.



**Figura 13**

**Sistemas de fachadas**



Nota. Adaptado de Morales (2017, pp.60-62).

En el caso de estudio que se consideró para este trabajo, el sistema de fachada empleado es el de muro cortina (ver **Figura 14**) razón por la que describiremos cómo trabaja. La carga en este sistema es su propio peso y dicha carga se transfiere a la estructura del edificio mediante la estructura conformada por anclajes y apoyos de acero —que también pueden ser perfiles de aluminio. Al usar este sistema nos permite tener una fachada acristalada en su totalidad, razón por la que debemos ser muy cuidadosos con el vidrio que elegimos, porque hay que considerar los aspectos térmicos y sobre todo lumínicos

—que es en lo que nos centramos en esta investigación. “Para utilizar esta tipología de fachada se requiere de un planteamiento exhaustivo para tener la modularidad controlada y que encaje con los espacios de la fachada” (Morales, 2017 p.60).

**Figura 14**

**Sistema de fachada de Torre Esmeralda I**



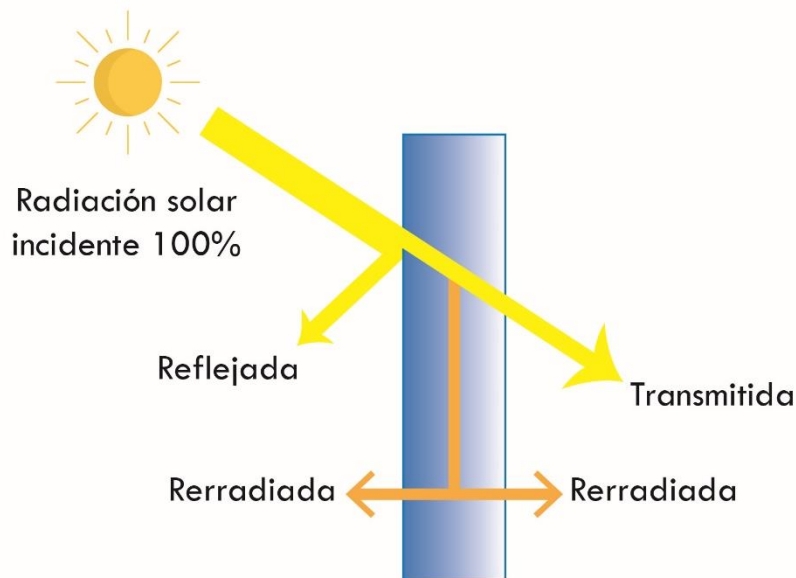
Una vez aclarados los sistemas de fachadas y que nos enfocamos en un sistema de muro cortina por ser una fachada 100% acristalada podemos continuar con cómo es que la radiación atraviesa el vidrio, qué es lo que importa cuando



queremos controlar la entrada de luz natural al espacio. Cabe aclarar que ni el vidrio más claro y fino va a transmitir el 100% de la radiación solar incidente, la radiación que no se transmite se absorbe o refleja (ver **Figura 15**). “La cantidad que se refleja depende de la naturaleza de la superficie y del ángulo de incidencia de la radiación” (Lechner, 2015, p.270). Dicho autor asegura que aproximadamente el 90% de la radiación solar incidente termina como ganancia de calor.

**Figura 15**

**Radiación incidente**



Nota. Adaptado de Lechner (2015, p.270).

La cantidad de radiación solar incidente sabemos que depende de factores como el clima, la altura solar, la orientación y la inclinación del vidrio, por lo que la pérdida o ganancia que se dé a través de un acristalamiento dependerá de estos factores. Además, intervienen las propias características del vidrio en cuestión, consideremos que “un acristalamiento idealmente seleccionado admite sólo la parte de la energía solar que es útil para la

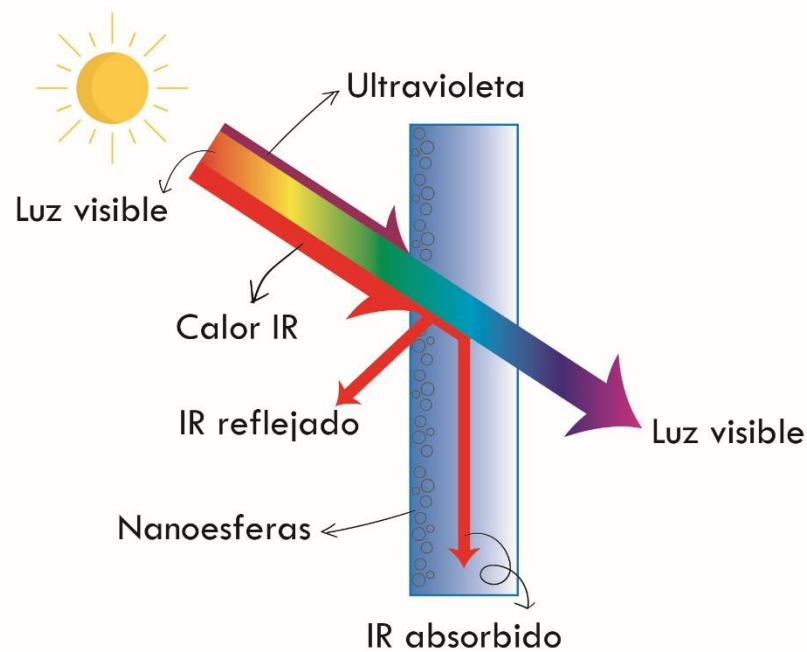


iluminación natural” (Robinson y Selkowitz, 2013, p.37). Esta energía solar útil debe estar dentro del espectro visible como se muestra en la **Figura 16**, dejando afuera la radiación infrarroja y ultravioleta. Tengamos presente que la radiación solar se propaga mediante longitudes de onda, la ultravioleta (UV), la visible (V) y la infrarroja (IR). En un vidrio queremos dejar afuera la UV y la mayor cantidad de IR, permitiendo el paso de la visible. La radiación UV pasa fácilmente a través del vidrio, pero resulta muy dañina, mientras que la IR debe quedar fuera para evitar exceso de calor. No obstante, en los días fríos queremos dejar pasar una fracción de IR para poder calentar el interior, esto se puede lograr gracias a las tecnologías selectivas de un vidrio, ya que mediante estas se puede rechazar o ganar calor.

Lo que hace un vidrio de alta tecnología —que veremos más adelante— es dejar afuera la radiación UV y la IR a través de la película adherida al vidrio; en dicha película están alojadas nanoesferas, las cuales tienen la función de rechazar —ya sea reflejando o absorbiendo— estas partes del espectro. El porcentaje de la radiación UV e IR que es rechazada dependerá de la tecnología que tenga la película, con lo cual logra que pase la luz visible.

**Figura 16**

**Espectro en un vidrio**

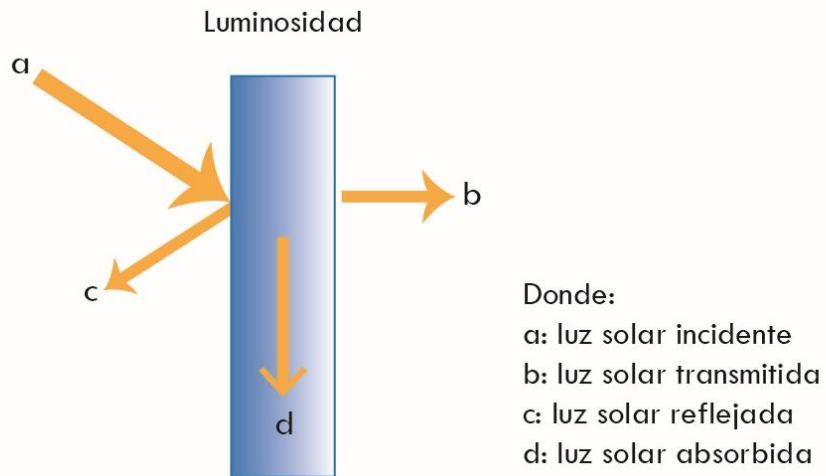


Nota. Adaptado de Robinson y Selkowitz (2013, p.37).

Los materiales empleados en un acristalamiento en su mayoría son de vidrio, pero a veces también lo son de plásticos, especialmente desarrollados; estos se pueden encontrar en distintos espesores, transparentes o tintados, simples o de múltiple acristalamiento; todas estas características pueden combinarse para proporcionar al diseñador distintas presentaciones. A la hora de diseñar un edificio se ha de tener muy en cuenta el tipo de acristalamiento que se elegirá, prestando especial atención a su comportamiento ante la luminosidad y la energía de la luz solar. En la **Figura 17** podemos ver los elementos y comportamiento de la luminosidad; mientras que en la **Figura 18** podemos observar los flujos de calor que se tienen a través de un vidrio.

**Figura 17**

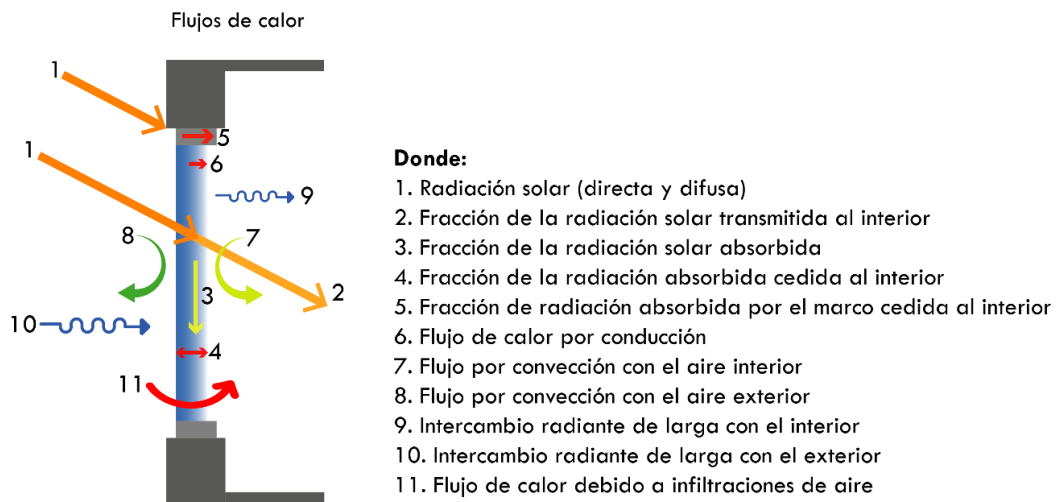
**Distribución luminosa**



Nota. Adaptado de IDAE (2005, p.65).

**Figura 18**

**Flujos de calor en un acristalamiento**



Nota. Adaptado de IDAE (2005, p.65).



Todas las características generales descritas en este apartado nos ayudan a entender cómo el vidrio es un elemento arquitectónico de suma importancia, mediante el cual se logra la interacción del espacio interior con el exterior y cómo gracias a éste podemos controlar la incidencia lumínica al interior. Lo anterior es la razón por la que hay que estudiar el material que vamos a elegir, así como sus características específicas, tal como lo veremos en la siguiente sección.

## 2.4 Componentes de un vidrio

Las fichas técnicas proporcionadas por las vidrieras contienen los valores y/o porcentajes de los componentes del vidrio que trabajan, por lo que es importante saber a qué se refiere cada uno, pues sólo así podremos seleccionar cuál es el que va acorde a nuestro proyecto. En el estudio de Saint-Gobain, (s.f.) mencionan que estos componentes pueden hacer referencia a sus propiedades lumínicas (A), propiedades energéticas (B), radiación ultravioleta (C), protección solar (D) y aislamiento térmico (E). A continuación, se enlistan los componentes con la letra de la propiedad que le corresponde.

**A- Transmisión luminosa (TL):** es el porcentaje de luz visible que pasa a través del vidrio. Es el parámetro que maximiza la luz que entra a los espacios.

**A- Reflexión luminosa (RL):** se divide en exterior e interior, la primera (RLe) es el porcentaje de luz visible reflejada hacia el exterior; la segunda (RLi) es el porcentaje de luz visible reflejada hacia el interior.

**B- Transmisión energética (TE):** porcentaje de energía solar transmitida a través del acristalamiento.

**B- Absorción energética (AE):** porcentaje de energía solar absorbida por el acristalamiento.

**D- Factor solar (g):** es la energía solar total que pasa al interior. A menor valor, mayor eficacia de control solar.

**D- Coeficiente de sombra (SC):** es la protección solar referida a un vidrio incoloro de 3mm ( $g=0.88$ ).

**E- Transmitancia térmica (Valor U):** cantidad de calor transmitida a través del acristalamiento de acuerdo con la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. Cuanto menor sea su valor, mayor aislamiento térmico ( $W/m^2K$ ).

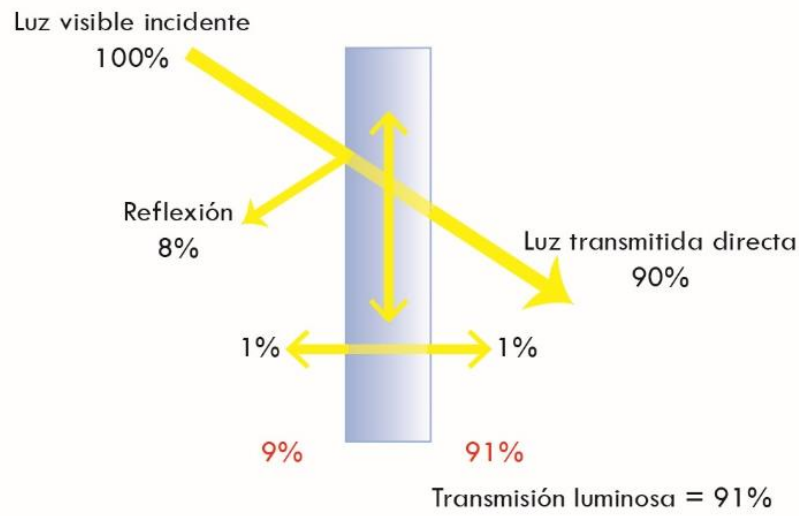
**E- Selectividad:** relación entre la transmisión de luz y el factor solar.

De las propiedades enlistadas las que debemos considerar para aprovechar la luz natural son las de transmisión luminosa (**Figura 19**) y el factor solar (**Figura 20**). Estas dos magnitudes resultan importantes porque necesitamos que “un acristalamiento permita la máxima transmisión de luz con una baja transmisión de calor radiante solar con el mínimo factor solar posible” (IDAE, 2005, p.66). Con dichas magnitudes equilibradas estaríamos evitando el sobrecalentamiento al interior y el deslumbramiento, el cual “es uno de los factores que requieren mayor control a la hora de iluminar con luz natural [...] no depende solamente de valores absolutos de luminancia, sino también de valores relativos y contraste” (Yamin et al., 2016).



**Figura 19**

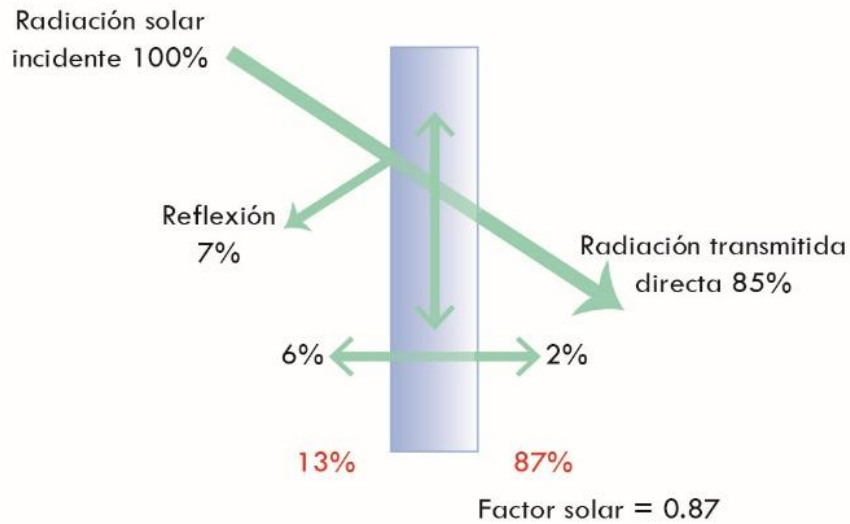
**Transmisión luminosa**



Nota. Adaptado de Fernández, (2006).

**Figura 20**

**Factor solar**



Nota. Adaptado de Fernández, (2006).

El acelerado crecimiento tecnológico de los últimos años ha permitido que las vidrieras también avancen en este ámbito y así sus productos nos puedan proteger “del calor, el frío, el ruido, el fuego, las agresiones y los accidentes además de decorar nuestros edificios, tanto el exterior como el interior” (Fernández, 2006). Es por lo que el vidrio se ha usado cada vez más en las fachadas de los edificios, pues ya es capaz de protegernos de los factores externos, además de poder controlar la incidencia de los mismos antes de que lleguen al interior.

## 2.5 Vidrios de alta tecnología

En el apartado 2.3 se describió cómo trabaja un vidrio, seguido de esto en el 2.4 vimos las características específicas de los vidrios, pero qué hay sobre los vidrios de alta tecnología y qué los hace útil. Pues bien, empecemos por diferenciar un vidrio inteligente de uno de alta tecnología. Los vidrios inteligentes son aquellos que se pueden volver transparentes u opacos mediante un control remoto, un interruptor, o bien, a través de un teléfono o Tablet; son reversibles al cambio y su función es molecular. Mientras que un vidrio de alta tecnología se caracteriza por ser un producto que tiene un control solar y su sistema se basa en la incorporación de capas invisibles donde se alojan los materiales especiales en las caras de los vidrios; con este sistema se logra que la luz solar atraviese el vidrio, pero impide el paso del calor —lo cual dependerá de la tecnología utilizada, ya que se puede diseñar qué parte del espectro es el que queremos que ingrese, así como rechazar o ganar calor.

Para poder abarcar las características de un vidrio de alta tecnología lo haremos específicamente con los vidrios de *Saint-Gobain Glass*, que es uno de los fabricantes de vidrio plano más importante en el mundo y que ha estado en México desde 1996. Esta empresa tiene hornos en la ciudad de Cuautla, en el Estado de Morelos, en esta planta trabajan la línea *SGG Cool-Lite*, la cual es para control solar y es la que se analiza en esta investigación. En 2017 inició



con la construcción del primer Coater Jumbo de esta empresa en el país, donde hacen vidrios a capas de alta tecnología y grandes dimensiones, los cuales tendrán “la capacidad de aislar hasta 6 veces más que el vidrio normal, reducir las ganancias de calor por radiación solar directa en residencias y edificios, generando así economías significativas en el consumo de energía en uso de climatización, ventilación e iluminación artificial” (Saint-Gobain, 2019). Para esta investigación se decidió trabajar con la familia SGG Cool-Lite, ya que son vidrios a capas con alta eficiencia de control solar y baja emisividad, lo que permite que se disminuya el paso del calor al interior y se incremente el aislamiento. De esta familia se toman dos series, que son los Cool-Lite Xtreme y Cool-Lite SKN.

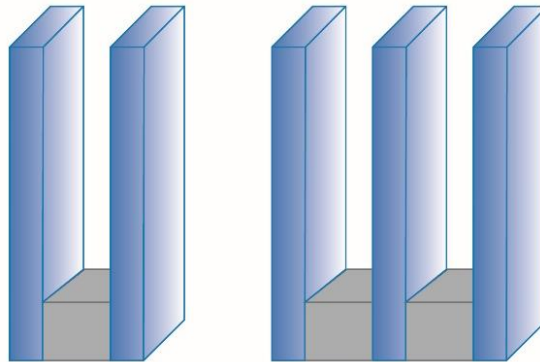
De acuerdo con la descripción de Saint-Gobain (2018a) el Cool-Lite Xtreme es un vidrio de triple capa (Figura 21-derecha) con la más avanzada tecnología de control solar y aislamiento térmico; su recubrimiento de control solar se debe a la triple capa de plata, lo que lo hace el más eficiente del mercado al brindar un perfecto equilibrio entre el paso de la luz, aislamiento y control solar. El Cool-Lite Xtreme bloquea hasta  $\frac{2}{3}$  del calor, reflejándolo al exterior, su uso es ideal en edificios de oficinas, ya que cuenta con un revestimiento microscópicamente delgado en una cara, lo que proporciona una apariencia atractiva y reduce el resplandor de la luz solar directa.

Por otra parte, Saint-Gobain (2018b) dice que el Cool-Lite SKN es un producto que tiene doble capa (Figura 21-izquierda) de plata, aplicada nanométricamente, lo que lo hace transparente, es uno de los vidrios más neutros del mercado sin sacrificar su desempeño energético. Tiene como característica principal que es un producto a capas con alta eficiencia, ya que tienen propiedades de control solar y baja emisividad, lo que permite que se disminuya el paso del calor e incremente el aislamiento. Son capaces de controlar hasta  $\frac{2}{3}$  del calor que se transmite al interior, esto sin sacrificar el paso de la luz, lo que genera que se consuma menos energía por luz artificial.



**Figura 21**

**Vidrio de doble y triple capa**



De la línea Cool-Lite de Saint-Gobain en la **Tabla 3** se observan las series Xtreme y SKN con sus respectivos productos, así como las características de cada uno de sus componentes. Estos modelos tienen un aspecto neutro, no se consideran vidrios tintados.

Donde:

- LT: transmisión de luz
- G: factor solar
- SC: coeficiente de sombra
- LT/g: selectividad
- RLe: reflexión de luz exterior
- RLi: reflexión de luz interior



**Tabla 3****Componentes de la serie Cool-Lite Xtreme y Cool-Lite SKN**

Modelo	Tipo	LT (%)	G	SC	LT/g	RLe (%)	RLi (%)	Valor U (W/m <sup>2</sup> K)	
								12 mm aire	12 mm argón
COOL- LITE XTREME	60/28	59	0.28	0.33	2.11	14	17	1.5	1.2
	60/28 II	60	0.28	0.33	2.14	14	17	1.5	1.2
	50/22 II	46	0.22	0.25	2.09	16	18	1.5	1.2
	70/33	68	0.33	0.38	2.06	11	13	1.5	1.2
	70/33 II	68	0.33	0.38	2.06	11	13	1.5	1.2
	60/28 D	60	0.29	0.33	2.07	14	17	1.5	1.2
COOL-LITE SKN	144 II	41	0.24	0.27	1.71	20	15	1.6	1.3
	154	52	0.28	0.32	1.85	19	22	1.5	1.5
	165	60	0.34	0.39	1.76	16	18	1.5	1.2
	176	68	0.37	0.43	1.84	13	15	1.5	1.2

De los vidrios que se presentaron en la **Tabla 3** se decidió trabajar únicamente con tres, tomando en cuenta su transmisión de luz, para así evaluar distintos porcentajes en la simulación. De principio aquellos de tipo II se descartaron porque son vidrios que están disponibles para templar. De la serie SKN se descartó el modelo 165 ya que su LT es del 60%, valor muy próximo al del Xtreme 60/28. Asimismo, de la serie Xtreme se descartó el 70/83 por tener el mismo LT al SKN 176. La finalidad de esta selección de vidrios es evaluar el desempeño de distintos porcentajes de transmisión de luz, por lo que los vidrios que se evaluaron son los de la **Tabla 4**.

**Tabla 4****Vidrios para evaluación lumínica**

Modelo	Tipo	LT	G
<b>COOL-LITE XTREME</b>	XTREME 60/28	59	0.28
<b>COOL-LITE SKN</b>	SKN 154	52	0.28
	SKN 176	68	0.37

## Conclusiones

Para cerrar este capítulo recordemos que el material de recubrimiento para las fachadas en los edificios ha ido cambiando con el paso del tiempo, hasta llegar al uso del vidrio como el favorito para protegernos de los factores externos, entre los que están el viento, ruido y calor. Una de las razones por las cuales el vidrio es el predilecto es porque permite vistas al exterior, lo que ayuda a la integración del espacio interior con el exterior. A raíz del avance tecnológico se ha llegado a la creación de los vidrios de alta tecnología, los cuales son capaces de filtrar la luz natural, controlar la cantidad que puede ingresar al interior y reflejar otra tanta al exterior.

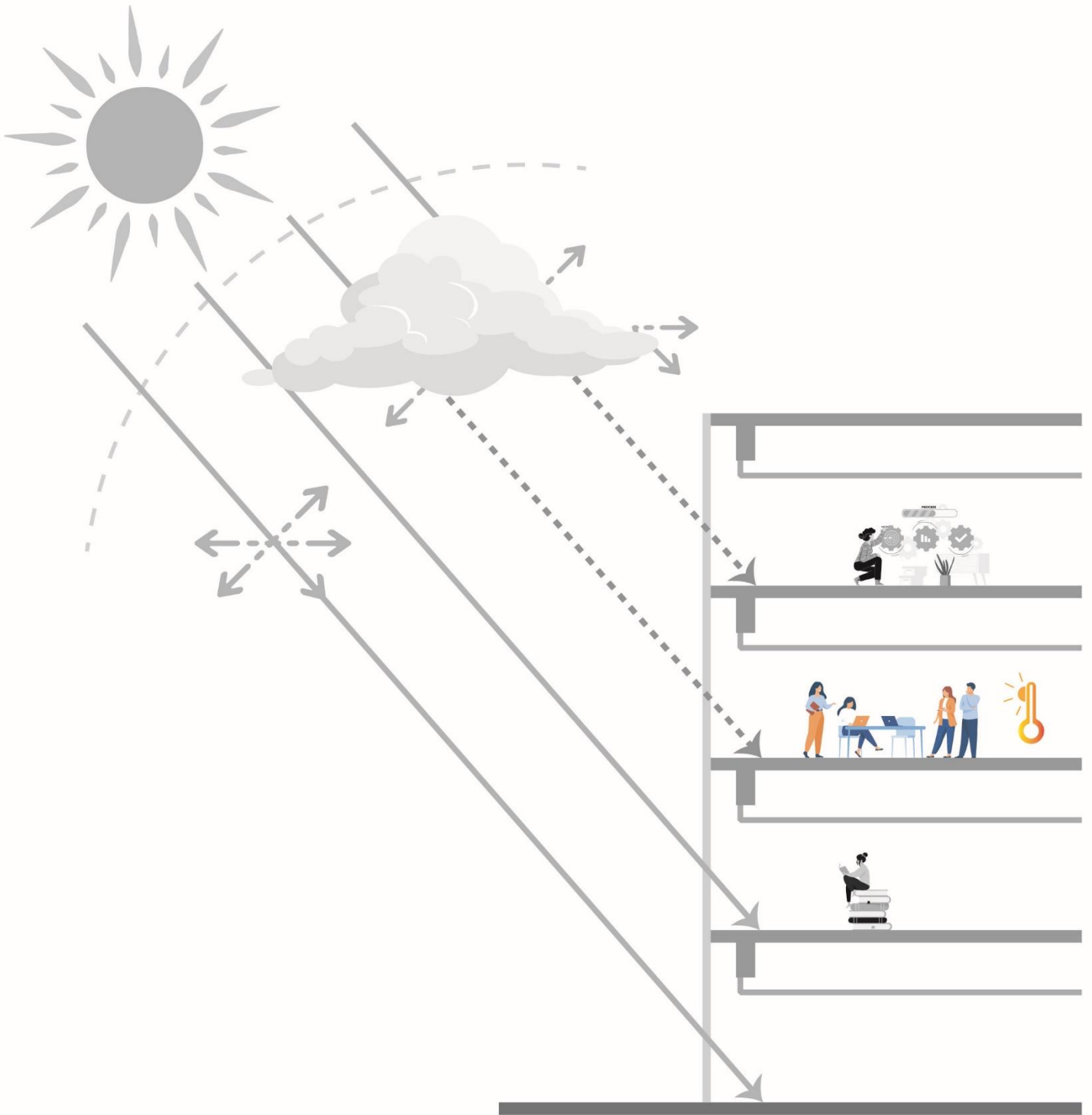
La forma en la que entra la luz al espacio es importante para su distribución, en este capítulo se vio que la incidencia lateral es la más común, por lo que la cantidad de luz incidente se tendrá que regular para evitar deslumbramientos. Del análisis lumínico y la cantidad recibida habrá que estudiar cómo podemos redirigir la luz de tal forma que también llegue a los espacios más profundos cumpliendo la relación altura-profundidad. Lo anterior dependerá de las intenciones de diseño que se pretendan alcanzar, así como los objetivos lumínicos establecidos.

Cuando se trata de aprovechar la luz, con las características de los vidrios, lo que hay que considerar es el porcentaje de transmisión luminosa y el factor solar. El primer término lo podemos encontrar en la literatura como VT que es la transmitancia visible y a mayor porcentaje de este habrá mayor incidencia de luz. Recordemos que ningún vidrio permite el paso del 100% de radiación incidente, ya que el vidrio cumple con la función de reflejar una parte al exterior. Ahora bien, un vidrio de alta tecnología está diseñado para controlar la incidencia solar y la radiación UV e IR, motivo por el que se eligieron este tipo de vidrios; además los vidrios de alta tecnología tienen un alto porcentaje de transmitancia visible.



# **CONFORT LUMÍNICO**

**CAPÍTULO 3**



Hasta el momento hemos hablado de la luz natural y de los vidrios de alta tecnología, dos elementos relevantes para este estudio —si los consideramos como las partes exteriores de una edificación— pero la arquitectura se vive desde un espacio interior por lo que debemos pensar y diseñar el ambiente interior sin olvidar que “los edificios deben diseñarse no sólo como lugares de refugio y para albergar las actividades necesarias, sino también como lugares de curación” (Boubekri, 2008, p.61). Diseñar espacios que se sientan como refugio se puede lograr a través de la luz natural, ya que se puede lograr una conexión entre distintos factores biológicos que sugieren que los “niveles terapéuticos de luz son necesarios para un funcionamiento saludable, pero estos niveles no se alcanzan dentro de nuestros edificios si dependemos únicamente de la iluminación eléctrica” (Boubekri, 2008, p.84).

Es importante considerar que al no tener acceso a la luz natural y no lograr niveles de confort lumínico, incluso con los sistemas artificiales, estaríamos afectando el desempeño laboral de los trabajadores; por lo que un adecuado balance entre la luz natural y artificial contribuye a la comodidad y salud de las personas. *Boyce et al., (2003)* mencionan que el beneficio e impacto de la luz natural se da en “el rendimiento humano y la productividad en el lugar de trabajo; la salud humana; y el rendimiento financiero de la inversión”. De estos, el más importante es mantener los niveles de comodidad visual adecuados, los cuales se pueden lograr con distintas métricas y siguiendo la normativa. Por lo anterior, es que en este capítulo nos centramos en el confort lumínico y las métricas aplicables en la luz natural, las cuales son objeto de estudio en esta investigación.

### **3.1 Definición de confort lumínico**

En primera instancia, la Organización Mundial de la Salud (OMS) define el confort como la condición de la mente que expresa total satisfacción con el ambiente.

Dicha satisfacción tiene relación con nuestra percepción en el interior, la cual se ve afectada por cuatro factores que son lo térmico, visual, acústico y el aire. Si estos cuatro elementos están equilibrados, tendremos lugares que funcionan bien y nos harán sentir en total comodidad. Ahora bien, de los cuatro elementos antes mencionados, en el que nos enfocaremos será el visual, conforme a *Carlucci et al.*, (2015) el estudio del confort visual se debe centrar en la “cantidad de luz, la calidad de la luz en la reproducción de colores y en el riesgo de deslumbramiento para los ocupantes”.

Con base en la norma europea EN 12 665, el confort visual se define como “una condición subjetiva del bienestar visual inducida por la visual ambiental” mientras que *Carlucci et al.*, (2015) mencionan que el bienestar visual dependerá de tres factores principales, el primero de la fisiología del ojo humano; el segundo de la cantidad física que describe la cantidad de luz y su distribución en el espacio; finalmente el tercero de la emisión espectral del recurso lumínico. A su vez, *Véliz (s.f.)* plantea que los factores que intervienen con el bienestar visual son los siguientes:

- Nivel de iluminación adecuado (iluminancia media  $E_{av}$ )
- Distribución espacial (uniformidad  $E_{min}/E_{av}$  y limitación del deslumbramiento: UGR)
- Reproducción cromática correcta ( $R_a$ )

Dentro de la distribución espacial está otro concepto que hay que tener presente y es el del deslumbramiento, el cual de acuerdo con la norma europea EN 12464-4:2002 se define como la sensación producida por áreas brillantes dentro del campo de visión y puede ser experimentado como deslumbramiento molesto o perturbador. El deslumbramiento molesto en los espacios de trabajo se puede producir por las luminarias brillantes o las ventanas, las fuentes luminosas brillantes al causar deslumbramiento pueden alterar la visión de los objetos.



Cumplir con un bienestar visual en los espacios interiores es fundamental, principalmente en las áreas de trabajo, ya que nos llevará a desarrollar de forma más eficiente nuestras actividades laborales. La relevancia de enfocarse en las oficinas es porque son espacios donde las personas pasan la mayor parte de su día, ya que pueden estar entre 8 y 10 horas en su espacio de trabajo. La luz natural es un factor que beneficia la productividad de los trabajadores, pero si no se sabe aprovechar y hacer un uso adecuado de ésta puede generar “molestias visuales por el deslumbramiento y la distracción, y puede disminuir los estímulos que la tarea presenta al sistema visual al producir reflejos velados o por las sombras. La eficacia de la luz natural para el rendimiento visual dependerá de cómo se suministre” (Boyce *et al.*, 2003, p.65). Por lo anterior es que las condiciones de diseño lumínico se deben mejorar para el bienestar de los trabajadores, para así tener mayor calidad en su entorno laboral en pro de la eficiencia y productividad.

Para lograr y asegurar niveles óptimos de comodidad visual se requieren de lineamientos o normas que las regulen y en nuestro país las normas que hacen referencia a la iluminación natural no son valores absolutos, nos hablan de porcentajes generales; por lo que hay que recurrir a estándares internacionales. Aplicar la normativa resulta conveniente ya que nos ayudará a regular los niveles lumínicos porque “no siempre tener niveles altos de iluminación será sinónimo de un espacio más comfortable porque puede conducir al deslumbramiento y generación de calor extremo, pues la luz es una energía que se transformará en calor y, según sea el caso, será o no beneficioso” (Zambrano y Prado, 2016). Cuando tenemos exceso de iluminación se verán afectados los niveles de confort térmico y lumínico, lo que impactaría de forma negativa en los trabajadores.



### 3.2 Niveles de iluminación

Hay normas que especifican y determinan los niveles recomendados de iluminación para llevar a cabo distintas actividades, pero cuando se trata de iluminación natural no se habla de valores absolutos. En México contamos con dos normas de iluminación, las cuales se explican más adelante, asimismo encontraremos la compilación de las normas internacionales a modo comparativo de los requerimientos lumínicos en las oficinas, basado en el trabajo de Pattini en el año 2000.

#### ▪ Normas Técnicas Complementarias del RCDF

En cuanto a la iluminación natural, en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en la sección de ventanas Fracción I de la norma 3.4.2.1 se estipula que “el área de las ventanas para iluminación no será inferior al 17.5% del área del local en todas las edificaciones a excepción de los locales complementarios donde este porcentaje no será inferior al 15%” (Arnal y Betancourt, 2014, p.255). Esta norma hace una generalidad en las orientaciones, sin tomar en cuenta que cada orientación tiene sus propios requerimientos lumínicos. Aunado a lo anterior, estos porcentajes no nos hablan sobre un espacio de trabajo, sin embargo, en el apartado 3.4.3 Iluminación artificial se encuentran los requisitos mínimos de iluminación para diferentes tipos de edificación y los distintos locales. Cabe recalcar que son requerimientos para iluminación artificial. Los requisitos aplicables para oficina son como se muestran en la **Tabla 5**.

*Tabla 5*

*Requisitos mínimos de iluminación artificial.*

SERVICIOS	Local		Nivel de iluminación
	Oficinas privadas y públicas	Cuando sea preciso apreciar detalles:	Toscas o burdos
Medianos			300 lux
Muy finos			500 lux

Nota. Adaptado de Arnal y Betancourt (2014, p.259)



▪ **NOM-025-STPS-2008**

Por otro lado, está la Norma Oficial Mexicana denominada “Condiciones de iluminación en los centros de trabajo” de la Secretaría de Trabajo y Previsión Social con su versión más reciente, la del 2008, la cual es la modificación de la anterior de 1994. Esta norma tiene como objetivo “establecer los requerimientos de iluminación artificial de los centros de trabajo, para que se cuente con la cantidad de iluminación requerida para cada actividad visual” (Secretaría de Trabajo y Previsión Social, 2008). En la **Tabla 6** se puede ver el extracto de estos niveles correspondientes a un puesto de trabajo.

**Tabla 6**

**Niveles de iluminación**

<b>Tarea visual del puesto de trabajo</b>	<b>Área de trabajo</b>	<b>Niveles mínimos de iluminación (lux)</b>
En interiores	Áreas de circulación y pasillos; salas de espera, salas de descanso.	100
Requerimiento visual simple: inspección visual, trabajo en banco y máquina.	Servicios al personal; recepción y despacho.	200
Distinción moderada de detalles: trabajo medio en banco y máquina, trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	300
Distinción clara de detalles: captura y procesamiento de información.	Talleres de precisión: salas de cómputo.	500
Alto grado de especialización en la distinción de detalles.	Proceso de gran exactitud. Ejecución de tareas visuales: De bajo contraste y tamaño muy pequeño por periodos prolongados.	2000

Nota. Adaptado de la Secretaría de Trabajo y Previsión Social.

▪ **Norma europea UNE 12464.1**

La normativa de la Unión Europea “Iluminación para interiores” entró en vigor para mejorar la iluminación de los espacios de trabajo, donde buscan generar un ambiente agradable y así contribuir a la creación de distintas atmósferas para desarrollar sus múltiples tareas. Dicha norma menciona que tener buena iluminación tendrá efectos positivos en sus empleados a largo plazo, esto al mejorar su productividad ya que “estudios científicos nos demuestran que la luz no sólo mejora el ambiente de la oficina, sino que también influye en la realización de las tareas” (Unión Europea, 2002) . En la **Tabla 7** podemos apreciar cómo esta normativa es más completa, incluye actividades específicas e incorpora el trabajo de CAD —el cual es importante en la arquitectura— además incorpora el UGR (Unified Glare Rating) el cual es el Índice de Deslumbramiento Unificado, cuyo valor “expresa el deslumbramiento sometido al ojo humano provocado por una fuente de luz” (Marín, 2020).

En la **Tabla 7** se entiende por  $E_m$  la iluminancia media mantenida,  $UGR_L$  el límite de índice de deslumbramiento unificado y  $R_a$  el índice de rendimiento de colores.

**Tabla 7**

*Niveles de iluminación en oficinas.*

Tipo de interior, tarea o actividad	$E_m$ lux	$UGR_L$	$U_0$	$R_a$	Observaciones
Archivo, copias, etc.	300	19	0.4	80	
Escritura, escritura a máquina, lectura y tratamiento de datos.	500	19	0.6	80	Trabajo con EPV*
Dibujo técnico.	750	16	0.7	80	
Puestos de trabajo de CAD.	500	19	0.6	80	Trabajo con EPV
Salas de conferencias y reuniones.	500	19	0.6	80	La iluminación debería ser controlable.
Mostrador de recepción.	300	22	0.6	80	
Archivos	200	25	0.4	80	
*EPV: equipo con pantalla de visualización					

Nota. Adaptado de la Unión Europea (2002).



▪ **Valores lumínicos internacionales**

Pattini (2000) hizo una recopilación sobre la normativa de iluminación, basada en fuentes nacionales, manuales de iluminación y material publicado; esto con el fin de poder hacer la comparativa de los requerimientos lumínicos que solicitan en diferentes países. En la **Tabla 8** se muestran los resultados de esta comparativa, la autora menciona que los países varían en la frecuencia con la que revisan sus recomendaciones lumínicas. Por lo anterior es que hay una gran diferencia entre un país y otro, debido a que el estudio lo realizó en el año 2000, la normativa vigente para el caso de México era la NOM-025-STPS-1994, la cual recordemos que tuvo una actualización en el año 2008 y estos valores se aprecian en la **Tabla 6**. De la revisión de 1994 a la de 2008 transcurrieron 14 años para que fuera revisada, y como el caso de México, quizá muchos países más.

**Tabla 8**

*Niveles recomendados de iluminancia horizontal (lux) para diferentes actividades en edificios no residenciales destinados a oficinas.*

País	Actividad				
	General	Computadora	Plano de trabajo	Lectura	Dibujo
Argentina	200	750	300-750	N/A	1000
Australia	160	160	320	320	600
Austria	500	160	320	320	600
Bélgica	300-750	500	500-1000	500-1000	1000
Brasil	750-100	N/A	N/A	200-500	3000
China	100-150-200	150-200-300	150	75-100-150	200-300-500
República Checa	200-500	300-500	300-500	500	750
Dinamarca	50-100	200-500	N/A	500	1000
Finlandia	150-300	150-300	500-1000	500-1000	1000-2000
Francia	425	250-425	425	425	850
Alemania	500	500	500	N/A	750
Japón	300-750	300-750	300-750	300-750	750-1000
<b>México</b>	<b>200</b>	<b>N/A</b>	<b>600</b>	<b>900</b>	<b>1100</b>

País	Actividad				
	General	Computadora	Plano de trabajo	Lectura	Dibujo
Holanda	100-200	500	400-500	400	1600
Suecia	100	300-500	300	500	1500
Suiza	500	300-500	300	500	1000
UK	500	300-500	500	300	750
USA	200-300-500	300	200-300-500	200-300-500	1000-1500-2000
URSS	300	200	300	300	500
CE	500	500	500	500	750

Nota. Adaptado de Pattini, (2000).

### ▪ Ciclos circadianos

Anteriormente se mencionó el ciclo circadiano, el cual se considera en la certificación *WELL*; el ciclo circadiano es como un reloj biológico que está sincronizado con la transición entre sueño y vigilia, los cuales están intrínsecamente relacionados con los estímulos de la luz. Para sincronizarlos “se requiere de estímulos luminosos, regidos por los patrones de luz y oscuridad, que informen al cerebro respecto a la necesidad de segregación de las hormonas necesarias para atender las necesidades de actividad y descanso y demás procesos fisiológicos” (Díaz, 2021, p.18). Es así como el ciclo circadiano regula la relación de luz-oscuridad; a través de la luz que entra por nuestra retina se manda una señal al cerebro para que éste controle la producción de melatonina —hormona que nos induce al sueño— la cual aumenta en la noche y disminuye durante el día.

Los receptores que regulan este ciclo son más sensibles a la región de longitud de onda corta del espectro visible, y estas longitudes de onda son abundantes en la luz del día. Un espacio interior iluminado por el día con características de transmisión de luz espectralmente neutras debería ayudar a regular este ciclo para los ocupantes, especialmente para



aquellos que ocupan posiciones cerca de las aperturas de luz del día, donde los niveles de luz del día son más altos. (DiLaura *et al.*, 2011, p.14.4).

Cuando el ciclo circadiano es alterado en el ser humano puede influir en el “humor y comportamiento, en los niveles hormonales, la temperatura corporal y el metabolismo, y su interrupción afecta la formación de la memoria” (Díaz, 2021, p.28). La desincronización circadiana está asociada a enfermedades crónicas como pueden ser la diabetes o la hipertensión arterial. Otro punto es que la iluminación circadiana tiene como prioridad mantener los ciclos estables a través del control de “la temperatura de color a lo largo del día, que permite pasar de una «luz biológica» estimulante con un contenido máximo de azul a una «oscuridad biológica» tranquila, más cálida y con poco o nulo contenido azul” (Marín, 2018) esto aplicado a conveniencia en determinados momentos del día.

Las normativas mencionadas en este apartado se basan en los niveles lumínicos de fuentes artificiales, pero cabe destacar que para lograr niveles de confort lumínico hay que tener en consideración que no son los mismos requerimientos para una iluminación natural que una artificial y que “la energía utilizada está en función no sólo de los niveles de iluminación, sino también en la eficiencia de las luminarias y en las horas de uso, de la variación espacial y del aprovechamiento efectivo de la luz natural cuando ésta está disponible” (Pattini, 2000). Es esencial conocer los niveles mínimos requeridos para que una persona en su espacio de trabajo se encuentre con los niveles adecuados de comodidad visual y sea capaz de desarrollar sus actividades de forma efectiva.

Los criterios lumínicos han ido cambiando con el paso de los años, en las oficinas un elemento clave ha sido el uso de la computadora, ya que antes no se usaba tanto como ahora. En México se tiene la intención de abarcar la iluminación natural, pero se hace una generalidad con porcentajes, pero no ha llegado a valores absolutos, a diferencia de la iluminación artificial. Y desde la última normativa en México para las oficinas ya pasaron otros catorce años y

no se ha modificado; no sólo se requiere actualización, sino que también se incorpore la luz natural.

### 3.3 Métricas aplicables a la luz natural

Por años se ha estudiado la relación entre las necesidades humanas y la luz natural, diversos estudios concluyen en los beneficios de la luz natural en la salud de las personas y en la influencia que ésta tiene en su rendimiento laboral. Cuando se quieren llevar a cabo un análisis de iluminación natural en espacios interiores, debemos tener un criterio establecido y cuantificable para poder determinar si los niveles lumínicos son los adecuados o no y evaluar su rendimiento. Esta evaluación se puede lograr con las métricas de iluminación natural “el desarrollo de las métricas de iluminación natural ha sido objeto de considerables esfuerzos y debates; su propósito es predecir exitosamente si el rendimiento de la iluminación natural es mejor o peor, según las decisiones tomadas en el proyecto” (Chi, 2017, p.35). Consideremos que los trabajadores aprecian la entrada de luz natural y las vistas al exterior; así como el hecho de que aquellos espacios que tienen control lumínico y térmico generan satisfacción y rendimiento en los ocupantes.

En el punto anterior vimos normativa y niveles lumínicos, los cuales se enfocan mayormente en la iluminación artificial, pero para las mediciones de la luz natural se trabaja con las métricas dinámicas de iluminación natural, mejor conocidas como DDM por sus siglas en inglés (*Dynamic Daylight Metrics*). Estas métricas se han ido simplificando conforme las investigaciones en torno a ellas avanzan; hay diferentes métricas, las cuales dependen de los valores que se quieran conocer del componente lumínico. Es así como Chi (2019) llevó a cabo una revisión de la literatura sobre estas métricas, donde la definición y características de cada una de estas se describen a continuación. Cabe destacar



que se mencionan las métricas más utilizadas y las que se consideran en normativas internacionales.

- **Factor de luz natural DF (*Daylight Factor*)**

Fue a principios del siglo XX en el Reino Unido que se desarrolló el concepto de factor de luz natural (DF) y ha sido muy utilizado en normativas internacionales. Y aunque han pasado muchos años desde su primera propuesta “el DF sigue siendo la métrica de evaluación dominante debido a su simplicidad inherente más que a su realismo” (Nabil y Mardaljevic, 2006). El DF se define como la relación que representa la cantidad de iluminación disponible en un punto interior ( $E_i$ ), en relación con la iluminación presente en exteriores al mismo tiempo bajo un cielo nublado CIE y sin obstrucciones ( $E_e$ ) lo que se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$1 \gg DF = \frac{E_i}{E_e} \times 100$$

El resultado de esta ecuación se representa con un porcentaje, donde no se consideran valores absolutos de iluminancias. El DF es invariable y uniforme para todas las orientaciones independientemente de la ubicación geográfica del edificio, esto a causa de que no se considera la variabilidad de las condiciones del cielo ni el Sol; lo que representa una gran desventaja en esta métrica.

- **Modelado de la luz natural basado en el clima**

Con los años se desarrolló el modelado de la luz natural basado en el clima (CBDM) el cual “es la predicción de cualquier cantidad luminosa (iluminancia y/o luminancia) utilizando condiciones de Sol y cielo realistas derivadas de datos climáticos estandarizados” (Tregenza y Mardaljevic, 2018). Para su aplicación se requiere de un programa especializado, ya que genera archivos con 8 760 valores horarios para un año completo, pero su gran ventaja es que considera las condiciones particulares de localidades específicas y que en la simulación se puede utilizar el modelo de cielo *All-Weather*. Recordemos que el modelo *All-*



*Weather* puede caracterizar las condiciones del cielo en un periodo anual con la eficacia luminosa y la distribución de luminancias, acercándose así a la realidad local.

- **Métricas dinámicas de iluminación natural**

Derivado de la gran cantidad de información que contiene el CBDM se formularon las métricas dinámicas de iluminación natural, mejor conocidas como DDM (*Dynamic Daylight Metrics*), las cuales permiten establecer la cantidad de luz natural para un determinado espacio a través de cálculos horarios de las iluminancias. Las DDM resultan de un análisis estadístico de las iluminancias y se puede convertir en un valor único para la cantidad de luz natural anual en un espacio determinado.

Ahora bien, las DDM que se han utilizado en los estándares internacionales en la última década han sido la autonomía de luz natural (**DA**) y la iluminancia de luz natural útil (**UDI**); de las cuales derivan la autonomía espacial de luz natural (**SDA**) y la disponibilidad de luz natural (**DA<sub>v</sub>**), enseguida se describe cada una.

- **Autonomía de luz natural (DA: *Daylight Autonomy*)**

En 1989 fue que se dio origen a este término por la *Association Suisse des Electriciens* convirtiéndola en la primera serie de métricas anuales de la luz diurna, de 2001 a 2004 la DA fue mejorada por Christoph Reinhart. Este valor se representa como un porcentaje de las horas diurnas anuales que un punto dado en un espacio está por encima de un nivel de iluminación específico. Reinhart hizo una innovación importante ya que considera información meteorológica específica de la ubicación geográfica en un periodo anual. Esta métrica también se relaciona con el ahorro de energía de iluminación eléctrica si el umbral definido por el usuario se establece en función de los criterios de iluminación eléctrica.



▫ **Iluminancia de luz natural útil (UDI: *Useful Daylight Illuminance*)**

Esta métrica es una modificación de la autonomía de luz natural concebida por Mardaljevic y Nabil en 2006; la cual se define como el porcentaje de horas ocupadas cuando los niveles lumínicos naturales sobre el plano de trabajo se consideran “útiles” para los usuarios. UDI tiene ciertos límites en la iluminancia, teniendo 100 lux para la inferior y 3000 lux para la superior, de estos dos límites cada punto del espacio obtiene tres valores UDI: rango superior, rango inferior y rango intermedio.

1. Rango superior: representa el tiempo cuando existe una sobre iluminación de luz natural.
2. Rango inferior: representa el tiempo cuando existe poca iluminación.
3. Rango intermedio: representa la iluminación natural útil.

A su vez el rango útil se puede subdividir en UDI-suplementario (UDI-s) y en UDI-autónomo (UDI-a) el primero contabiliza iluminancias de 100-300 lux, mientras que el segundo las contabiliza de 300-3000 lux. En el UDI-s se podría requerir de iluminación artificial adicional para complementar la luz natural requerida para llevar a cabo las actividades en niveles lumínicos óptimos; por el contrario, con UDI-a no se debe requerir iluminación artificial adicional. En la **Figura 22** se muestra el esquema a modo de resumen con la ocurrencia de sus niveles de iluminación natural, la ventaja de este esquema es que establece dos límites de iluminancias para así poder medir la cantidad de luz natural útil.

Cabe resaltar que niveles altos de UDI son asociados con el discomfort lumínico de los ocupantes, aunado a esto “UDI ofrece los medios para comunicar las características significativas de los análisis basados en el clima de forma concisa y fácilmente inteligible” (Nabil y Mardaljevic, 2006). Por lo anterior, es que se decidió trabajar con la métrica UDI en esta investigación.

Figura 22

Valores UDI

UDI-f	UDI-s	UDI-a	UDI-e
Bajo	Suplementario	Autónomo	Excesivo
Iluminancia menor que 100 lux	Iluminancia mayor que 100 lux y menor que 300 lux	Iluminancia mayor que 300 lux y menor que 3000 lux	Iluminancia mayor que 3000 lux

Nota. Adaptado de Chi, (2019).

▫ **Autonomía espacial de la luz natural (SDA: *Spatial Daylight Autonomy*)**

De acuerdo con la IES (2012) la SDA se define como el porcentaje del área de estudio que alcanza un mínimo de iluminación natural por una fracción de las horas de ocupación anual. Con base en el IES-LM83 para que el espacio en el plano de trabajo se considere iluminado debe alcanzar al menos el 55% para considerarse aceptable y 75% para ser preferible. La limitante con SDA es que no contabiliza el tiempo durante el cual se excede el objetivo de iluminación, mientras que su ventaja radica en que arroja como resultado un único valor que representa toda el área de estudio.

▫ **Disponibilidad de luz natural (DAv: *Daylight Availability*)**

La DAv se propuso para conjuntar la información de DA y UDI en una sola métrica y ésta divide al espacio de tres maneras:

1. Iluminado: área que se considera iluminada naturalmente si recibe suficiente iluminación durante al menos la mitad del tiempo en una ocupación de 8:00 a 18:00 horas (DA 300, 50%).



2. Parcialmente iluminado: área que consigue menos del 50% de las horas de ocupación con niveles suficientes de iluminación natural (DA 150, 50%).
3. Sobre iluminado: área que consigue iluminancias que exceden el límite máximo de iluminancias naturales (3000 lux) durante al menos el 5% de las horas de ocupación. No dejemos de lado que un área sobre iluminada representa un riesgo de deslumbramiento.

En su estudio Chi (2019) concluye con que la aplicación de las métricas dinámicas es de gran relevancia para aprovechar de mejor forma la iluminación natural y que debieran considerarse desde las etapas conceptuales de diseño. Además de que sugiere que las normas basadas en el DF deberían actualizarse para así incluir los nuevos requerimientos mínimos de iluminación natural, los cuales están basados en las métricas UDI o DAV. Finalmente, dado que en México ya se cuentan con archivos climáticos de la mayoría de sus ciudades, se puede realizar sin problemas el modelado de la luz natural basada en el clima, logrando predicciones muy certeras y acercadas a la realidad.

#### ▪ **Análisis de deslumbramiento**

El deslumbramiento es un factor que requiere un alto nivel de control cuando un espacio se ilumina de forma natural, para su evaluación los modelos más validados son el *Daylight Glare Index (DGI)*<sup>1</sup> y el *Daylight Glare Probability (DGP)*<sup>2</sup>. De estos dos modelos Yamin *et al.* (2016) dicen que “el DGP es el modelo que mejor predice situaciones con ingreso de luz solar directa y que la base de este modelo es comparar las áreas de alta luminancia con respecto a la iluminancia vertical que llega al ojo”.

---

<sup>1</sup> Índice de deslumbramiento por luz diurna.

<sup>2</sup> Probabilidad de deslumbramiento por la luz diurna.

La métrica del DGP se ha introducido recientemente y “puede proporcionar una mejor correlación con la respuesta de los humanos. Esta métrica necesita más investigación, pero está disponible para estudiar el deslumbramiento del sistema de luz diurna” (DiLaura *et al.*, 2011, p.14.42). Para evaluar el DGP “como primera aproximación, utilizamos la iluminancia vertical en la posición de los ojos de la persona, orientados en la misma dirección de la vista, como base para la probabilidad” (Wienold y Christoffersen, 2006). Por otro lado, Mardaljevic *et al.* (2012) mencionan que en el caso de una simulación se puede determinar y evaluar mediante una imagen *High Dynamic Range* (HDR)<sup>3</sup> con ojo de pez hemisférica adaptada en un periodo anual. Las imágenes HDR “intentan representar el rango dinámico completo de una escena, desde la luz solar directa hasta las sombras profundas. Es un método para capturar y editar digitalmente toda la luminancia (luz) de una escena” (Reinhart *et al.*, s.f.). Por tanto, las imágenes HDR tienen la capacidad de predecir la cantidad de iluminación natural en un espacio resaltando el deslumbramiento.

Por su parte, Wienold (2009) formuló una métrica simplificada del deslumbramiento para las simulaciones anuales con CBDM y utiliza un método análogo al de la evaluación del confort térmico. Dicha evaluación se basa en los datos recogidos de su estudio de campo, del cual derivó un conjunto de "clases de confort" denominadas A, B y C, donde:

- A. **Mejor:** el 95% del deslumbramiento en la oficina es más débil que "imperceptible".
- B. **Bueno:** el 95% del deslumbramiento en la oficina es más débil que "perceptible".
- C. **Razonable:** el 95% del deslumbramiento en la oficina es más débil que "molesto".

---

<sup>3</sup> Alto rango dinámico.

Las clases utilizan el nivel superior de los intervalos de confianza del 95% dentro de la escala de valoración del DGP (ver **Tabla 9**) pero estos límites no se pueden sobrepasar en más del 5% del tiempo de trabajo, por lo que el DGP dentro del 5% no debe superar el valor de la media de la categoría del deslumbramiento superior.

**Tabla 9**

**Límites del DGP**

<b>Clase</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Límite de DGP (95%)	≤ 0.35	≤ 0.40	≤ 0.45
Límite medio de DGP (5%)	0.38	0.42	0.53

Nota. Adaptado de Wienold (2009).

De modo similar, el plugin *Honeybee* —el cual se explica más adelante en el apartado 4.3— realiza el análisis del deslumbramiento, con el que se pueden calcular los siguientes índices: índice de deslumbramiento diurno (DGI), índice de deslumbramiento unificado (UGR), Probabilidad de comodidad visual (VCP), índice de deslumbramiento CIE (CGI) y la luminancia de velo (Lveil). El análisis que se llevó a cabo fue utilizando el DGP, en la clasificación de Wienold veíamos que son tres clases (**Tabla 9**), mientras que *Honeybee* tiene cuatro categorías de deslumbramiento, tal como se aprecia en la **Tabla 10**.

**Tabla 10**

**Valores DGP de Honeybee**

<b>Categoría</b>	<b>Valores DGP</b>
Imperceptible	$0.35 > DGP$
Perceptible	$0.40 > DGP \geq 0.35$
Perturbador	$0.45 > DGP \geq 0.40$
Intolerable	$DGP \geq 0.45$

En la **tabla 10** el valor que se agrega es el intolerable, que es cuando se supera el índice de 0.45; asimismo, se observa que *Honeybee* trabaja con los límites establecidos por Wienold. Es importante mencionar y comparar estas tablas, pues en la parte de resultados se verán reflejados ambos términos, aunque los valores sean los mismos.



## Conclusiones

La normativa existe para regular los niveles de lux que hay en un espacio, para la iluminación artificial se habla de valores absolutos, mientras que para la natural sólo hay porcentajes generales. Por lo anterior, se han creado las métricas dinámicas para poder calcular la luz natural incidente en un espacio, las cuales se han investigado por años para poder incorporarlas. No obstante, la normativa debe actualizarse para incorporar niveles de iluminación natural, o bien, revisar las características de cada orientación para sus porcentajes y que dejen de ser generales.

Cada orientación tiene características particulares que se deben considerar, por lo que un porcentaje general para iluminación natural no basta en la normativa. Si bien, la radiación incidente no cambia, las investigaciones sí lo han hecho en estos catorce años —si nos basamos en el tiempo que ha pasado desde la última norma que es aplicable a oficinas— que además sólo incorpora iluminación artificial. El RCDF se actualiza constantemente, pero no han llegado a valores absolutos en cuanto a la iluminación natural, las tienen para la artificial y creo que es momento de llegar a esto con la natural. Es necesario que la normativa vigente en México incluya los criterios de iluminación natural para aprovechar este recurso.

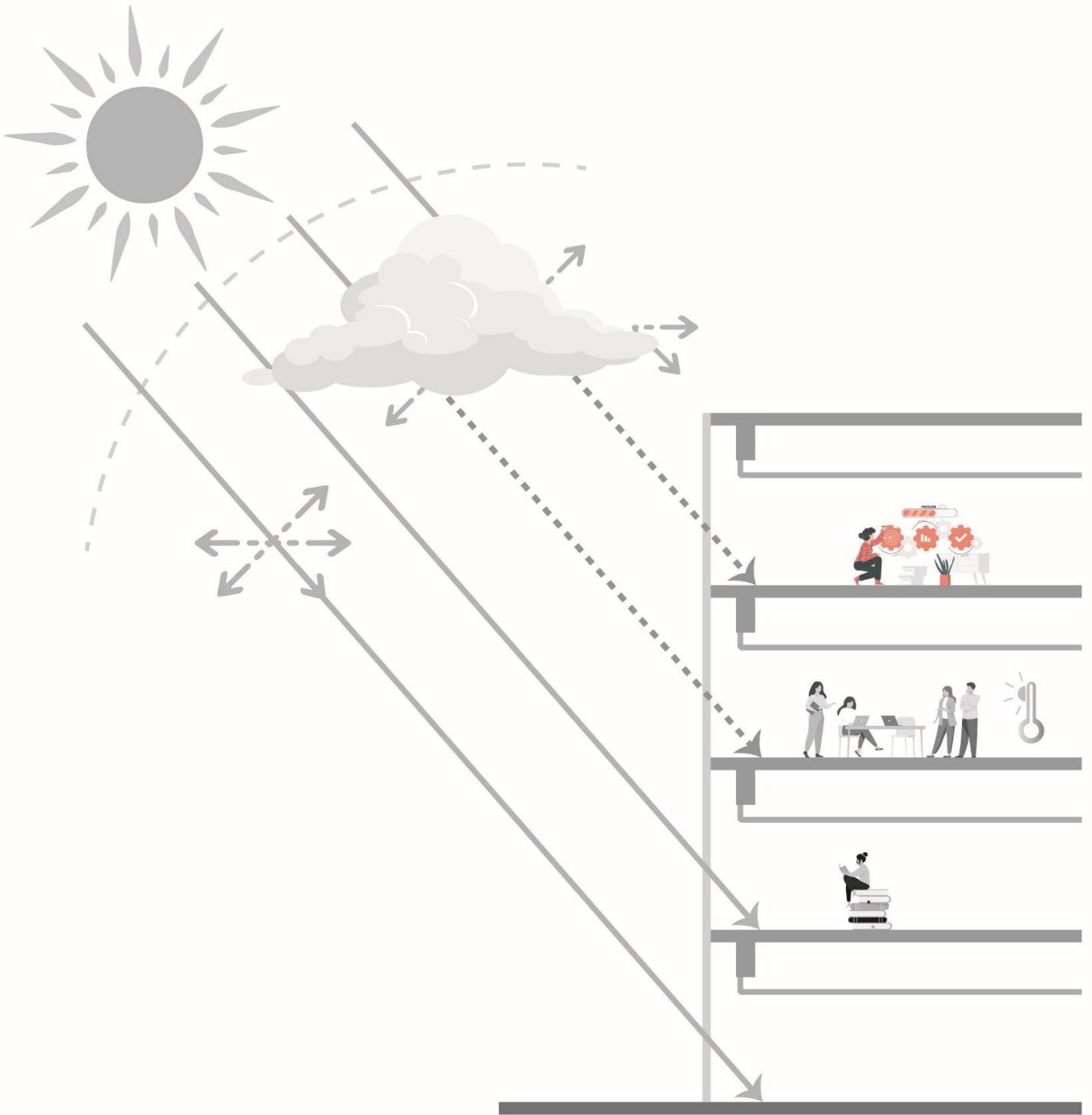
Como se expuso, se consideró la métrica UDI, una de las métricas dinámicas, porque nos brinda un porcentaje de iluminancia útil de la luz natural, este porcentaje hace referencia al tiempo que realmente se aprovecha este recurso. Asimismo, esta métrica considera los niveles de luz excesiva, la que se relaciona con el deslumbramiento. Cuando cubrimos el rango del UDI-a que va de los 300 a los 3000 lux no vamos a requerir el uso de iluminación artificial; lo ideal al diseñar con luz natural es que ésta se utilice el mayor tiempo posible. Lo anterior se puede comprobar a través de simulaciones con un modelo CBDM y proceder a la lectura e interpretación con las métricas dinámicas. Para obtener una certificación, ya sea de tipo LEED o WELL se puede requerir incorporar la simulación para verificar los niveles lumínicos, en el caso de estas certificaciones se pide usar la métrica sDA, no obstante, la sDA mide el porcentaje de área iluminada. Por el contrario, el UDI mide el porcentaje de tiempo que un espacio está iluminado, dato con el que podremos definir las estrategias pertinentes para iluminar de forma natural el mayor tiempo posible.





# **METODOLOGÍA**

**CAPÍTULO 4**



## 4.1 Flujo de trabajo

Para empezar, debemos definir qué es la investigación, la cual, de acuerdo con Hernández *et al.*, (2014, p.4) es “un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema”. Al ser sistemática nos lleva a generar procedimientos, con los cuales debemos tener resultados y conclusiones “ya que la sola recopilación de datos o hechos y aun su tabulación no son investigación, sólo forman parte importante de ella. La investigación tiene razón de ser por sus procedimientos y resultados obtenidos” (Tamayo, 2021, p.41). Ahora bien, para poder llevar a cabo una investigación debe existir una metodología, para lo que Maya (2014, p.13) la describe como el “estudio de los métodos, su desarrollo, explicación y justificación. Su finalidad es comprender el proceso de investigación y no los resultados de la misma, se pueden tener tantas metodologías como diferentes formas y maneras de adquirir conocimientos científicos”.

Para el desarrollo de una metodología podemos hablar de tres tipos de rutas que se han construido por parte de la comunidad científica para poder estudiar cualquier tema, que son la cuantitativa, cualitativa y mixta. Para esta investigación se decidió seguir con la ruta cuantitativa, ya que una vez que se ha delimitado “se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica” (Hernández *et al.*, 2014, pp. 4, 5). El proceso de la ruta cuantitativa en la investigación se puede explicar en la **Figura 23**, la cual contempla 10 fases, “la ruta cuantitativa es apropiada cuando queremos estimar las magnitudes u ocurrencias de los fenómenos y probar hipótesis” (Hernández y Mendoza, 2018, p.6).

En este punto es importante recordar el problema identificado, los objetivos y las hipótesis que se plantearon. La problemática detectada es que al tener una superficie vidriada de casi el 100% existe un deslumbramiento al interior de las oficinas, lo que genera incomodidad en los trabajadores. Lo

anterior es la razón por la que utilizan elementos de protección solar al interior, como son las persianas y con esto bloquean el paso de la luz natural, lo que los lleva a utilizar sistemas artificiales —tanto de luz como de calefacción— incluso en horas innecesarias. Esta investigación busca cumplir con tres objetivos, el general, específico y metodológico.

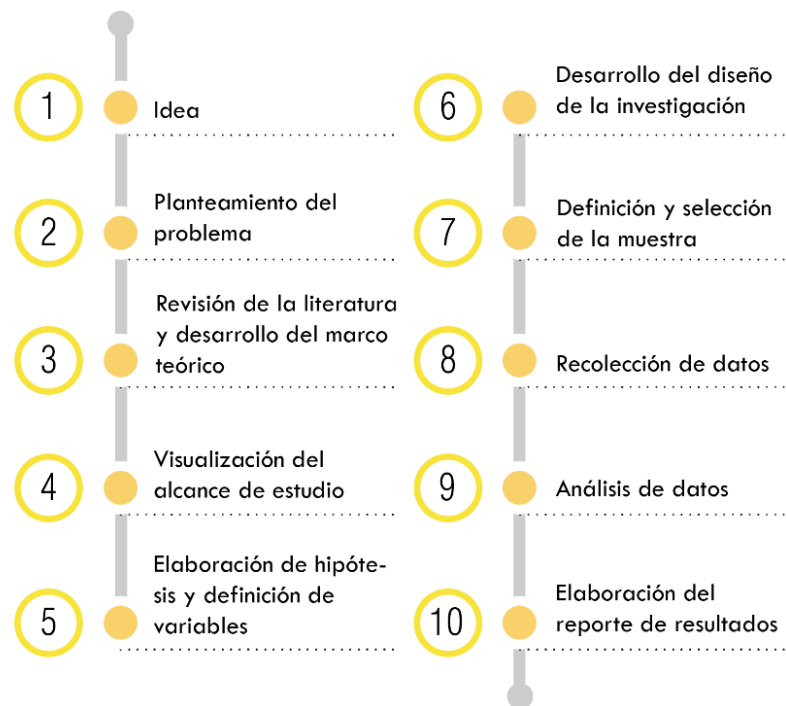
- General: evaluar el porcentaje de transmitancia visible de los vidrios de alta tecnología en cuanto a su utilidad lumínica y deslumbramiento en una oficina de Torre Esmeralda I, en una jornada laboral de 8 a 18 horas.
- Específico: probar que los niveles de iluminancia natural útil se mantienen en un rango de 300 a 3000 lux el 60% del tiempo de ocupación.
- Metodológico: por medio de simulaciones por computadora conocer el porcentaje de iluminancia útil y evaluar el deslumbramiento al interior de una oficina en Torre Esmeralda I.

Además de los objetivos se quiere comprobar la hipótesis de que con el uso de un vidrio de alta tecnología se aprovecha la iluminancia natural hasta en un 60% del tiempo de ocupación, con niveles de 300 a 3000 lux, lo que disminuye el deslumbramiento al interior de una oficina en la Ciudad de México.



Figura 23

Proceso cuantitativo



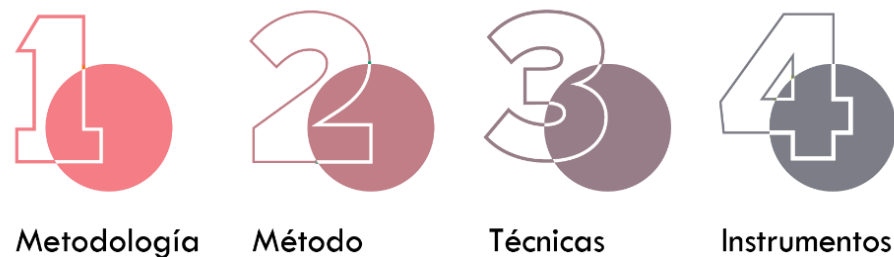
Nota. Adaptado de Hernández y Mendoza (2018, p.6).

Una vez definida la metodología, procedemos a elegir el método, que es el camino que tomaremos para resolver nuestro problema, en este caso se eligió un método experimental. En este método se manipula una variable “con el fin de descubrir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento en particular. El experimento es una situación provocada por el investigador” (Tamayo, 2021, p.53). Seguido del método, procedemos a definir el alcance, el cual es de tipo descriptivo y tiene como finalidad “especificar propiedades y características de conceptos, fenómenos, variables o hechos en un contexto determinado” (Hernández y Mendoza, 2018, p.108). Posteriormente, definimos las técnicas, las cuales “se vuelven respuestas al cómo hacer y permiten la aplicación del método en el ámbito donde se aplica [...] las técnicas serán las etapas de operaciones unidas a elementos prácticos, concretos, para situarlos en el nivel de los hechos” (Baena, 2017, p.68), en esta investigación se escogieron

como técnicas el caso de estudio y la simulación por computadora, en los cuales se profundizará más adelante. Lo anteriormente expuesto se puede resumir en la secuencia que se muestra en la **Figura 24**.

**Figura 24**

*Pasos de la metodología*



Si seguimos el esquema anterior, ya hemos establecido la metodología, el método y las técnicas —en las cuales se profundizará más adelante. El último paso de esta ruta son los instrumentos, de los cuales no podemos hablar sin antes haber definido las variables, las cuales surgen de la hipótesis. Para empezar, se entiende por variable independiente (V.I.) a aquella que es la causa y condición de una variable dependiente; esta variable puede ser manipulada por el investigador con el fin de obtener resultados. Razón por la que el vidrio de alta tecnología es la V.I., ya que el investigador puede seleccionar el vidrio con base en su porcentaje de transmitancia visible. Por otra parte, la variable dependiente (V.D.) es el efecto producido por la V.I., en este caso la V.D. es el deslumbramiento; de tal forma que, si el porcentaje de transmitancia visible cambia también lo harán los niveles de deslumbramiento. Por último, la variable interviniente (V.i.) es la que se interpone entre la V.I. y la V.D.; esta variable no se somete a investigación, pero influye en los efectos estudiados. Por lo anterior, es que la iluminancia de la luz natural es la V.i., ya que no se manipula por el investigador y es fija, pues proviene de un archivo climático. Asimismo, las



variables tienen relación con la hipótesis y los objetivos de esta investigación y dicha relación se muestra en la **Figura 25**.

**Figura 25**

**Relación de hipótesis con variables y objetivos**

Con el uso de un **vidrio de alta tecnología** se aprovecha la **iluminancia natural** hasta en un 60% del tiempo de ocupación, con niveles de 300 a 3000 lux, lo que disminuye el **deslumbramiento** al interior de una oficina en la Ciudad de México.



Ahora bien, la totalidad del fenómeno estudiado en esta investigación es la luz natural, pero parte representativa de ésta será la iluminancia, por lo que ésta corresponde a la muestra. La selección de la muestra se hizo de forma no aleatoria empírica de forma intencionada, ya que en este muestreo es el investigador quien elige los elementos representativos “lo cual exige al investigador un conocimiento previo de la población que se investiga para poder determinar cuáles son las categorías o elementos que se pueden considerar como tipo representativo del fenómeno que se estudia” (Tamayo, 2021, p.182). Y es así como de los 365 días del año, se evaluará la iluminancia de los equinoccios y solsticios, los cuales corresponden a las fechas del 20 de marzo y 22 de septiembre para los equinoccios —que al ser el mismo resultado sólo se tomará



en cuenta la primera fecha; 20 de junio y 21 de diciembre para los solsticios, con lo anterior tenemos tres fechas representativas de medición.

Una vez que definimos las variables y la muestra, podemos seguir con los instrumentos, donde se entiende que un instrumento de medición es el recurso que utilizará el investigador para registrar la información o datos sobre las variables que tiene en mente. En una investigación de tipo cuantitativa se aplican los instrumentos para medir las variables contenidas en la hipótesis, cabe resaltar que toda medición o instrumento para la recolección de datos debe cumplir con los requisitos de confiabilidad, validez y objetividad.

Para medir las variables, que son los vidrios de alta tecnología (V.I.), luz natural (V.i.) y confort lumínico (V.D.); a continuación, se describe cada uno de los instrumentos. Cabe resaltar que los instrumentos que se seleccionaron son para un criterio de simulación por computadora.

- **Vidrio de alta tecnología:** el instrumento será la transmitancia visible (VT), que es el resultado de la conversión a decimales de la transmisión luminosa (TL). Es preciso señalar que la TL es expresada como un porcentaje y es el valor que viene en las fichas técnicas; mientras que la VT se expresa como un número de 0 a 1 y es el parámetro de ingreso para la simulación. Por lo anterior, si tenemos una TL del 68% nuestra VT será de 0.68.
- **Luz natural:** con esta variable se tienen dos instrumentos de medición, el primero corresponde a las iluminancias como valor absoluto y el segundo a la iluminancia de luz natural útil que nos da un porcentaje. El primero se obtiene del modelo CBDM donde se calculan los valores de iluminancia utilizando los datos climáticos del sitio. El segundo se interpreta con la métrica de UDI- $\alpha$ , el cual maneja un rango de iluminancia mayor que 300 lux y menor que 3000 lux.
- **Deslumbramiento:** el instrumento de medición es el porcentaje de probabilidad de deslumbramiento por la luz diurna (DGP) ya que es el



modelo que mejor predice las luminancias y la compara con la iluminancia vertical de la posición de los ojos de las personas. Se interpreta con imágenes de tipo HDR y con los valores correspondientes a la clasificación de Wienold.

## 4.2 Caso de estudio

De acuerdo con Chávez (2015, pp.141, 142) cuando se trata de proyectos arquitectónicos debemos tener en cuenta el contexto de nuestro caso de estudio, este autor considera que la iluminación natural es uno de los parámetros que se pueden realizar en un estudio de casos, porque se puede abordar desde distintos aspectos, como el mecánico y funcional, además del valor poético, simbólico, emotivo y metafísico.

Por lo anterior, es que una de las técnicas para el desarrollo de esta investigación fue el caso de estudio, el cual permite “el estudio de la particularidad y de la complejidad de un caso singular, para llegar a comprender su actividad en circunstancias importantes” (Stake, 2010, p.11) teniendo como resultado una particularización del objeto de estudio, ya que “es importante dedicar el mejor tiempo de análisis a los mejores datos [...] los estudios de casos se realizan para hacer comprensible el caso” (Stake, 2010, p.78). Para lograr tal comprensión se eligió Torre Esmeralda I como caso de estudio, edificio corporativo en la Ciudad de México, el cual está dentro de la circunferencia aceptada para una estación meteorológica de la cual se obtendrán los datos de análisis climatológicos.

Por un lado, el edificio se encuentra bajo un sistema de coordenadas con una latitud de  $19^{\circ}25'46''$  N y una longitud de  $99^{\circ}12'21''$  O. Por otra parte, la estación meteorológica de donde se recabaron los datos climáticos es denominada Ciudad de México Central, por lo que más adelante haremos

referencia a ella como estación central; esta estación en el sistema de coordenadas tiene una ubicación de  $19^{\circ}40'00''$  N de latitud y  $-99^{\circ}18'30''$  O de longitud. Entre estas dos hay una distancia de 3.07 km, motivo por el que se trabajó con esta estación meteorológica y con este edificio (ver **Figura 26**).

**Figura 26**

*Distancia entre Torre Esmeralda I y estación central*



Nota. Adaptado de Google Maps (2022).

#### **4.2.1 Ubicación**

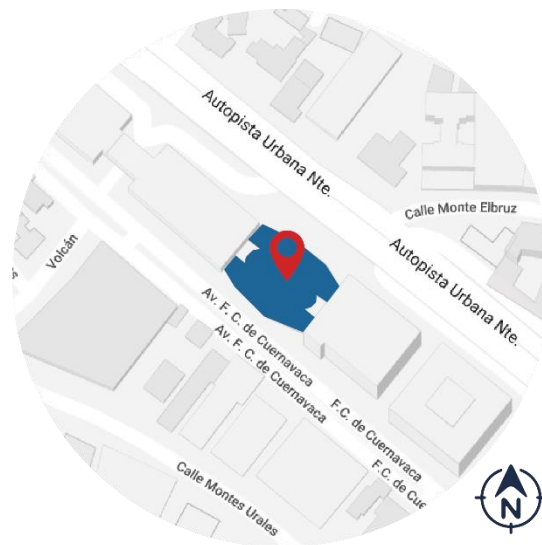
Torre Esmeralda I está ubicada sobre Boulevard Manuel Ávila Camacho #40, colonia Lomas de Chapultepec, alcaldía Miguel Hidalgo, Ciudad de México (**Figura 27**). Este edificio se encuentra en una zona medianamente densa, ya que en la parte frontal tiene una vialidad elevada, el segundo piso de Periférico, además tiene edificios de igual o menor altura a los costados. La fachada posterior de este edificio colinda con Av. F.C. de Cuernavaca, donde



la altura de los edificios circundantes es menor; esta vista es importante, ya que es la fachada que se analiza en este estudio.

**Figura 27**

**Ubicación Torre Esmeralda I**



Nota. Adaptado de Google Maps (2021).

#### **4.2.1.1 Climatología de la Cuenca de México**

Como vimos en la sección 1.2 el tipo de clima que predomina en la parte baja de la Cuenca de México es templado subhúmedo con lluvias en verano, cuya nomenclatura es C(w0-2) —esto con base en la clasificación de Köppen modificada por García. El clima de la Cuenca de México está determinado por la situación geográfica, la altitud sobre el nivel del mar, el relieve y la circulación atmosférica regional. Enriqueta García señala que la disminución de la temperatura en el Valle de México se debe a la altitud, por lo que el clima varía de templados a muy fríos; pero en general la temperatura presenta dos máximos y dos mínimos “el primer máximo se presenta en mayo o junio y el segundo en agosto. El mínimo principal es en enero y el secundario en julio,

correspondiendo éste con el mes más lluvioso” (García, 1968, p.6). Durante el año podemos hablar de que existen dos temporadas climáticas, la de lluvias y secas, la temporada de lluvias corresponde a los meses de junio a octubre, y el mes que registra mayor cantidad de precipitación es julio —lo que se determinó con el análisis de las gráficas I-IV de García, 1968, p.34; mientras que el periodo de secas corresponde a los meses de noviembre a mayo. Por otro lado, Jáuregui (2000, p.53) menciona que para el periodo de secas “los vientos pueden soplar tanto del norte como del este, sur y noreste, mientras que en los meses de lluvia predominan del norte y noreste en el ámbito de la ciudad”, los cuales se presentan con una débil intensidad.

Otro hecho a considerar es “la influencia que la orografía ejerce en la temperatura, en la precipitación y en la circulación atmosférica es muy grande, lo que puede explicar la diversidad de climas que se encuentran, aún dentro de una zona tan pequeña como es el Valle de México” (García, 1968, p.11). Por tal motivo vamos a hacer énfasis en las condiciones climáticas presentes en la zona de estudio; para lo que se toma en cuenta la información de las normales climatológicas.

Para el análisis de las normales climatológicas en la zona de estudio se tomó en cuenta la estación más cercana que tiene el Servicio Meteorológico Nacional, la cual es Tacubaya Central, con una latitud  $19^{\circ}24'13''$  N, longitud  $99^{\circ}11'46''$  W y altura 2 308.6 msnm. El periodo de registro que se consideró para este análisis es de 1981 a 2010, por lo que en la **Tabla 10** se observan las temperaturas máximas, medias y mínimas registradas, así como la precipitación. De esto resulta que mayo es el mes más caluroso con una media mensual de  $20.0^{\circ}\text{C}$  y el mes más frío es enero con  $14.8^{\circ}\text{C}$  como temperatura media. En cuanto a las precipitaciones, el mes más lluvioso es julio —tal como lo indicaba García— con una media mensual de 85.8 mm y la más baja se presenta en diciembre con 1.7 mm. En la **Figura 28** se observa el comportamiento de los datos mostrados en la **tabla 11**.



**Tabla 11**

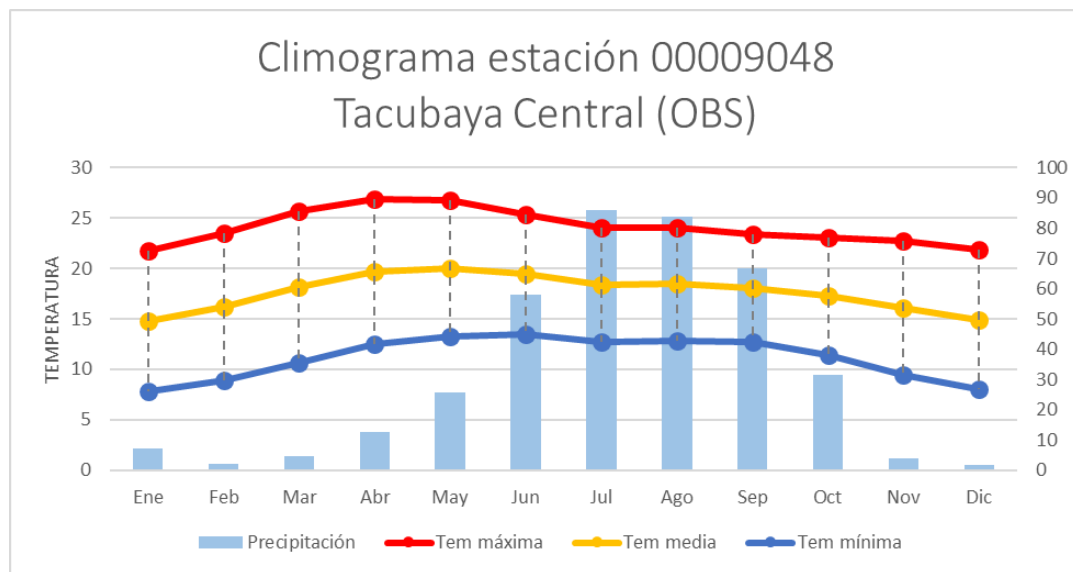
**Temperaturas y precipitación**

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>T. máx.</b>	21.8	23.5	25.7	26.9	26.8	25.4	24.1	24.1	23.4	23.1	22.7	21.9
<b>T. med.</b>	14.8	16.2	18.1	19.7	20.0	19.4	18.4	18.45	18.0	17.2	16.0	14.9
<b>T. mín.</b>	7.8	8.9	10.6	12.5	13.3	13.5	12.8	12.8	12.7	11.4	9.4	8
<b>Precip</b>	7.2	1.9	4.5	12.5	25.7	58	85.8	83.8	66.9	31.6	3.9	1.7

Nota. Adaptado de CONAGUA.

**Figura 28**

**Climograma de la estación central**



En conclusión, una vez más se demuestra que las características de un sitio son únicas, que no por estar dentro de un mismo punto geográfico vamos a generalizar, ya que dentro de una localidad hay microclimas que deben ser considerados. Razón por la que en arquitectura es tan importante hacer un análisis de sitio y las características entorno a este.

#### 4.2.1.2 Trayectorias solares del sitio

Recordemos que las trayectorias solares son un método de representación gráfica donde podemos ver la incidencia solar en el sitio de nuestro interés. La proyección estereográfica es la más utilizada, la cual “consiste en transportar la ruta del Sol sobre la bóveda celeste, en un plano horizontal” (Ferreiro *et al.*, p.147). En las Figuras 29, 30 y 31 observamos las trayectorias solares en Torre Esmeralda I, las representaciones son de los solsticios y equinoccios con tres horas representativas. La primera hora corresponde a las 8:00 a.m. instante en que los trabajadores llegan, la segunda corresponde a la hora en que el Sol se encuentra en el cenit y finalmente la tercera es de las 16:00 h.

Figura 29

*Solsticio de verano*

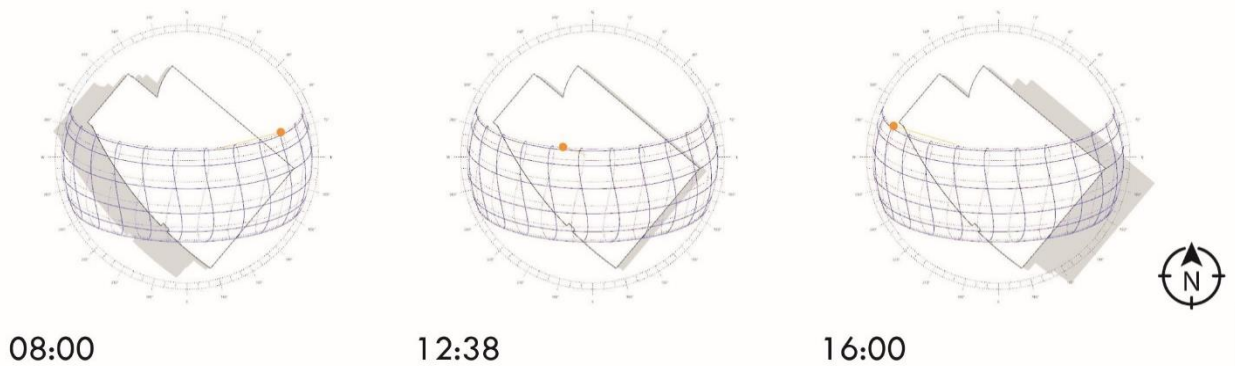
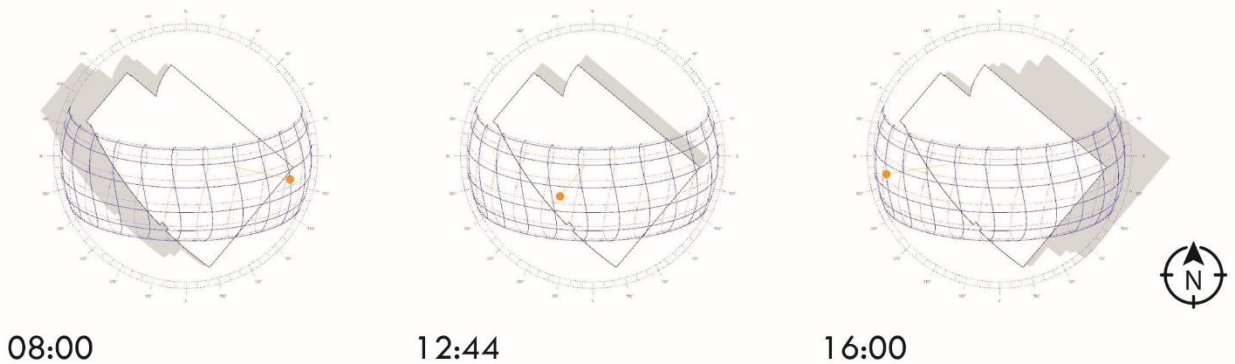


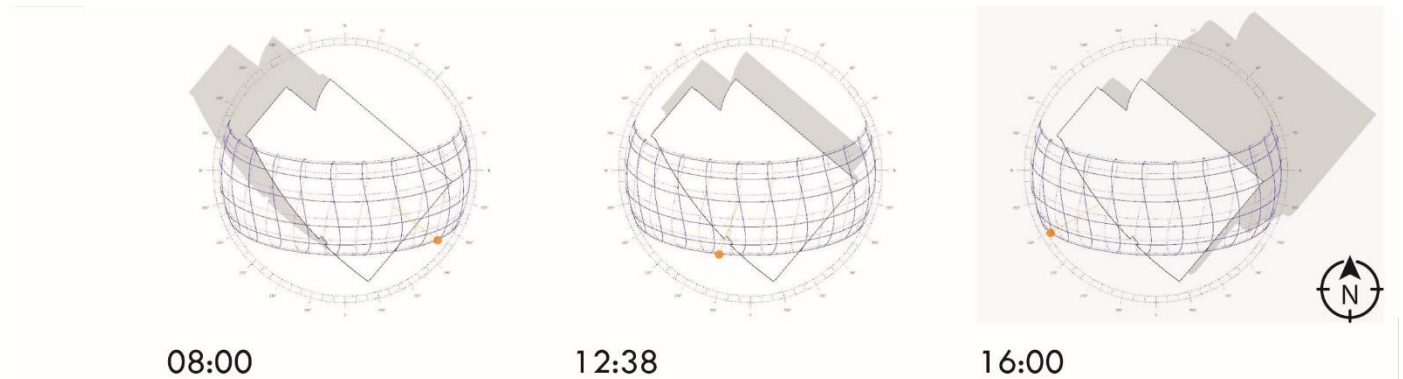
Figura 30

*Equinoccios de primavera y otoño*



**Figura 31**

**Solsticio de invierno**



#### **4.2.2 Descripción del contexto**

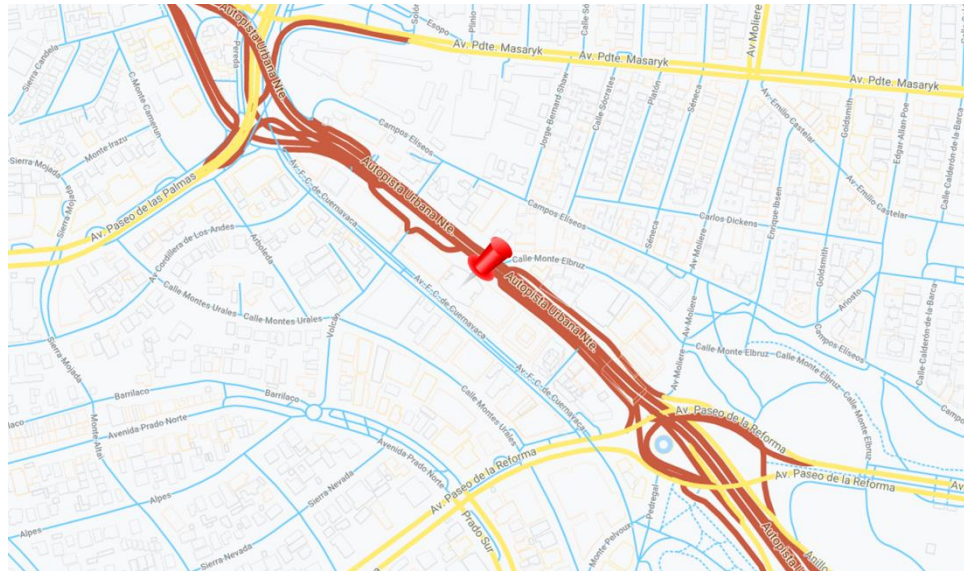
En la alcaldía Miguel Hidalgo se encuentra Lomas de Chapultepec, conocida como una de las zonas de oficinas más exclusivas de la Ciudad de México; lugar donde está ubicada Torre Esmeralda I, que corresponde al corredor Lomas Palmas, el cual es un proyecto de la desarrolladora GICSA. Este edificio corporativo cuenta con una superficie total rentable de 30,200 m<sup>2</sup> distribuidos en 25 niveles con lo que logra cubrir una altura total de 103.02 metros, además cuenta con cinco sótanos. Es un edificio icónico de la zona desde 1997 que por su privilegiada ubicación ofrece todo tipo de servicios con una gran accesibilidad vehicular y peatonal.

La plusvalía de la zona destaca por estar sobre Boulevard Manuel Ávila Camacho (Periférico) y Ferrocarril de Cuernavaca, además de estar muy cercana a avenida Paseo de la Reforma, como se aprecia en la **Figura 32**. Es una zona que tiene centros comerciales próximos, como Plaza Carso, Antara Polanco, Miyana y Pabellón Polanco; igualmente en el área cuentan con hospitales, bancos y sistemas de transporte público como el metro Auditorio de la línea 7.



**Figura 32**

**Macro localización**



Nota. Adaptado de Google Maps (2021).

**4.2.3 Condicionantes del edificio**

Torre Esmeralda I es un edificio con 25 niveles, en el número 12 se encuentran las oficinas donde se hizo el estudio lumínico. La oficina seleccionada tiene una superficie de 436 metros cuadrados y cuenta con los siguientes espacios: recepción, operativo, sala de juntas, área de cotrabajo, área de trabajo, 2 cabinas, 2 salas de trabajo, comedor, oficina del director y oficina del director técnico.

Debido a que se hace un análisis lumínico, es importante conocer el número de personas que están en la oficina, cuya plantilla de personal es de treinta trabajadores; con un rango de edades de entre 27 y 60 años. La jornada laboral de la empresa es en un horario de 8:00 am a 18:00 pm, rango en el que se hace el análisis.



En las Figuras 33, 34, 35, 36 y 37 se puede ver cómo es el espacio interior de las oficinas analizadas, la distribución de los espacios y cómo es la incidencia lumínica.

*Figura 33*

*Área de trabajo*



**Figura 34**

**Área de trabajo con vista hacia sala de juntas y oficinas directivas**



**Figura 35**

**Área de cotrabajo**



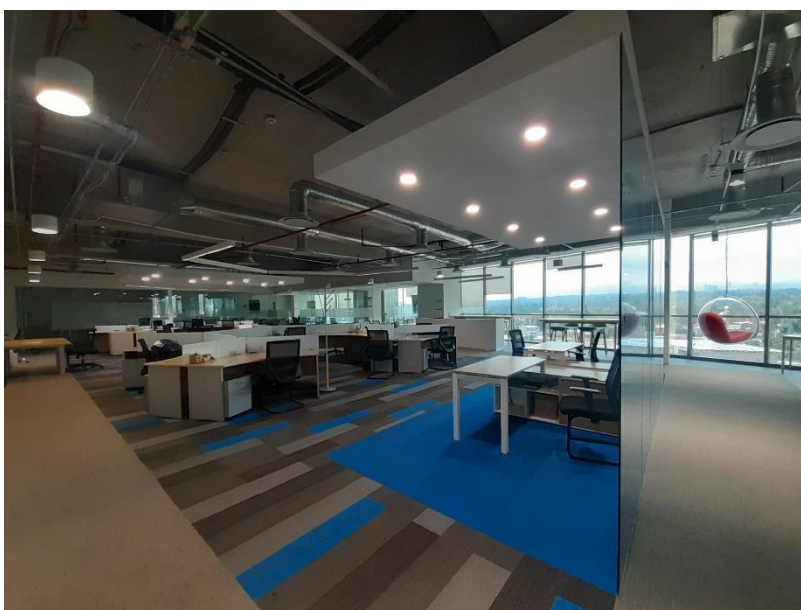
**Figura 36**

**Área de cotrabajo**



**Figura 37**

**Área de trabajo central**



### 4.3 Simulación asistida por computadora

Las simulaciones han abierto un camino más en la versatilidad de la representación gráfica en el campo de la arquitectura, ello ha permitido visualizar los proyectos con una gran aproximación a la realidad, donde podemos observar y manipular desde la computadora todos los elementos que componen el proyecto. El avance tecnológico a lo largo de los últimos años ha logrado el desarrollo de diferentes programas que ayudan a la simulación de los espacios, así como la luz natural. Es así como las simulaciones por computadora en los últimos años han sido una gran oportunidad para los diseñadores, ya que han sustituido a los equipos que consumen mucha energía y a los modelos a escala, esto por la facilidad y rapidez de obtención de resultados que ofrecen, lo que permite hacer varios análisis en poco tiempo y con menor cantidad de recursos.

En el ámbito de la iluminación ha permitido hacer simulaciones tanto para la artificial como para la natural y se han podido incorporar a las simulaciones en edificios. El uso de las simulaciones para una certificación es un recurso para verificar el cumplimiento de los criterios estipulados en dichas certificaciones; los criterios dependerán de la certificación deseada, así como del organismo que certifica.

Tal como expresa Mardaljevic (2012) “la modelización de la luz diurna basada en el clima es la predicción de diversas magnitudes radiantes o luminosas (por ejemplo, irradiación, iluminancia, radiancia y luminancia) utilizando las condiciones del Sol y del cielo derivadas de conjuntos de datos meteorológicos anuales normalizados”.

Pese al avance en las simulaciones aún queda mucho camino por recorrer, ya que su aplicación no es tan recurrente y falta formación en la materia, pues para llevar a cabo esta práctica se requiere estudiar y dominar los programas. Lo





ideal sería aplicar estas herramientas al proceso de diseño de toda edificación, sin necesidad de buscar la certificación, para así comprobar la eficiencia lumínica del edificio de manera rápida y eficaz, asimismo tendríamos un ahorro de recursos desde el inicio. Cabe mencionar que “la evaluación de un entorno luminoso incorpora un análisis cualitativo y cuantitativo. El análisis cuantitativo se ocupa de los métodos numéricos. El análisis cualitativo implica el rendimiento visual, el confort visual y la estética, teniendo en cuenta numerosos factores” (Inanici, 2001).

La simulación de luz natural resulta más compleja que la iluminación artificial, en la luz natural se puede evaluar el rendimiento mediante una métrica dinámica o con mediciones en un modelo a escala, “el principio es idéntico en ambos casos: a partir de datos meteorológicos, se modela el cielo para cada hora del año y la métrica requerida puede ser entonces calculada o medida en una maqueta” (Bodart *et al.*, 2016). De acuerdo con Chi (2017, p.43) simular la luz natural es un cálculo computacional, donde se predice la situación lumínica de un edificio bajo situaciones específicas en cuanto a la luz natural, en la **Figura 38** vemos que para simularla se requiere tener disponible la información del edificio, información de las condiciones del cielo y el algoritmo de simulación que calcule las luminancias e iluminancias interiores basado en los dos ítems anteriores.

Figura 38

Información requerida en una simulación de luz natural



Nota. Adaptado de Reinhart, (2010, p.18).

Consideremos que para llevar a cabo las simulaciones lumínicas se requiere de herramientas que deben estar validadas y tener un alto grado de confiabilidad, una de ellas y la más utilizada es *Radiance*. Esta herramienta fue una de las primeras en utilizar una descripción geométrica tridimensional de las escenas y sus materiales, muchos de los programas actuales tienen como base este instrumento.

*Radiance* simula tanto iluminación natural como artificial, es un programa gratuito y validado, Reinhart y Fitz (2006) mencionan que "en comparación con otros paquetes de software similares, Radiance tiene muchas características "no atractivas". Por ejemplo, carece de una interfaz de usuario propia y necesita una experiencia considerable para manipular sus variables. No obstante, sigue siendo el preferido por la comunidad de investigadores de la iluminación". Al



ser una interfaz compleja se usan otros programas más amigables para poder operar Radiance, ya sean del sector público o privado, algunos de estos programas son los que se muestran en la **Figura 39**. De acuerdo con Energy Efficiency y Renewable Energy (Energy.gov, 2014) el uso de Radiance se destaca en la comunidad de arquitectos, ingenieros y fabricantes, estos últimos lo usan para desarrollar y optimizar sus productos de iluminación simulando el rendimiento de sus propios productos.

**Figura 39**

*Programas que trabajan con Radiance*



Nota. Recuperado de Energy.gov (2014).

- **Programas de simulación**

Dentro de los programas que se muestran en la **Figura 39** están *DIVA for Rhino* y *Honeybee*, cabe destacarlos porque ambos son parte del desarrollo de esta investigación. En primer lugar está *DIVA for Rhino* que era un complemento de modelado de luz natural y energía para *Rhinoceros*, era un programa basado en el modelado NURBS, si bien, fue un programa que estuvo disponible por muchos años, en el 2021 fue reemplazado por su versión mejorada llamada



*ClimateStudio*, ambos pertenecientes a grupo *Solemma*. En segundo lugar, está *Honeybee*, el cual es un plugin que admite el modelado termodinámico y de iluminación natural; a diferencia del primero, *Honeybee* es un recurso gratuito. A continuación, se comentan algunas de las características de ambos programas, además se describen los programas que se utilizan para operar estos complementos y llevar a cabo las simulaciones de luz natural.

Se mencionó que *ClimateStudio* (CS) reemplazó a *DIVA for Rhino*, CS es un programa de desempeño ambiental más rápido y preciso de lo que era *DIVA*, ya que “implementa Radiance en un modo de trazado de ruta progresivo. Es decir, en lugar de rastrear todos los caminos de luz posibles antes de calcular un resultado, *ClimateStudio* rastrea algunos caminos a la vez, actualizando el resultado a medida que avanza” (Solemma, s.f.-a). Los flujos de trabajo de CS ayudan a optimizar la eficiencia energética de los edificios, así como el acceso a la luz natural, el rendimiento de la iluminación eléctrica, el confort visual y térmico, además de medidas de salud de los ocupantes. Entre las características que ofrece además de las ya mencionadas, es que es fácil de usar y está pensado para el mundo real; hace análisis de clima, estudios de ruta solar y sombras, deslumbramiento anual, entre otras funciones que lo hacen un programa completo (ver **Figura 40**). De acuerdo con Solemma, (s.f.-b) *ClimateStudio* admite una serie de flujos de trabajo de análisis ambiental para edificios y vecindarios, incluidas simulaciones de iluminancia anual para créditos de iluminación natural LEED v4, distribuciones de deslumbramiento y comodidad térmica en espacios con iluminación natural y artificial, así como análisis de mapas de radiación anuales y estacionales para estudios de diseño de masa y sombreado urbano.

En un principio, para esta investigación se utilizaría la versión que había reemplazado a *DIVA*, *ClimateStudio*, del cual se solicitó una versión prueba, esto por ser un programa de pago, y, posteriormente, se obtuvo una licencia educativa. Para empezar a trabajar con CS el programa te da un esquema



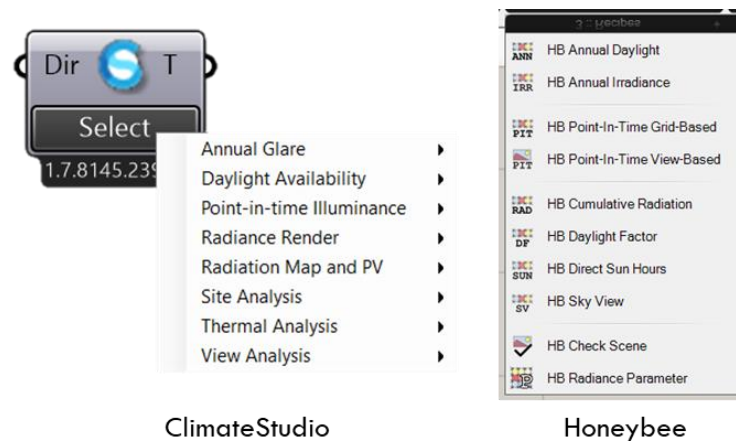
base, sobre el cual hay que conectar lo que te solicita y todo esto se manipula a través de *Grasshopper* (GH). Una vez que se tuvieron los elementos constructivos vinculados y los materiales, CS fue actualizada y al momento de incorporar las características específicas de los vidrios en esta nueva versión no permitía manipular ni crear materiales de acristalamiento, por lo que se debía trabajar con los predeterminados. Al tener esta limitante para caracterizar el vidrio fue imposible seguir trabajando con este programa. Ahora bien, al ser un programa controlado cualquier duda o aclaración debe ser atendida directamente con *Solemma*, lo que se logra a través de sus embajadores educativos, pero la respuesta no es inmediata. *Solemma* brinda licencias a instituciones educativas y de investigación por medio de sus embajadores, en México destacan la UNAM y la UDLAP, y fue con esta última institución y su embajadora que se obtuvo la licencia educativa. Por la situación anterior fue que se decidió migrar al programa Honeybee (HB).

HB pertenece actualmente a *Ladybug Tools LLC*, en el 2012 inició *Ladybug Tools* y en 2013 se lanzó la primera versión de HB como un complemento de *Ladybug* para *Grasshopper* y un año después se lanza de forma independiente *Honeybee* para *Grasshopper*. En esta última versión ya se conecta a modelos validados de simulación de luz natural y energía, tales como *Radiance*, *Daysim*, *EnergyPlus* y *OpenStudio*. Estos complementos permiten un acoplamiento dinámico entre la interfaz, lo que la hace visual y flexible, a través de los componentes de GH y al conjunto de datos de las herramientas de simulación. Este programa específicamente crea, ejecuta y visualiza los resultados de luz natural usando *Radiance* y modelos de energía con *EnergyPlus/OpenStudio*; esto lo logra vinculándose a *Rhinoceros* y *Grasshopper*. Por lo anterior, HB divide su trabajo en funciones térmicas y lumínicas, para esta investigación trabajamos con todas las herramientas de *HBRadiance* (HB-R). Entre sus funciones destacan estudios de iluminancia, estudios anuales de luz diurna, radiación solar avanzada y análisis de deslumbramiento (ver **Figura 40**). En los estudios de iluminancia, HB permite la personalización completa de la simulación de forma puntual. Los estudios

anuales se pueden llevar a cabo con las DDM. Con la exposición solar anual se puede calcular el potencial de deslumbramiento con la métrica de exposición solar anual (ASE). Finalmente, en el análisis de deslumbramiento se lleva a cabo un estudio detallado basado en el DGP.

**Figura 40**

**Funciones lumínicas de CS y HB**



Ahora bien, hay algunas ventajas que se tienen entre estos dos programas y que se mencionan enseguida. Empezamos por HB, que al ser un recurso gratuito tiene un foro de debate, en el cual hay una interacción entre los creadores y usuarios de este programa, donde te ayudan a resolver dudas de forma casi inmediata; por el contrario, CS al ser de uso privado no cuenta con estos foros y la respuesta a cualquier duda puede tardar. Después, si hablamos de facilidad y rapidez CS tiene la ventaja, ya que el programa te da un esquema de trabajo base al cual sólo debes vincular los elementos que te solicitan, modificando la menor cantidad de parámetros; por el contrario, en HB debes armar tu propio esquema. Finalmente, de ambos programas la actualización de versiones los hace muy diferentes de trabajar, si bien, siempre los cambios son para mejorar, a veces puede representar un atraso en la elaboración del esquema de trabajo. Cabe mencionar que la simulación lumínica la puede hacer cualquier interesado en el tema, sin embargo, serán los

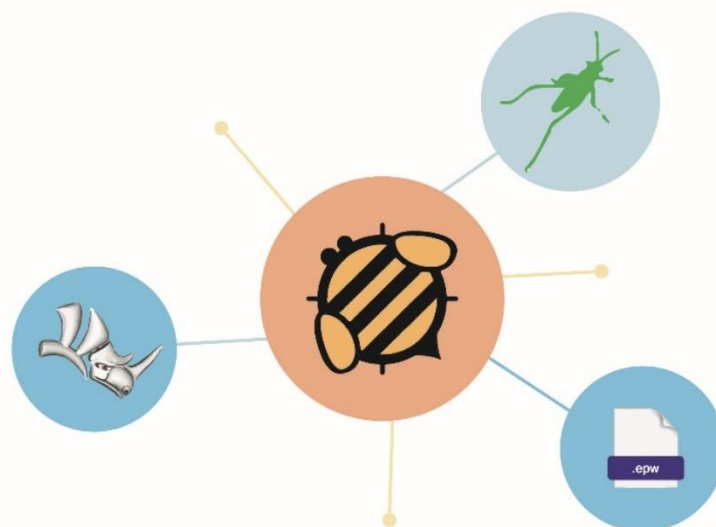


especialistas en iluminación quienes podrían favorecer la interpretación de resultados.

En síntesis, la simulación por computadora ha tomado gran relevancia en los últimos años, por la facilidad de la obtención de resultados, ya que emplea la menor cantidad de recursos económicos y de tiempo. Facilita el hacer más de una prueba al mismo tiempo y valorar la mejor alternativa y/o solución para nuestro proyecto. Como se ha mencionado antes, existe una gran variedad de programas que se pueden usar para simulaciones lumínicas, pocos son los que están validados ante la comunidad científica y de resultados confiables. Para esta investigación se realizó el levantamiento 3D en *Rhinceros* para poder vincular a *Grasshopper* y finalmente poder trabajar con *Honeybee* para la evaluación lumínica (ver **Figura 41**). Vamos ahora a describir las características básicas de los programas mencionados y cómo se prepararon para la simulación de este trabajo.

**Figura 41**

*Programas para simulación*



- **Rhinoceros (Rhino)**

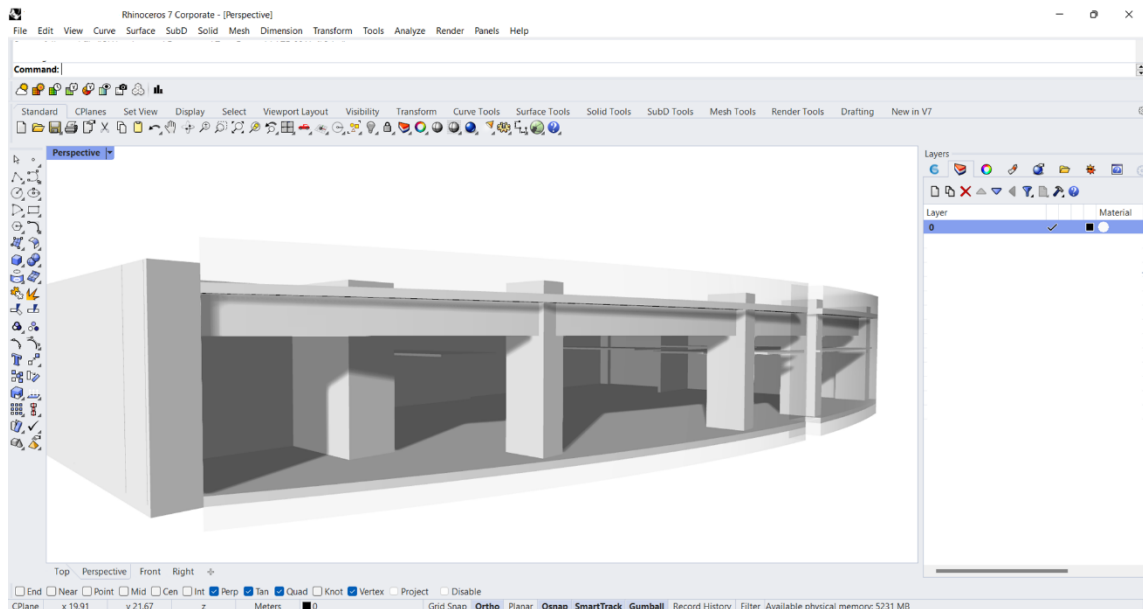
Es un programa de diseño asistido por computadora (CAD) que permite la creación de modelos 3D completo y eficaz que pertenece a *Robert McNeel y Asociados*. Con Rhino puedes crear y editar los objetos, analizar, documentar, renderizar, animar y traducir curvas NURBS, además de superficies y sólidos, geometría de subdivisión, nubes de puntos y mallas poligonales. Este programa se usa principalmente en áreas como la arquitectura, prototipado, ingeniería y diseño industrial. *Rhino* se ha caracterizado por no tener límite de complejidad, grado o tamaño de los diseños; además es compatible con cientos de productos de animación y renderizado. Una de las herramientas de *Rhinoceros* que lo hace un programa diferente al resto es su editor de algoritmos: *Grasshopper*.

Para el levantamiento 3D se utilizó *Rhino* y conviene destacar que, a diferencia de un modelo para renderizado, cuando vamos a simular luz natural el modelo debe cumplir con los elementos arquitectónicos necesarios, los cuales deben ser lo más sencillo posible (ver **Figura 42**). Lo anterior porque a mayor complejidad de las superficies más pesado es el modelo y al momento de correr la simulación el tiempo será mayor al estimado para la obtención de los resultados, por tal motivo, hay que usar geometrías simples.



**Figura 42**

**Interfaz y modelo 3D en Rhino**

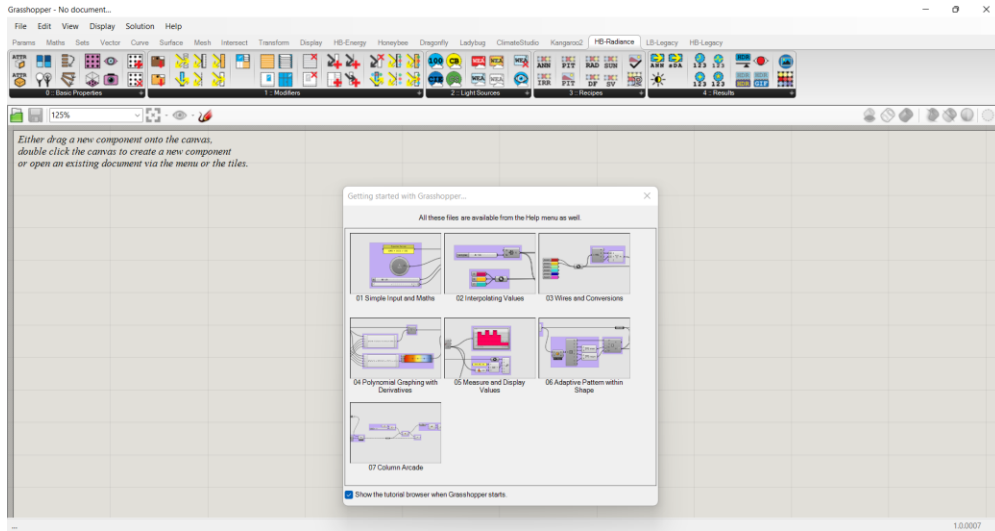


○ **Grasshopper**

Es un editor de algoritmos gráficos que se incluye en la interfaz de *Rhino*, el cual no requiere de conocimientos de programación, permite crear algoritmos sin tener que escribir códigos. Está basado en la programación orientada a objetos, los cuales pueden ser de tipo paramétrico, componentes o conectores. A su vez a *Grasshopper* se le pueden integrar otros plugin con diferentes categorías y componentes para los fines que se deseen, entre estos está *Honeybee* (ver **Figura 43**).

Figura 43

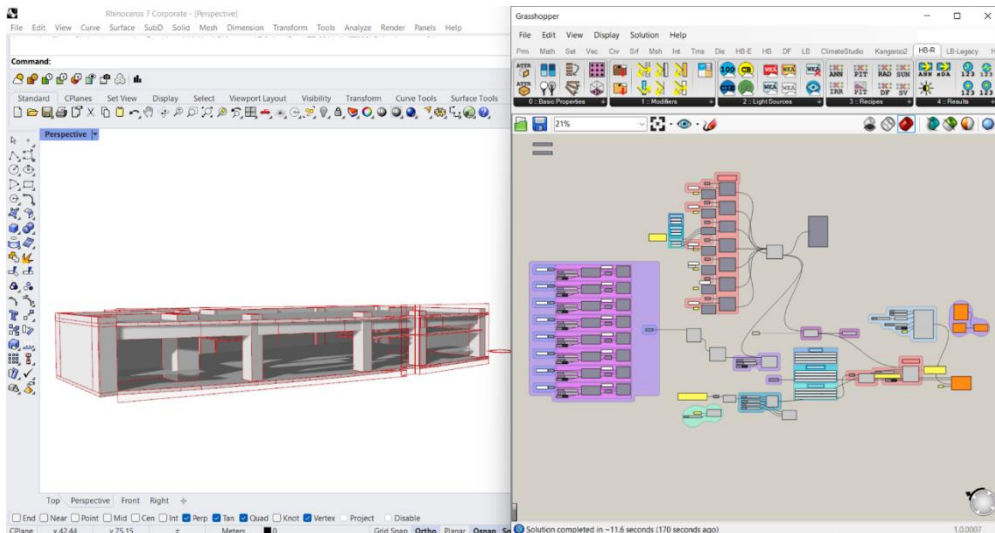
### Interfaz de Grasshopper



Si vinculamos todos los programas mencionados en este apartado la simulación se puede ver como en la **Figura 44**. En síntesis, se levanta la geometría 3D en *Rhino*, se vinculan todos los componentes con *Grasshopper* y *Honeybee*; una vez hecho esto se puede correr la simulación lumínica.

Figura 44

### Modelo vinculado



### 4.3.1 Archivo climático para la simulación: EPW

La simulación se hará mediante el CBDM que recordemos es el modelado de la luz natural basado en el clima, por ende, requerimos un archivo climático. En estos archivos están contenidos datos sintetizados para representar un año típico meteorológico, el cual se conoce como *Typical Meteorological Year (TMY)*. De acuerdo con Reinhart (2014, p.55) el método del TMY fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Sandia (*Sandia National Laboratories*). Dicho método se basa en doce años de medición, a partir del mes de enero y se selecciona el mes de enero que más se aproxima a la media de los doce eneros; basándose en una ponderación compuesta de elementos climáticos como la radiación solar, temperatura, humedad y velocidad del viento. Este procedimiento se aplica para el resto de los meses. Como resultado, cada mes de un TMY puede corresponder a datos medidos de un año diferente.

Alrededor del mundo hay muchas estaciones meteorológicas, las cuales tienen décadas de años registrados, estos datos se pueden recopilar en “cintas meteorológicas anuales”. Estas cintas se pueden obtener en diferentes formatos, entre ellos “*WEA (Weather Data File), EPW (Energy Plus Weather Data Files)* o *IWEC (data set: new International Weather for Energy Calculations format from ASHRAE)*, por mencionar algunos” (Chi, 2021, p.235). De los formatos más utilizados es el EPW, el cual es compatible con diversos programas para el análisis de la energía, el viento y la luz natural.

Los archivos EPW constan de una cabecera con información clave relativa a la ubicación del emplazamiento, la altitud y el intervalo de tiempo, así como datos horarios detallados que incluyen la radiación directa y difusa, la iluminancia, diversas temperaturas, la humedad relativa y el viento. (Reinhart, 2014, p.55).

El formato EPW se puede obtener de forma gratuita directamente de la página de *Energy Plus*, cuyo programa está financiado por la Oficina de



Tecnologías de Construcción (BTO) del Departamento de Energía de EE. UU. (DOE), y administrado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL). *Energy Plus* cuenta con datos meteorológicos para 3 034 localidades (ver **Figura 45**) de las cuales “149 están ubicadas en Estados Unidos, 80 en Canadá y más de 1 450 en otros 98 países” (EnergyPlus, s.f.). Los datos se clasifican por región y país con base en la Organización Meteorológica Mundial, México se encuentra en la Región 4 de la OMM que corresponde a América del Norte y Central. Un aspecto que es muy importante considerar al momento de seleccionar nuestro archivo climático, es que hay que cerciorarse de que éste se encuentre entre 30 o 50 kilómetros de distancia y a 100 m de elevación respecto a nuestro sitio de interés, esto para mayor precisión de los datos meteorológicos recopilados.

Por otro lado, la Universidad de Berkeley de California ha desarrollado la herramienta climática CBE que es un recurso de visualización y análisis del clima en línea cuyo objetivo fue “desarrollar una herramienta en línea fácil de usar que transforme los datos meteorológicos disponibles gratuitamente en un conjunto comprensible de gráficos que puedan adaptarse a las necesidades de los diseñadores de edificios conscientes del medio ambiente y otras partes interesadas” (Berkeley University of California, 2022). Esta herramienta cuenta con 30 000 archivos meteorológicos a los cuales se pueden acceder a través de un mapa interactivo (ver **Figura 46**); desde el cual podemos descargar los archivos EPW del sitio de nuestro interés.



**Figura 45**

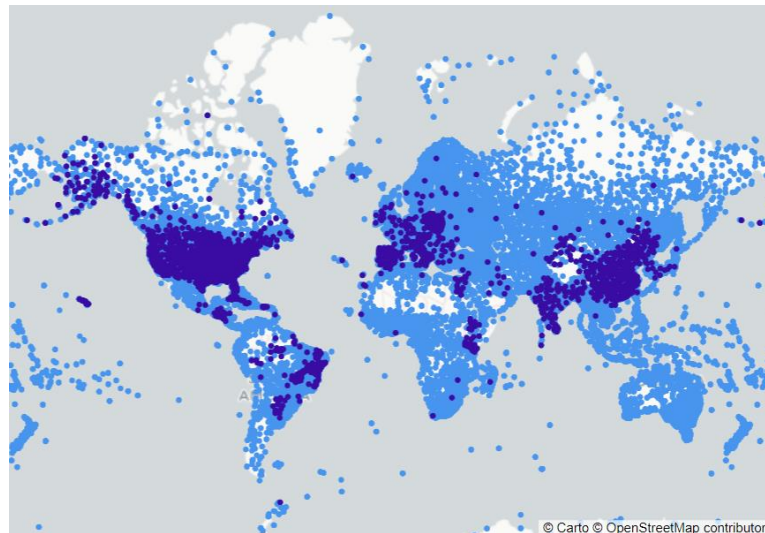
**Estaciones meteorológicas de Energy Plus**



Nota. Recuperado de EnergyPlus (s.f.).

**Figura 46**

**Base de datos CBE**



Nota. Recuperado de Berkeley University of California, (2022).

Energy Plus cuenta con tres estaciones para la recolección de datos climáticos en la Ciudad de México las cuales corresponden a la Central y al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (Benito Juárez). Para el desarrollo de este trabajo se utilizó el EPW Central de la CDMX, el cual tiene una latitud de

19°40'00" N y una longitud de -99°18'30" O. De acuerdo con estas coordenadas hacemos referencia al Observatorio de Tacubaya y al ser la estación más cercana al caso de estudio es con la que se trabajó. El archivo climático EPW que se utilizó tiene un registro de trece años en un periodo del 2005 al 2017; en dicho archivo indican los TMY que se consideró para cada mes y son los que se muestran en la **Tabla 12**.

**Tabla 12**

*TMY de la estación central*

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2016	2016	2009	2017	2010	2014	2006	2013	2010	2014	2011	2008

Existen diversos programas para la lectura y graficar la información contenida en un archivo climático de tipo EPW “*Meteornom, Weather Tool y Climate Consultant* son algunos ejemplos de programas desarrollados con este objetivo” (Chi, 2021, p.240). Un archivo climático está organizado en filas y columnas, contiene aproximadamente 8 760 filas si lo leemos como una hoja de cálculo, su composición general se aprecia en la **Figura 47**.

Chi (2021, pp.237-239) describe la composición de un archivo EPW si lo leemos en una hoja de cálculo, de esto podríamos rescatar que las primeras filas (1-8) están destinadas a la información general: localidad, condiciones de diseño, condiciones típicas y periodos extremos, temperaturas de terreno, días feriados y de verano, comentarios y periodo de recolección de datos. A partir de la fila 9, la información del archivo se organiza por columnas (A, B, C, D, E, etc.). De esta manera, cada columna corresponde a un tipo de información específica, por tanto, desde la fila 9 hasta la 8 768 es la colección de datos correspondientes al tipo de información específica de cada columna. Entre la serie de datos de estas columnas las que más nos interesan son las de: radiación horizontal infrarroja desde el cielo ( $Wh/m^2$ ), radiación global horizontal



(Wh/m<sup>2</sup>), radiación normal directa (Wh/m<sup>2</sup>), radiación difusa horizontal (Wh/m<sup>2</sup>), iluminancia horizontal global (lux), iluminancia normal directa (lux), iluminancia horizontal difusa (lux) y luminancia en el zenit (cd/m<sup>2</sup>). No obstante, toda la información contenida en estos archivos es procesada por los programas especializados, en los cuales podemos extraer aquello que nos interese conocer.

Figura 47

Composición de un archivo EPW

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
INFORMACIÓN GENERAL																					
1 LOCATION Ciudad Mexico, MEX, 1907599, 705800, 18.4 -99.14 -7 3302																					
2 DESIGN CONDITIONS																					
3 TYPICAL THERMAL ENVIRONMENT																					
4 OVERCAST-TYPICAL-REL. RES.																					
5 HOURLY DIM LIGHT SAV'GCS. No																					
6 COMMENTS 1																					
7 COMMENTS 2																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					
37																					
38																					
39																					
40																					

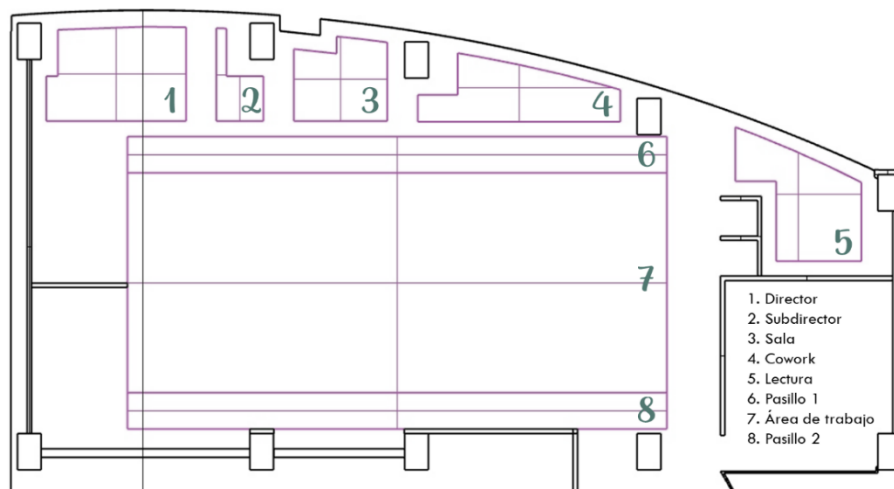
año mes día hora  
 Parametros climáticos

4.3.2 Parámetros para cálculo de iluminancia

Para realizar la simulación se requirió dividir la oficina en ocho zonas, sobre las cuales se hizo el levantamiento de los planos de trabajo para poder hacer el análisis de iluminancias. Las zonas de análisis o planos de trabajo se configuraron como se indica en la Figura 48.

Figura 48

Zonas de análisis

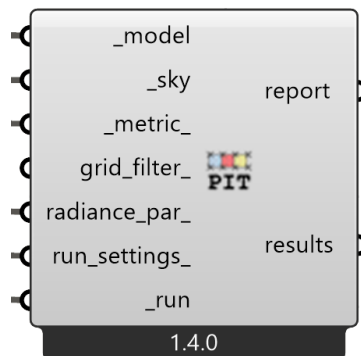


Una vez que se definieron los planos de trabajo se procedió a vincular los elementos en los tres programas —Rhino, GH y HB. Para esto hay que tener claro que cada componente que se utilice para la simulación estará integrado por entradas y salidas, el primero es toda la información requerida para que se ejecute dicho componente y la salida son los resultados obtenidos del mismo; en caso de existir un error en la ejecución en la salida se reporta dónde se encuentra dicho error. Ahora bien, para realizar un análisis de iluminancias basada en cuadrículas en un determinado momento se utilizó el componente *HB Point-In-Time Grid-Based (PIT)* (ver **Figura 49**). Para ejecutar este componente las entradas requeridas son: modelo, cielo, métrica, filtro de cuadrículas, parámetros de *Radiance*, configuraciones y ejecutar. Cada una de las entradas se detalla enseguida, la información presentada está basada en la versión 1.4.0 de HB, asimismo se especifica que el término “sensor” hace referencia a cada punto de una cuadrícula simulada, por lo que de ahora en adelante se dará por hecho que el referente es un sensor simulado.



Figura 49

Componente PIT



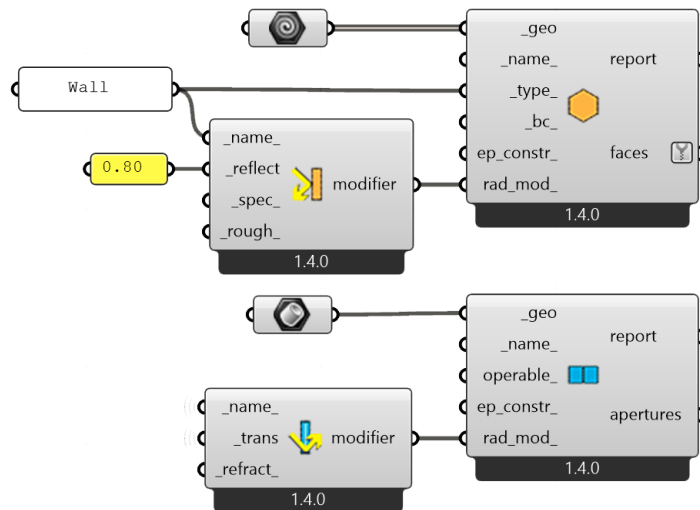
▫ **Modelo**

Para esta entrada se tiene que hacer una preparación previa, en la cual estarán interviniendo geometrías, sensores y el conjunto de los sensores. En primer lugar, están las geometrías —si el modelo 3D viene desde *Rhino* y si se han trabajado por capas será más fácil de ligar a GH— las cuales se dividen en superficies sólidas y aperturas. Para la primera se usa el componente *HB Face* y para el segundo *HB Aperture*, en ambos casos aplica el modificador de materiales para que las propiedades sean lo más parecidas a la realidad (ver **Figura 50**). De este modificador el valor más importante es el de la reflectancia del material, ya que influye tanto en un cálculo térmico como lumínico. En *HB Face* se pueden ingresar tres parámetros a modificar, que es la reflectancia, la especularidad y la rugosidad; estos valores se pueden obtener desde las fichas técnicas de los materiales, no obstante, hay otros medios para obtener estos valores. De no conocer los valores anteriores, *Radiance* nos lo da de forma predeterminada, pero para mayor precisión y acercamiento a la realidad se recomienda ingresar de forma manual dichos parámetros. Ahora bien, el modificador para el vidrio es distinto y en éste se ingresa el valor de transmisión y de refracción; para esta simulación fue de suma importancia cambiar el primer valor. Cabe destacar que al ser un programa cuya interfaz está en inglés cada

texto que se ingrese no debe estar acentuado ni contener espacios, de lo contrario, arrojará un error en la ejecución.

Figura 50

Configuración de geometrías

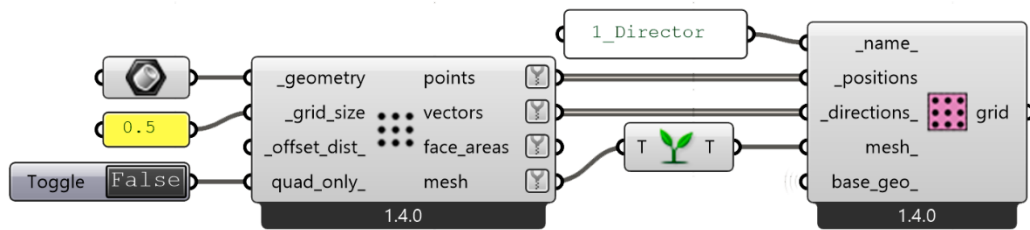


En segundo lugar, están los sensores de medición para poder llevar a cabo el cálculo de iluminancia, dichos sensores se preparan en conjunto con Ladybug —previamente en Rhino se deben dibujar los planos de trabajo. Se vinculan los planos de trabajo con el componente de *LB Generate Point Grid* y *HB Sensor Grid* (ver Figura 51); con lo anterior, obtendremos nuestro sembrado de sensores en las ocho zonas de análisis.



Figura 51

Configuración de sensores

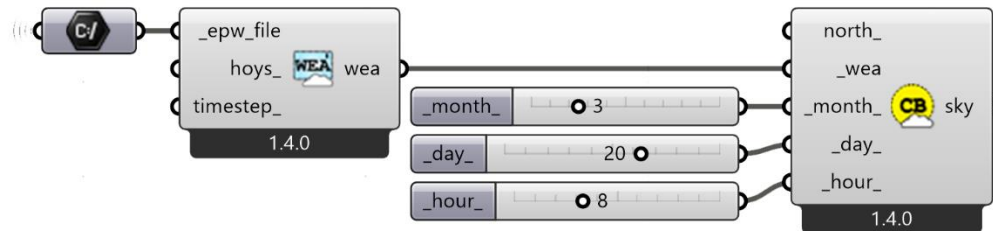


□ Cielo

Para esta entrada se pueden utilizar los cielos de la CIE, los basados en el clima o para una iluminancia/irradiancia específica. Para el cielo se trabajó con el componente *HB Climatebased Sky*, para que funcione, previamente se debe alistar la lectura del archivo EPW —el cual se puede cargar con componentes de Ladybug o de Honeybee— en este caso se realizó con la función *HB Wea from EPW*, al cual se le vinculó una ruta de acceso al archivo EPW que estaba guardado en el equipo. La salida del clima se conecta al componente del cielo, donde además se debe elegir la fecha y hora de la que se requiere la simulación (ver Figura 52).

Figura 52

Configuración del cielo





- **Métrica**

Se debe elegir un número o nombre para determinar lo que se quiere medir, puede ser iluminancia, irradiancia, luminancia o radiancia. En este caso se trabajó con la iluminancia.

- **Filtro de cuadrículas**

Como su nombre lo indica es para filtrar los sensores, en caso de que se requiera hacer el análisis de un solo espacio, se puede ingresar la etiqueta del nombre de dicho espacio. De no poner la etiqueta, de forma predeterminada se simularán todas las cuadrículas que estén en el modelo.

- **Parámetros de *Radiance***

Los parámetros de *Radiance* se pueden modificar de acuerdo con las condiciones de nuestro espacio y entorno, esto cambia el trazado de rayos y sirve para la obtención de resultados fiables en un tiempo razonable, la descripción de estos parámetros se encuentra en la **Tabla 13**. De la definición de estos datos dependerá la calidad de la imagen y la precisión de los resultados, asimismo tomará mayor o menor tiempo obtener los resultados. Honeybee tiene valores predeterminados para cada uno de los parámetros descritos en la **Tabla 13**, los cuales son: **-ab 2** | **-aa 0.1** | **-ad 2048** | **-ar 64**; pero para obtener resultados precisos y en un tiempo razonable de acuerdo con nuestro proyecto se trabajaron los valores de la **Tabla 14**.

**Tabla 13**

**Parámetros de Radiance**

<b>ab</b>	Rebotes ambientales	Número de interreflexiones difusas, calculadas antes de que un rayo sea descartado. Este parámetro incrementa significativamente el tiempo de simulación. Un valor de 5 es suficiente para un espacio estándar sin elementos complicados en la fachada.
<b>ad</b>	División ambiental	Número de rayos que son enviados hacia afuera de algún punto en la superficie durante el cálculo. Este parámetro requiere ser alto si la distribución luminosa en la escena tiene altas variaciones de brillo.
<b>aa</b>	Precisión ambiental	La combinación de estos parámetros con la máxima dimensión de la escena provee una medida de cuán fina se calculará la distribución luminosa en la escena.
<b>ar</b>	Resolución ambiental	

Nota. Adaptado de Chi (2021, p.71).

**Tabla 14**

**Valores de Radiance en la simulación**

<b>ab</b>	<b>aa</b>	<b>ad</b>	<b>ar</b>
5	0.1	3072	96

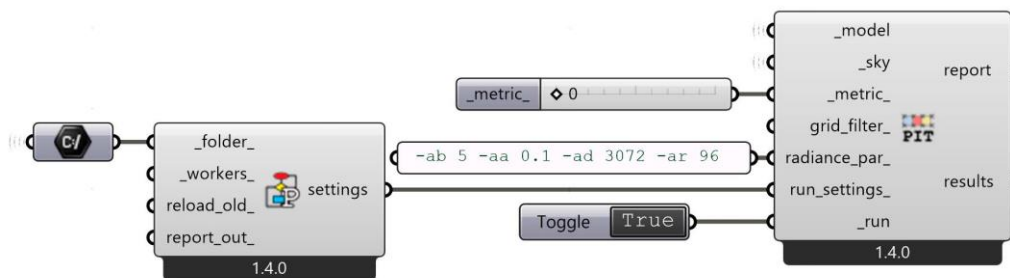
▫ **Ejecutar configuraciones**

Se define la ruta de la carpeta donde se guardarán los resultados obtenidos.

▫ **Ejecutar**

Finalmente, con esta entrada se puede llevar a cabo la simulación, para lo que se ingresa un componente denominado *Boolean Toggle* el cual contiene dos opciones, que son verdadero o falso, para ejecutar la simulación debe estar en verdadero (ver **Figura 53**).

**Figura 53**  
**Ejecutar PIT**



Una vez que se conectan todos los elementos antes mencionados — modelo, cielo, métrica, filtros y parámetros— procedemos a ejecutar la simulación y el resultado serán los mapas de iluminancia sobre los planos de trabajo seleccionados, los cuales se muestran en el apartado 5.1.1 de este documento. Los pasos que se describieron anteriormente corresponden a un análisis con PIT, que es para cálculos de iluminancia, irradiancia o luminancia para un día y hora en específico.

### 4.3.3 Parámetros para cálculo de iluminancia anual

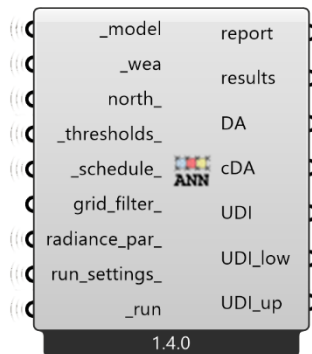
En *Honeybee* se puede hacer el análisis de luz natural anual, donde se calcula la iluminancia por hora para cada sensor que esté en el modelo. El componente que se utiliza para este cálculo es el de *HB Annual Daylight* (ver **Figura 54**), las entradas que se requieren ingresar son: modelo, clima, norte, umbrales, calendario, filtro de cuadrículas, parámetros *Radiance*, ejecutar configuraciones y ejecutar. A pesar de que muchas de estas entradas son las mismas que se utilizan con el componente PIT, existen algunas variaciones para poder obtener ANN, por lo que cada entrada se detalla más adelante. Los resultados de este componente se pueden interpretar mediante las métricas dinámicas como DA



(autonomía de la luz natural), cDA (autonomía de la luz natural continua) y UDI (iluminancia de luz natural útil), siendo este último el que utilizaremos.

Figura 54

Componente ANN

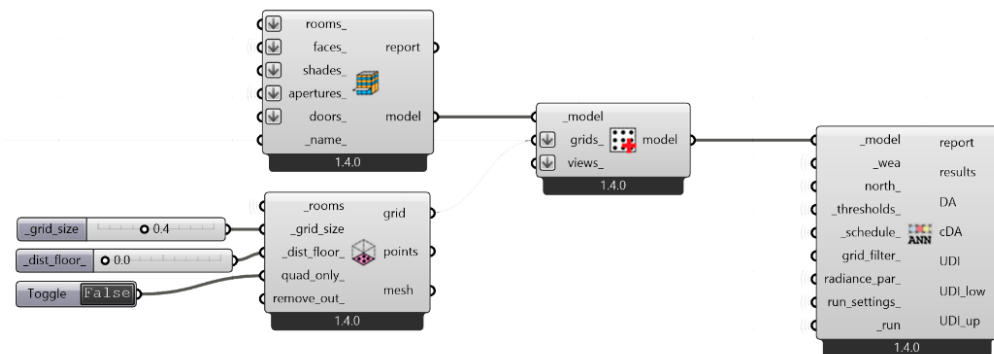


Modelo

Modelo configurado con los elementos de *Honeybee*, el cual debe contar con los sensores, como se describió en el apartado anterior.

Figura 55

Vinculación de modelo



- **Clima**

Este puede ser importado desde un sitio web, o bien, desde una ruta para cargar el archivo EPW, tal como se hizo en este caso (ver **Figura 56**). A diferencia del PIT, aquí no se carga el cielo ni se especifica una fecha de análisis, ya que el cálculo es anual.

- **Norte**

La dirección del norte predeterminada es 0, pero si el edificio tiene otra orientación será importante precisarlo para que los cálculos se ejecuten de forma correcta (**Figura 56**).

- **Umbrales**

Valores que se pueden cambiar para la DA y el UDI, donde se pueden modificar los valores más bajos y altos para estas métricas. Debido a que en esta investigación nos enfocamos en el UDI autónomo, usaremos los valores de  $I_t$  para el umbral inferior y  $u_t$  para el superior, bajo este entendido tenemos que fueron  $-I_t 300$  y  $-u_t 3000$  (ver **Figura 56**).

- **Calendario**

Es un cronograma de ocupación anual del espacio que se va a analizar, se puede cargar de diferentes formas, ya sea con *Ladybug* o *HB-Energy*, pero también se puede usar un archivo de tipo csv donde se determinen las horas de ocupación (ver **Figura 56**). O bien, usar los calendarios predeterminados del sistema como “*Generic Office Occupancy*”<sup>4</sup>.

- **Filtro de cuadrículas**

Como se mencionó anteriormente es para filtrar las cuadrículas de los sensores.

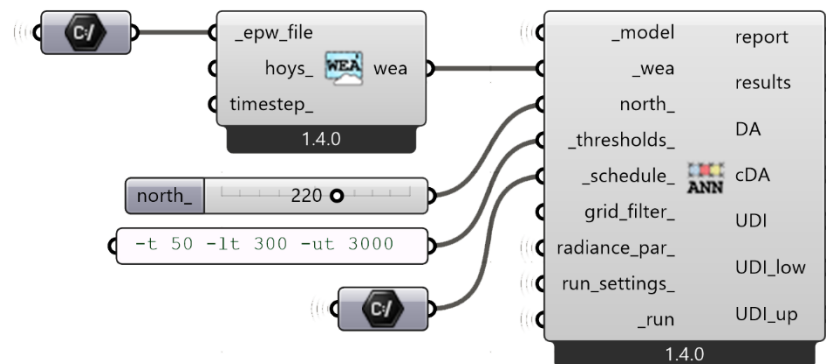
---

<sup>4</sup> Ocupación genérica para oficinas.



Figura 56

Entradas de ANN



▫ **Parámetros de Radiance**

Mediante un texto se pueden modificar los valores que se usarán para el trazado de rayos, en este caso a la entrada se le vinculará el *HB Radiance Parameter*, donde se define el tipo de análisis que se quiere, que puede ser: un punto en el tiempo a través de cuadrículas con el factor de luz natural, punto en el tiempo basado en vistas y cálculo anual. De lo anterior se configura un tipo anual con un nivel de detalle medio (ver Figura 57).

▫ **Ejecutar configuraciones**

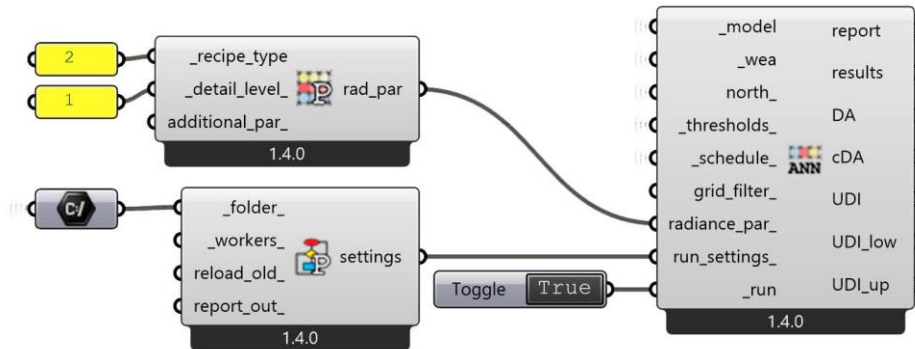
En esta entrada se define la ubicación de dónde se guardarán los resultados. (ver Figura 57).

▫ **Ejecutar**

Finalmente, con ingresar un componente *Boolean Toggle* en estado verdadero se puede ejecutar la simulación (ver Figura 57).

Figura 57

### Ejecución de ANN



#### 4.3.4 Parámetros para cálculo de deslumbramiento

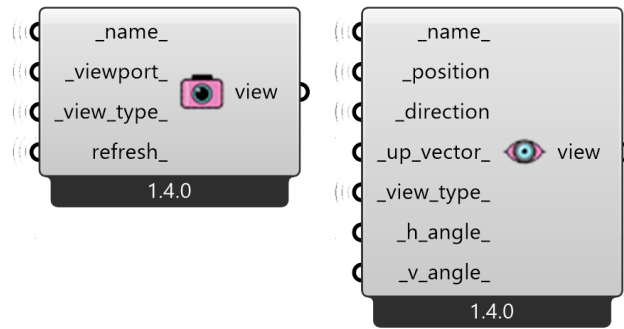
Para la evaluación del deslumbramiento se usarán muchos de los elementos que ya se han descrito, pero a diferencia de los dos anteriores, se deberán colocar cámaras y/o configurar vistas desde *Rhino* para poder vincularlas a GH y ligar los elementos a HB. Para esta parte necesitamos tres componentes clave que son: *View*, *PIT view* y *Glare*. Cada entrada de los tres componentes se describe a continuación y cerramos con la forma de visualizar los resultados con elementos HDR. Finalmente, los resultados de deslumbramiento se presentan en el apartado 5.1.3 de este documento.

##### ▫ Vista

Aquí hay dos elementos que se usan, el primero es *HB View from Viewport* (Figura 58-izquierda) al cual se le asigna el nombre de la vista que tenemos configurada y adaptada desde *Rhino*. El segundo es *HB View* (Figura 58-derecha) en el que se configura la posición y dirección de la vista, así como qué tipo de imagen queremos generar, ya que puede ser de tipo perspectiva, paralela, cilíndrica, angular ojo de pez y estereográfica. La vista seleccionada fue angular ojo de pez.

Figura 58

Vistas

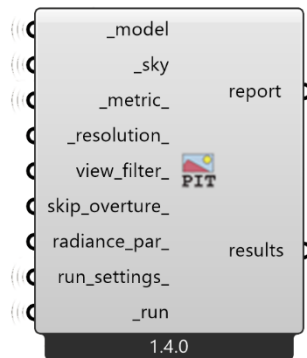


▫ Punto en el tiempo basado en vistas

Con este componente se pueden generar imágenes HDR tanto para iluminancia, irradiancia, luminancia o radiancia, todo a través de un modelo HB. Cada entrada se describirá en los siguientes puntos, sin repetir información previa (ver Figura 59).

Figura 59

Componente PIT View



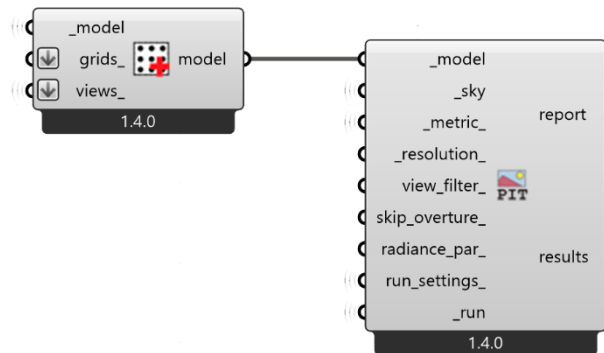


- **Modelo**

Esta entrada debe venir con la salida del componente *HB Assign Grids and Views* para así tener los sensores vinculados y la vista previamente configurada. De tal forma que el modelo se conecta al PIT como se muestra en la **Figura 60**.

**Figura 60**

*Vinculación de modelo*



- **Cielo**

Al seguir con un CBDM se cargará el cielo como se vio en el apartado 4.3.2, por lo que habrá que definir la fecha y hora de la que queremos el análisis.

- **Métrica**

Se define qué es lo que queremos calcular, ya que puede ser iluminancia, irradiancia, luminancia y radiancia. En este caso el cálculo es de **luminancia**.

- **Resolución**

Aquí se puede determinar la dimensión máxima de las imágenes en píxeles, el valor predeterminado es 800.

- **Filtro de vista**

- **Parámetros de Radiance**

- **Ejecutar configuraciones**

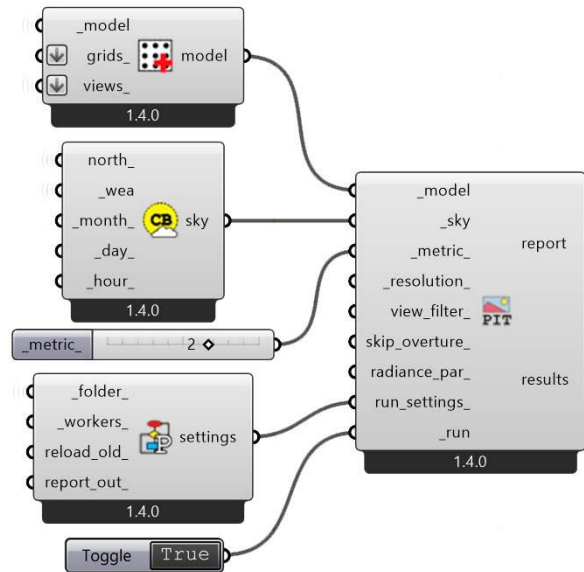
- **Ejecutar**



Las últimas cuatro entradas se han descrito anteriormente y no sufren cambios en su configuración (ver **Figura 61**).

**Figura 61**

**Ejecutar PIT View**



▫ **Salida de resultados**

Los resultados del componente *PIT view* serán las imágenes HDR para las que se tendrán que ligar tres elementos: *HB Glare Postprocess*, *HB Adjust HDR* y *HB False Color*. Cabe mencionar que el componente *Glare* tiene problemas en la versión 1.4.0 por lo que se tuvo que actualizar a la versión 1.5.0 para ejecutarlo de forma satisfactoria (ver **Figura 62**).

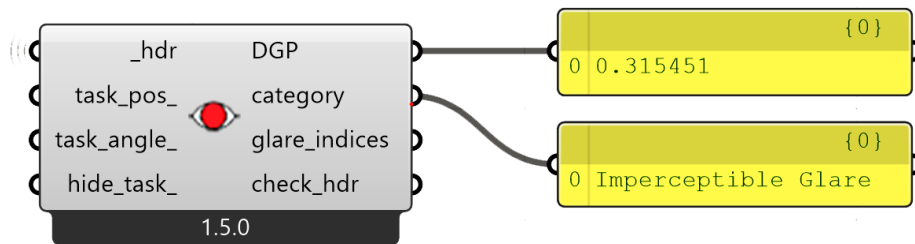
▫ **Postproceso de deslumbramiento**

Este componente incluye el cálculo de distintos índices de deslumbramiento como lo son *Daylight Glare Probability (DGP)*, *Daylight Glare Index (DGI)*, *Unified Glare Rating (UGR)*, *Visual Comfort Probability (VCP)*, *CIE Glare Index (CGI)* y *Veiling Luminance (Lveil)*; la métrica que nos interesa conocer es el DGP (ver **Figura 62**).

A la entrada HDR se le conecta el resultado que obtuvimos del *PIT View* (**Figura 61**) de esta forma obtenemos el valor y categoría del DGP.

**Figura 62**

**Deslumbramiento**



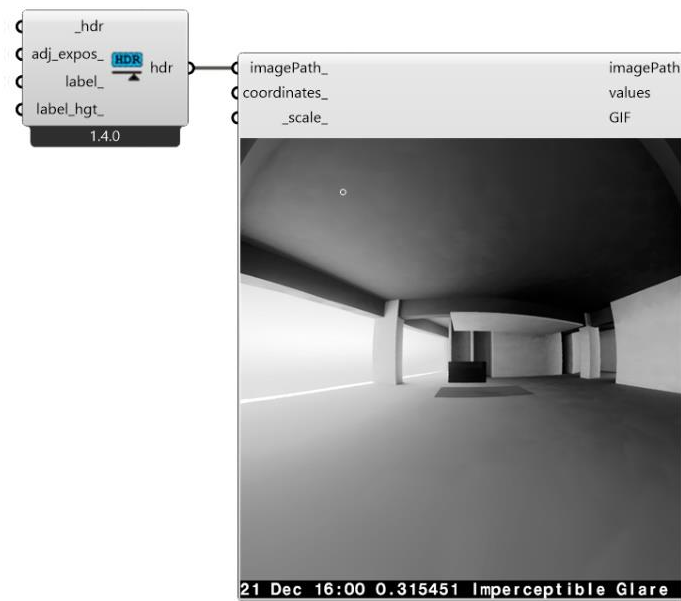
▫ **Ajustar HDR**

Con este componente obtendremos nuestra imagen HDR, a la cual se le hacen los ajustes pertinentes para imitar lo que el ojo humano puede ver. A la entrada HDR (ver **Figura 63**) se conectan los resultados del *PIT View* y la única salida que tiene se conecta al componente *LB ImageViewer* para obtener la imagen configurada.



Figura 63

Vista angular ojo de pez

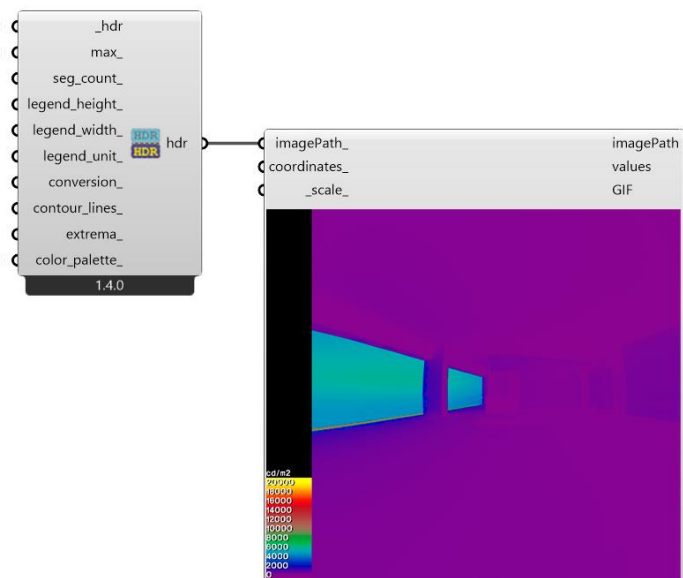


▫ Falso color

Convierte un archivo HDR con falsos colores para apreciar la incidencia lumínica, esta es una herramienta de análisis común, la cual se puede apreciar con líneas de color o líneas de contorno. A esta herramienta “se le asigna una gama de colores entre el azul y el rojo a los valores de luminancia o iluminancia. Este análisis ayuda a visualizar las distribuciones de luminancia e iluminación en un espacio” (Inanici, 2001). Para la entrada HDR se conectan los resultados del *PIT View* y a la salida el componente *LB ImageViewer*. A través del HDR podemos configurar la paleta de colores en la que queremos la imagen, la cual puede ser con los colores predeterminados, variación de los colores predeterminados, antiguo mapa espectral o escala térmica.

**Figura 64**

**Vista de falso color**



Cada una de las imágenes obtenidas se guarda en formato HDR y se puede abrir con programas como Photoshop. El resultado que se obtiene de la **Figura 63** se puede comparar con la clasificación de las **Tablas 9 y 10** del apartado 3.3.

## Conclusiones

La investigación es un proceso que se debe seguir y cubrir desde distintos rubros, los cuales dependen del tipo que ésta sea. La ruta de la investigación es de lo primero que se define y sobre ese eje se procede a elegir el método, técnicas e instrumentos.

Como parte de las técnicas de este trabajo fue el caso de estudio, del cual cabe resaltar que de todo el edificio es importante que sepamos las características urbano-arquitectónicas en torno a este. Las condiciones urbanas en un estudio lumínico son importantes porque de la densidad urbana dependerá la incidencia recibida, ya que se puede dar de forma directa o por reflexión. Otro factor urbano para considerar además de la densidad, son las alturas de los edificios. Las características climáticas de la región en general son importantes, pero también lo son las del sitio, por lo que el estudio de microclimas es relevante y crucial para cualquier análisis de sitio, para tal información nos podemos apoyar de los recursos que brinda el Servicio Meteorológico Nacional. Las proyecciones estereográficas y de sombreado no se pueden dejar de lado en el análisis de sitio —que aquí intervienen tanto el edificio de nuestro interés como los colindantes.

Los aspectos antes mencionados se deben considerar para las simulaciones por computadora. Gracias a los avances tecnológicos que se han tenido contamos con archivos climáticos, de los que se puede hacer una lectura climatológica resumida y del mismo obtener gráficos. Para la correcta selección del programa de simulación que utilizaremos hay que revisar lo que el programa nos ofrece y si responde a nuestras necesidades. Hay una amplia variedad de programas, lo principal será verificar que usen modelos validados y confiables ante la comunidad científica.

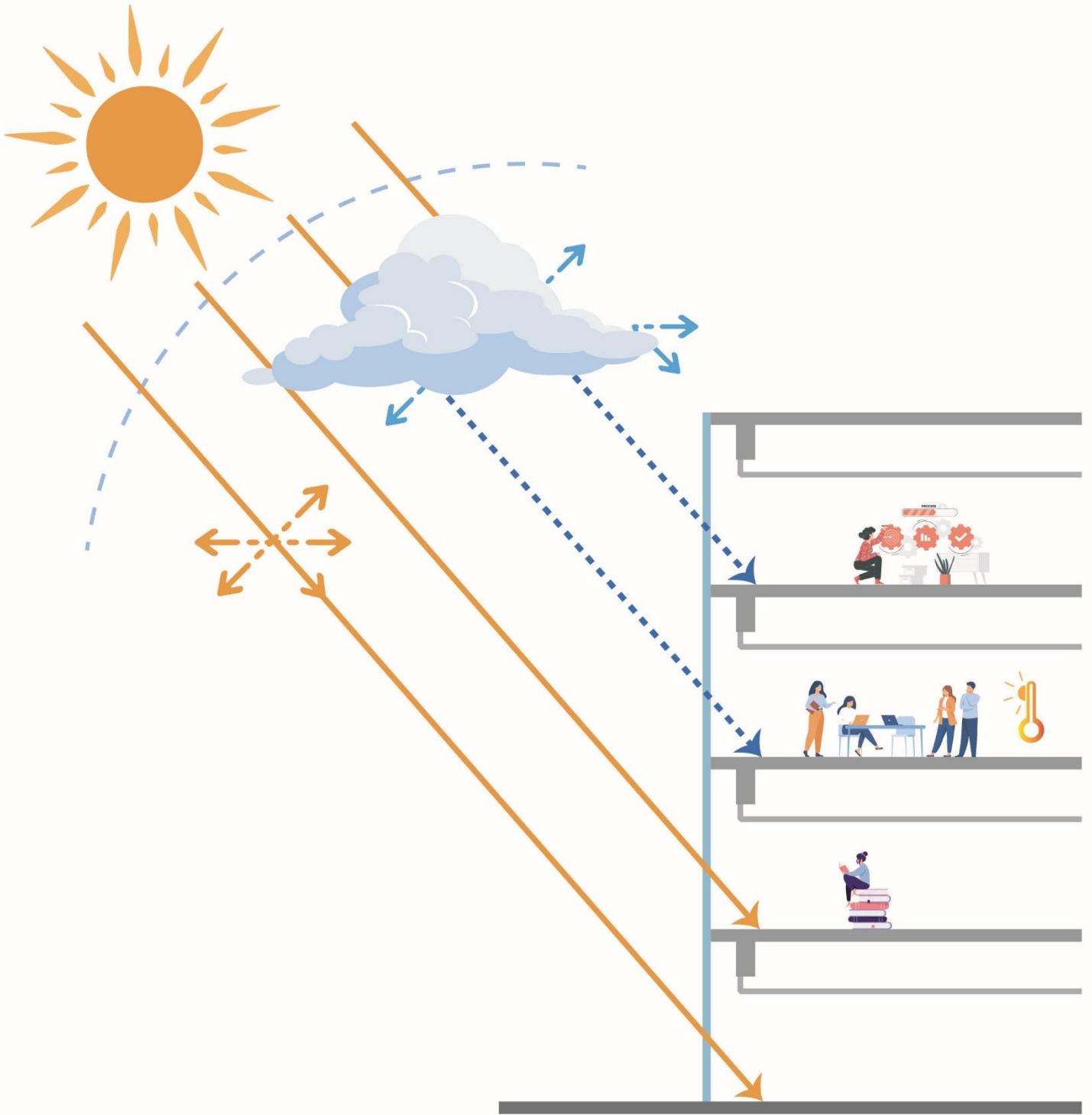
Finalmente, México se ha ido integrando a las simulaciones poco a poco, a diferencia de otros países, lo que se demuestra en la obtención de información y de la literatura revisada. Aún queda mucho camino por recorrer en el tema de luz natural incorporadas a las simulaciones.



# RESULTADOS

CAPÍTULO 5





## 5.1 Presentación de los resultados

En esta sección únicamente se presentan los resultados con una breve explicación para su entendimiento; en el siguiente apartado se procederá con la interpretación de lo que aquí se presenta. Para ambos casos se inicia con los resultados de iluminancias, seguido de la iluminancia anual y se cierra con el deslumbramiento.

### 5.1.1 Resultados de iluminancias

El cálculo de iluminancias se realizó para tres momentos del año con tres horarios en específico, las fechas representativas fueron el solsticio de verano (21 junio), equinoccios (20 marzo) y el solsticio de invierno (21 diciembre). Los horarios elegidos fueron las 8 de la mañana, horario en que la oficina empieza a tener una ocupación, medio día considerando las 12 y finalmente las 16 horas.

La iluminancia se define como: la densidad de flujo luminoso incidente sobre un elemento diferencial de superficie situado en un punto y orientado en una dirección determinada, expresada en lúmenes por unidad de superficie. Al tratarse de un área diferencial, se acostumbra a denominar iluminancia en un punto. El nombre de la unidad depende de la unidad constitutiva del área, se trata de los lux si se utilizan metros cuadrados. (DiLaura et al., 2011, p.5.10).

Con el cálculo de iluminancias se pudo determinar cuál de los vidrios tenía una respuesta lumínica más eficiente conociendo la cantidad de lux que traspasa al interior. Este cálculo se inició con el diagnóstico del vidrio original (ver **Figura 65**) por lo que la escala en lux varía en cada escena. Este diagnóstico permite observar la baja iluminancia que hay en el espacio, asimismo, es en el solsticio de invierno cuando más iluminación hay y eso en las áreas más próximas al vidrio. Posteriormente para igualar la escala en lux se aplicaron los valores del

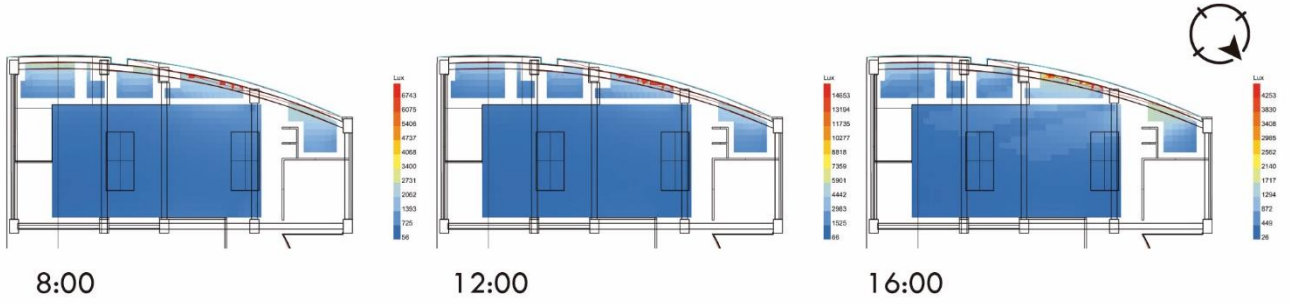
UDI-a considerando un mínimo de 300 y un máximo de 3000 lux. En la **Figura 66** ya se observa la incidencia lumínica con el vidrio original con los niveles correspondientes al UDI-a. En la **Figura 67** se muestran los resultados del vidrio SKN 154 y en la **Figura 68** el vidrio SKN 176, ambos son de la gama de doble capa. En la **Figura 69** está el modelo Xtreme 60, vidrio de triple capa. Si bien, la variabilidad de los resultados es casi imperceptible por la escala de colores que se presenta, sin embargo, en el **Anexo 1** se encuentran las gráficas que resultan de los valores registrados en cada sensor donde los cambios en los niveles lumínicos son evidentes y muestra la respuesta lumínica que tiene cada uno, así como la cantidad de lux a los que llega.



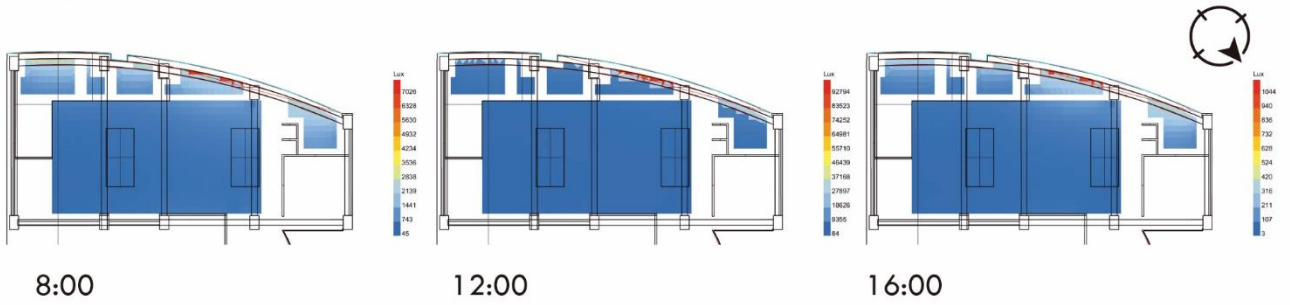
Figura 65

Diagnóstico de vidrio original

Solsticio de verano



Equinoccios



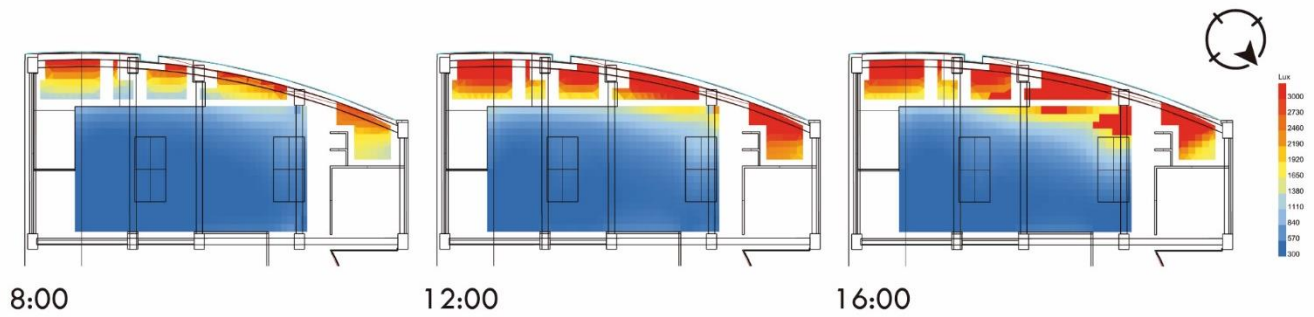
Solsticio de invierno



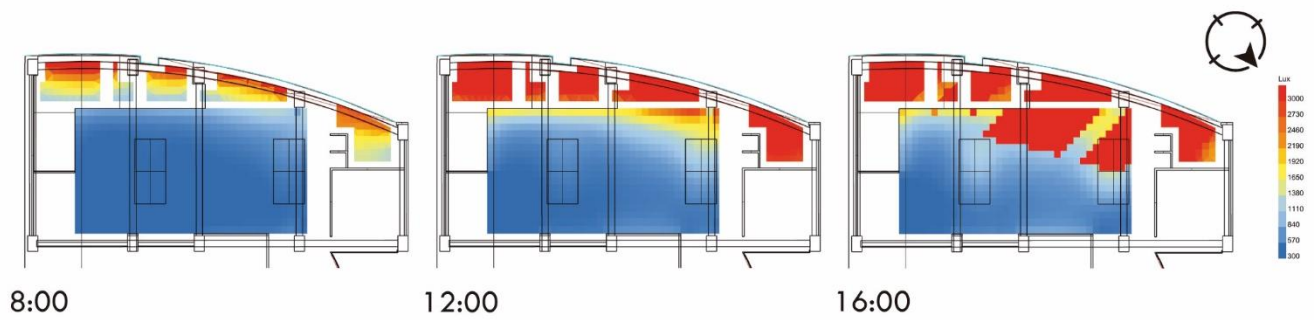
Figura 66

Vidrio Original

Solsticio de verano



Equinoccios



Solsticio de invierno

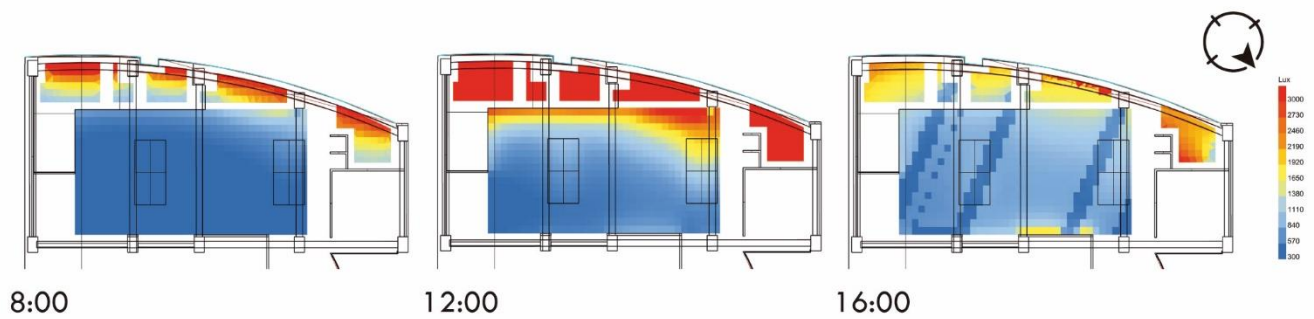


Figura 67

Vidrio SKN 154

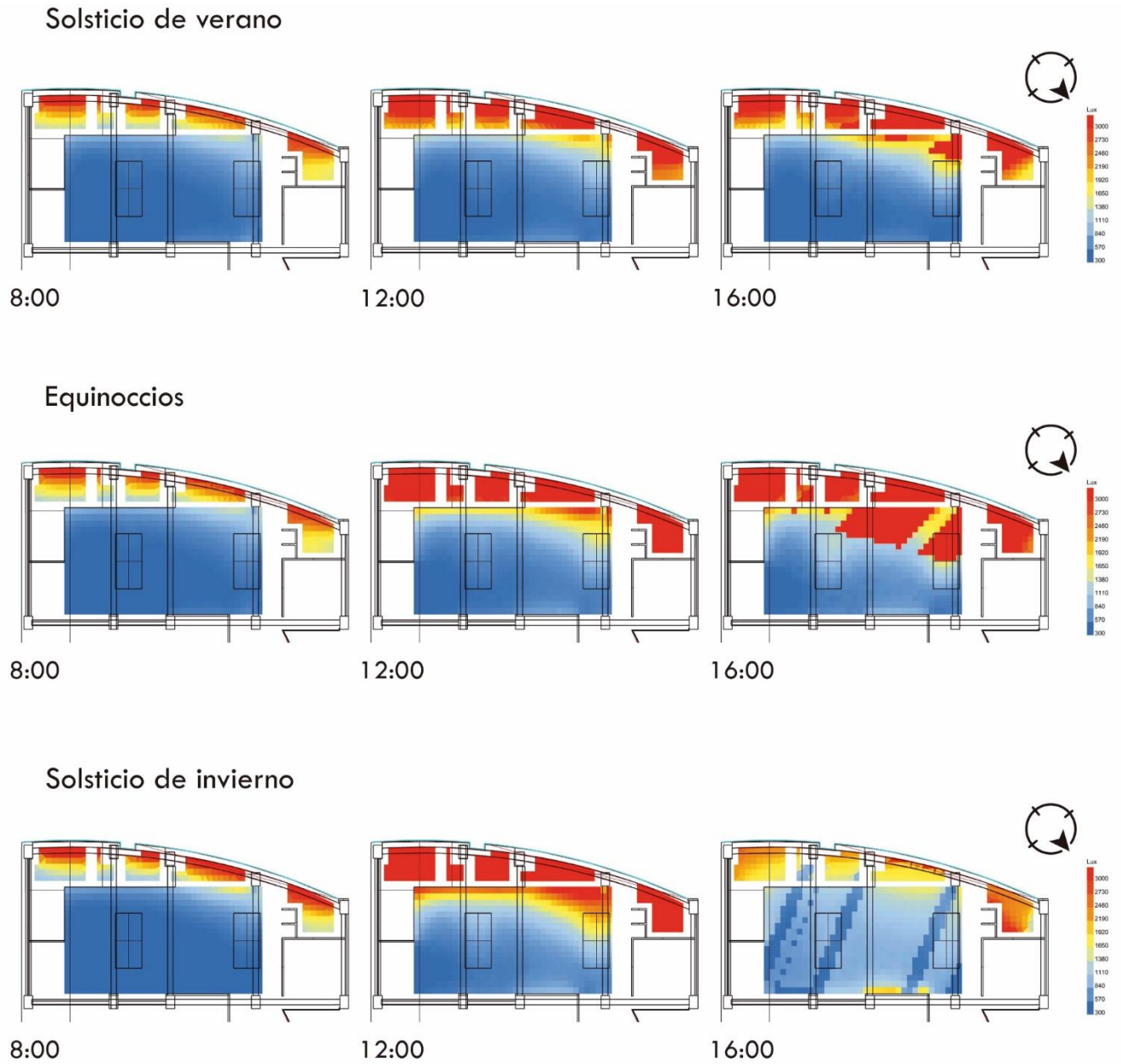
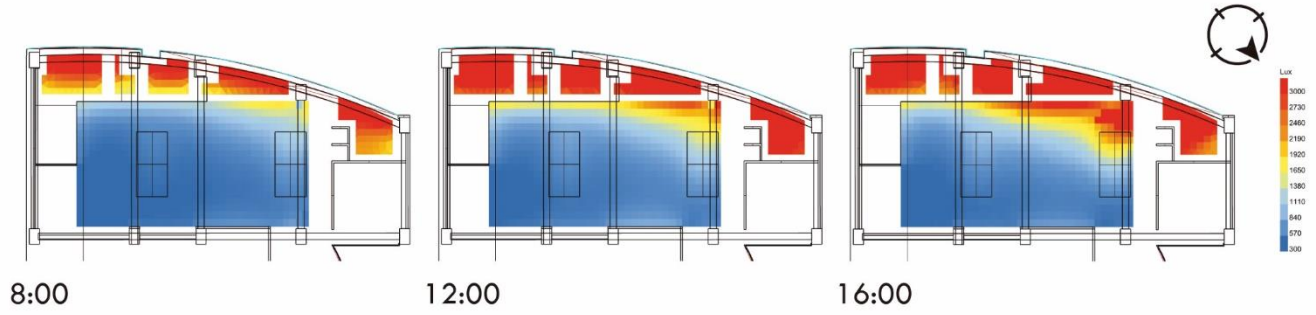


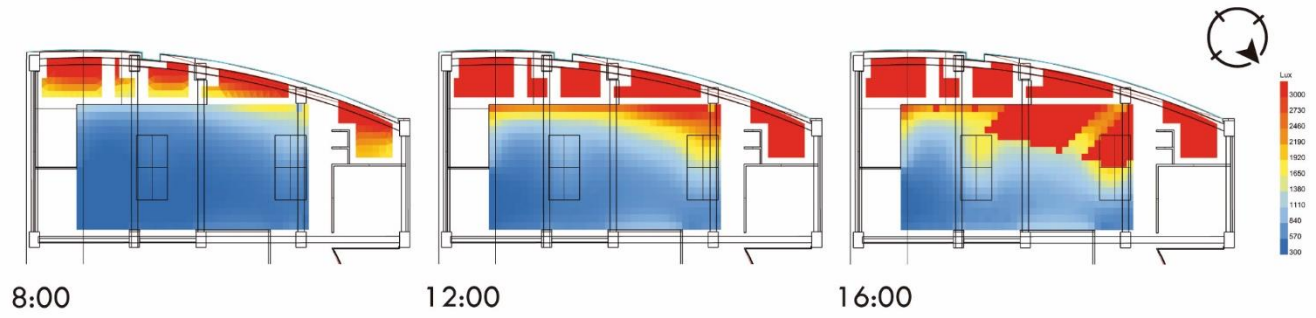
Figura 68

Vidrio SKN 176

Solsticio de verano



Equinoccios



Solsticio de invierno

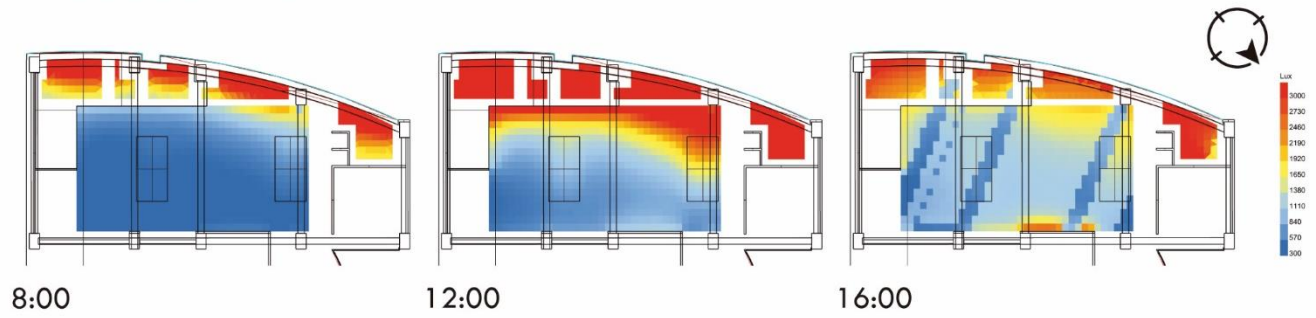
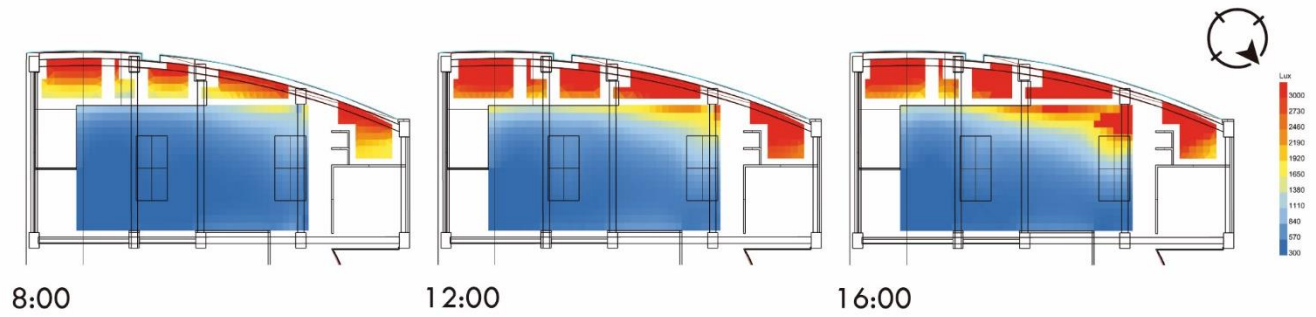




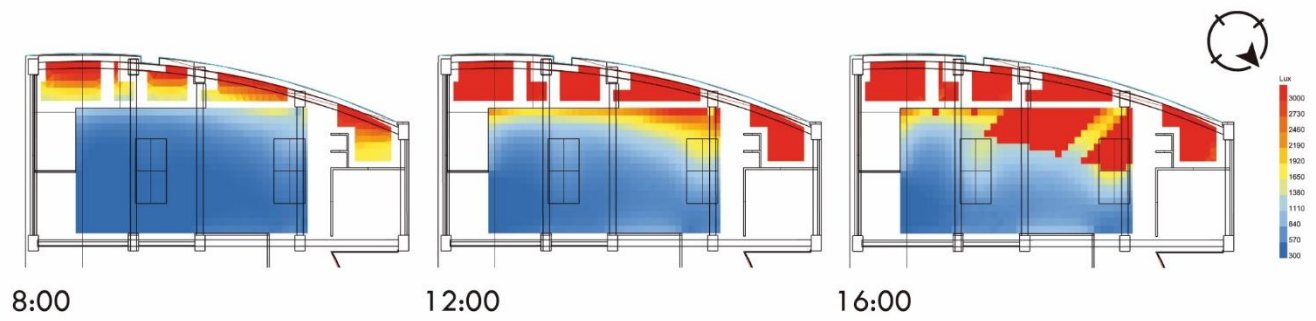
Figura 69

Vidrio Xtreme 60

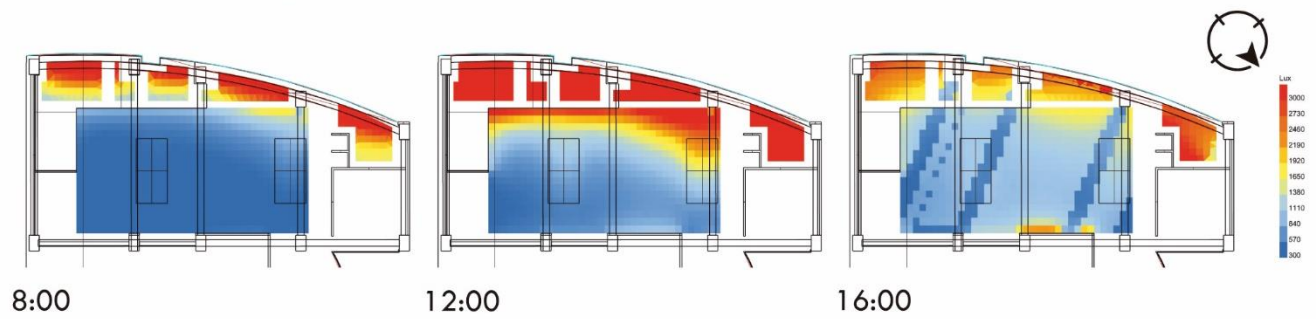
Solsticio de verano



Equinoccios



Solsticio de invierno





### 5.1.2 Resultados de iluminancia anual

Como segunda parte de los resultados está el análisis lumínico anual, el cual se evalúa con la métrica UDI, ya que con esta métrica se puede considerar el discomfort lumínico al superar los niveles de iluminancia. Asimismo, recordemos que esta métrica expresa las características significativas de un análisis de tipo CBDM “el UDI se basa en una serie temporal anual de valores absolutos de iluminancia previstos en cielos realistas generados a partir de conjuntos de datos meteorológicos estándar” (Nabil y Mardaljevic, 2005).

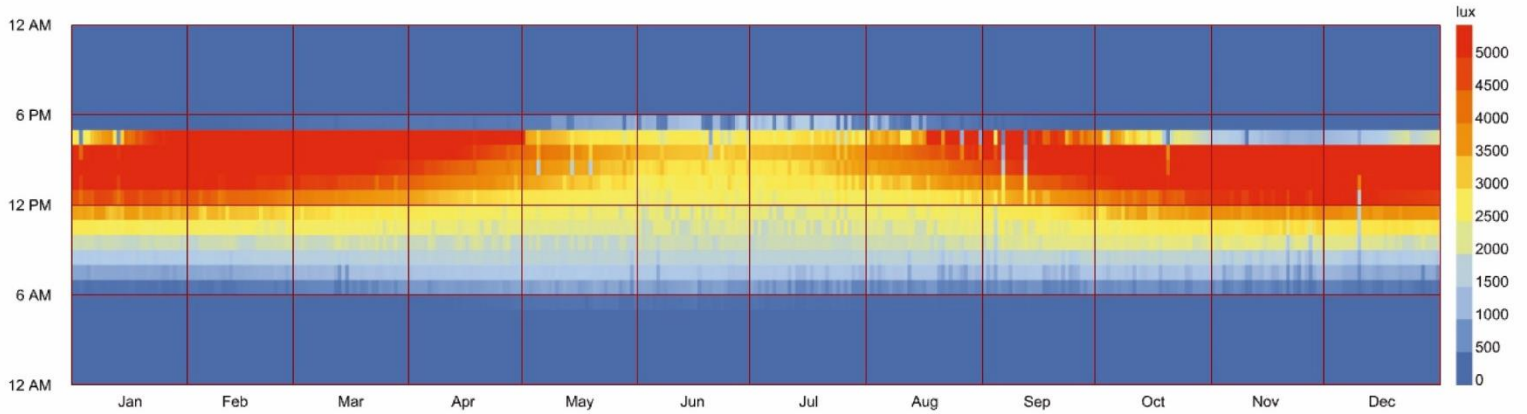
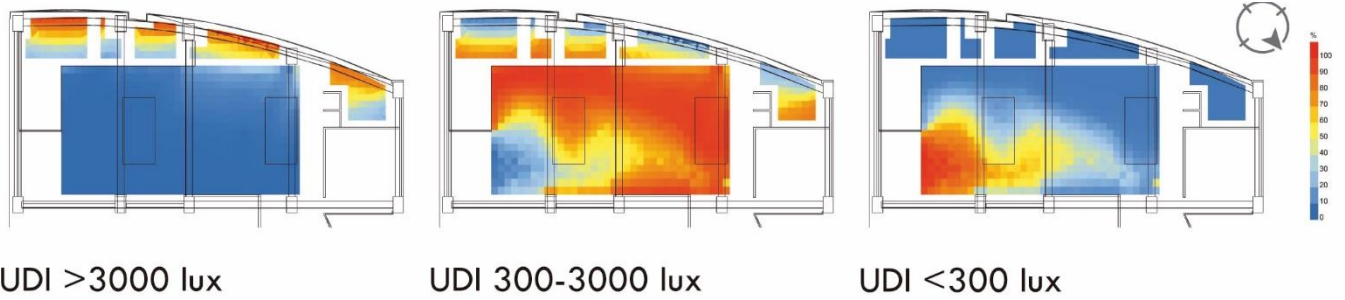
Las predicciones horarias de iluminancia con un modelo CBDM puede mostrar el rendimiento de la luz natural para un espacio interno, para lo que es necesario considerar el horario de ocupación del espacio, que en este caso es de 8:00 a 18:00 h. Las iluminancias anuales se presentan en un mapa temporal donde “las 8 760 horas de todo el año se muestran como (pequeños) rectángulos sombreados dispuestos en una matriz de 365 (días del año) por 24 (horas del día)” (Nabil y Mardaljevic, 2005).

Los resultados del análisis de iluminancia anual se presentan en dos partes, en la primera se muestra la distribución lumínica vista en planta y con porcentajes, los cuales se dividen en UDI bajo, UDI regular y UDI alto. El primero con niveles superiores a los 3000 lux, el segundo con niveles de 300 a 3000 lux y el tercero con niveles inferiores a los 300. La segunda parte muestra el mapa temporal donde se maneja una escala de 0 a 5000 lux para hacer evidente cuando sobre pasan los 3000 lux —límite del UDI-a. Este estudio se llevó a cabo con la finalidad de contrastar el vidrio original (**Figura 70**) con el que resultó tener mayor iluminancia en el análisis anterior, que fue el vidrio SKN 176 (**Figura 71**).



Figura 70

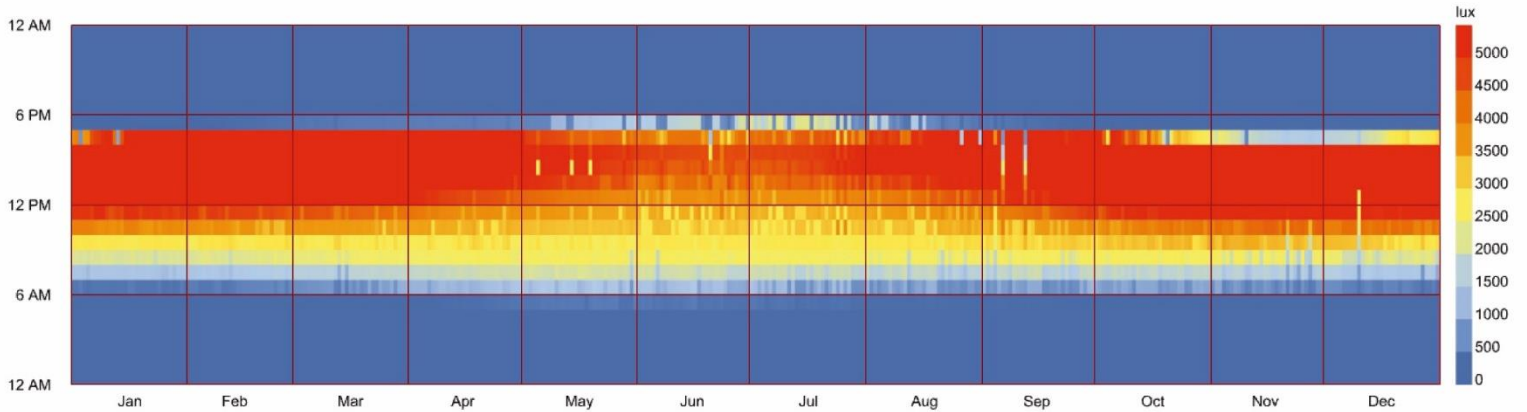
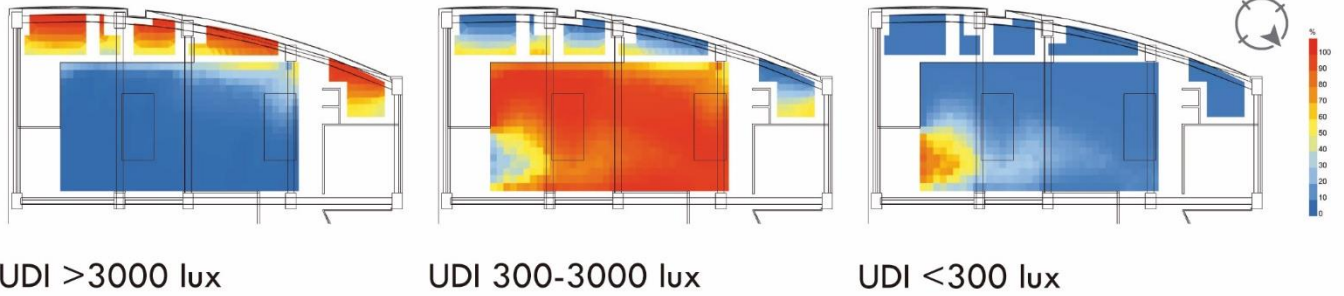
*Iluminancia anual con vidrio original*



Iluminance (lux)  
1/1 to 12/31 between 0 and 23 @1

Figura 71

Iluminancia anual con vidrio SKN 176



Illuminance (lux)  
1/1 to 12/31 between 0 and 23 @1



### 5.1.3 Resultados de deslumbramiento

El análisis de deslumbramiento se realizó en dos zonas de trabajo, una correspondiente a la oficina del director y la otra al área central, en la **Figura 72** se muestra la configuración de cada vista. Este análisis se hizo en tres fechas y horarios específicos —como en el análisis de iluminancias— en los solsticios y equinoccios en los horarios de 8:00, 12:00 y 16:00 h.

Como se observó en el apartado 4.3.4, los resultados se pueden mostrar en imágenes HDR aplicadas con falso color, lo que nos facilita visualizar los valores de luminancia y su distribución, esto ayudará a detectar las fuentes de deslumbramiento. A diferencia de los análisis previos, para este caso la unidad de medida de la luminancia es candela por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ), para lo que se manejó una escala de 0 a 10 000  $\text{cd}/\text{m}^2$ .

La luminancia es una medida del poder de emisión de luz de una superficie, en una dirección determinada, por unidad de superficie aparente. [...] La luminancia es quizá la magnitud más importante en el diseño de la iluminación y en la de iluminación, ya que es uno de los estímulos directos para la visión y se ha demostrado que muchas medidas de rendimiento y la percepción dependen de la luminancia. (DiLaura *et al.*, 2011, p.5.14).

Cabe señalar que en este análisis se compara el vidrio original con el SKN 176, para así evaluar el comportamiento de un vidrio de baja transmitancia visible contra uno de alto porcentaje. Es así como la parte del diagnóstico del vidrio original se muestra en la **Figura 73** y la **Figura 74**, la primera corresponde a la oficina del director y la segunda al área central. Mientras que en la **Figura 75** se observa el deslumbramiento con el vidrio SKN 176 de la oficina del director y en la **Figura 76** del área central.

Los resultados presentados en esta sección corresponden a imágenes de tipo HDR con falso color y en el análisis de resultados evaluaremos el

deslumbramiento con la métrica UGR. Las imágenes con falso color nos facilitan visualmente la interpretación, no obstante, se requieren los valores absolutos para clasificarlos de acuerdo con el UGR. En el **Anexo 3 y Anexo 4** se encuentran el conjunto de imágenes correspondientes a esta sección; se presenta la vista de pez, el deslumbramiento con valor absoluto con la percepción, así como el de falso color. El anexo 3 corresponde al deslumbramiento del vidrio original, mientras que el del anexo 4 es del deslumbramiento del vidrio SKN 176, que es el vidrio de alta tecnología. Para entender las imágenes en dichos anexos cabe señalar que corresponden a los espacios de trabajo denominados oficina del director (1) y el área central (7).

**Figura 72**

**Configuración de vistas**

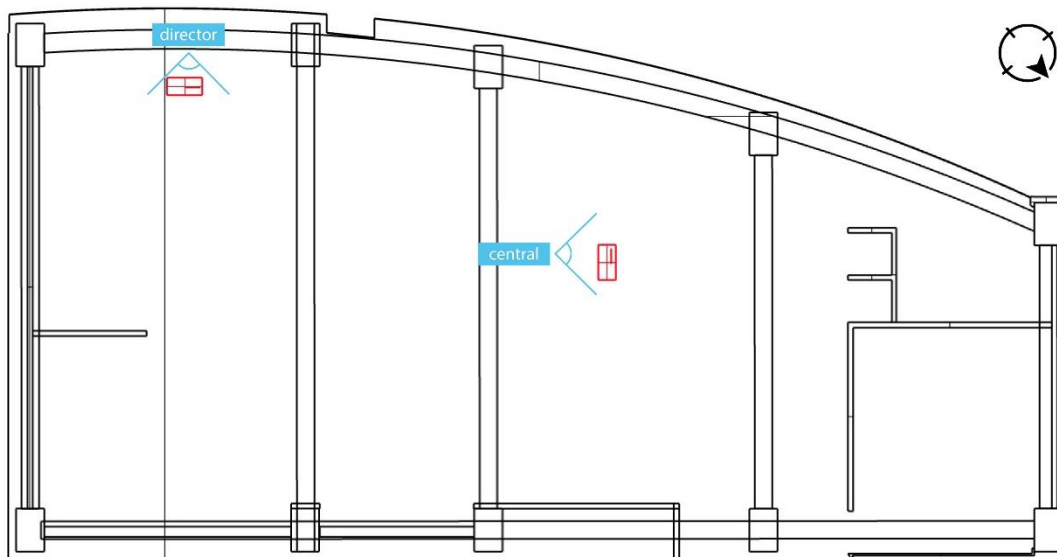


Figura 73

Diagnóstico de deslumbramiento en la oficina del director

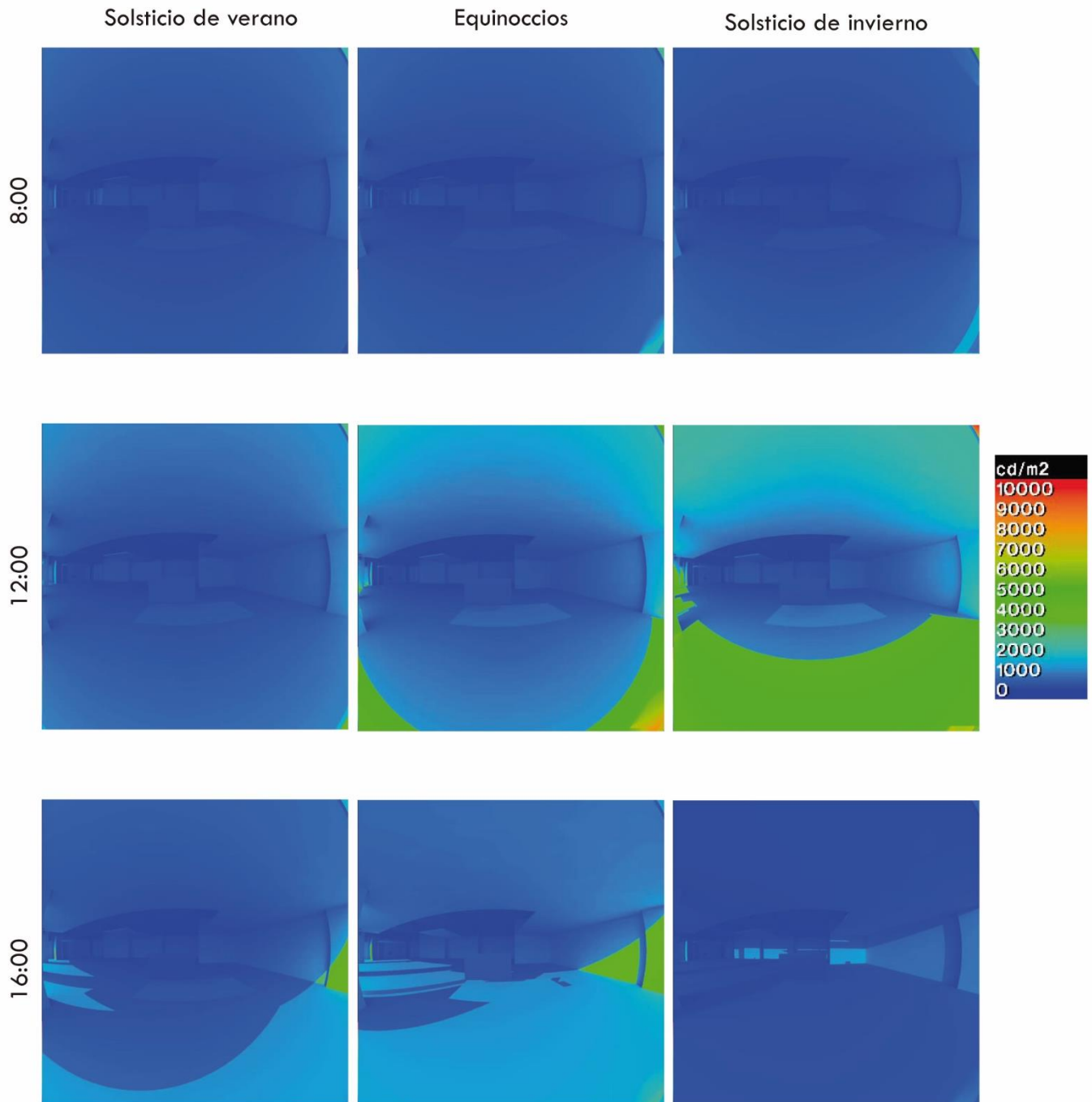


Figura 74

Diagnóstico de deslumbramiento en el área central

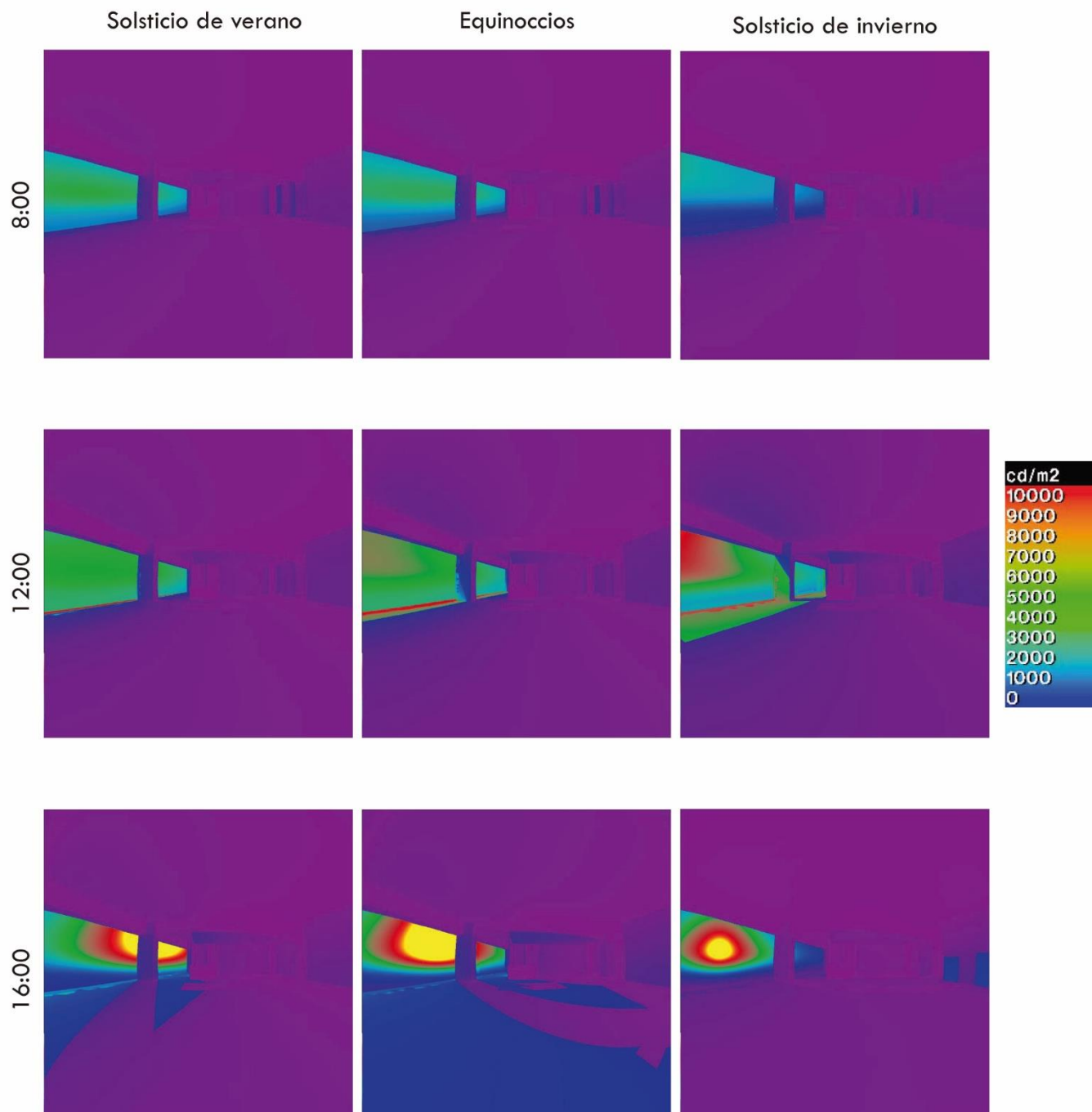


Figura 75

Deslumbramiento oficina de director

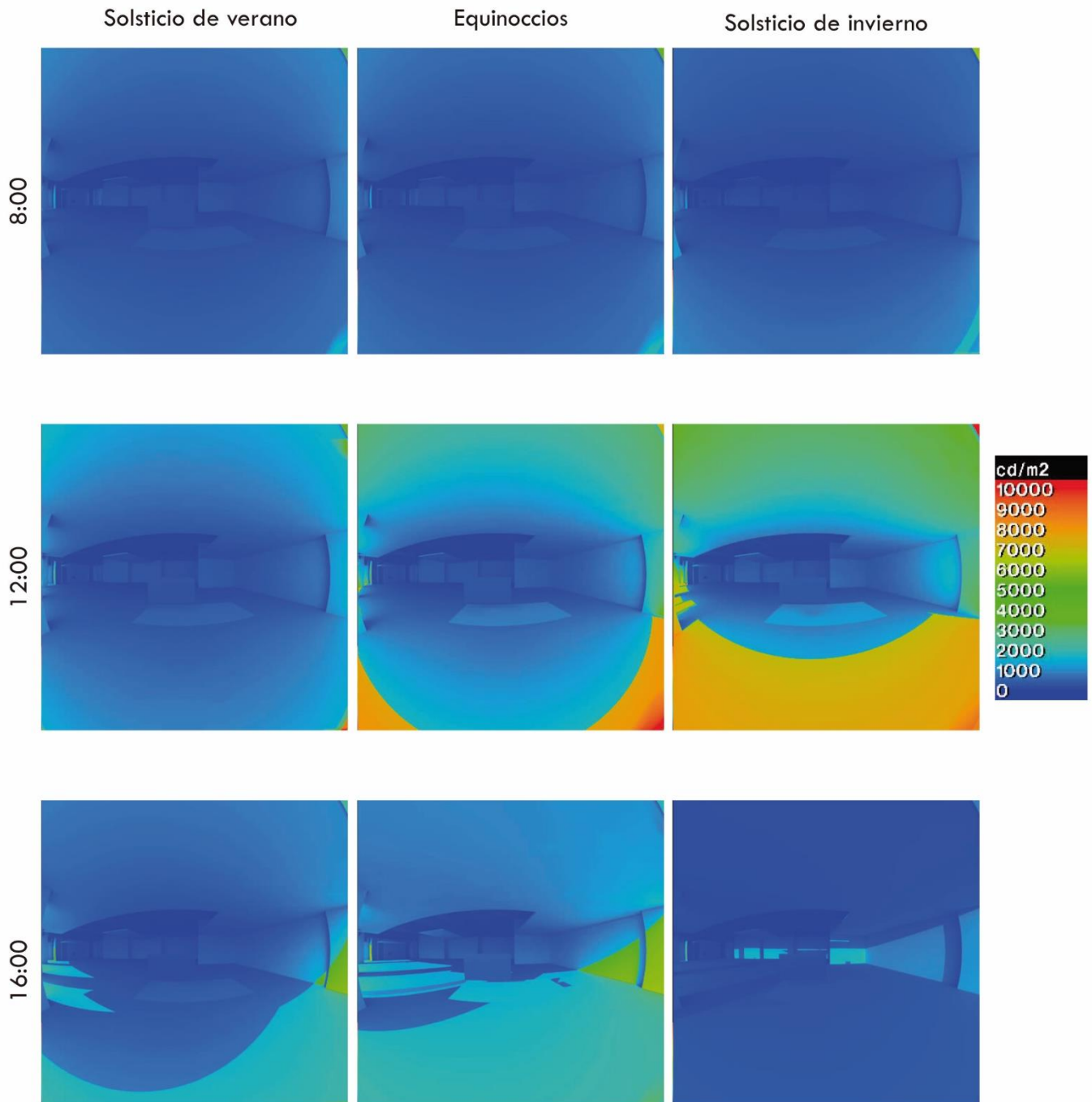
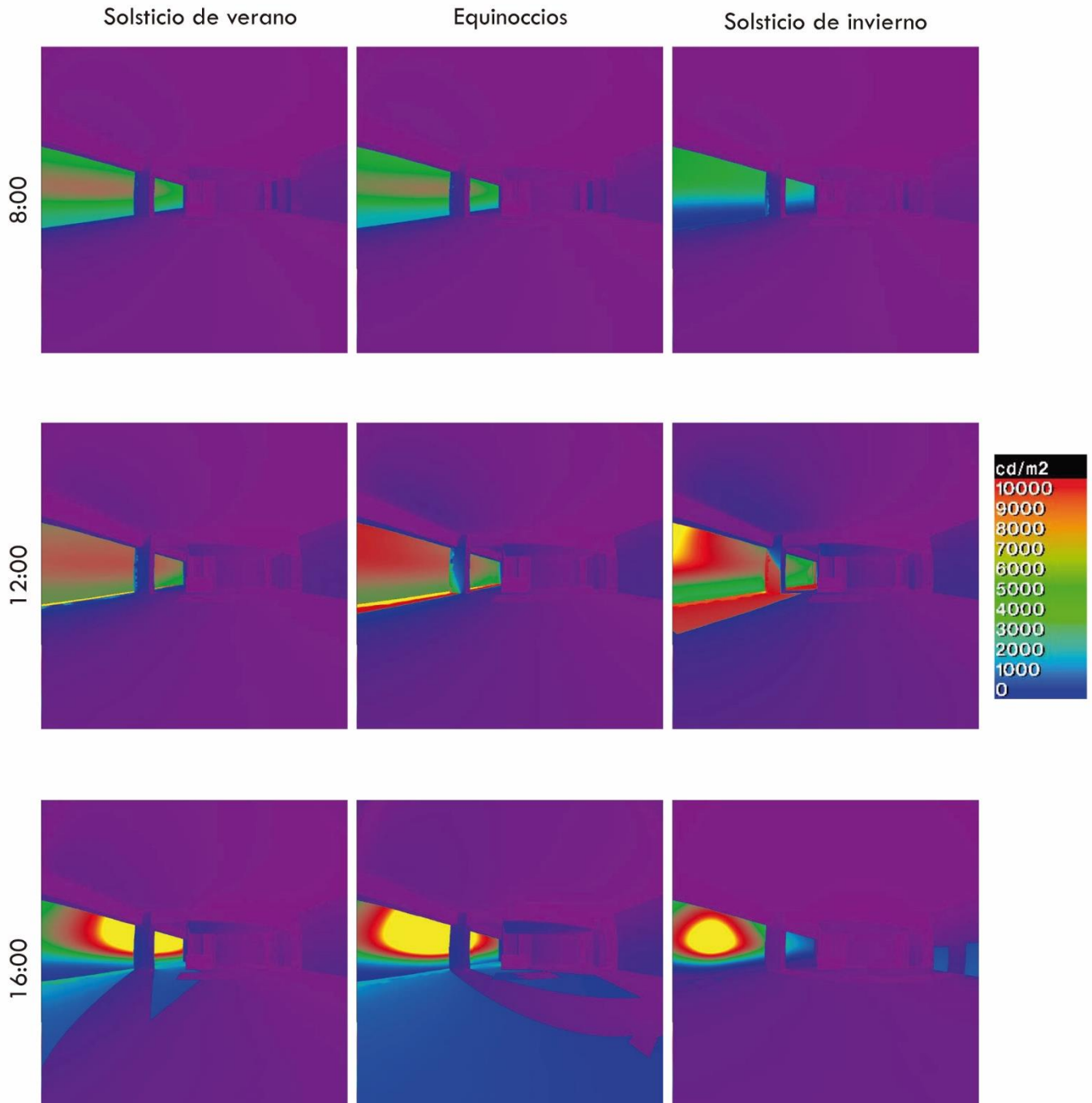




Figura 76

Deslumbramiento área central



## 5.2 Evaluación de los resultados

Para la evaluación de los resultados, primero se hizo el cálculo de iluminancias para poder determinar cuál de los tres vidrios de alta tecnología tenía mejor respuesta lumínica, comparados con el original. De esta primera evaluación, el vidrio que resultó más favorecedor fue el SKN 176. Seguido de esto se hizo el análisis de la iluminancia anual ya con el vidrio SKN 176, sin dejar de lado la comparación con el vidrio original. La última parte fue el análisis del deslumbramiento para los dos espacios de trabajo seleccionados, previamente vimos los resultados en imágenes HDR y en este apartado lo evaluaremos con valores absolutos.

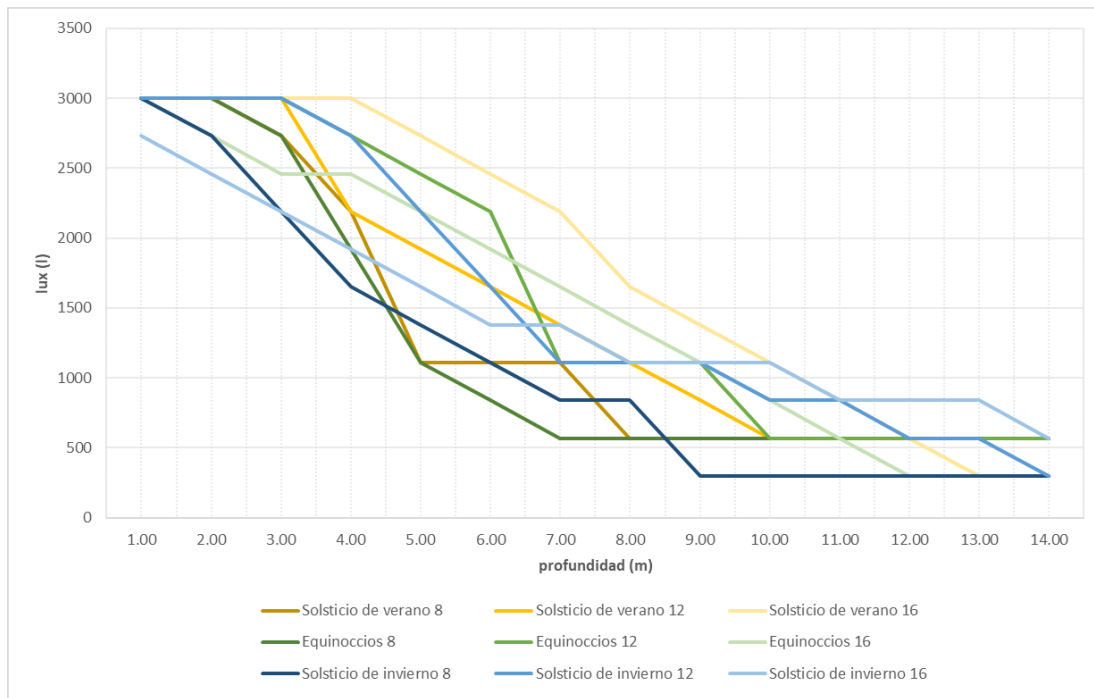
### 5.2.1 Evaluación de iluminancias

En este análisis por planos de trabajo se apreció cómo los niveles más altos de iluminancia se presentan en las áreas más próximas al vidrio, donde tenemos que hasta los 2 metros de profundidad los niveles son iguales o mayores a los 3000 lux. Que de los 2 a 4 metros hay niveles de iluminancia que van de los 1650 lux a los 2730 o 3000 en los solsticios. A partir de los 4 metros hay una evidente disminución en los niveles lumínicos, los cuales bajan drásticamente; de estos hay tres momentos donde la disminución es progresiva en relación con la profundidad, esto en el solsticio de verano a las 12:00 y 16:00 h y en el equinoccio a las 16:00 h. Mientras que en el solsticio de invierno a partir de los 9 metros a las 8:00 de la mañana los niveles lumínicos son los más bajos, manteniéndose en 300 lux hasta los 14 metros de profundidad. Niveles de iluminancia constante de 570 lux se mantienen en los equinoccios a las 12:00 y 16:00 h; en el solsticio de verano a las 8:00 y 12:00 h y en el solsticio de invierno a las 12:00 h, lo que nos indica que a las 12:00 h de los 10 a los 14 metros se requeriría iluminación complementaria. Por último, a una profundidad de 9 metros la iluminancia presenta los niveles más bajos, los cuales van de los 1110

lux a los 300 lux pues estos dependen de la época del año. A modo de resumen, de los 8 a 14 metros hay niveles bajos de iluminancia, por lo que se requerirá el uso de sistemas artificiales; en la gráfica de la **Figura 77** se muestran los resultados expuestos.

**Figura 77**

**Niveles de iluminancia en relación con la profundidad**



Asimismo, con las figuras presentadas en el apartado 5.1.1 y de las gráficas del **Anexo 1** se comprueba que el vidrio que mejor respuesta tiene es el SKN 176, esto se debe a que es el vidrio con mayor transmitancia visible. Y aunque los porcentajes sean muy similares entre sí, de los niveles registrados que se muestran en el **Anexo 2** se aprecia que la variación de lux entre cada uno es muy elevada, tanto para cada plano de trabajo (los cuales hay con menor o mayor profundidad) así como para cada temporada y horario establecido. En dicho anexo se destacan los promedios, niveles máximos y mínimos alcanzados



en este análisis. A continuación, en la **Tabla 15** se muestra la síntesis comparativa del vidrio original con el SKN 176, donde se aprecia en los promedios de iluminancia que el SKN 176 está muy por encima de los niveles recibidos con el vidrio original, claro que esto se debe a que tiene un mayor porcentaje de transmitancia.

La diferencia que se registra entre cada uno de estos vidrios va de los 621 a los 2940 lux, donde el valor máximo se da a las 12:00 h. Esta tabla síntesis hace evidente el aporte lumínico significativo que se tiene un vidrio de alta tecnología al dejar pasar más luz al interior. No obstante, en los espacios 6, 7 y 8 se nota cómo la iluminancia disminuye, esto se debe a que son espacios con mayor profundidad. Estos espacios como se vio en la Figura 48 corresponden al pasillo 1, área de trabajo y pasillo 2. De esto es importante definir estrategias para llegar a iluminar de forma natural el área de trabajo central, pues es donde la gente se encuentra trabajando. Que con base en lo presentado en la Tabla 15 se requieren de estrategias para el solsticio de verano en los tres horarios; en los equinoccios a las 8:00 y 12:00 h; finalmente en el solsticio de invierno a las 8:00 y 16:00 h; lo anterior porque es cuando presentan niveles bajos de iluminancia.

**Tabla 15**

**Tabla síntesis de niveles de iluminancia**

Niveles de iluminancia de planos de trabajo							
Espacio	Temporada	08:00		12:00		16:00	
		Original	SKN 176	Original	SKN 176	Original	SKN 176
[1]	Solsticio de verano	1985	2930	3256	4759	4158	6102
	Equinoccios	2095	3018	7276	10546	8343	12423
	Solsticio de invierno	2133	3030	14785	21948	1766	2547
[2]	Solsticio de verano	1523	2277	2343	3546	2285	3301
	Equinoccios	1568	2327	4907	7252	4253	6677
	Solsticio de invierno	1600	2337	8734	13067	1064	1537

Espacio	Temporada	08:00		12:00		16:00	
		Original	SKN 176	Original	SKN 176	Original	SKN 176
[3]	Solsticio de verano	1902	2918	3171	4969	5650	8653
	Equinoccios	1897	2834	5291	8204	7300	10754
	Solsticio de invierno	1879	2812	16003	24467	1520	2229
[4]	Solsticio de verano	2994	3724	5874	7211	11803	15417
	Equinoccios	3078	3785	28055	32655	10787	13926
	Solsticio de invierno	3714	4688	34255	43596	2034	2682
[5]	Solsticio de verano	1956	2911	3517	5219	5401	8035
	Equinoccios	1907	2834	12100	18579	7317	10672
	Solsticio de invierno	2094	3121	20235	30578	2085	2998
[6]	Solsticio de verano	764	1114	1139	1662	2154	3207
	Equinoccios	745	1075	1607	2325	3974	5798
	Solsticio de invierno	724	1052	2562	3736	946	1360
Espacio	Temporada	08:00		12:00		16:00	
		Original	SKN 176	Original	SKN 176	Original	SKN 176
[7]	Solsticio de verano	331	473	445	645	608	895
	Equinoccios	310	445	570	837	1601	2326
	Solsticio de invierno	259	372	758	1112	681	974
[8]	Solsticio de verano	292	398	341	485	286	412
	Equinoccios	264	364	397	568	453	653
	Solsticio de invierno	185	258	470	679	768	1093
<b>Promedios</b>		<b>1508</b>	<b>2129</b>	<b>7421</b>	<b>10360</b>	<b>3635</b>	<b>5195</b>
<b>Diferencia (lux)</b>		<b>621</b>		<b>2940</b>		<b>1560</b>	

### 5.2.2 Evaluación de iluminancias anuales

Por y con lo anterior, se pueden determinar las estrategias de sombreado para lograr una distribución lumínica eficiente todo el año. De la prueba anual que se mostró en la Figura 71 se interpreta que de los meses septiembre a abril se requiere de sistemas de protección solar, lo cual se define gracias al mapa temporal, ya que son los meses donde se presentan mayores niveles de iluminancia. Lo anterior también se podrá rectificar con el análisis de



deslumbramiento, donde ya podríamos identificar cuáles son las horas más críticas.

Para empezar, recordemos que el vidrio SKN 176 es el que tiene una mayor transmitancia, por ende, presenta niveles lumínicos más altos; con esto se podría especular que habrá deslumbramientos, no obstante, esto se verificará en la tercera parte del análisis. En la **Tabla 16** se muestra la clasificación de UDI descrita en las métricas dinámicas —sección 3.3, Figura 22— en esta tabla se adaptó la clasificación para que correspondan con los datos obtenidos de la simulación, de tal manera que, de cuatro tipos de UDI nos quedamos con tres para poder tener los porcentajes de la **Tabla 17**.

En la **tabla 17** observamos los valores obtenidos del UDI suplementario (s), autónomo (a) y excesivo (e), tanto para el vidrio original como para el SKN 176. En el caso del UDI-s tenemos niveles inferiores a los 300 lux el 10.30% del tiempo con el SKN 176 y el 20.82% con el original; lo anterior indica que se tendrá que complementar con iluminación artificial mayor tiempo con el vidrio original, por los bajos niveles de iluminancia que se tiene con este vidrio. Con el UDI autónomo podemos apreciar que el vidrio original tiene una utilidad del 61.41% del tiempo y el SKN 176 un 64.15%, con lo que se tiene una eficiencia superior del 2.74% durante todo el año con el vidrio de alta tecnología. Contrario al UDI-s está el UDI excesivo donde el porcentaje de éste es mayor con el vidrio SKN 176 al tener el 25.55% y 17.77% con el vidrio original; es evidente que haya un porcentaje mayor con el SKN 176 ya que tiene mayor transmitancia visible. De aquí que a mayor transmitancia mayor iluminancia, por lo que habrá que cuidar los posibles deslumbramientos.

De los tres valores analizados e interpretados se concluye que el porcentaje de utilidad en el rango autónomo es el de mayor importancia, ya que con este rango de iluminancia (300 a 3000 lux) no se requiere de iluminación artificial adicional el 64.15% del tiempo, únicamente en un 35.85% del tiempo de ocupación anual. Sumando estos resultados con los anteriores

podemos determinar que la implementación de sistemas artificiales será principalmente para la temporada de solsticios, sobre todo en el verano, seguido del invierno.

**Tabla 16**

**Clasificación UDI**

UDI-f	UDI-s	UDI-a	UDI-e
UDI-low		UDI-regular	UDI-alto

**Tabla 17**

**Comparativa de UDI**

Vidrio	UDI-s	UDI-a	UDI-e
Original	20.82%	61.41%	17.76%
SKN 176	10.31%	64.15%	25.56%

### 5.2.3 Evaluación de deslumbramiento

Derivado de las imágenes presentadas en la sección 5.1.3 podemos determinar de forma visual que es el área central la que presenta mayor variación lumínica con ambos vidrios —tanto el original como el SKN 176. En las **Tablas 18 y 19** observamos los niveles de deslumbramiento registrados, así como el tipo de clase al que pertenecen de acuerdo con la clasificación de *Wienold (2009)*.

La **tabla 18** muestra los valores del vidrio original, donde nos damos cuenta de que sólo hay deslumbramiento en tres momentos del año. El primero se presenta en el solsticio de invierno a las 12 en la oficina del director con un deslumbramiento de tipo perturbador, clasificación C. El segundo es en los equinoccios a las 16:00 h para el área central donde el deslumbramiento es perceptible tipo B. El tercero se da de igual forma en el área central en el solsticio de invierno a las 16:00 h de forma perturbadora. Lo que resta del año tienen una clasificación A que es deslumbramiento imperceptible. Los niveles



bajos de deslumbramiento con el vidrio original se asocian a su bajo porcentaje de transmitancia.

En la **tabla 19** se muestran los valores del vidrio SKN 176 donde el deslumbramiento se presenta en seis momentos del año, la mayoría corresponden al área central. Para la oficina del director tenemos que en el solsticio de verano todo el tiempo es tipo A, lo que significa que hay un deslumbramiento imperceptible. En los equinoccios a las 16:00 h hay un deslumbramiento de tipo B, que es perceptible. Por otro lado, en el solsticio de invierno a las 12:00 h hay un deslumbramiento C que es perturbador. Para el área central en el solsticio de verano a las 16:00 h hay un deslumbramiento perceptible; para los equinoccios a las 16:00 h hay un deslumbramiento perturbador, clase C. Finalmente, en el solsticio de invierno a las 12:00 y 16:00 h hay un deslumbramiento que es perceptible y perturbador, respectivamente. Con este vidrio hay mayor deslumbramiento, lo que se debe al alto porcentaje de transmitancia que tiene.

**Tabla 18**

**Valores DGP del vidrio original**

Fecha y horario		Oficina de director			Área de trabajo central		
		Valor	DGP		Valor	DGP	
Solsticio de verano	08:00	0.197851	A		0.252597	A	
	12:00	0.218676	A		0.274937	A	
	16:00	0.220421	A		0.327611	A	
Equinoccios	08:00	0.196976	A		0.247406	A	
	12:00	0.25114	A		0.289889	A	
	16:00	0.295569	A		0.363525	B	
Solsticio de invierno	08:00	0.19298	A		0.217316	A	
	12:00	0.410338	C		0.315346	A	
	16:00	0.201057	A		0.549555	C	



Tabla 19

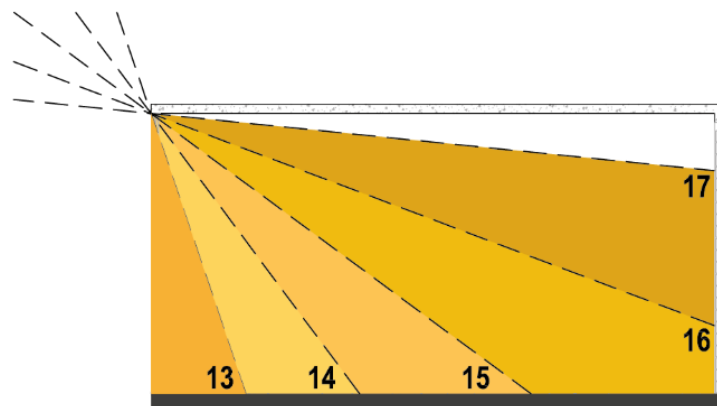
Valores DGP del vidrio SKN 176

Fecha y horario		Oficina de director			Área de trabajo central		
		Valor	DGP		Valor	DGP	
Solsticio de verano	08:00	0.216362	A		0.284348	A	
	12:00	0.246280	A		0.315459	A	
	16:00	0.250607	A		0.390275	B	
Equinoccios	08:00	0.214565	A		0.280533	A	
	12:00	0.297372	A		0.335143	A	
	16:00	0.365325	B		0.450035	C	
Solsticio de invierno	08:00	0.208996	A		0.249905	A	
	12:00	0.572083	C		0.377452	B	
	16:00	0.219994	A		0.596985	C	

En ambos vidrios en el solsticio de invierno es donde se percibe más deslumbramiento, lo que se debe a la forma en la que inciden los rayos del Sol, ya que los rayos tienen un ángulo de inclinación menor, por lo que entran de forma más directa al interior conforme avanza la tarde; esto se puede entender mejor con la **Figura 78** donde se aprecia la inclinación de los rayos solares. Con lo expuesto anteriormente, se demuestra que para el invierno es cuando se requerirían elementos de protección solar.

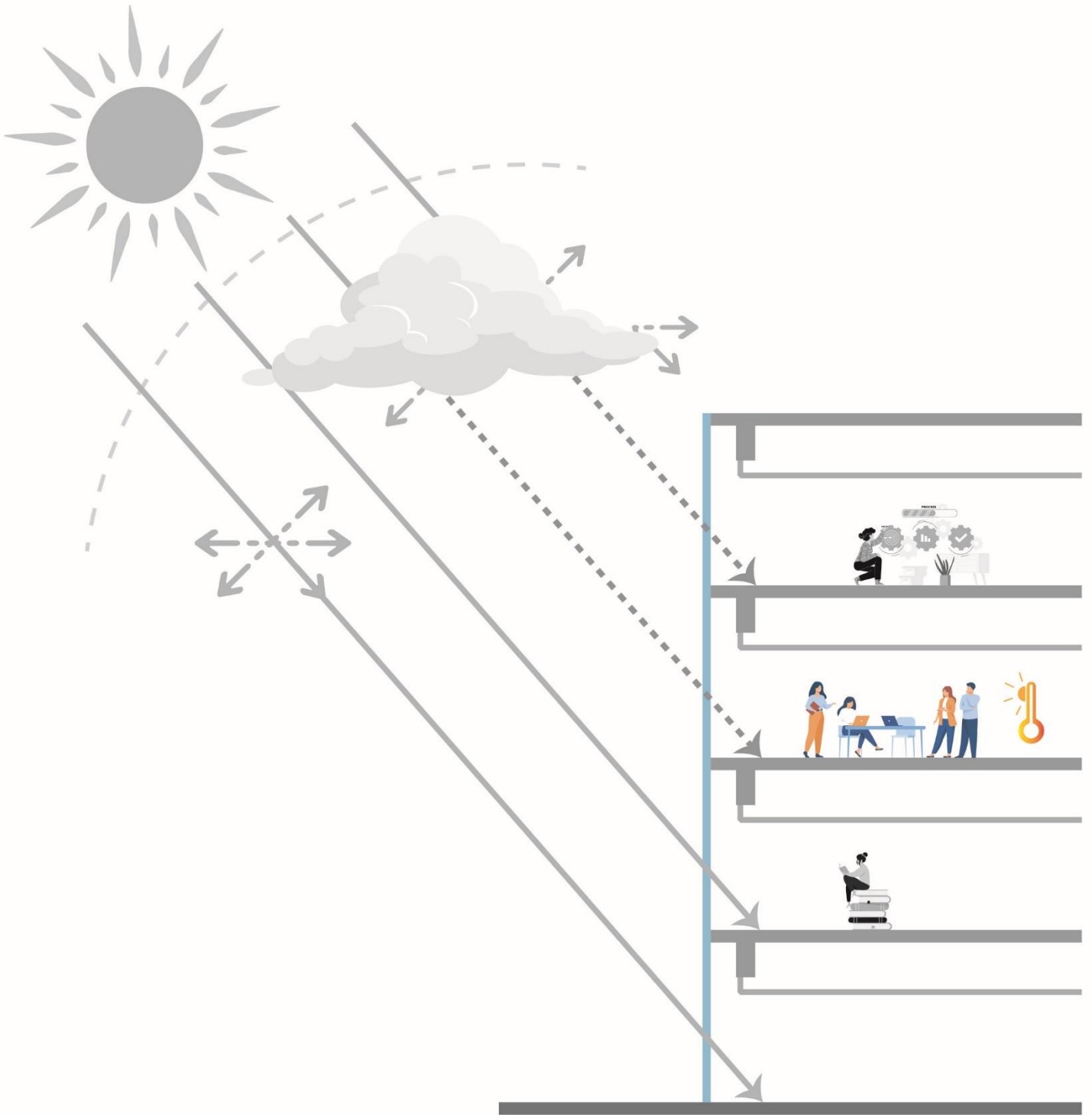
Figura 78

Inclinación de rayos solares en solsticio de invierno



**CONCLUSIONES  
Y  
APORTACIONES**

**CAPÍTULO 6**



## 6.1 Conclusiones

La luz natural es un recurso inagotable que prevalecerá durante muchos años más en la existencia del ser humano, nuestros antepasados honraban la naturaleza y todo lo que ésta tenía para ofrecernos, con el paso de los años, se nos ha ido olvidando ese respeto y valor que antes se les daba a los recursos naturales. Puesto que con el avance tecnológico muchos de los recursos han sido explotados de sobre manera para satisfacer las necesidades y exigencias del ser humano. El sol no es un recurso que podamos agotar fácilmente, no obstante, deberíamos hacerlo, pero más que eso, hay que aprovecharlo, ya que le podemos sacar mucha ventaja a lo que nos ofrece y hacerlo resultaría un beneficio global. Si aprovechamos la luz natural en las construcciones y en los espacios interiores estaríamos contribuyendo a reducir el consumo energético, lo que favorece al medio ambiente, asimismo, hay un beneficio para las personas que habitan los espacios, dado que gozan del acceso a la luz natural. Lo anterior tiene como resultado un mejor ánimo y un incremento en la productividad de los trabajadores en espacios laborales; razones suficientes para aprovechar este increíble recurso y garantizar así el acceso de la luz natural al interior.

El usar vidrios de alta tecnología tiene una gran ventaja porque permite un alto porcentaje de transmisión de luz al interior de los espacios, no obstante, esto puede representar mayor deslumbramiento, con lo cual, generalmente, surge un incremento en la cuestión térmica —algo que se tendría que comprobar más adelante. Otro factor importante, en cuanto al vidrio, son sus propiedades físicas y químicas, con esta investigación se logró comprobar la eficiencia lumínica a través del porcentaje de transmitancia, el único valor modificable en la simulación, con lo que se demostró que no se logra una distribución uniforme de la luz en la profundidad. Por lo anterior, habría que hacer pruebas en físico con el material, evaluar las propiedades físicas y químicas de éste para comprobar si puede funcionar como control solar y térmico. De lo que se destaca en esta investigación son las características en las que debemos poner atención

al seleccionar un vidrio y cómo estas interactúan con los rayos solares. Aunado a esto, se vio el espectro visible y cómo es la interrelación de los rayos solares a través del vidrio, donde queda claro que una parte de la radiación solar incidente se refleja y otro tanto se transmite. Es importante evaluar y analizar el porcentaje que se transmite en un vidrio de alta tecnología, ya que éste puede controlar la incidencia solar y reflejar un alto porcentaje. En síntesis, un vidrio de alta tecnología permite mayor ingreso de luz, pero no garantiza la distribución uniforme, además no evita el deslumbramiento.

En esta investigación se resalta la importancia de conocer el recurso lumínico natural, la incidencia y transmitancia de luz, ya que es fundamental tener iluminación natural el mayor tiempo posible de la ocupación de un espacio. Si mantenemos los niveles de iluminancia entre 300 y 3000 lux no será necesario el uso de sistemas de iluminación artificial gran parte del día. En caso de requerir el uso de sistemas artificiales habrá que analizar la distribución lumínica, para identificar los horarios en los que realmente es necesaria, así como un sistema controlado y seccionado, principalmente cuando se trata de espacios profundos, pues como se vio con esta investigación y como puede parecer lógico es que a mayor profundidad menor iluminancia natural. Por consiguiente, hay que conocer el valor de esta disminución para poder evaluar dónde se requiere la implementación de sistemas artificiales y ver de qué manera se puede redirigir la luz para que llegue a los espacios más profundos respetando la relación altura-profundidad.

En cuanto a la profundidad del espacio retomemos la fórmula para esta relación que vimos en la página 61, dicha fórmula se contrasta con la regla de oro de la iluminación natural para una incidencia lateral. Con la fórmula de la profundidad del espacio tenemos que  $6.32 < 4.00$ , lo que significa que la iluminancia efectiva debería llegar a los 6.32 m, en cambio, en la simulación se refleja que llega a los 7.00 m, aunque matemáticamente la profundidad aceptable en relación con la altura de la ventana (2.40 m) es de 4.00 m. Por otro lado, con la regla de oro, la cual establece que la profundidad puede ser



1.5 o 2.0 veces la altura de la ventana nos da como resultado 3.60 y 4.80 m respectivamente; lo que representa el área efectiva de iluminación natural en la profundidad. Con lo anterior, por ecuaciones matemáticas tenemos 3.60, 4.00 y 4.80 m como una profundidad aceptable con niveles de iluminancia efectiva. En el caso de estudio que se consideró para este trabajo es a partir de los 7 m donde bajan los niveles de iluminancia, o sea, a la mitad del espacio, por lo que de los 7 a los 14 metros habrá que optar por utilizar sistemas de iluminación artificial, pero hay que estudiar las secciones que lo requieren, por lo que un uso de iluminación artificial automatizada resultaría una buena solución. Si hay que optar por el uso de sistemas automatizados y controlados, se deberá hacer un estudio de dónde se necesita, ya sea zona, tiempo y horario en específico que requieran de estos sistemas.

Por otro lado, se comprobó que ni el vidrio con el mayor porcentaje de transmitancia alcanza el 75% de iluminancia, porcentajes que se mencionan en las certificaciones LEED y WELL, pero que hacen referencia a la métrica sDA, la cual mide el porcentaje de área iluminada; mientras que el UDI mide el porcentaje de tiempo que es iluminado un espacio. Dicho lo anterior, habría que evaluar los resultados con la métrica sDA, ya que con UDI sólo llegamos al 64.15% de utilidad en el rango autónomo, pero en los porcentajes del sDA que representaría este 64.15% pues en UDI resultó ser un porcentaje anual aceptable si consideramos el tiempo de ocupación. Al plantear el uso de protecciones solares, los cuales al igual que la iluminación artificial debería ser automatizado y bajo un análisis profundo, ya que como se identificó en la problemática, los usuarios utilizan persianas y esto bloquea el paso de la luz natural. Si se utilizan elementos automatizados basados en un estudio de la iluminación natural, se podrá permitir el paso de la luz más tiempo y en los momentos más críticos en cuanto al deslumbramiento disminuir la entrada de luz. Estos sistemas automatizados de protecciones solares e iluminación permitirán aprovechar la luz natural el mayor tiempo posible y utilizar los sistemas artificiales cuando realmente se necesite y donde se requiera, con lo que podría

incrementar el porcentaje de utilidad. Una de las ventajas que representa el usar elementos de protección de forma inteligente y analizada es que la incidencia solar se reflejará y podrá permitir el paso del componente difuso de la luz natural, lo cual podría disminuir los niveles de deslumbramiento, cabe destacar que esto se podría lograr con el vidrio de alta tecnología, pero habría que hacer pruebas físicas del material. No hay que dejar de lado que en México hace falta la actualización de la normativa, donde se incluyan los valores absolutos de iluminación natural; con esto podríamos determinar cuándo tenemos una iluminancia aceptable y cuándo se presenta el deslumbramiento.

Para aprovechar la luz natural es importante conocer sus características en el sitio geográfico, conocer su disponibilidad, por lo que las mediciones son importantes. Conformar un archivo climático implica años de mediciones, mínimo 12, para obtener datos sintetizados de luz natural, para integrar estos datos en las simulaciones por computadora ha llevado años perfeccionar las técnicas para su fácil y rápida interpretación. En la actualidad contamos con diversos formatos para los archivos climáticos, pero el más utilizado es el EPW, en nuestro país ha crecido la recopilación de este tipo de datos, por lo que fue posible extraer este archivo en años recientes de medición —recientes para el periodo en el que se llevó a cabo la investigación. Si bien, hay muchos programas capaces de leer este tipo de archivos la cuestión es saber interpretarlos y manejar de la mejor manera la información, para así hacer el análisis pertinente del sitio y sus condiciones particulares, entre ellos los niveles de incidencia solar.

Las simulaciones por computadora representan muchas ventajas y en México no hay mucha aplicación de ellas en temas de iluminación natural, como lo hay en otros países, por lo que resulta importante incluirlas en el proceso de diseño. Una vez que se tienen dominados los programas de simulación hay mucha información que se puede obtener y aprovechar. Nuestro país tiene mucho camino que recorrer en cuanto a la simulación lumínica, nada que no pueda ser posible, y nada que no se pueda igualar con lo que otros países tienen en este ámbito. Hoy en día las simulaciones son una forma de representación gráfica en



el mundo de la arquitectura y la iluminación no se debe quedar atrás, por lo que es importante que nos actualicemos en este campo y adquiramos las habilidades necesarias para llevar a cabo estos estudios que están a favor del medio ambiente, de las personas y la calidad de habitar los espacios. Crear consciencia y revalorar los recursos naturales es algo que debemos hacer en estos días, ya que hemos explotado al planeta y es momento de aprovechar la tecnología para regresarle un poquito de lo mucho que le hemos quitado.

Para finalizar, la hipótesis y objetivos que se plantearon se cumplieron y abrieron paso a nuevas líneas de investigación —las cuales se abarcarán más adelante. De la hipótesis la parte del aprovechamiento de la iluminancia se comprobó y el resultado fue positivo; en cuanto al deslumbramiento resultó negativo. Empecemos por el aprovechamiento de la iluminancia natural que tuvo como resultado un 64.15% de utilidad en el rango autónomo con una eficiencia superior del 4.15% del tiempo anual que se planteó en la hipótesis y superó en un 2.74% la eficiencia del vidrio original con lo que podemos decir que fue un resultado aceptable. No obstante, esto no significó menor deslumbramiento, si no que, todo lo contrario, hay mayores niveles de deslumbramiento con un vidrio de mayor transmitancia, que es lo opuesto a lo que se planteó en la hipótesis. De lo anterior, se puede afirmar que la relación es directamente proporcional, a mayor transmitancia de luz mayor es el deslumbramiento.

Los objetivos se cumplieron, pues el general era evaluar la transmitancia visible a través del porcentaje de un vidrio de alta tecnología y destacar la utilidad lumínica que se tenía en una jornada laboral dentro de una oficina de Torre Esmeralda I, por lo que para poder cumplir con este objetivo se utilizó la métrica UDI, ya que considera niveles de luz excesiva, se seleccionaron los vidrios de alta tecnología para la evaluación. Esto, a su vez nos llevó a definir el rango autónomo para poder cumplir con el objetivo específico donde se quería probar que los niveles pueden estar en un rango de 300 a 3000 lux el 60% del tiempo, y se comprobó esto con una eficiencia superior al haber llegado al 64.15% de utilidad anual. Finalmente, el objetivo metodológico se llevó a cabo con la



simulación por computadora y se utilizó el programa Honeybee el cual nos permitió evaluar tanto la iluminancia como el deslumbramiento.

## 6.2 Aportaciones

Una de las aportaciones es la metodología para la evaluación de iluminancias a través de simulaciones por computadora con el programa Honeybee. Se abarcó la iluminancia por planos de trabajo, iluminancias anuales y deslumbramiento, este último es una evaluación poco común en nuestro país. La metodología que se desarrolló fue con un programa que está totalmente validado ante la comunidad científica. Esta investigación se centró en la evaluación lumínica a través del porcentaje de transmitancia visible de un vidrio de alta tecnología, valor modificable en la simulación.

Otra aportación es poner en práctica el uso de herramientas para el análisis de archivos climáticos de tipo EPW, los cuales han ido creciendo en la compilación de datos, actualmente en México hay registros para los 32 estados de la República Mexicana y se puede disponer de estos archivos desde la base de datos de Energy Plus, dentro de esta base la Ciudad de México cuenta con dos estaciones. Saber utilizar, leer e interpretar estos datos con las diversas herramientas nos pueden ayudar a realizar análisis más rápidos y eficaces a favor del diseño bioclimático.

Finalmente, está la implementación del uso de los vidrios de alta tecnología para aprovechar iluminancias en niveles de 300 a 3000 lux. Lo ideal sería acompañar estos vidrios con sistemas automatizados de protecciones solares e iluminación artificial, con el debido análisis para determinar los días, horas y espacios que requieran de estos sistemas, ya que el uso de estos vidrios no garantiza una distribución uniforme en espacios profundos.



### 6.2.1 Futuras líneas de investigación

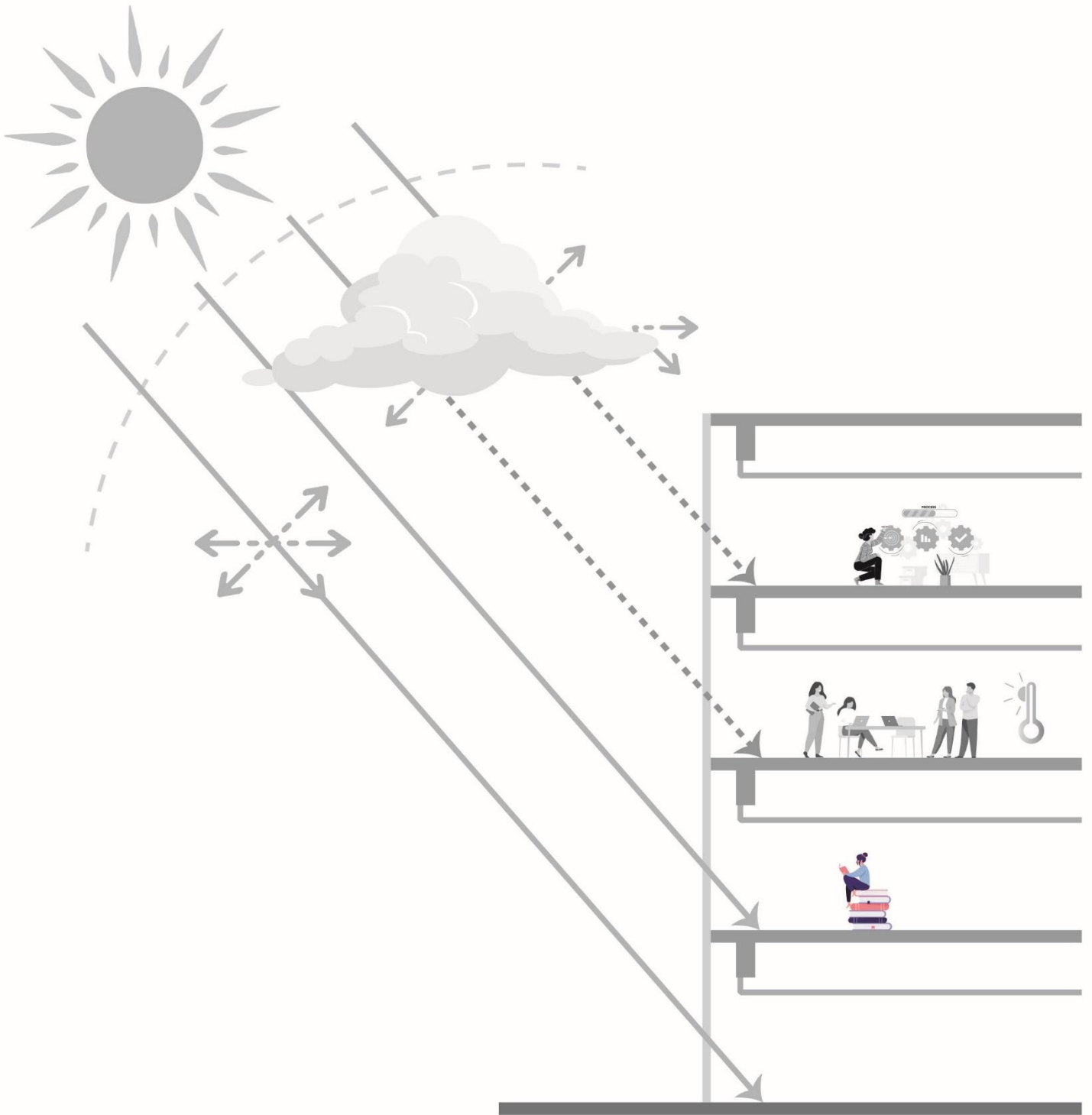
1. **Pruebas en un modelo a escala.** Hacer un modelo a escala para evaluar el vidrio de alta tecnología, ya que con la simulación sólo se pudo evaluar el porcentaje de transmitancia. Con un modelo a escala se podrían evaluar las demás propiedades del vidrio, entre ellas su respuesta térmica, asimismo, la interacción que tiene con la radiación solar y el espectro visible. Por otro lado, se puede evaluar el vidrio de doble y triple capa, ya que la respuesta lumínica no será la misma, en esta investigación el que tuvo mayores niveles de iluminancia fue uno de doble capa con una transmisión de luz del 68%. Pero qué pasaría si evaluamos el de triple capa con una transmisión igual del 68%, o bien, con el del 59% que se consideró en la simulación ¿La capa adicional daría una mejor distribución lumínica?
2. **Mediciones de iluminancia en sitio.** Las mediciones en sitio son comunes en México, esto quiere decir que no es un tema nuevo, pero poco se ha trabajado con simulaciones por computadora. La simulación nos arrojó datos muy acertados y claros, pero qué pasaría si hiciéramos un análisis con mediciones *in situ*, ¿los niveles de iluminancia serán los mismos? Es una pregunta que vale la pena resolver, colocar sensores reales y determinar las zonas que requieran atención, que si bien, con la simulación se detectaron habrá que contrastar la información con medidas reales.
3. **Cálculo energético con simulaciones por computadora.** A través de esta investigación se demostró que los vidrios de alta tecnología no evitan el deslumbramiento y que además pierden niveles de iluminancia en la profundidad; pero no se analizó el aspecto térmico. Por lo anterior será importante saber qué pasa cuando tenemos una iluminancia de 300 a 3000 lux, porque si bien, estos niveles son los óptimos para realizar actividades sin necesidad de implementar iluminación artificial, faltaría analizar qué pasa con la comodidad térmica. Estos cálculos se pueden

llevar a cabo con el mismo programa de Honeybee usando los elementos correspondientes a *HB-Energy*; asimismo evaluar el aspecto térmico con esta relación de la profundidad del espacio.





**REFERENCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS**



- Amstock, J. (1999). *Manual del vidrio en la construcción*. McGraw-Hill.
- Arias, S., y Ávila, D. (2004). *La iluminación natural en la arquitectura (en climas semitemplados)*. Universidad de Guadalajara.
- Arnal, L., y Betancourt, M. (2014). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Trillas.
- Ayllón, T. (2003). *Elementos de meteorología y climatología* (2a ed.). Trillas.
- Baena, G. (2017). *Metodología de la investigación* (3a ed.). Grupo Editorial Patria.
- Baracho, A. S., Cruz, F., y C. de Macedo, C. (2003). Evaluación de la iluminación natural hacia el interior de aulas a través del simulador DESKTOP RADIANCE 2.0. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7(2), 01-06.
- Barrera, F. (s.f.). *Historia del vidrio*. Recuperado el 30 de noviembre de 2021, de Saint-Gobain: <https://mx.saint-gobain-glass.com/es-MX/historia-del-vidrio>
- Berkeley University of California. (2022). *Center for the Built Environment (CBE)*. Recuperado el 08 de julio de 2022, de <https://cbe.berkeley.edu/research/clima-tool/>
- Boubekri, M. (2008). *Daylighting, Architecture and Health*. Architectural Press.
- Boyce, P., Hunter, C., y Howlett, O. (2003). *The benefits of daylight through windows*. U.S. Department of Energy.
- Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., y Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1016-1033.
- Cetto, A. (1996). *La luz en la naturaleza y en el laboratorio*. Fondo de Cultura Económica.
- Chi, D. (2017). *Iluminación natural a través de protecciones solares perforadas en fachadas vidriadas: criterios de diseño* [Tesis de doctorado]. Escuela Internacional de Doctorado (eidUS).
- Chi, D. (2019). Revisión de índices para la evaluación de la iluminación natural en espacios interiores. *Entorno UDLAP*(8), 4-13.
- Chi, D. (2021). *Iluminación natural a través de ventanas. Criterios de diseño para climas de México*. Universidad de las Américas Puebla.
- Climate Consultant. (2021). 6.0.15. Software de ordenador.
- Commission Internationale de L'Éclairage -CIE-. (1986). *Guide on interior lighting* (2a ed.). Central Bureau of the CIE.
- CONAGUA. (s.f.). *Normales Climatológicas por Estado*. Recuperado el 20 de mayo de 2022, de Comisión Nacional del Agua: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=df>
- Díaz, A. (2021). *Iluminación natural en planos verticales y potencial circadiano para la Ciudad de México* [Tesis de maestría]. TESIUNAM.

- DiLaura, D., Houser, K., Mistrick, R., y Steffy, G. (2011). *The lighting handbook* (10 ed.). Illuminating Engineering Society.
- EnergyPlus. (s.f.). *Weather data*. Recuperado el 11 de marzo de 2022, de <https://energyplus.net/weather>
- EnergyPlus. (s.f.). *Weather Data*. Recuperado el 21 de abril de 2022, de EnergyPlus: <https://energyplus.net/weather>
- Esquivias, P. (2017). *Iluminación natural diseñada a través de la arquitectura: análisis lumínico y térmico en base climática de estrategias arquitectónicas de iluminación natural* [Tesis de doctorado]. Depósito de Investigación Universidad de Sevilla (idUS).
- Fernández, A. (2006). Uso de programas informáticos para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios, mediante una adecuada elección del acristalamiento de vidrio. *Grupo Energía, Edificación y Patrimonio*, 1-16.
- García, E. (1968). *Los climas del Valle de México* (Vol. 6). Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5a ed.). Instituto de Geografía-UNAM.
- Glasstech. (s.f.). *Fachadas y muros cortina*. Recuperado el 28 de abril de 2022, de Glasstech: [https://neufert-cdn.archdaily.net/uploads/product\\_file/file/2394/Glasstech\\_MurosCortina.pdf](https://neufert-cdn.archdaily.net/uploads/product_file/file/2394/Glasstech_MurosCortina.pdf)
- Gómez, C. (2022). Aprovechamiento de la luz natural en edificios de la Ciudad de México. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 10(Especial2),109-116. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial2.8693>
- Guadarrama, C. (2017). *Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño* [Tesis de doctorado]. TESIUNAM.
- Guadarrama, C. (2020). Nubes, tipos de cielo y clima local. *Comp*, p. 30. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Inanici, M. (2001). Application of the state -of-the-art computer simulation and visualization in architectural lighting research. *Building Simulation*, 1175-1182.
- INEGI. (2022). *Cuéntame de México. Territorio*. Recuperado el 17 de octubre de 2022, de Coordenadas extremas: <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/coordenadas.aspx?tema=T>
- INEGI. (s.f.). *Cuéntame de México. Territorio*. Recuperado el 28 de enero de 2022, de <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/climas.aspx?tema=T>



- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2005). *Guía técnica para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios*. Madrid: IDAE.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press.
- Jáuregui, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México*. Plaza y Valdés Editores.
- Lechner, N. (2015). *Heating, cooling, lighting. Sustainable design methods for architects (4a ed.)*. Wiley.
- Lira, A., & Guevara, A. (s.f.). *Laboratorio de Edificación Sostenible | LES*. [http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/07/180515\\_Practica3\\_LES.pdf](http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/07/180515_Practica3_LES.pdf)
- Mardaljevic, J. (2012). Daylight, Indoor Illumination, and Human Behavior. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 69-111. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_456](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_456)
- Mardaljevic, J., Andersen, M., y Christoffersen, J. (2012). Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability?
- Marín, P. (2018). *Qué es la iluminación circadiana y cuáles son sus beneficios*. Recuperado el 12 de mayo de 2022, de iluminet: <https://www.iluminet.com/que-es-iluminacion-circadiana/>
- Marsh, A. (2019). *3D Sun-Path (0.0.6)*. Software de ordenador: <http://andrewmarsh.com/software/sunpath3d-web/>
- Maya, E. (2014). *Métodos y técnicas de investigación. Una propuesta ágil para la presentación de trabajos científicos en las áreas de arquitectura, urbanismos y disciplinas afines*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales, L. (2017). *El vidrio en la edificación. Propiedades, aplicaciones y estudios de fracturas en casos reales*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Nabil, A., y Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*. <https://doi.org/10.1191/1365782805li128o>
- Olgay, V. (1998). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas (15a ed.)*. Gustavo Gili.
- Olvera, R. (s.f.). *Buscando el balance ideal en iluminación: Equilibrio entre LEED y Well Building*. Recuperado el 05 de agosto de 2022, de Bioconstrucción y energía alternativa: BEA: <https://bioconstruccion.com.mx/equilibrio-entre-leed-y-well-building/>
- Organización Meteorológica Mundial. (s.f.). *International cloud atlas*. Recuperado el 20 de diciembre de 2021, de <https://cloudatlas.wmo.int/es/appearance-of-clouds.html>
- Pattini, A. (2000). Recomendaciones de niveles de iluminación en edificios no residenciales. Una comparación internacional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, 7-12.



- Pattini, A. (2006). Luz natural e iluminación de interiores. En E. Argentina, *Manual de iluminación eficiente* (pp. 2-24). Buenos Aires. edUTecNe: <http://www.edutecne.utm.edu.ar/eli-iluminacion/eli.html#libro>
- Poirazis, H., Blomsterberg, A., y Wall, M. (2008). Energy simulations for glazed office buildings in Sweden. *Energy and Buildings*, 40, 1161-1170.
- Reinhart, C. (2010). *Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design*. Harvard University.
- Reinhart, C. (2014). *Daylighting Handbook I: Fundamentals designinig with the Sun*. Building Technology Press.
- Reinhart, C. (2018). *Daylighting Handbook II: Daylighting simulations and dynamic facades*. Building Technology Press.
- Reinhart, C., & Fitz, A. (2006). Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. *Energy and Buildings*(38), 824-835.
- Reinhart, C., Doyle, S., Alstan, J., y Mogri, R. (s.f.). *Glare Analysis of Daylit Spaces: Recommendations for Practice*. Recuperado el 25 de junio de 2022, de MIT: [http://web.mit.edu/tito\\_/www/Projects/Glare/GlareRecommendationsForPractice.html](http://web.mit.edu/tito_/www/Projects/Glare/GlareRecommendationsForPractice.html)
- Riveros, D., Valdés, M., y Arancibia, C. A. (2012). *La radiación solar*. Terracota.
- Robinson, A., y Selkowitz, E. (2013). *Tips for daylighting with windows*. Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL).
- Saint-Gobain. (2016). *Indoor environment and Well-Being. The Saint-Gobain Multi-Comfort comic book*. issuu: [https://issuu.com/gyprocthailand/docs/2020indoor\\_environment\\_\\_\\_well-being\\_saint-gobain\\_m](https://issuu.com/gyprocthailand/docs/2020indoor_environment___well-being_saint-gobain_m)
- Saint-Gobain. (2018a). *SGG COOL LITE XTREME*. Recuperado el 01 de diciembre de 2021, de Saint-Gobain: <https://mx.saint-gobain-glass.com/es-MX/sgg-cool-lite-xtreme>
- Saint-Gobain. (2018b). *SGG COOL-LITE SKN*. Recuperado el 01 de 12 de 2021, de Saint-Gobain: <https://mx.saint-gobain-glass.com/es-MX/sgg-cool-lite-skn>
- Saint-Gobain. (2019). *Saint-Gobain inaugura nuevo Coater Jumbo*. Recuperado el 01 de diciembre de 2021, de Saint-Gobain: <https://mx.saint-gobain-glass.com/es-MX/saint-gobain-inaugura-nuevo-coater-jumbo>
- Saint-Gobain. (s.f.). *Asesoramiento técnico- Características técnicas gama de control solar Cool-Lite*. Recuperado el 01 de diciembre de 2021, de Saint-Gobain: <https://es.saint-gobain-building-glass.com/es/asesoramiento-tecnico-caracteristicas-tecnicas-gama-de-control-solar-cool-lite>
- Secretaría de Trabajo y Previsión Social . (2008). *Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*. Diario Oficial de la Federación: <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3581/stps/stps.htm>



- Solemma. (s.f.). *ClimateStudio*. <https://www.solemma.com/climatestudio>
- Solemma. (s.f.). *Why is ClimateStudio so fast?* Recuperado el 23 de julio de 2022, de <https://www.solemma.com/climatestudio/speed>
- Tamayo, T. M. (2021). *El proceso de la investigación científica. Incluye evaluación y administración de proyectos de investigación* (5a ed.). LIMUSA.
- Tecnoenergía. (2018). *Tecnoenergía alternativa de México*. Recuperado el 18 de enero de 2022, de <https://www.tecnoenergia.mx/radiacion-solar-en-mexico-somos-privilegiados/>
- Tejeda, A., y Gómez, G. (2015). *Prontuario solar de México*. Universidad de Colima.
- Tornquist, J. (2008). *Color y luz: teoría y práctica*. Gustavo Gili.
- Unión Europea. (2002). *Norma europea sobre la iluminación para interiores-UNE 12464.1*. Saltoki: <https://www.saltoki.com/iluminacion/docs/03-UNE-12464.1.pdf>
- Valeriano, A. (2010). *Iluminación natural en la arquitectura. Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México* [Tesis de maestría]. TESIUNAM.
- Véliz, B. (s.f.). *Iluminación natural: luz, confort, métrica y diseño*. Arquitectura Véliz: <http://arquitecturaveliz.com/06-Iluminaci%C3%B3n%20natural.pdf>
- WELL. (s.f.). *Luz*. Recuperado el 05 de septiembre de 2022, de <https://v2.wellcertified.com/en/v/light/feature/5>
- Wienold, J. (2009). Dynamic daylight glare evaluation. *Eleventh International IBPSA Conference* (pp. 944-951). Glasgow, Scotland: Building Simulation.
- Wienold, J. (2009). Dynamic daylight glare evaluation. *Building simulation*. Glasgow, Scotland.
- Wienold, J., y Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*(38), 743-757.
- Yamin, J. A., Colombo, E. M., Rodríguez, R., y Pattini, A. (2016). Evaluación del confort visual en escenas con iluminación natural directa. *Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable* (pp. 189-199). La Plata: Universidad Nacional de la Plata.
- Yong, J., Schiler, M., y Kensek, K. (2016). Absolute glare factor and relative glare factor based metric: Predicting and quantifying levels of daylight glare in office space. *Energy and Buildings*, 130, 8-19.
- Zambrano, P., y Prado, L. (2016). Simulación de iluminación natural en oficinas; implicaciones para la eficiencia visual. *Estoa*, 5(8), 59-71.
- Zeevaert, L. (s.f.). *Interacción del medio ambiente y la envolvente arquitectónica*. Apuntes.

## Figuras

Figura 1 Espectro electromagnético .....	27
Figura 2 Movimientos de la Tierra alrededor del Sol .....	28
Figura 3 Los climas de la cuenca de México .....	32
Figura 4 Cubierta nubosa en la Ciudad de México .....	34
Figura 5 Trayectoria solar en la Ciudad de México .....	40
Figura 6 Proyección estereográfica de la Ciudad de México .....	41
Figura 7 Flujos de radiación directa y difusa.....	42
Figura 8 Iluminación obtenida en un plano de trabajo .....	58
Figura 9 Iluminación lateral.....	59
Figura 10 Componentes de iluminación cenital .....	60
Figura 11 Iluminación combinada .....	61
Figura 12 Profundidad en el sistema lateral.....	62
Figura 13 Sistema de fachadas .....	65
Figura 14 Sistema de fachada de Torre Esmeralda I .....	66
Figura 15 Radiación incidente .....	67
Figura 16 Espectro de un vidrio .....	69
Figura 17 Distribución luminosa .....	70
Figura 18 Flujos de calor en un acristalamiento.....	70
Figura 19 Transmisión luminosa .....	73
Figura 20 Factor solar .....	73
Figura 21 Vidrio de doble y triple capa .....	76
Figura 22 Valores UDI.....	94
Figura 23 Proceso cuantitativo .....	105
Figura 24 Pasos de la metodología .....	106
Figura 25 Relación de hipótesis con variables y objetivos.....	107
Figura 26 Distancia entre Torre Esmeralda I y estación central.....	110
Figura 27 Ubicación de Torre Esmeralda I .....	111
Figura 28 Climograma de la estación central.....	113
Figura 29 Solsticio de verano .....	114
Figura 30 Equinoccios de primavera y otoño .....	114
Figura 31 Solsticio de invierno.....	115
Figura 32 Macro localización .....	116
Figura 33 Área de trabajo .....	117
Figura 34 Área de trabajo con vista hacia sala de juntas y oficinas directivas.....	118
Figura 35 Área de cotrabajo .....	118
Figura 36 Área de cotrabajo .....	119
Figura 37 Área de trabajo central.....	119
Figura 38 Información requerida en una simulación de luz natural.....	122
Figura 39 Programas que trabajan con Radiance.....	123
Figura 40 Funciones lumínicas de CS y HB .....	126
Figura 41 Programas para simulación.....	127
Figura 42 Interfaz y modelo 3D en Rhino .....	129
Figura 43 Interfaz de Grasshopper .....	130
Figura 44 Modelo vinculado .....	130



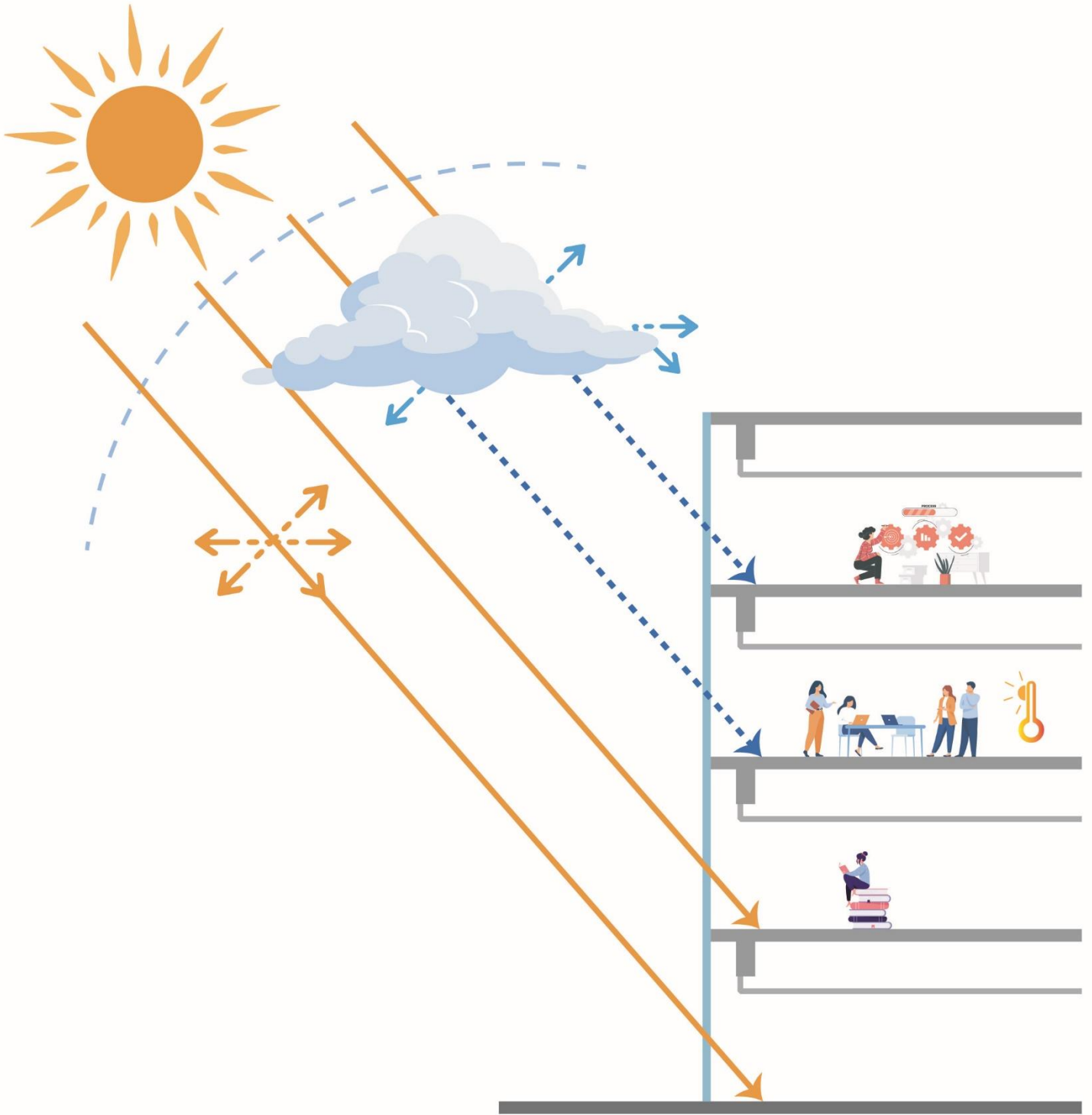
Figura 45 Estaciones meteorológicas de Energy Plus .....	133
Figura 46 Base de datos CBE .....	133
Figura 47 Composición de un archivo EPW .....	135
Figura 48 Zonas de análisis .....	136
Figura 49 Componente PIT .....	137
Figura 50 Configuración de geometrías.....	138
Figura 51 Configuración de sensores.....	139
Figura 52 Configuración del cielo.....	139
Figura 53 Ejecutar PIT.....	142
Figura 54 Componente ANN.....	143
Figura 55 Vinculación de modelo.....	143
Figura 56 Entradas de ANN .....	145
Figura 57 Ejecución de ANN .....	146
Figura 58 Vistas.....	147
Figura 59 Componente PIT view.....	147
Figura 60 Vinculación de modelo.....	148
Figura 61 Ejecutar PIT view .....	149
Figura 62 Deslumbramiento .....	150
Figura 63 Vista angular ojo de pez.....	151
Figura 64 Vista de falso color .....	152
Figura 65 Diagnóstico de vidrio original.....	159
Figura 66 Vidrio original .....	160
Figura 67 Vidrio SKN 154 .....	161
Figura 68 Vidrio SKN 176 .....	162
Figura 69 Vidrio Xtreme 60.....	163
Figura 70 Iluminancia anual con vidrio original.....	165
Figura 71 Iluminancia anual con vidrio SKN 176 .....	166
Figura 72 Configuración de vistas.....	168
Figura 73 Diagnóstico de deslumbramiento en la oficina del director.....	169
Figura 74 Diagnóstico de deslumbramiento en el área central .....	170
Figura 75 Deslumbramiento oficina de director .....	171
Figura 76 Deslumbramiento área central.....	172
Figura 77 Niveles de iluminancia en relación con la profundidad .....	174
Figura 78 Inclinación de rayos solares en solsticio de invierno.....	180

## Tablas

Tabla 1 Clasificación CIE de cielos .....	37
Tabla 2 Porcentajes de acristalamiento .....	64
Tabla 3 Componentes de la serie Cool-Lite Xtreme y Cool-Lite SKN .....	77
Tabla 4 Vidrios para la evaluación lumínica .....	77
Tabla 5 Requisitos mínimos de iluminación artificial.....	84
Tabla 6 Niveles de iluminación .....	85
Tabla 7 Niveles de iluminación en oficinas .....	86
Tabla 8 Niveles recomendados de iluminancia horizontal (lux) para diferentes actividades en edificios no residenciales destinados a oficinas .....	87
Tabla 9 Límites del DGP .....	97
Tabla 10 Valores DGP de Honeybee.....	98
Tabla 11 Temperaturas y precipitación .....	113
Tabla 12 TMY de la estación central .....	134
Tabla 13 Parámetros de Radiance .....	141
Tabla 14 Valores de Radiance en la simulación .....	141
Tabla 15 Tabla síntesis de niveles de iluminancia.....	175
Tabla 16 Clasificación UDI .....	178
Tabla 17 Comparativa de UDI.....	178
Tabla 18 Valores DGP del vidrio original.....	179
Tabla 19 Valores DGP del vidrio SKN 176 .....	180



# **ANEXOS**



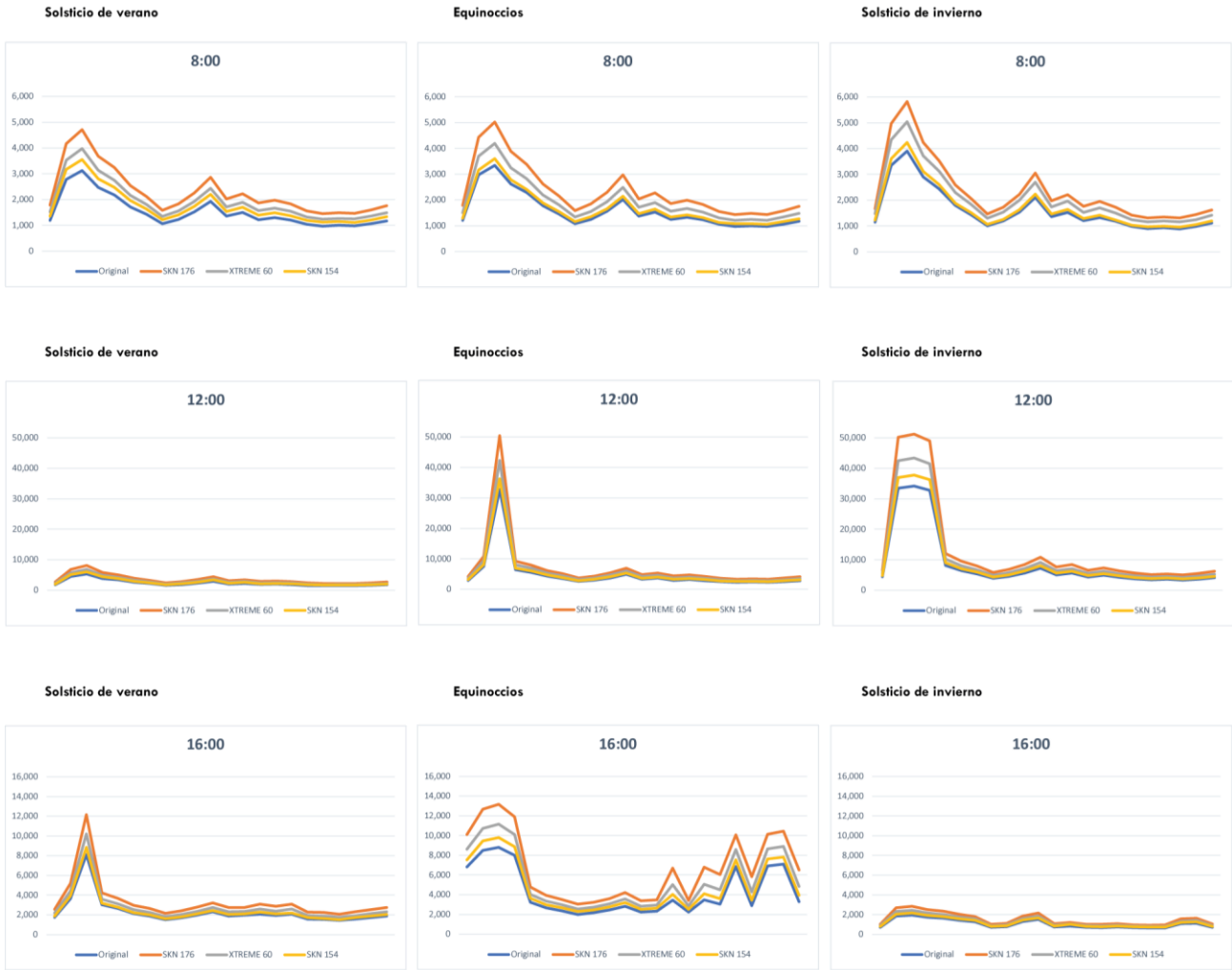
# Anexo 1

## Gráficas de iluminancia de los planos de trabajo

[1] Oficina de director

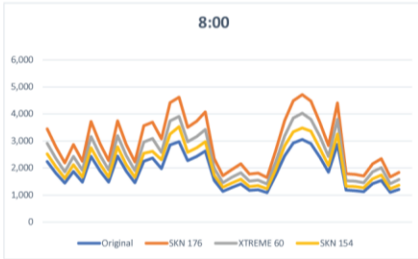




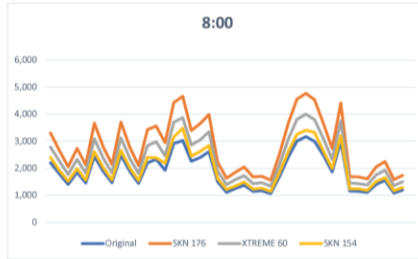


[3] Sala de juntas

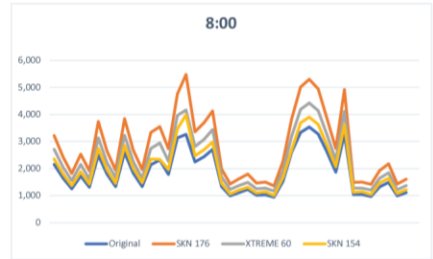
Solsticio de verano



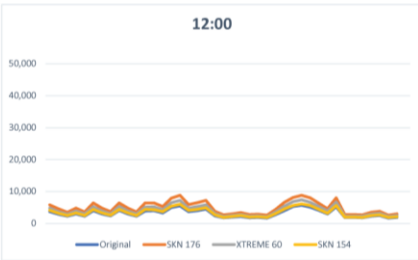
Equinoccios



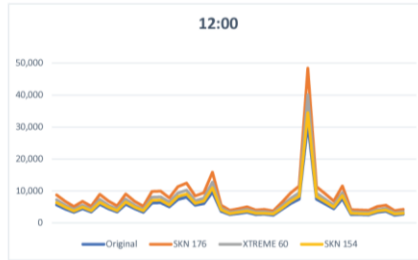
Solsticio de invierno



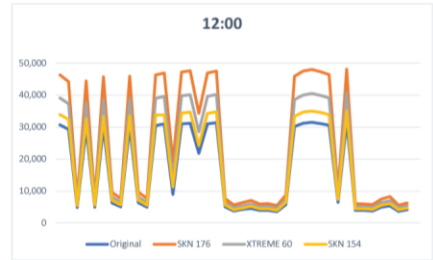
Solsticio de verano



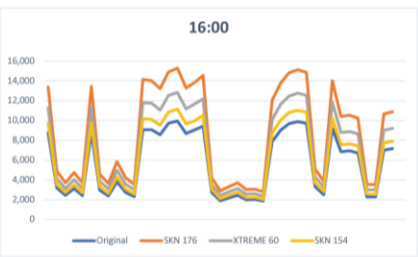
Equinoccios



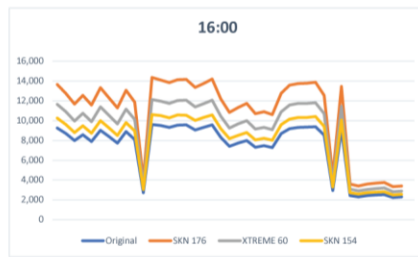
Solsticio de invierno



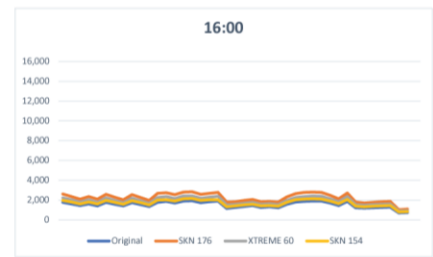
Solsticio de verano



Equinoccios

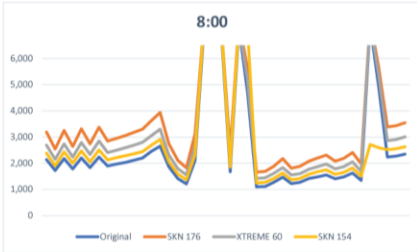


Solsticio de invierno

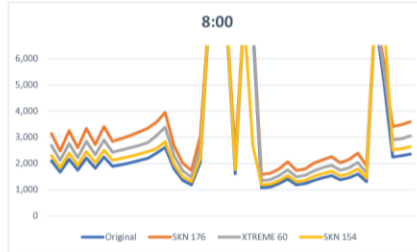


[4] Área de cowork

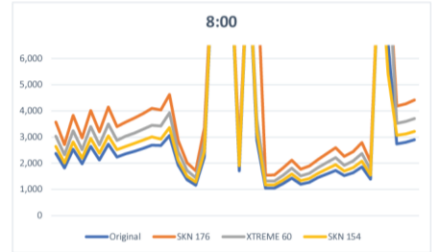
Solsticio de verano



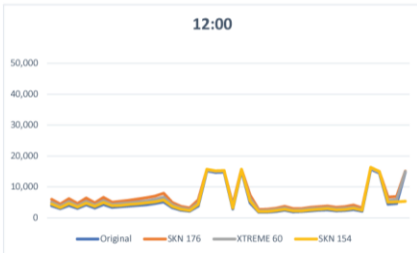
Equinoccios



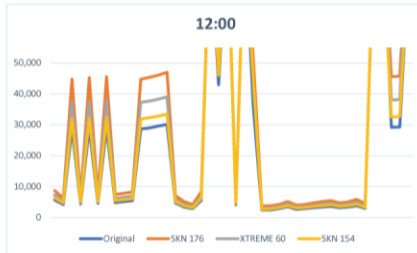
Solsticio de invierno



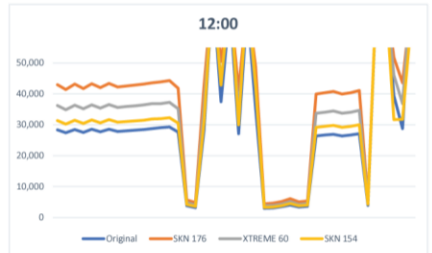
Solsticio de verano



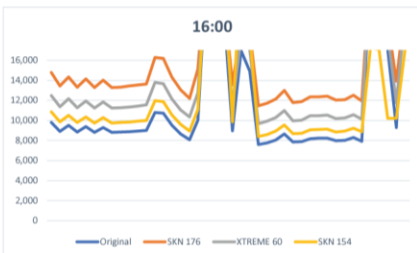
Equinoccios



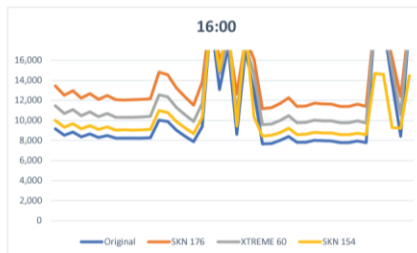
Solsticio de invierno



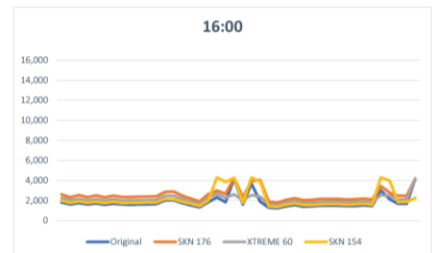
Solsticio de verano



Equinoccios

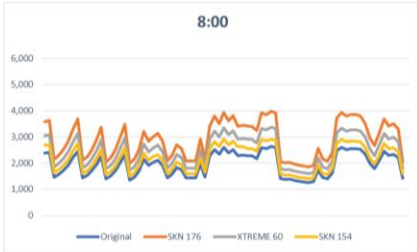


Solsticio de invierno

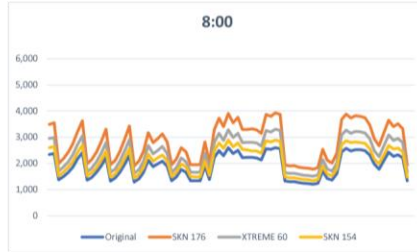


[5] Zona de lectura

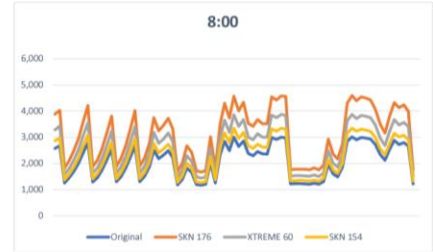
Solsticio de verano



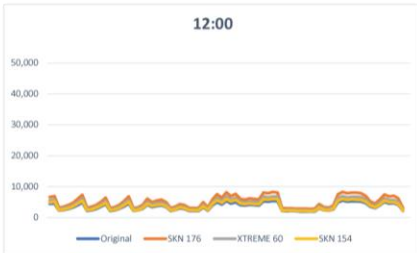
Equinoccios



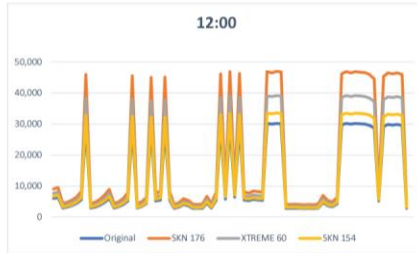
Solsticio de invierno



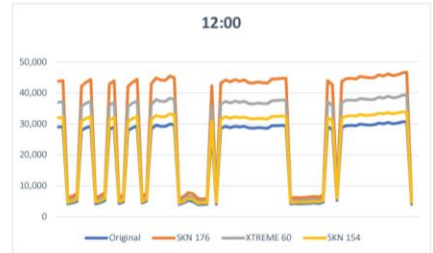
Solsticio de verano



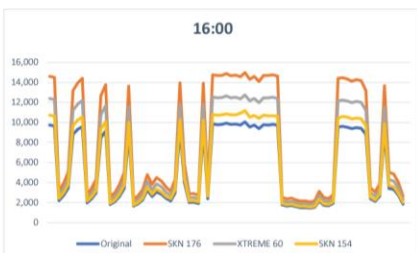
Equinoccios



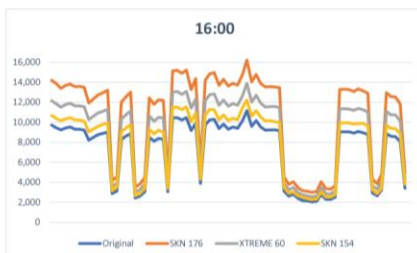
Solsticio de invierno



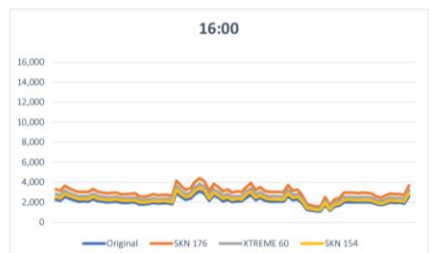
Solsticio de verano



Equinoccios

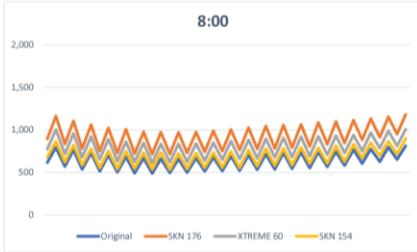


Solsticio de invierno

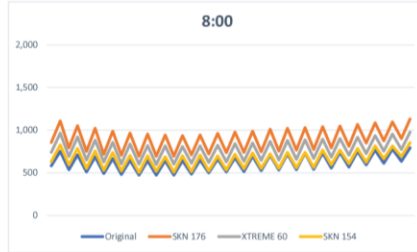


[6] Circulación 1

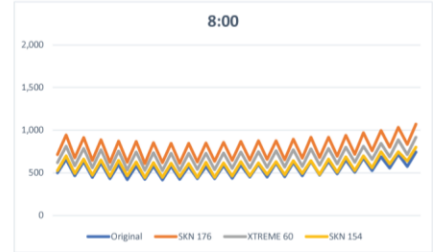
Solsticio de verano



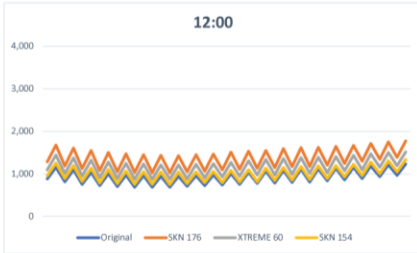
Equinoccios



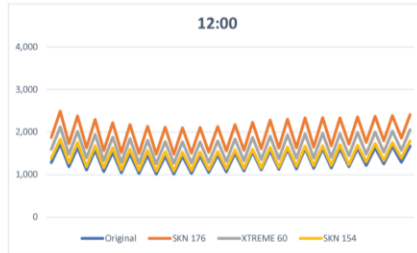
Solsticio de invierno



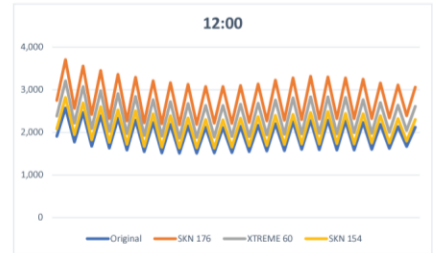
Solsticio de verano



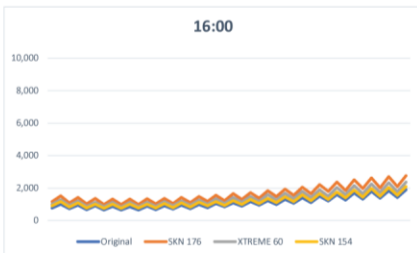
Equinoccios



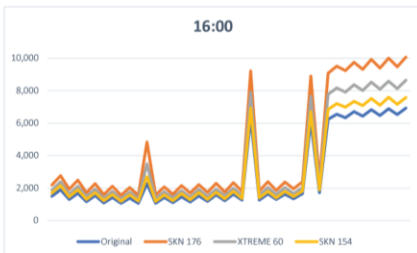
Solsticio de invierno



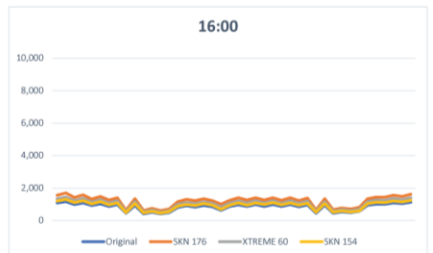
Solsticio de verano



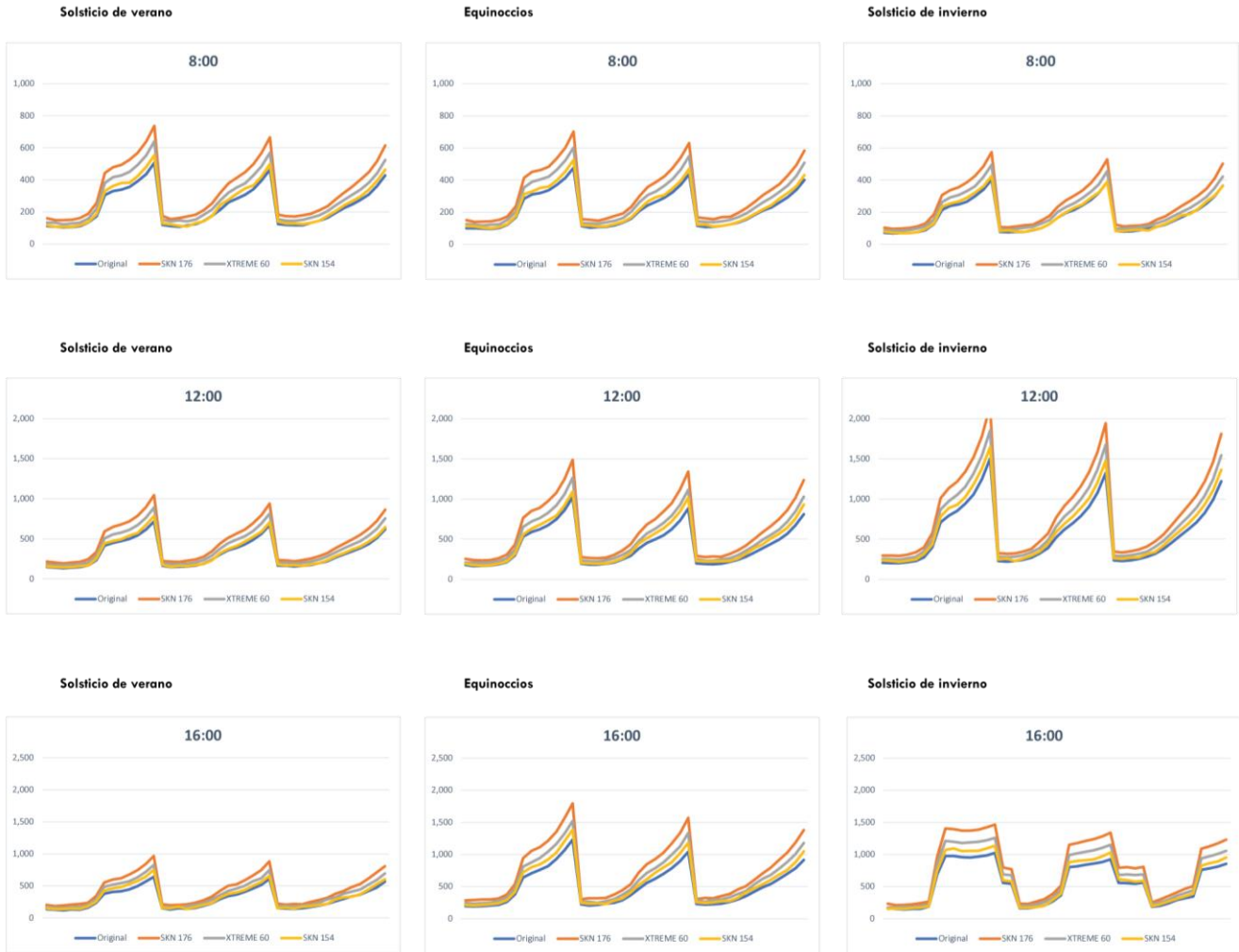
Equinoccios



Solsticio de invierno



[7] Área de trabajo central



[8] Circulación 2



## Anexo 2

### Niveles de iluminancia de los planos de trabajo

Niveles de iluminancia de planos de trabajo														
Espacio	Temporada	08:00				12:00				16:00				
		Original	SKN 176	XTR 60	SKN 154	Original	SKN 176	XTR 60	SKN 154	Original	SKN 176	XTR 60	SKN 154	
[1] Oficina de director	Solsticio de verano	1985	2930	2501	2244	3256	4759	4094	3513	4158	6102	5165	4507	Prom
		3320	4894	4174	3723	5947	8503	7342	6075	9331	14120	11864	10247	Máx
		1101	1625	1386	1243	1659	2468	2109	1876	1481	2052	1755	1568	Mín
	Equinoccios	2095	3018	2591	2169	7276	10546	8992	7870	8343	12423	10525	9275	Prom
		3699	5303	4587	3927	33311	50526	42429	36443	11304	16866	14302	12560	Máx
		1121	1609	1377	1194	2548	3630	3121	2856	2222	3294	2778	2501	Mín
	Solsticio de invierno	2133	3030	2652	2164	14785	21948	18602	16270	1766	2547	2208	1987	Prom
		4246	6068	5256	4430	33829	50439	42697	37285	2352	3437	2961	2643	Máx
		974	1349	1181	952	3541	5223	4429	3945	1247	1788	1550	1400	Mín
	[2] Oficina de subdirector	Solsticio de verano	1523	2277	1933	1734	2343	3546	2983	2664	2285	3301	2784	2447
3124			4712	3980	3554	5336	8089	6829	6042	8091	12148	10206	8844	Máx
973			1456	1236	1111	1449	2200	1840	1665	1441	2076	1764	1518	Mín
Equinoccios		1568	2327	1951	1679	4907	7252	6200	5400	4253	6677	5514	4789	Prom
		3346	5028	4193	3603	32789	50473	42333	36329	8798	13167	11146	9788	Máx
		973	1438	1207	1050	2271	3345	2860	2536	2000	3031	2549	2284	Mín
Solsticio de invierno		1600	2337	2055	1709	8734	13067	11039	9676	1064	1537	1326	1196	Prom
		3910	5826	5046	4237	34199	51247	43362	37766	1941	2831	2429	2157	Máx
		891	1307	1153	962	3348	5063	4255	3753	641	931	797	740	Mín
[3] Sala de juntas		Solsticio de verano	1902	2918	2482	2158	3171	4969	4092	3459	5650	8653	7293	6291
	3062		4708	4031	3529	5708	8821	7408	6140	9925	15264	12823	11129	Máx
	1087		1651	1405	1229	1679	2560	2131	1866	1847	2778	2352	2028	Mín
	Equinoccios	1897	2834	2395	2052	5291	8204	6759	5941	7300	10754	9174	8071	Prom
		3175	4765	3997	3482	31001	48468	40126	34530	9591	14340	12139	10615	Máx
		1064	1555	1331	1149	2460	3757	3133	2787	2237	3315	2808	2490	Mín
	Solsticio de invierno	1879	2812	2352	2064	16003	24467	20584	17809	1220	2229	1911	1698	Prom
		3531	5475	4430	3987	31640	48179	40609	35127	1917	2835	2423	2139	Máx
		941	1352	1168	1007	3564	5399	4564	3986	697	1027	875	792	Mín
	[4] Área de cowork	Solsticio de verano	2994	3724	3385	3000	5874	7211	6602	6120	11803	15417	13823	12565
7300			7489	7407	7488	15732	16128	15973	16279	25216	25796	25502	25704	Máx
1105			1657	1414	1245	1788	2672	2273	1994	2757	4050	3459	2935	Mín
Equinoccios		3078	3785	3461	3220	28055	32655	30590	29062	10787	13926	12459	11030	Prom
		7612	7807	7728	7813	94504	94957	94694	95209	20180	20645	20399	20406	Máx
		1077	1582	1346	1188	2449	3665	3091	2731	7659	11169	9576	8417	Mín
Solsticio de invierno		3714	4688	4216	3905	34255	43596	39166	36368	2034	2682	2293	2286	Prom
		10071	10252	10159	10250	75724	76428	75995	76393	4340	4431	4395	4413	Máx
		1049	1545	1315	1176	2976	4476	3793	3313	1237	1799	1546	1379	Mín
[5] Zona de lectura		Solsticio de verano	1956	2911	2492	2181	3517	5219	4362	3842	5401	8035	6844	5916
	2637		3986	3374	2922	5436	8271	6886	6035	10045	14980	12752	11171	Máx
	1263		1861	1605	1407	1926	2763	2305	2036	1456	2086	1815	1551	Mín
	Equinoccios	1907	2834	2398	2124	12100	18579	15598	13388	7317	10672	9144	8037	Prom
		2601	3927	3304	2890	30216	46999	39226	33597	11163	16215	13892	12211	Máx
		1204	1780	1508	1337	2699	3950	3395	2919	2059	2992	2561	2279	Mín
	Solsticio de invierno	2094	3121	2658	2312	20235	30578	25823	22376	2085	2998	2587	2308	Prom
		3018	4588	3875	3343	30778	46696	39394	33928	3112	4422	3837	3478	Máx
		1168	1678	1443	1269	3924	5766	4915	4357	1114	1594	1378	1253	Mín
	[6] Circulación 1	Solsticio de verano	764	1114	956	839	1139	1662	1414	1235	2154	3207	2730	2375
1173			1717	1476	1299	2123	3157	2645	2342	8095	12226	10345	8976	Máx
489			716	615	535	686	1028	873	745	648	981	833	747	Mín
Equinoccios		745	1075	923	804	1607	2325	1976	1722	3974	5798	4965	4373	Prom
		1165	1688	1429	1271	2692	3912	3329	2957	7690	11221	9616	8445	Máx
		472	693	599	505	1015	1480	1255	1081	1056	1557	1321	1178	Mín
Solsticio de invierno		724	1052	900	783	2562	3736	3190	2802	946	1360	1174	1044	Prom
		1339	1970	1665	1486	26273	39739	33542	29031	1335	1914	1652	1473	Máx
		415	610	526	445	1509	2181	1866	1629	397	579	503	439	Mín
[7] Área de trabajo central		Solsticio de verano	331	473	407	360	445	645	555	485	608	895	762	667
	975		1431	1217	1089	1481	2181	1843	1621	7202	10838	9175	7996	Máx
	103		149	123	107	133	195	170	145	122	184	152	138	Mín
	Equinoccios	310	445	383	337	570	837	714	631	1601	2326	1997	1760	Prom
		935	1372	1178	1047	1872	2791	2386	2102	7208	10496	8992	7938	Máx
		97	139	118	100	165	235	204	171	189	283	234	205	Mín
	Solsticio de invierno	259	372	319	277	758	1112	953	839	681	974	842	745	Prom
		955	1416	1207	1060	2345	3424	2956	2605	1235	1774	1530	1359	Máx
		67	96	85	69	201	293	247	218	142	210	173	155	Mín
	[8] Circulación 2	Solsticio de verano	292	398	351	315	341	485	420	374	286	412	354	314
595			662	632	611	510	737	636	566	440	638	546	488	Máx
123			177	153	136	164	241	201	178	151	215	184	164	Mín
Equinoccios		264	364	319	288	397	568	490	442	453	653	562	500	Prom
		472	549	515	498	595	867	745	690	715	1032	885	802	Máx
		116	164	147	127	194	275	233	221	218	330	272	234	Mín
Solsticio de invierno		185	258	223	197	470	679	585	523	768	1093	945	843	Prom
		285	401	344	304	726	1063	918	826	1717	2434	2115	1885	Máx
		81	117	99	86	222	327	280	260	211	291	255	236	Mín

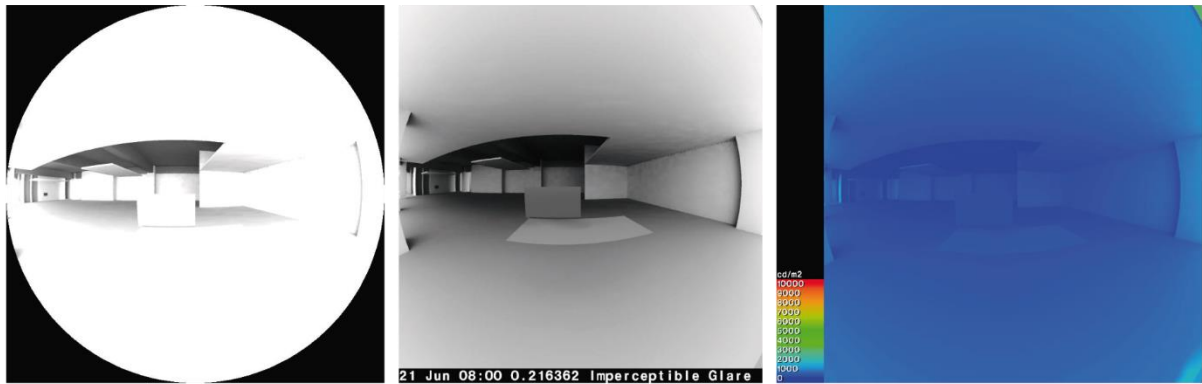


### Anexo 3

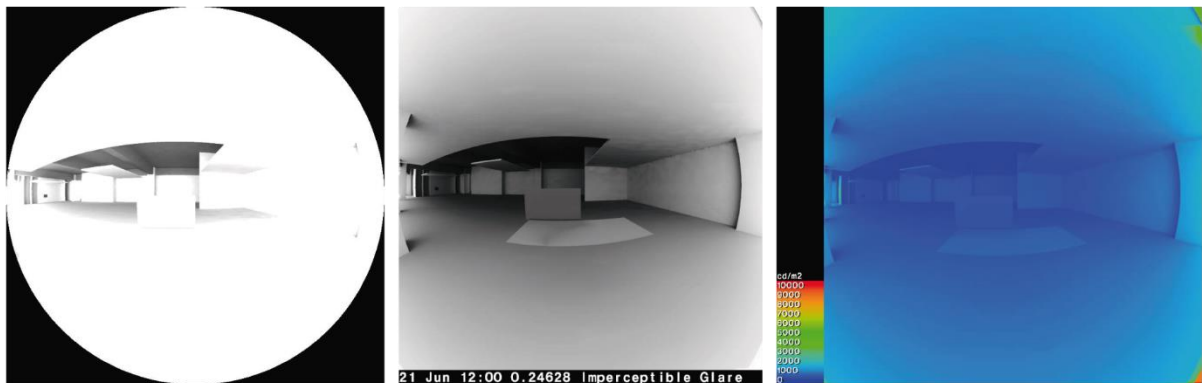
### Deslumbramiento con el vidrio original

[D-1] Solsticio de verano

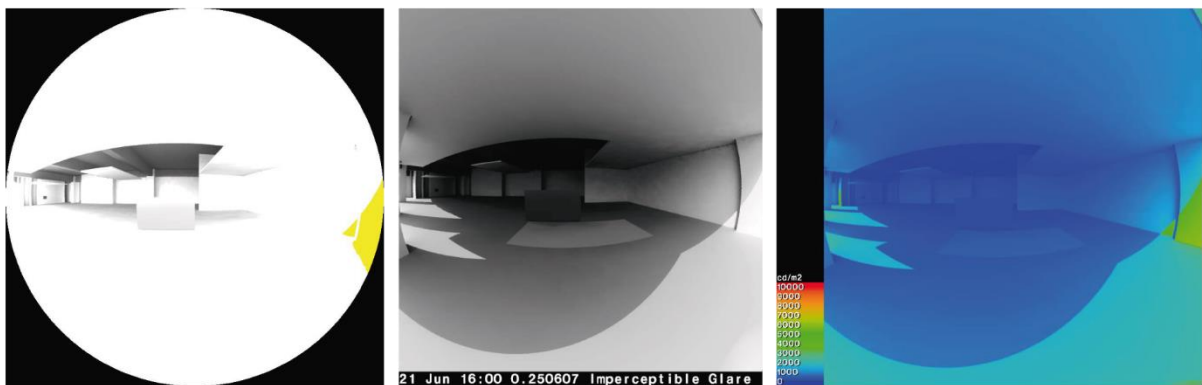
8:00



12:00

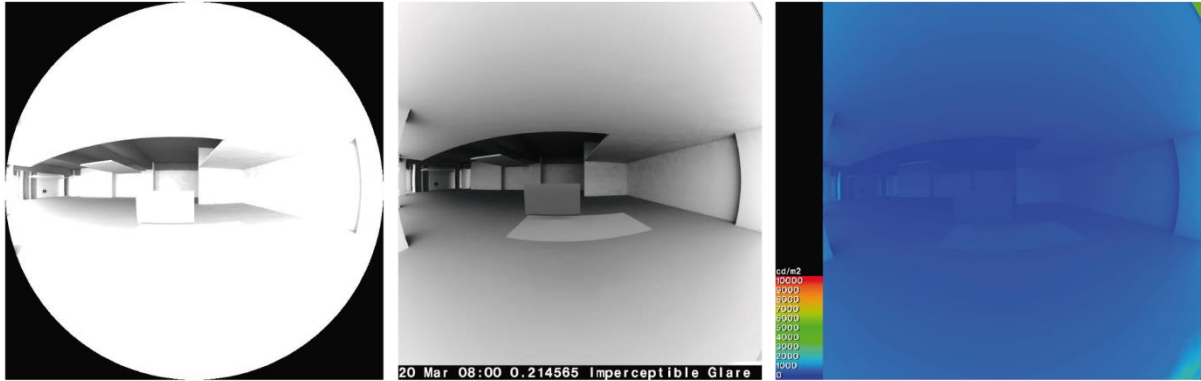


16:00

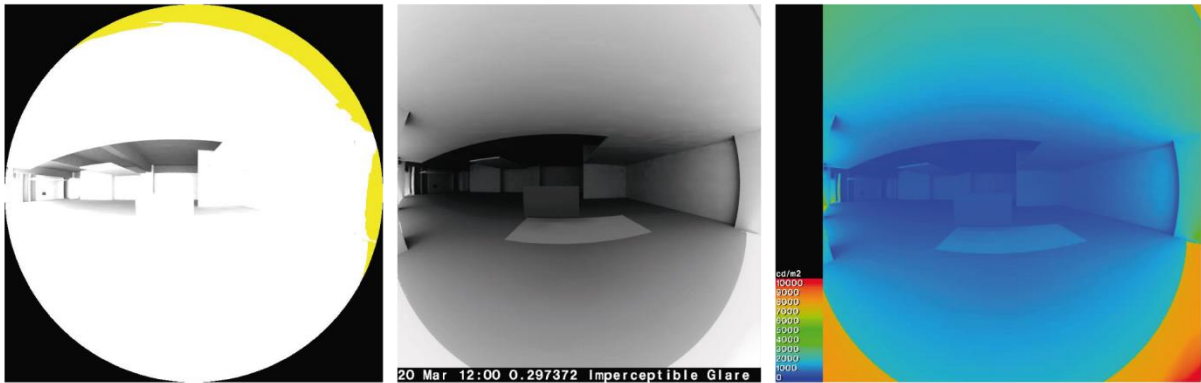


[D-1] Equinoccios

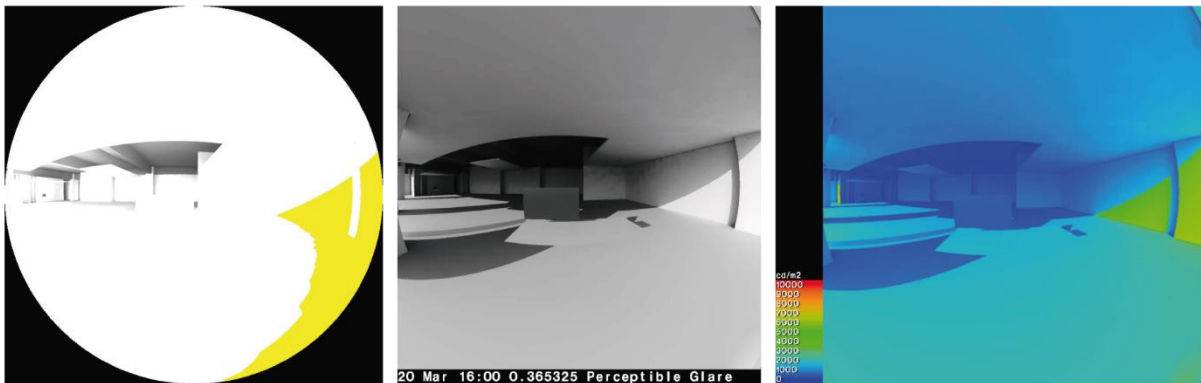
8:00



12:00

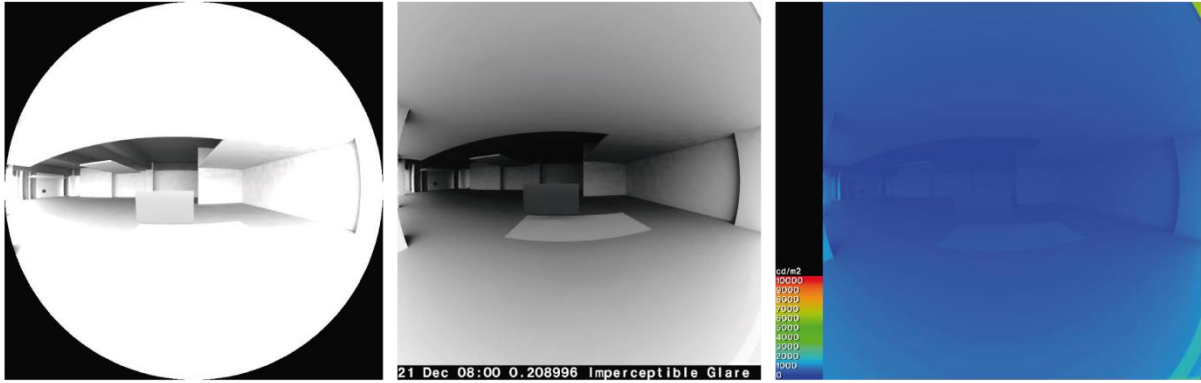


16:00

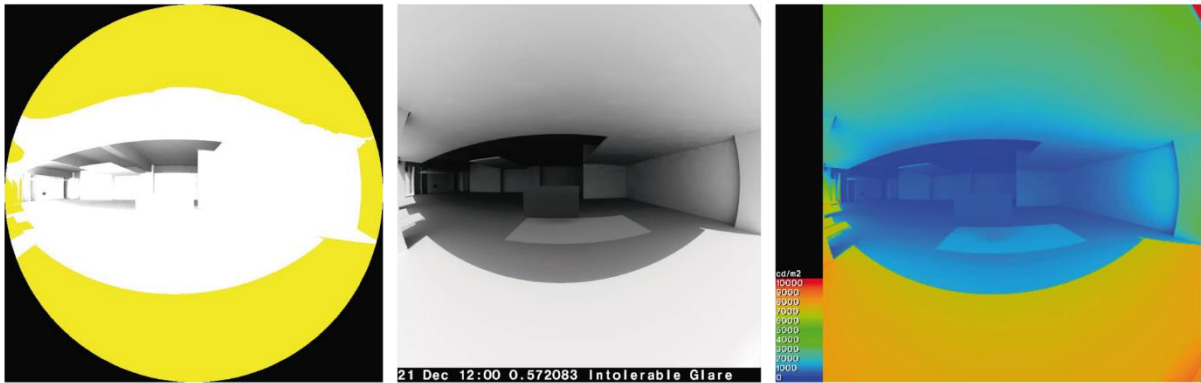


[D-1] Solsticio de invierno

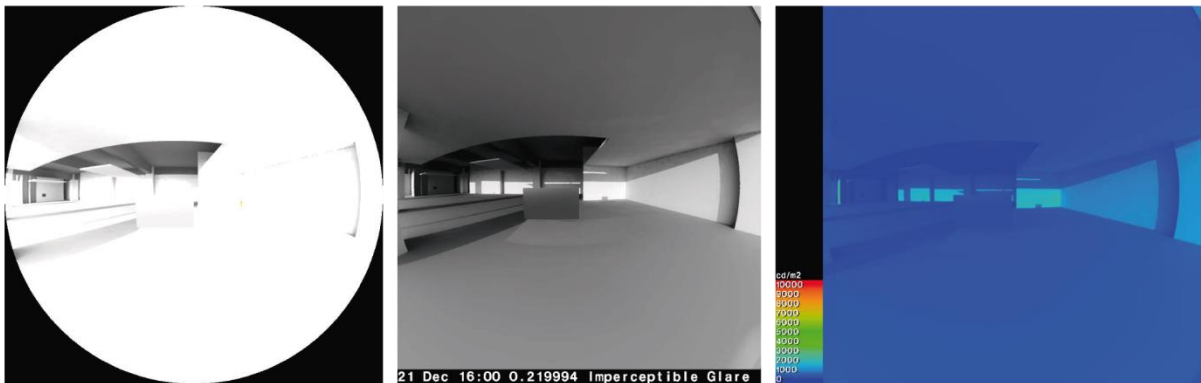
8:00



12:00



16:00



# [C-7] Solsticio de verano

8:00



12:00



16:00



[C-7] Equinoccios

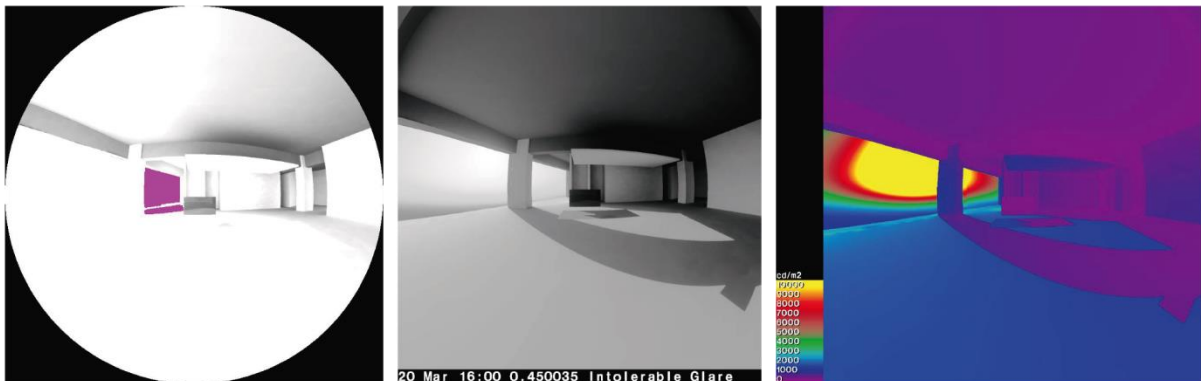
8:00



12:00



16:00

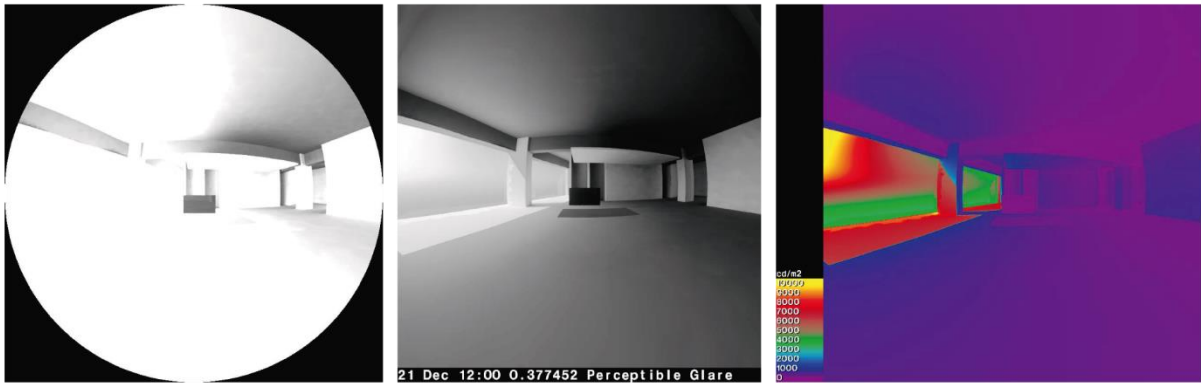


[C-7] Solsticio de invierno

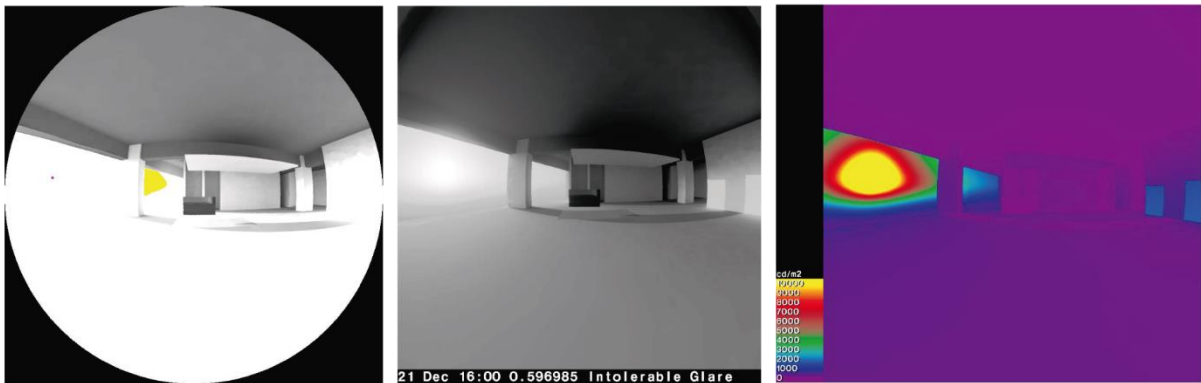
8:00



12:00



16:00



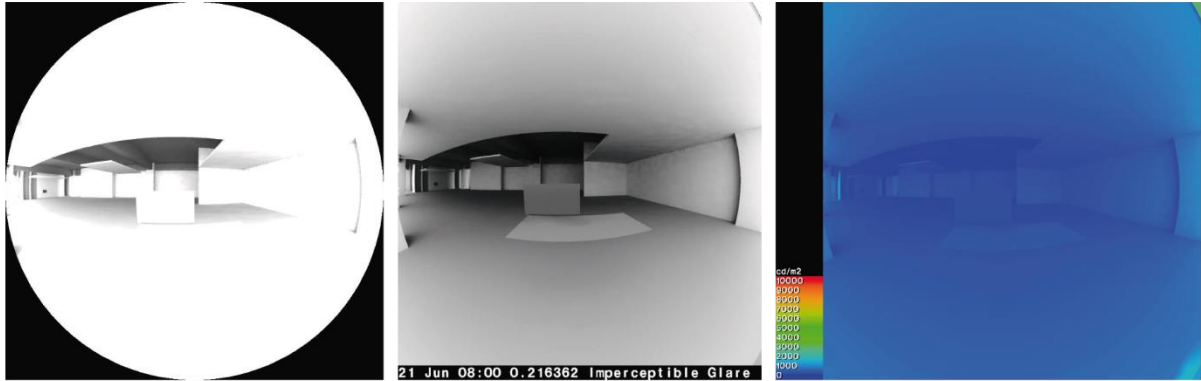


## Anexo 4

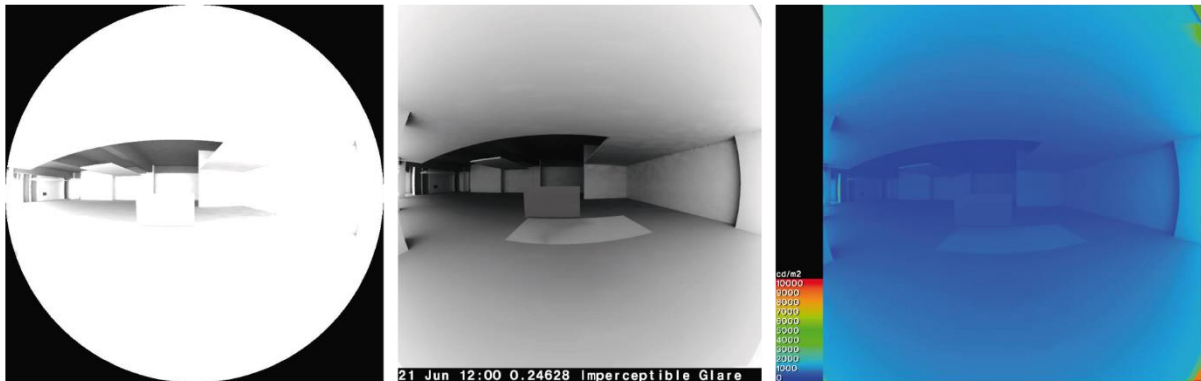
### Deslumbramiento con el vidrio SKN 176

[1] Solsticio de verano

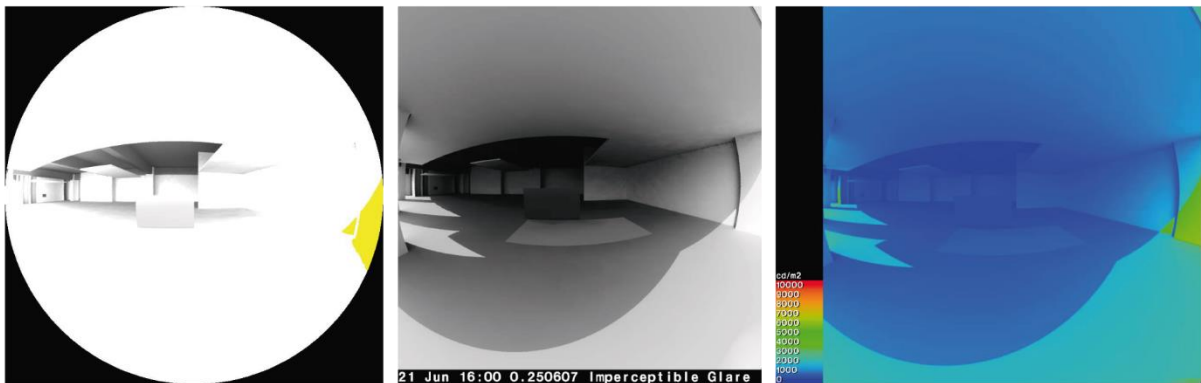
8:00



12:00

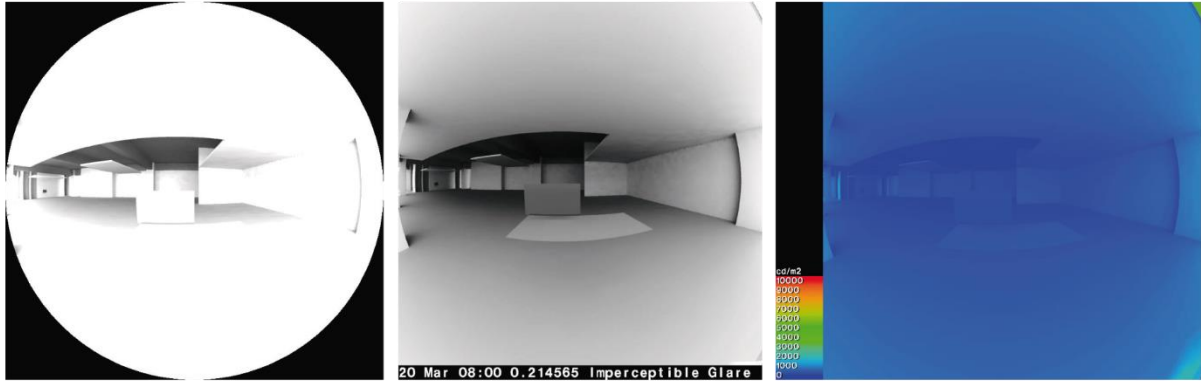


16:00

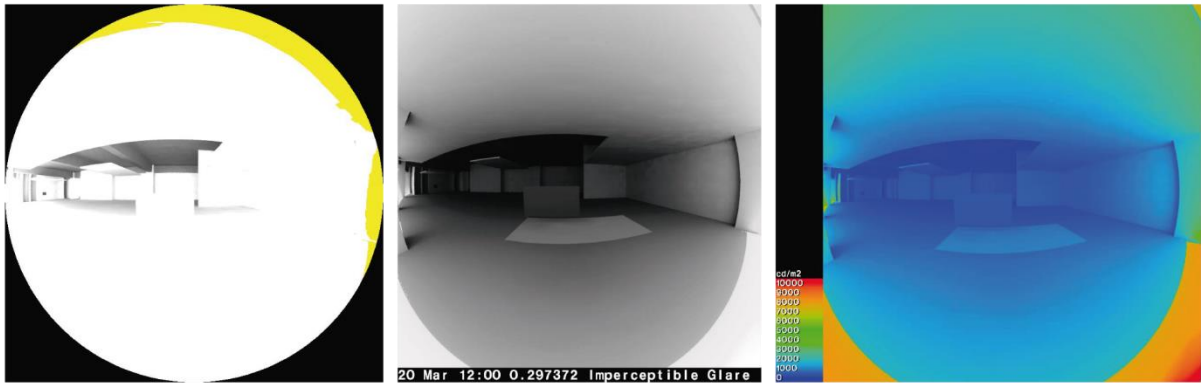


[1] Equinoccios

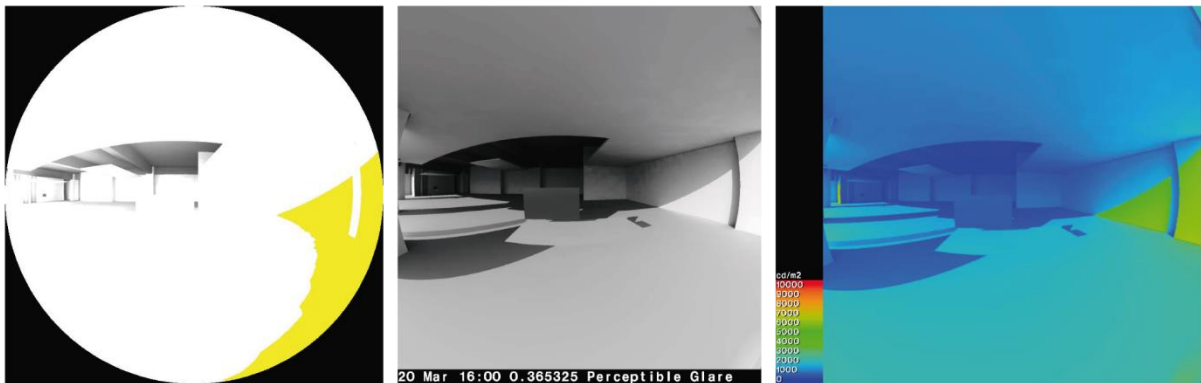
8:00



12:00



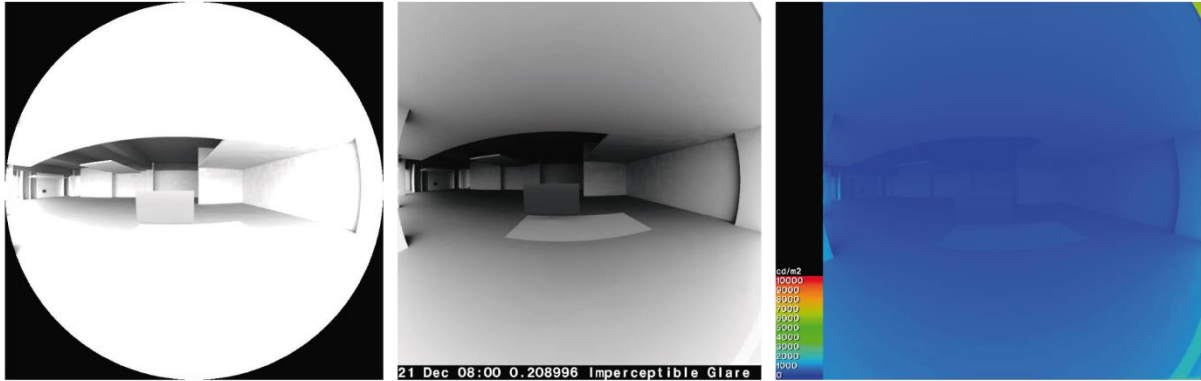
16:00



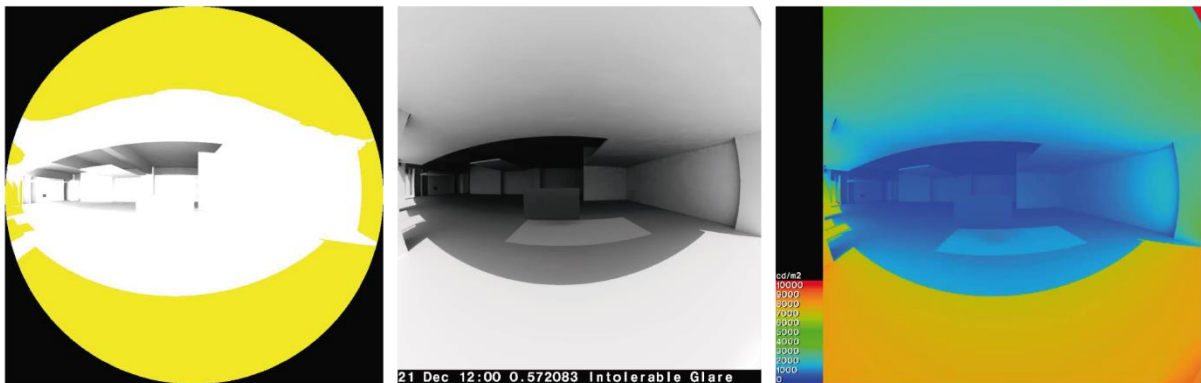


[1] Solsticio de invierno

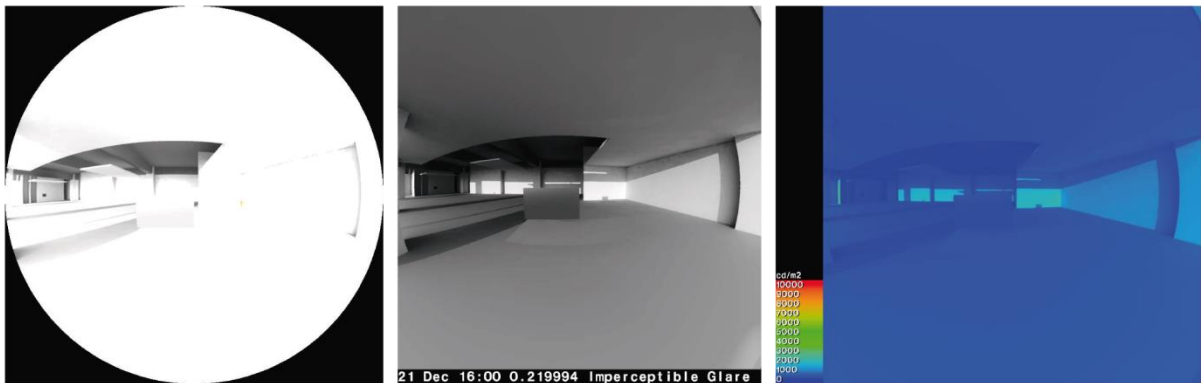
8:00



12:00



16:00



[7] Solsticio de verano

8:00



12:00



16:00



# [7] Equinoccios

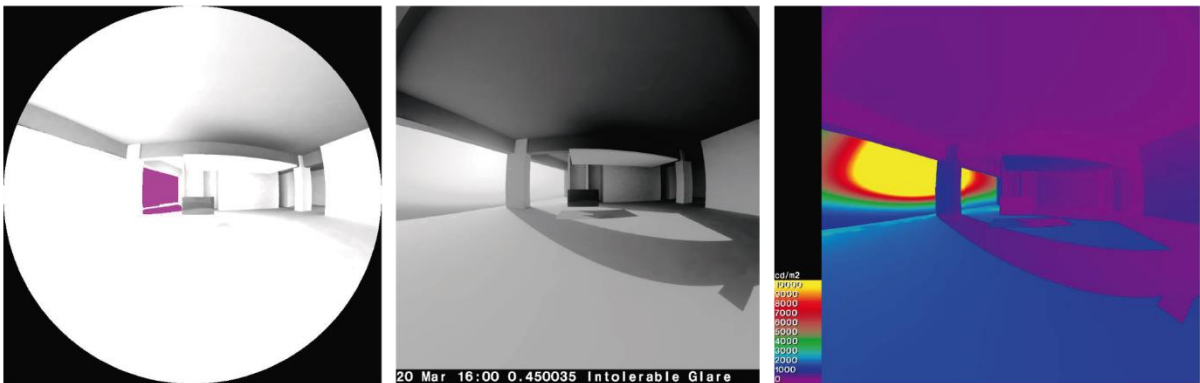
8:00



12:00



16:00

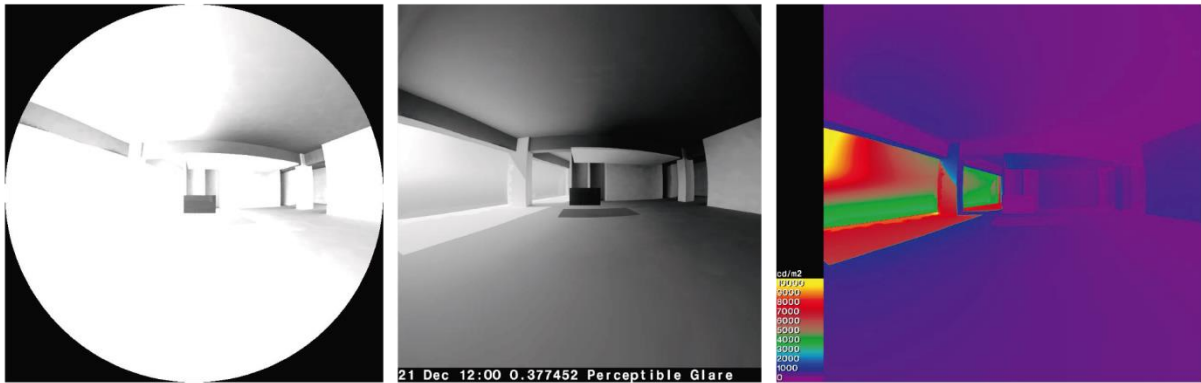


[7] Solsticio de invierno

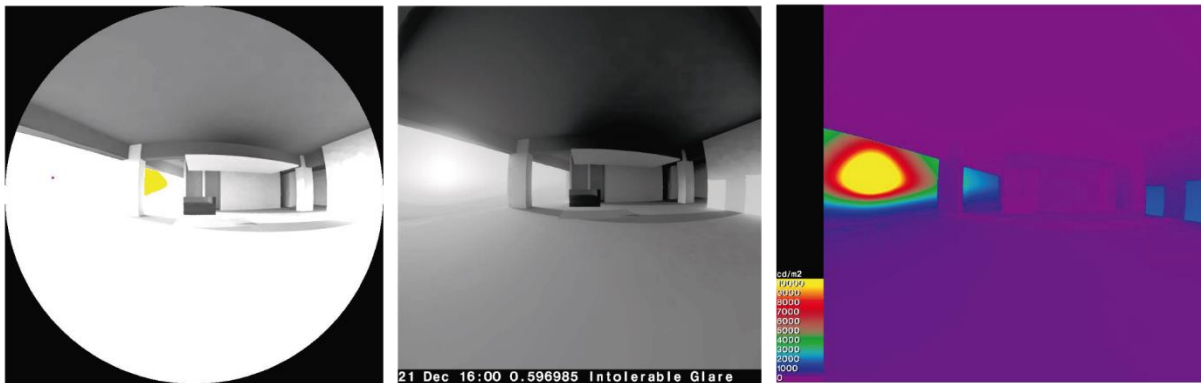
8:00



12:00



16:00



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**  
**CAMPO DE CONOCIMIENTO DE TECNOLOGÍAS**  
**F E B R E R O**  
**2 0 2 3**

