



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Simulación con Radiance de estrategias de  
iluminación natural para un espacio del IER

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniera en Energías Renovables

PRESENTA:

Lucero Clarisa Betancourt García

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Guillermo Barrios del Valle



Temixco, Mor. a 12 de Mayo de 2020.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**OF/IER/LIER/033/2020**

**ASUNTO:** Notificación de jurado y fecha para examen profesional mediante aula virtual.

**LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
**DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR**  
**Presente.**

Por medio de la presente le informo que el día martes 12 de mayo de 2020, a las 10:00 hrs., mediante Aula Virtual habilitada por la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación de la UNAM, la **C. LUCERO CLARISA BETANCOURT GARCÍA**, con número de cuenta 312232009 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

*“Simulación con Radiance de estrategias de iluminación natural en un espacio del IER”*

Debido a que la alumna ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>DR. DAVID MORILLÓN GÁLVEZ</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>DR. GUILLERMO BARRIOS DEL VALLE</b>
<b>SUPLENTE:</b>	<b>DR. PATRICIO JAVIER VALADÉS PELAYO</b>
<b>SUPLENTE:</b>	<b>DRA. ADRIANA LIRA OLIVER</b>

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,  
**“Por mi raza hablará el espíritu”**  
Temixco, Mor., a 8 de mayo de 2020



**Dr. Jorge Alejandro Wong Loya**  
**Coordinador de la LIER**  
**IER-UNAM**

JAWL´mfp.

# Simulación con Radiance de estrategias de iluminación natural para un espacio del IER

por

L.C. Betancourt García

## Resumen

En esta tesis se presentan la evaluación de la iluminación natural en el espacio administrativo del edificio de docencia que será construido durante la primera etapa del proyecto “Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables UNAM (291600)” y la evaluación de un ducto solar de sección rectangular para el mismo espacio, ambas realizadas con el software de código abierto Radiance. Se presenta también un ejemplo con los pasos a seguir para llevar a cabo una simulación de iluminación natural con Radiance, así como un repositorio con los archivos necesarios para reproducir dicho ejemplo.

La evaluación del espacio administrativo consta de cuatro partes; la primera es la revisión de incidencia de radiación solar directa en el espacio para los días críticos por medio de la generación de imágenes fotorrealistas para dos puntos de vista. Para la segunda parte, se presentan mapas de iluminancia horarios para los días críticos con el fin de visualizar la distribución de la iluminación en el espacio. En la tercera parte se calcula la iluminancia por luz diurna útil (UDI) en el espacio para determinar cuáles puntos del espacio están correctamente iluminados, subiluminados y sobreiluminados a lo largo del año. En la cuarta parte se presenta el cálculo de la probabilidad de deslumbramiento simplificada (DGPs) para ocho puntos de vista y posteriormente el análisis detallado para los tres puntos de vista que presentaron un DGPs superior al límite establecido como perceptible.

Para el análisis del ducto solar se presentan los coeficientes de transferencia (CT) para un ducto solar horizontal de sección rectangular en función de la longitud y reflectancia del mismo, así como la comparación entre el flujo luminoso proporcionado por un ducto de 5 m de longitud y 0.8 de reflectancia y el proporcionado por las luminarias que se planean instalar en el espacio analizado.

*A mis padres Xochilquetzal y Victoriano, porque es su apoyo y amor lo que me ha permitido  
llegar hasta aquí.*

*A Dolores y Teresa, mujeres que admiro y a quienes llevo siempre en mente y corazón.*

*A Toribio, mi fiel compañero.*

# Agradecimientos

Agradezco a mi alma mater, la UNAM, por todo lo que me ha permitido crecer y vivir dentro de ella. Expreso mi gratitud para con el Instituto de Energías Renovables y su personal tanto académico como administrativo y de intendencia, que me han recibido como parte de su comunidad.

De forma más específica, quiero agradecer a mi asesor Guillermo Barrios del Valle, quien ha sabido sacar la ingeniera/científica que llevo dentro para plasmarla en estas páginas. Agradezco también a Guadalupe Huelsz Lesbros y al proyecto “Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables UNAM (291600)” por la oportunidad de participar en el proyecto y por la beca proporcionada para el desarrollo de este trabajo.

Gracias a José Campos, por el apoyo emocional y vocacional proporcionado a lo largo de casi cuatro años, así como por presentarme a uno de los amores de mi vida: la programación. Gracias Maximiliano Valdez, porque sin tus sabios consejos de Python esta tesis seguiría inconclusa.

Agradezco a mi hermano Pax por su constante apoyo en la actividad de debuggeo y a Viqui por ser el vivo ejemplo de “haz lo que amas” y siempre motivarme a ello.

Maribel, Magali, Carlos y Miguel, gracias por hacer posible la LIER y por todo el apoyo proporcionado a lo largo de estos años.

Por último quiero agradecer a mis amigos y compañeros de la cuarta y quinta generación de la LIER, por haber sido parte esencial de esta etapa.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Iluminación natural: importancia y ventajas . . . . .	1
1.2. Conceptos básicos de fotometría . . . . .	2
1.2.1. Magnitudes radiométricas y fotométricas . . . . .	3
1.3. Programas para simulación de iluminación natural . . . . .	4
<b>2. Simulaciones de iluminación natural con Radiance</b>	<b>5</b>
2.1. Trazado de rayos hacia atrás con el método de Montecarlo o de cómo funciona Radiance . . . . .	5
2.2. Coeficientes de Iluminación Natural (CIN) . . . . .	7
2.3. Modelos de cielo . . . . .	9
2.4. Ejemplo de cálculo de iluminación natural en un espacio sencillo . . . . .	10
2.4.1. Descripción de geometría y materiales . . . . .	10
2.4.2. Cálculo de CIN . . . . .	12
2.4.3. Matriz de luminancia del cielo . . . . .	13
2.4.4. Multiplicación de matrices . . . . .	13
2.5. Evaluación del deslumbramiento . . . . .	16
<b>3. Análisis de iluminación natural en oficinas del NELIER</b>	<b>19</b>
3.1. Descripción del espacio . . . . .	19
3.1.1. Consideraciones para la simulación con Radiance . . . . .	22
3.1.2. Casos de estudio . . . . .	26
3.2. Selección de días críticos . . . . .	26
3.3. Resultados . . . . .	30
3.3.1. Radiación directa al interior del espacio . . . . .	30
3.3.2. Mapas horarios de iluminancia . . . . .	32
3.3.3. Cálculo de la iluminancia útil por luz diurna ( <i>UDI</i> ) . . . . .	42
3.3.4. Evaluación del deslumbramiento . . . . .	46

3.4.	Evaluación de un ducto solar . . . . .	49
3.4.1.	Características del ducto solar . . . . .	49
3.4.2.	Coeficiente de transferencia . . . . .	50
3.4.3.	Eficiencia . . . . .	53
3.4.4.	<i>UDI</i> con implementación del ducto . . . . .	60
<b>4.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>A.</b>	<b>Selección de parámetros para la simulación con Radiance</b>	<b>71</b>
<b>B.</b>	<b>Ficha técnica luminarias</b>	<b>75</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Iluminación natural: importancia y ventajas

Una de las principales fuentes de energía de nuestro planeta es el sol, que nos provee de energía tanto térmica como luminosa. Esta última es necesaria no sólo porque nos permite ver para realizar las actividades cotidianas, sino también porque juega un papel importante en algunas funciones biológicas de los seres humanos como la producción de melatonina durante el ciclo circadiano. La luz puede también propiciar un estado de alerta o de relajación de acuerdo con su intensidad y composición espectral [1]. Por otra parte, se ha encontrado que la exposición prolongada a fuentes de iluminación artificial tiene consecuencias negativas para la salud, tales como mayor susceptibilidad a la formación de tumores [2], agorafobia [3] o aumento de estrés [4].

La iluminación ha adquirido un papel cada vez más importante en el área de estudio de la energía en edificaciones en los últimos años, puesto que el consumo de energía eléctrica con fines de iluminación en países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos representa el 34 % del consumo total de los edificios del sector terciario, dentro del que se incluyen los servicios educativos, de salud y financieros [5]. En México, el consumo energético del sector residencial, comercial y público constituye un 17 % del consumo final total nacional [6]. Dentro de este sector se encuentran las instituciones educativas como la UNAM, en la cual el uso de energía eléctrica para iluminación puede representar desde el 18 al 80 % del consumo total de sus edificios [7], según el tipo de actividades docentes o de investigación que se desempeñe en ellos, de modo que el aprovechamiento de la iluminación natural representa una oportunidad para la reducción del consumo energético de estas edificaciones.

Por estos motivos, el diseño y análisis de iluminación natural debe ser considerado en la etapa de diseño anterior a la de proyecto ejecutivo y construcción de un edificio.

## 1.2. Conceptos básicos de fotometría

La luz es el conjunto de radiaciones electromagnéticas (Figura 1.1) con longitud de onda entre 380 y 780 nm, que pueden ser percibidas por el ojo humano [8]. Este conjunto de radiaciones electromagnéticas no es percibido con la misma sensibilidad en todas las longitudes de onda, de modo que en la fotometría se utilizan las funciones de eficacia luminosa para ponderar la percepción del ojo humano para cada longitud de onda.

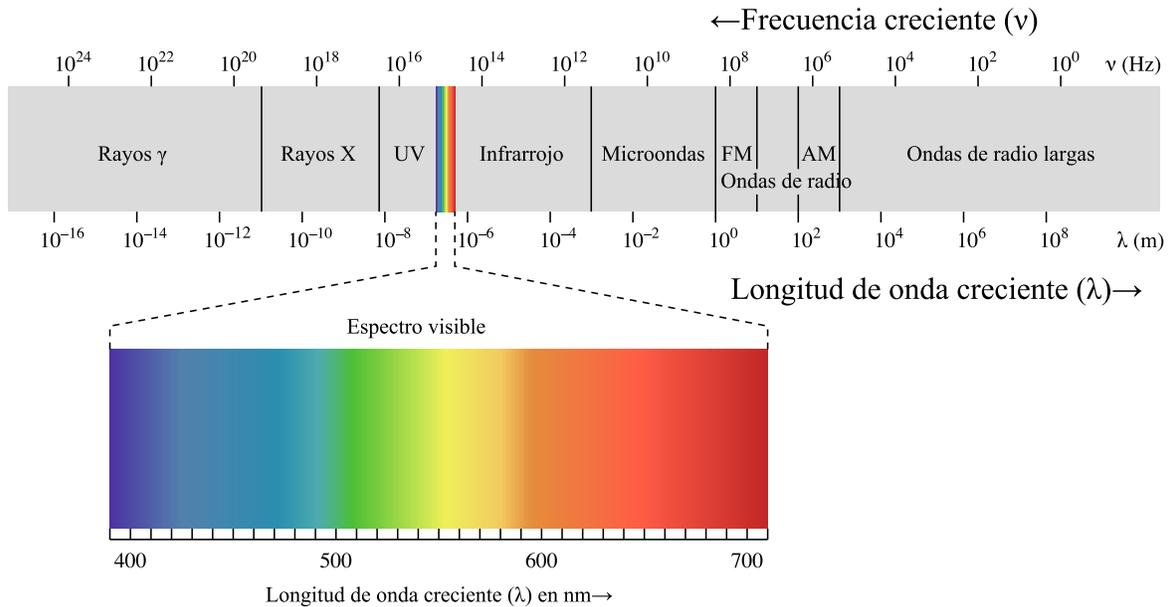


Figura 1.1: Espectro electromagnético [9].

Existen dos tipos de células fotosensibles en el ojo humano que se encargan de la visión: los conos y los bastones. Los conos se utilizan durante el día, son sensibles al color y proporcionan mayor agudeza visual, mientras que los bastones se utilizan en condiciones de baja iluminación por ser más sensibles a la luz, pero carecen de la capacidad de distinguir entre colores.

Gracias a estos dos tipos de células es que el ojo tiene la capacidad de adaptarse según las condiciones de iluminación. De acuerdo con esto, se utilizan las curvas fotópica y escotópica para ponderar la sensibilidad del ojo humano (Figura 1.2). La curva fotópica se utiliza durante el día o cuando la iluminación es abundante (luminancia  $> 5 \text{ cd m}^{-2}$ ) y la escotópica se utiliza por la noche o en condiciones de penumbra (luminancia  $< 0.005 \text{ cd m}^{-2}$ ) [10] y cuyos máximos son  $1700 \text{ lm W}^{-1}$  a  $555 \text{ nm}$  y  $683 \text{ lm W}^{-1}$  a  $507 \text{ nm}$ , respectivamente [11].

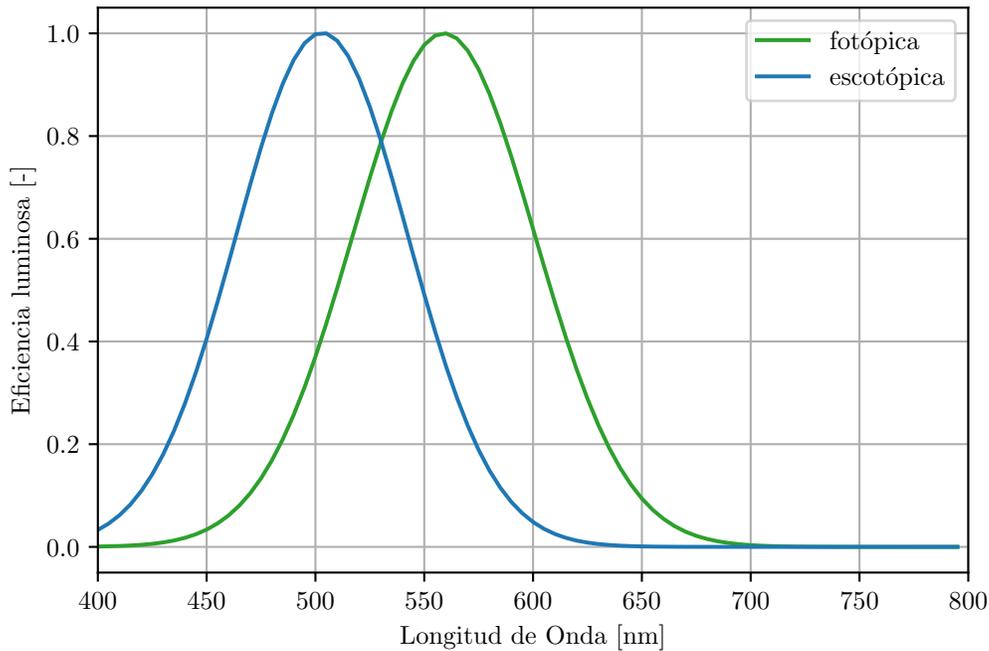


Figura 1.2: Funciones de eficacia luminosa fotópica y escotópica [11].

### 1.2.1. Magnitudes radiométricas y fotométricas

La fotometría se encarga del estudio de la luz de acuerdo con la percepción de la misma por el ojo humano, mientras que la radiometría estudia las radiaciones electromagnéticas en términos de potencia absoluta, por lo que será importante para este trabajo hacer notar la diferencia entre cuatro de las magnitudes medidas en estas dos ramas.

#### Radiancia

Esta magnitud radiométrica se refiere al flujo radiante emitido por unidad de ángulo sólido y unidad de área. Se utiliza el símbolo  $P$  y sus unidades son  $[\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}]$ .

#### Irradiancia

La irradiancia  $I$  es la magnitud radiométrica que describe la potencia incidente por unidad de superficie y sus unidades son  $[\text{W m}^{-2}]$ .

## Luminancia

La luminancia  $L$  es la magnitud fotométrica equivalente a la radiancia, con la diferencia de que está ponderada de acuerdo con la sensibilidad del ojo humano para cada longitud de onda. Sus unidades son  $[\text{cd m}^{-2}]$ .

## Iluminancia

La iluminancia  $E$  es la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área y se mide en  $[\text{lm m}^{-2}]$  o  $[\text{lx}]$ .

### 1.3. Programas para simulación de iluminación natural

Durante la etapa de planeación en la construcción de grandes edificios se suele hacer uso de software especializado para la simulación energética de edificaciones, el cual generalmente incluye simulaciones de iluminación tanto natural como artificial. Entre las herramientas utilizadas para en análisis del desempeño energético y lumínico en edificios se encuentran programas como OpenStudio, DesignBuilder, DIVA for Rhino y REVIT Insight360. Estos programas utilizan distintos motores para las simulaciones energéticas como pueden ser EnergyPlus y DOE-2. Asimismo, hacen uso de motores de cálculo para las simulaciones de iluminación tales como Radiance y Lighting Analysis for Revit (LAR).

Existen otros programas para la simulación de iluminación natural por separado, entre los que se encuentran Daysim, LightSolve y LightStanza. Todos estos son interfaces gráficas o plug-ins que utilizan Radiance como motor para los cálculos de iluminancia. En esta tesis se utilizará Radiance controlado mediante la línea de comando, lo que da un control absoluto sobre todas las opciones de simulación.

# Capítulo 2

## Simulaciones de iluminación natural con Radiance

En este capítulo se presenta el fundamento teórico para el análisis de iluminación natural con Radiance, comenzando con una breve explicación de cómo funciona dicha herramienta. Posteriormente se explica el concepto de coeficiente de iluminación natural y se presentan dos de los modelos de cielo más utilizados para simulaciones de este tipo, el de la Comisión Internacional de la Iluminación y el propuesto por Pérez en [12]. A modo de validación, se presenta el procedimiento para el cálculo de iluminancia en un espacio sencillo, previamente simulado en [13] y por último, se describe el proceso de evaluación de deslumbramiento a través del uso de la probabilidad de deslumbramiento (DGP).

### 2.1. Trazado de rayos hacia atrás con el método de Montecarlo o de cómo funciona Radiance

Radiance es un conjunto de programas en los que se implementa el trazado de rayos hacia atrás y el método de integración Montecarlo. El trazado de rayos hacia atrás consiste en seguir la trayectoria de la luz desde una cámara hipotética como la que se muestra en la Figura 2.1, pasando por sus interacciones con distintas superficies, hasta la fuente que la emite. Se denomina hacia atrás porque el rastreo ocurre de forma inversa al sentido en el que viaja la luz, de forma en que se siguen únicamente los rayos que se sabe que efectivamente llegan a la cámara o sensor de interés, que puede ser también el ojo de un observador. A partir de la información obtenida después del trazado de rayos es posible generar una imagen fotorrealista que contiene información fotométrica en cada pixel, ya sea de luminancia o iluminancia.

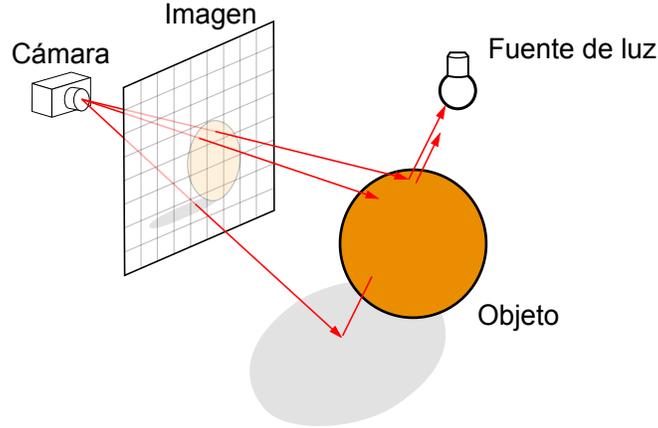


Figura 2.1: Escena hipotética de trazado de rayos hacia atrás, donde los rayos se originan en la cámara e interactúan con los objetos en la escena, siendo absorbidos o reflejados por estos objetos hasta llegar a las fuentes de luz. Modificada de [14].

Radiance utiliza el método de Montecarlo para integrar la ecuación de renderización (2.1) a partir del muestreo con múltiples rayos aleatorios trazados desde la cámara hasta las fuentes emisoras [15]. La ecuación de renderización describe cómo se calcula la iluminancia en cada punto de las superficies simuladas (ver Figura 2.2) y tiene la forma:

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = L_e(\theta_r, \phi_r) + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i(\theta_i, \phi_i) \rho_{bd}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i, \quad (2.1)$$

donde:

$\theta_i$  es el ángulo polar del haz incidente,

$\phi_i$  es el ángulo acimutal del haz incidente,

$\theta_r$  es el ángulo polar del haz reflejado,

$\phi_r$  es el ángulo acimutal del haz reflejado,

$L_e(\theta_r, \phi_r)$  es la radiancia emitida ( $\text{W sr}^{-1} \text{ m}^2$ ),

$L_r(\theta_r, \phi_r)$  es la radiancia reflejada,

$L_i(\theta_i, \phi_i)$  es la radiancia incidente y

$\rho_{bd}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$  es la función bidireccional de dispersión de la luz de la superficie ( $\text{sr}^{-1}$ ).

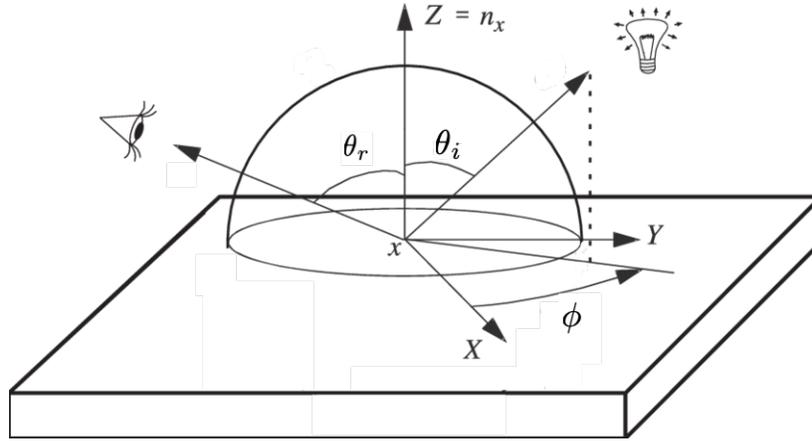


Figura 2.2: Geometría para la ecuación de renderización, modificada de [16].

En la ecuación 2.1 primer término corresponde a la luz emitida por la superficie y el segundo término corresponde a la luz reflejada por la superficie, que se obtiene al integrar el producto de la luz incidente multiplicada por la función bidireccional de dispersión de la luz. Esta función describe el comportamiento de la radiación incidente en la superficie y toma en cuenta en qué medida ésta es reflejada ya sea de forma especular o difusa, así como la cantidad de radiación transmitida por ella. Se le conoce como bidireccional puesto que pueden intercambiarse las direcciones de incidencia y reflexión sin alterar los resultados.

Radiance es utilizado para simulaciones de iluminación tanto artificial como natural para realizar un análisis cualitativo a través de la generación de imágenes fotorrealistas o un análisis cuantitativo utilizando sensores virtuales, es decir, midiendo iluminancia en puntos específicos de un espacio. Este último se lleva a cabo de forma matricial a partir de una malla de sensores y el procedimiento que se describirá en la próxima sección.

## 2.2. Coeficientes de Iluminación Natural (CIN)

Tregenza propone en [17] una metodología para el cálculo de la iluminancia natural en interiores, comenzando con la premisa de que la iluminancia natural medida en un punto dentro de una habitación depende de dos factores que, en general, son independientes el uno del otro: 1) la luminancia del cielo y 2) la forma, la textura y las propiedades ópticas de los materiales de las superficies cercanas. Este último factor, que en otras palabras está asociado con la orientación, geometría y materiales del edificio, puede considerarse constante de forma que, para el mismo espacio, la iluminancia a lo largo de un día o un año cambiará sólo en función de la distribución de luminancia del cielo.

No obstante, la contribución luminosa de la bóveda celeste a un punto en el interior de un espacio no es igual para cada punto de la misma bóveda (habrá áreas de cielo que

no serán visibles desde algunos puntos pero sí desde otros) y pueden existir variaciones en la luminancia que afecten sólo a pequeñas zonas de ella (el paso de una nube densa, por ejemplo), por lo que es necesario discretizar la bóveda celeste para tomar en cuenta de forma más sencilla dichas variaciones. En la Figura 2.3 se muestran dos discretizaciones del cielo usadas para la evaluación de la iluminación natural con Radiance.

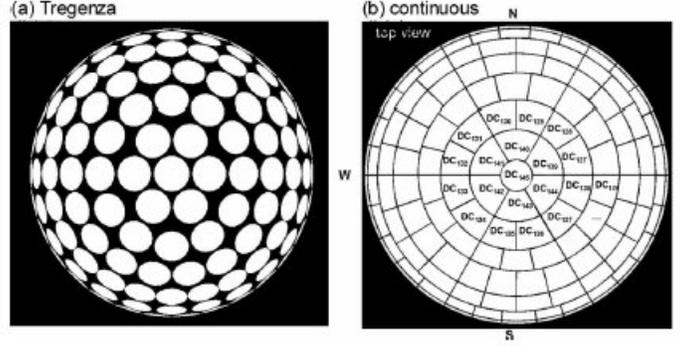


Figura 2.3: a) Discretización del cielo en parches circulares propuesta por Tregenza y b) discretización continua propuesta por Reinhart [18].

Así, Tregenza propone el cálculo de un coeficiente de iluminación natural  $CIN_{\theta\phi}$ , que representa la sensibilidad de la iluminancia interior a cambios en la luminancia de un elemento del cielo con posición  $\theta$  y  $\phi$ , siguiendo la notación de la Figura 2.2. Este coeficiente se define de la forma:

$$CIN_{\theta\phi} = \frac{\Delta E_{\theta\phi}}{L_{\theta\phi} \Delta S_{\theta\phi}}, \quad (2.2)$$

donde  $\Delta E_{\theta\phi}$  es la iluminancia en un punto en el interior del espacio a evaluar producida por un pequeño elemento de cielo con ángulos solares cenital  $\theta$  y azimutal  $\phi$ ,  $L_{\theta\phi}$  es la luminancia del mismo segmento de cielo y  $\Delta S_{\theta\phi}$  es su ángulo sólido [19]. De este modo, la iluminancia total en un punto en una habitación se obtiene de la forma:

$$E = \sum_{p=1}^n CIN_p S_p L_p. \quad (2.3)$$

Es decir, la iluminancia en un punto es la suma de  $n$  productos de  $CIN_p$ ,  $S_p$  y  $L_p$  de cada parche  $p$ , siendo  $n$  el número de parches en los que se dividió el cielo. Los  $n$  valores de  $CIN$ ,  $S$  y  $L$  pueden ser considerados vectores y la formulación puede extenderse para el cálculo de la iluminancia en  $m$  puntos de la habitación, de modo que el arreglo de  $CIN$  se convierte en una matriz de  $m \times n$  elementos. De igual manera, otro vector columna puede formarse con los  $n$  productos del ángulo sólido y la luminancia, resultando en la formulación:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CIN_{11} & CIN_{12} & \dots & CIN_{1n} \\ CIN_{21} & CIN_{22} & \dots & CIN_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ CIN_{m1} & CIN_{m2} & \dots & CIN_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 L_1 \\ S_2 L_2 \\ \vdots \\ S_n L_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Es a través de esta formulación que se calcula con Radiance de forma sencilla la iluminancia al interior de un espacio. El cálculo de CIN se lleva a cabo con el programa `rfluxmtx`, mientras que la distribución de luminancia del cielo discretizado se determina a partir de un archivo de clima con el programa `gendaymtx` y la multiplicación de ambas matrices se ejecuta con el comando `dctimestep`.

## 2.3. Modelos de cielo

Para la evaluación de la iluminación natural en un espacio es necesario conocer la distribución de luminancia del cielo, sin embargo, el patrón de luminancia del cielo puede ser difícil de caracterizar en la mayoría de los casos exceptuando para cielos muy nublados [19], por lo que se han propuesto patrones de luminancia idealizados conocidos también como modelos de cielo. A continuación se presenta una breve descripción de los modelos de cielo más utilizados para el estudio de la iluminación natural.

### Modelo de cielo nublado de la CIE

La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE por sus siglas en francés) define como su modelo de cielo nublado estándar el formulado por Moon y Spencer cuya distribución de luminancia se rige por la ecuación (2.5),

$$L_\theta = \frac{L_z \times (1 + 2 \cos \theta)}{3} \quad (2.5)$$

donde  $L_\theta$  es la luminancia a un ángulo  $\theta$  del cenit, y  $L_z$  es la luminancia en el cenit. Este es el modelo utilizado para calcular el factor de luz diurna, métrica que es utilizada en los países nórdicos para cuantificar la iluminación natural pero que para países como México no funciona porque son pocas las ocasiones en las que se tienen cielos nublados como el que representa este modelo. La contraparte de este modelo adoptada por el CIE corresponde a la de un cielo despejado cuya ecuación es más compleja puesto que considera varios efectos observados en la bóveda celeste como una zona muy brillante alrededor del sol, una luminancia mínima en algún punto sobre el horizonte y el aumento de la luminancia hacia el horizonte, donde la magnitud de estos fenómenos está en función de la posición solar.

## Modelo de cielo de Pérez

Este modelo tiene la forma:

$$L(\gamma, \theta) = L_z \left[ 1 + a \exp \frac{b}{\sin \gamma} \right] [1 + c \exp(\theta d) + e \sin^2 \theta], \quad (2.6)$$

donde  $a, b, c, d$  y  $e$  son coeficientes que dependen de la altura solar  $\gamma$  y la claridad y brillo del cielo [19]. Estos coeficientes fueron obtenidos por Pérez et al. en [12] a través de un ajuste de mínimos cuadrados de una base de datos de luminancia del cielo medida en Berkeley, California y pueden obtenerse a partir de mediciones de radiación solar directa y difusa [20]. Dependiendo del signo del coeficiente  $a$ , el modelo presentará un oscurecimiento (para  $a > 0$ ) o aclaramiento (con  $a < 0$ ) del horizonte con respecto al zenit. El coeficiente  $b$  modula el gradiente de luminancia cerca del horizonte, mientras que el coeficiente  $c$  es proporcional a la intensidad relativa de la región circumsolar. Por otra parte, el coeficiente  $d$  modifica el tamaño de la región circumsolar y el coeficiente  $e$  se utiliza para considerar la intensidad relativa de la luz reflejada difusamente en la superficie terrestre. La ventaja que presenta este modelo frente a los modelos propuestos por la CIE es la posibilidad de representar varios tipos de cielos, a partir de las magnitudes de variables meteorológicas como la irradiancia directa y difusa, por lo que será el modelo utilizado en este trabajo.

El programa `gendaylit` permite generar la descripción de un cielo basada en este modelo para un momento específico, mientras el programa `gendaymtx` genera una matriz anual con base en el modelo, a partir de un archivo EPW.

## 2.4. Ejemplo de cálculo de iluminación natural en un espacio sencillo

### 2.4.1. Descripción de geometría y materiales

En esta sección se presenta, a modo de validación, un ejemplo de uso de Radiance para el cálculo de iluminación natural en un espacio sencillo publicado en [13]. Los archivos utilizados para este ejemplo se encuentran disponibles en el repositorio <https://github.com/lcbeg/illuminacion-natural-radiance>, puesto a disposición por la autora de este trabajo.

El primer paso para llevar a cabo una simulación con Radiance consiste en especificar la geometría del espacio a analizar. Esto se puede hacer de dos formas: directamente en un archivo de texto o a través del uso de software CAD. En general, la segunda opción resulta más práctica puesto que basta con trazar el modelo y utilizar un plugin como `su2rad` para traducir el modelo de SketchUp a un archivo de texto legible por Radiance. Para este ejemplo

utilizaremos el espacio mostrado en la Figura 2.4, contenido en el archivo *habitacion.rad*, que consiste en una habitación sencilla con una ventana orientada hacia el sur y su respectiva protección solar.

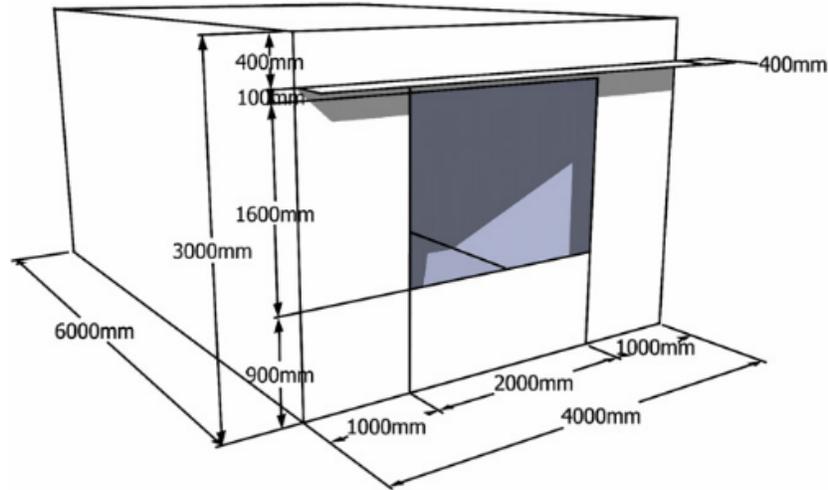


Figura 2.4: Dimensiones del espacio a simular [13].

Una vez establecida la geometría es necesario especificar las propiedades ópticas (reflectancia para materiales opacos y transmitancia para los translúcidos) de las superficies del modelo, esto se hace modificando manualmente el archivo de texto *materials.rad* generado por su2rad con las propiedades correspondientes. Los valores de reflectancia y transmitancia utilizados para este ejemplo se enlistan en la tabla 2.1.

Superficie	propiedad especificada	valor
Muros	reflectancia	0.700
Piso	reflectancia	0.300
Techo	reflectancia	0.800
Alero	reflectancia	0.000
Ventana	transmitancia	0.782

Tabla 2.1: Propiedades de superficies del ejemplo.

Posteriormente, se concatenan cada una de las descripciones de la escena en un archivo octree, cuya estructura facilita el proceso de trazado de rayos, a través del comando `oconv` utilizado de la forma:

```
oconv materials.rad habitacion.rad >modelo.oct
```

## 2.4.2. Cálculo de CIN

Tan pronto como se haya generado el octree, que contiene la geometría y las propiedades de las superficies del modelo, se puede proceder al cálculo de los CIN, para lo cuál se utiliza el comando `rfluxmtx`. Este comando, que realiza el trazado de rayos, requiere un emisor (nuestra matriz de sensores de iluminancia) y un receptor (la bóveda celeste, nuestra fuente de luz). Los archivos `sensores.pts` y `cielo_r4.rad` contienen así nuestro emisor y nuestro receptor de rayos. El primero consiste en una matriz con 10 sensores orientados hacia arriba, distribuidos en una línea paralela al suelo, cruzando por en medio la habitación en un eje sur a norte, a una altura de 0.8 m (altura a la que se encuentra el área de trabajo) y espaciados cada 0.5 m entre ellos. El segundo archivo contiene la descripción de un cielo dividido en 2305 parches según la discretización de Reinhart.

Por otra parte, para que los resultados sean correctos se requiere seleccionar los parámetros del cálculo indirecto de la simulación adecuados a la geometría por simular. El proceso de selección de estos parámetros se describe a detalle en el Apéndice A y para fines prácticos en este ejemplo nos limitaremos a utilizar los elegidos por Christian et al., que se muestran en la Tabla 2.2.

Parámetro	Abreviatura	valor
Ambient bounces	-ab	7
Ambient division	-ad	4096
Ambient super-samples	-as	2048
Ambient accuracy	-aa	0.1
Ambient resolution	-ar	256
Direct thresholding	-dt	0.03
Direct sampling	-ds	0.02

Tabla 2.2: Parámetros utilizados para la simulación del ejemplo [13].

De este modo, el comando a utilizar queda como:

```
rfluxmtx <sensores.pts -I+ -v -ab 7 -ad 4096 -as 2048 -aa 0.1 /  
-ar 256 -dt 0.03 -ds 0.02 -lw 1.52e-06 - cielo_r4.rad /  
-i modelo.oct >matriz_dc.mtx
```

La matriz resultante tendrá un encabezado como el siguiente:

```
#:RADIANCE  
oconv -f -i modelo.oct cielo_r4.rad  
rcontrib -fo+ -ab 7 -ad 4096 -as 2048 -aa 0.1 -ar 256 [...]  
SOFTWARE= RADIANCE 5.2 Official Release Oct 8 2018 by LBNL  
CAPDATE= 2019:10:21 12:36:11
```

```
GMT= 2019:10:21 17:36:11
NCOMP=3
NCOLS=2306
FORMAT=ascii
```

Y las siguientes diez líneas contendrán los 2305 CIN para cada sensor y uno correspondiente al suelo, de forma que tendremos 10 líneas (por los 10 sensores) con 2306 columnas.

### 2.4.3. Matriz de luminancia del cielo

El siguiente paso es la generación de un vector que contenga los valores de luminancia para cada parche del cielo correspondiente al día 21 de septiembre a las 15:00 en horario solar en Copenhague (latitud 55.67° N). Para ello, se utiliza el programa `gendlit` y los valores de radiación directa y difusa de 245 y 189 W/m<sup>2</sup> respectivamente, obtenidos del año de referencia Danés (DRY), con el comando:

```
gendlit 09 21 +15 -a 55.67 -W 245 189 /
| genskyvec -m 4 >vector_cielo.skv.
```

El vector resultante tendrá un encabezado como el siguiente y contendrá una columna con los 2306 valores de luminancia de 2305 segmentos del cielo y uno correspondiente al suelo.

```
?RADIANCE
genskyvec -m 4
NROWS=2306
NCOLS=1
NCOMP=3
FORMAT=ascii
```

### 2.4.4. Multiplicación de matrices

Por último, para obtener el valor de la iluminancia en cada uno de nuestros sensores, realizaremos la multiplicación de las matrices como en la ecuación (2.4), utilizando el comando `dctimestep` que generará una matriz con valores de irradiancia especificados para los colores rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés). Finalmente, convertiremos a valores de iluminancia multiplicándolos por el coeficiente de sensibilidad cromática correspondiente, usando el programa `rmtxop`. El comando a utilizar queda:

```
dctimestep matriz_dc.mtx vector_cielo.skv /
| rmtxop -fa -c 47.7 119.9 11 -,
```

que nos dará como resultado lo siguiente:

```
#?RADIANCE
rmtxop -fa -c 47.7 119.9 11 -
dctimestep matriz_dc.mtx vector_cielo.skv
CAPDATE= 2019:05:28 15:39:49
GMT= 2019:05:28 20:39:49
Applied 1x3 matrix transform
NROWS=11
NCOLS=1
NCOMP=1
FORMAT=ascii
```

```
1.431362512200000e+04
4.344769333000000e+03
2.655866928000000e+03
1.877208411000000e+03
1.878895549000000e+03
1.284508342700000e+03
9.388450715000000e+02
9.222022071000000e+02
7.395792652000000e+02
5.754121454000000e+02
5.987306822000000e+02
```

Donde cada línea corresponde a la lectura de uno de nuestros sensores en [lx]. Finalmente, para validar los datos obtenidos, se realizaron diez simulaciones con el procedimiento anterior y se promediaron los resultados de cada sensor, dando lugar a los valores presentados en la gráfica de la Figura 2.5, con su respectiva desviación estándar.

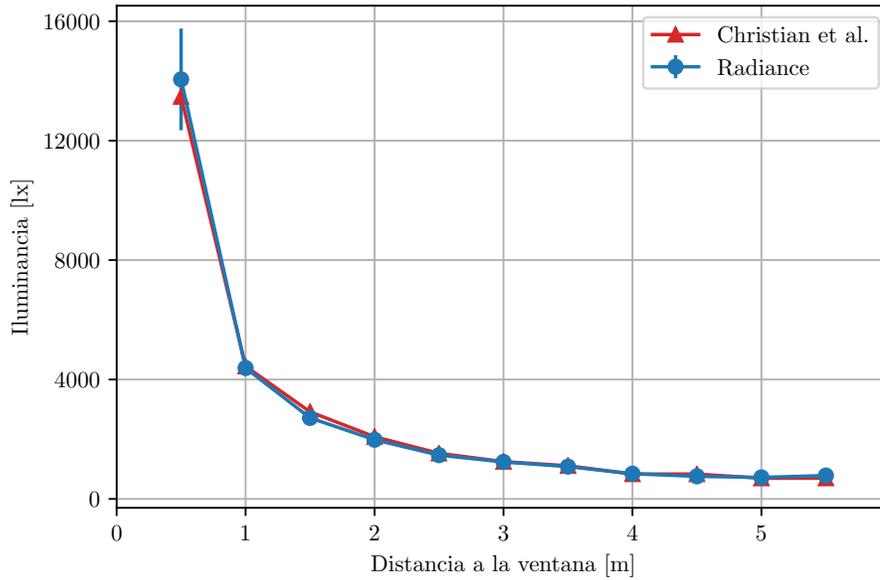


Figura 2.5: Comparación de resultados de iluminancia para espacio simple obtenidos en este ejemplo y los presentados por Christian et al. en [13].

Se calculó el error relativo entre los resultados obtenidos y los reportados por Christian et al. de la forma:

$$ER = \frac{|E_{Radiance} - E_{Christian}|}{E_{Christian}} \times 100 \%$$

La Figura 2.6 muestra el error relativo calculado, que resulta pequeño y aumenta cuando la magnitud de la medición en la parte alejada de la ventana decrece, alcanzando un máximo de 13% en el sensor localizado a 5.5 m de la ventana.

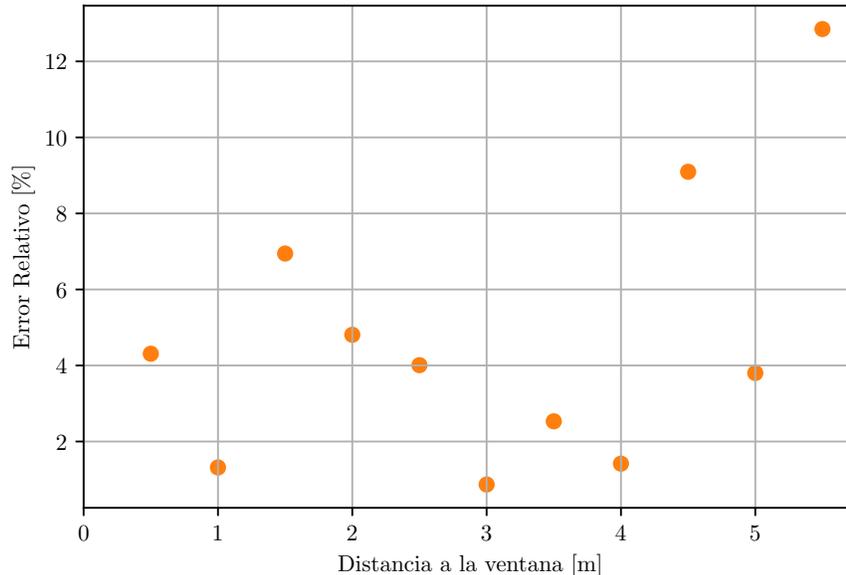


Figura 2.6: Error relativo ER para resultados de iluminancia en espacio simple obtenidos en este ejemplo y los presentados por Christian et al. en [13].

## 2.5. Evaluación del deslumbramiento

El deslumbramiento es un fenómeno complejo que puede darse en dos circunstancias. La primera de ellas se da cuando hay demasiada luz, resultando en dificultad para observar algunos objetos o una reacción fotofóbica en el observador que se manifiesta en repetido parpadeo o voltear a ver hacia otro lado. En el segundo caso, que ocurre cuando el rango de luminancia en el campo visual es amplio, el contraste excesivo entre partes iluminadas y oscuras causa una degradación progresiva del desempeño de la vista que se ve reflejado en cansancio visual o sensación de incomodidad, hasta dolores de cabeza [21].

Existen varias métricas utilizadas para la evaluación del deslumbramiento, basadas en ecuaciones que relacionan valores de luminancia o distribuciones de luminancia en el campo visual del observador con la sensación subjetiva de deslumbramiento; dichas ecuaciones han sido obtenidas de forma experimental tanto en espacios con iluminación artificial como en lugares iluminados naturalmente. Una de estas métricas es la probabilidad de deslumbramiento (*DGP* por sus siglas en inglés), propuesta por Wienold [22] e implementada en el programa *evalglare* de Radiance. Puesto que indica una probabilidad, se trata de un

número adimensional cuyo valor va de 0 a 1. El  $DGP$  se calcula de la forma:

$$DGP = 5.87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 9.18 \cdot 10^{-2} \cdot \log \left( 1 + \sum_i^n \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} \cdot P_i^2} \right) + 0.16, \quad (2.7)$$

donde:

$E_v$  es la iluminancia vertical del ojo [lx],

$L_s$  la luminancia de la fuente [cd/m<sup>2</sup>],

$\omega_s$  es el ángulo sólido de la fuente vista por el observador y

$P$  es el índice de posición, que es adimensional e indica la proporción del deslumbramiento experimentado en relación a la posición de la fuente en el campo visual del observador. Se calcula con dos ecuaciones empíricas distintas para las fuentes que se encuentran sobre y bajo la línea de visión, descritas en [22].

Esta ecuación es válida en el rango de  $0.2 < DGP < 0.8$  y para una iluminancia vertical  $E_v$  mayor a 380 lx. Una de las principales desventajas de esta métrica es la alta demanda de cómputo para su cálculo, puesto que requiere de imágenes foto realistas generadas con Radiance para cada posición o punto de vista de interés y a distintas horas del día que son posteriormente analizadas con la herramienta `evalglare`. Como solución a esta alta demanda de cómputo, existe la propuesta de un DGP simplificado (DGPs [23]), que depende únicamente de la iluminancia vertical del ojo  $E_v$  pero puede ser utilizado únicamente si no existe incidencia de forma directa de luz del sol o de algún reflejo de ésta [21]. La forma de calcular la probabilidad de deslumbramiento de manera simplificada es:

$$DGPs = 6.22 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 0.184. \quad (2.8)$$

Tanto  $DGP$  como  $DGPs$  se pueden interpretar en cuatro zonas de acuerdo con la Tabla 2.3.

Nivel de deslumbramiento	DGP
Imperceptible	$\leq 0.352$
Perceptible	$\leq 0.394$
Molesto	$\leq 0.456$
Insoportable	$\leq 0.590$

Tabla 2.3: Niveles de deslumbramiento de acuerdo al DGP [24].



# Capítulo 3

## Análisis de iluminación natural en oficinas del NELIER

En este capítulo se describe inicialmente el espacio estudiado, las simplificaciones utilizadas en el modelo simulado y los casos de estudio analizados. Posteriormente se explica el proceso de selección de días críticos para el estudio. Se presentan las imágenes fotorrealistas generadas para las 9:00 h en horario solar para los días críticos soleados, con las cuales se comprueba de forma cualitativa la incidencia de radiación solar directa para uno de los casos de estudio. Posteriormente se presentan mapas de iluminancia en el plano de trabajo durante los días críticos, para las horas en las que hay iluminación natural. Por último, se presentan los resultados para el estudio anual de la iluminancia a través de mapas de iluminancia útil por luz diurna y del deslumbramiento en el área descrita.

### 3.1. Descripción del espacio

El edificio modelado se encontrará en la localidad de Temixco, Morelos, 18.84° N y longitud 99.26° O. El clima en Temixco es cálido subhúmedo. En la Figura 3.1 se presentan los valores de iluminancia global horaria en el exterior correspondientes al año típico de Temixco y en la Figura 3.2 se muestran los valores de iluminancia exterior global máximo diario promedio para cada mes  $E_{max}$ , así como el promedio diario mensual para la iluminancia global exterior  $E_{prom}$ , notando que ambos valores alcanzan su máximo en el mes de abril con valores de 125,000 lx y 70,000 lx respectivamente. Por otra parte, los mínimos se presentaron en el mes de enero con valores de  $E_{max} = 90,000$  lx y  $E_{prom} = 50,000$  lx.

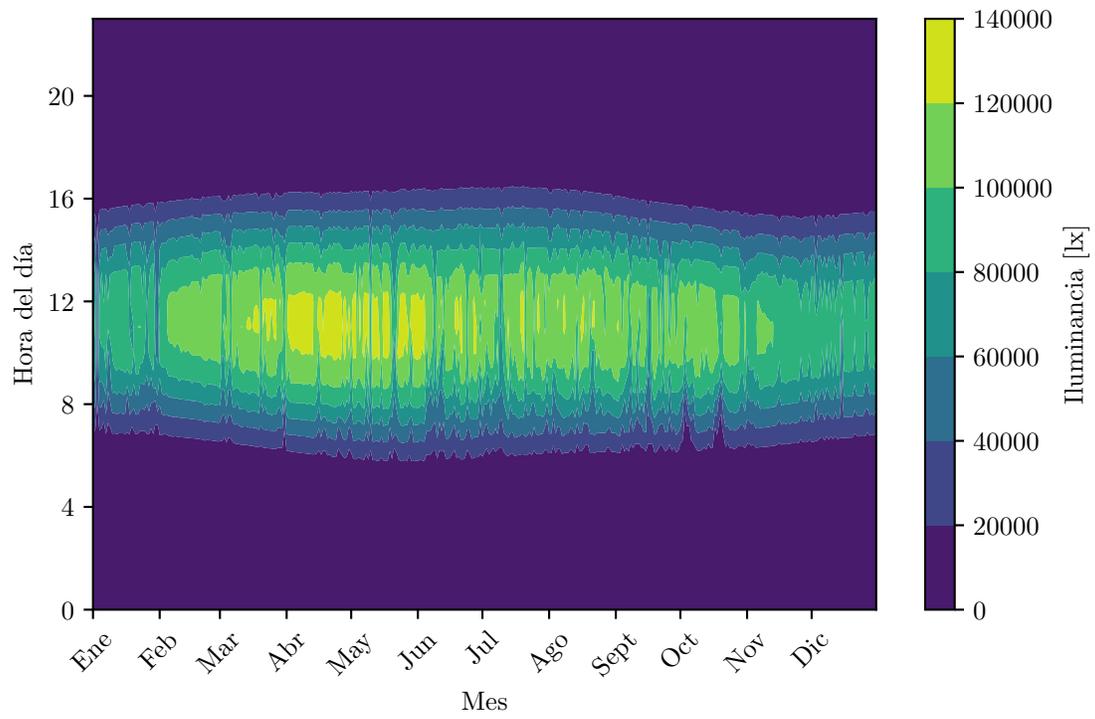


Figura 3.1: Iluminancia global horaria para Temixco, Morelos.

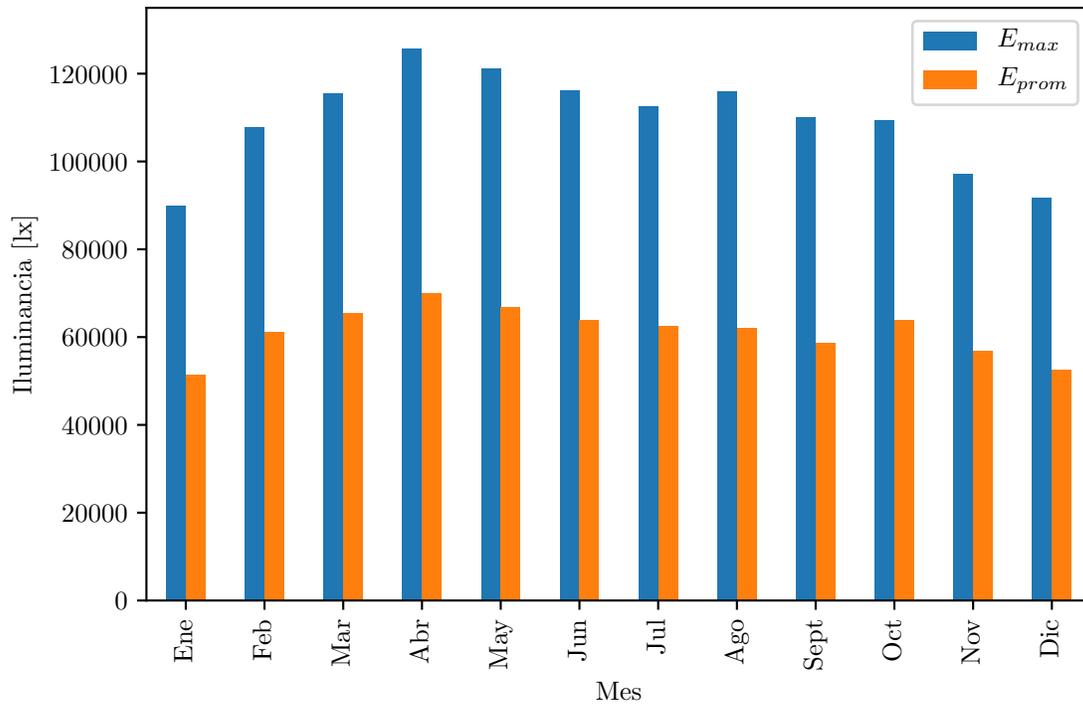


Figura 3.2: Iluminancia exterior global máxima diaria promedio mensual  $E_{max}$  y promedio diario  $E_{prom}$  en Temixco, Morelos.

El espacio simulado corresponde a las oficinas y espacios administrativos del Nuevo Edificio de la Licenciatura en Energías Renovables (NELIER, Figura 3.3), que será construido como parte del proyecto “Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables UNAM (291600)”.

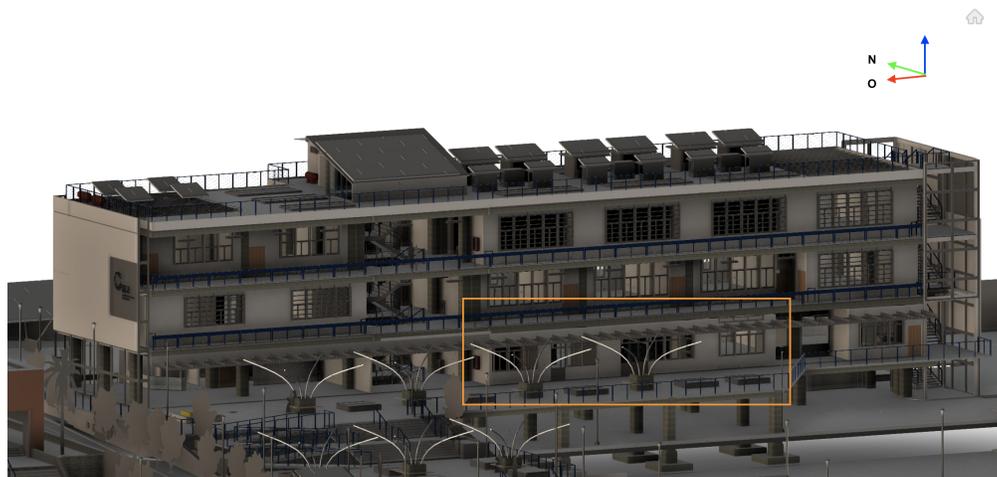


Figura 3.3: Fachada sur del NELIER, área simulada marcada con rectángulo anaranjado.

En la Figura 3.4 se muestra la planta del área administrativa y coordinación del NELIER. Se trata de un espacio con múltiples subdivisiones y superficies translúcidas tanto en la fachada norte como en la fachada sur.

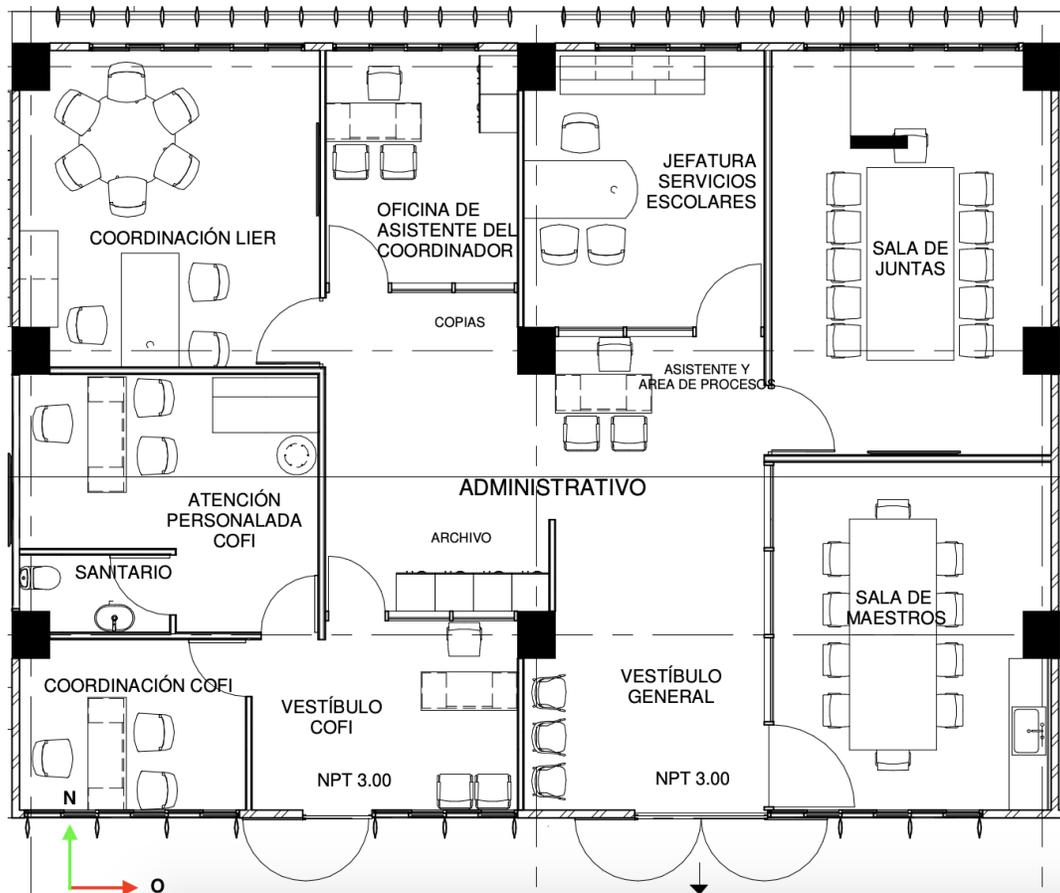


Figura 3.4: Plano arquitectónico del área administrativa.

### 3.1.1. Consideraciones para la simulación con Radiance

#### Simplificaciones en geometría y propiedades

A diferencia de la creación digital de imágenes fotorrealistas, en la predicción de niveles de iluminación con Radiance la complejidad de los elementos modelados debe estar directamente relacionada con su contribución a la iluminancia en los puntos de interés [25], de forma que es posible reducir el tiempo de modelado sin sacrificar la precisión de la simulación. De acuerdo con esto, se realizaron las siguientes simplificaciones:

- Se modelaron con detalle únicamente los espacios pertenecientes al área administrativa del edificio, considerando los espesores de los muros, cancelas y protecciones solares en dicha zona (Figura 3.5).

- En cuanto al exterior, el resto del edificio se modeló utilizando el valor de reflectancia del material predominante, el ladrillo blanco.
- En la fachada sur (Figura 3.6), se representó el alero con una superficie plana.
- Se utilizaron planos horizontales en el piso para modelar la contribución del albedo.
- Las simulaciones se realizaron considerando ventanas cerradas.
- Los árboles se modelaron de manera simplificada, manteniendo la geometría propuesta por el proyecto pero utilizando un material semitransparente para tomar en cuenta el sombreado parcial que éstos proporcionan.



Figura 3.5: Detalle del interior del espacio simulado considerando los espesores de muros, protecciones solares y particiones interiores.

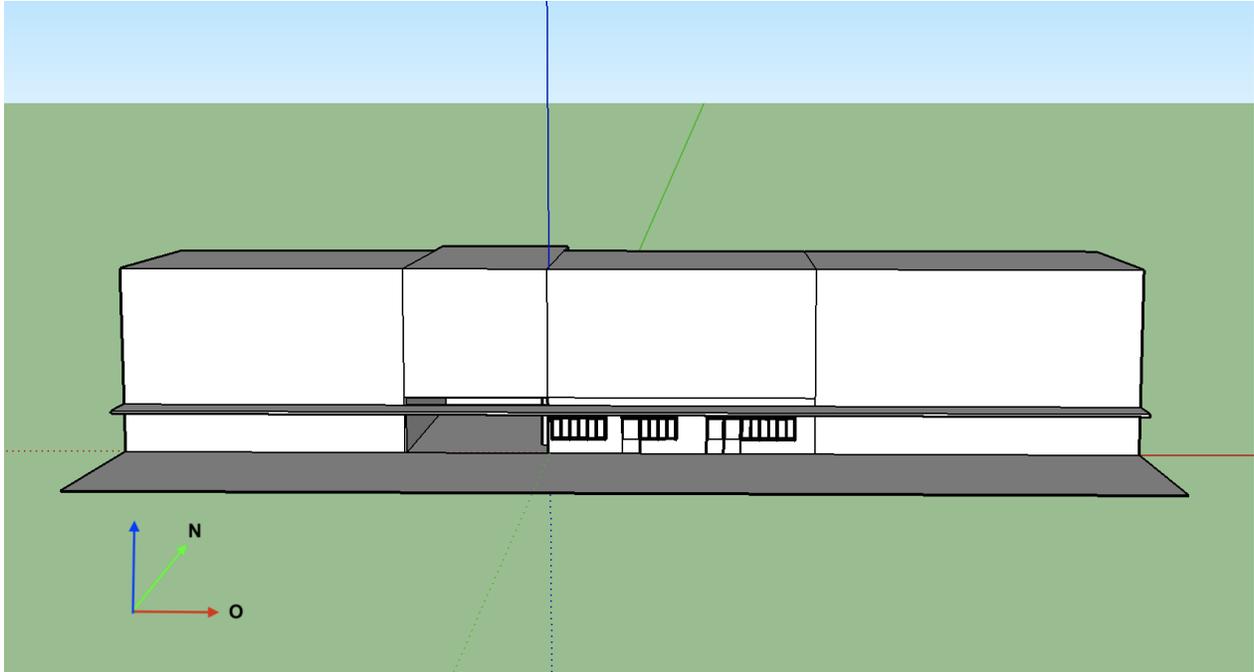


Figura 3.6: Fachada sur del modelo simplificado.

### Propiedades de los materiales

En la Tabla 3.1 se presentan los valores de reflectancia  $r_{\text{canal}}$  para los canales rojo (R) verde (G) y azul (B), especularidad  $\sigma$  y rugosidad  $\rho$  utilizadas para los materiales opacos del modelo de Radiance. Dichos valores fueron obtenidos de la base de datos en [26].

Materiales en modelo	Nombre en base de datos	Tipo	$r_{\text{R}}$ [-]	$r_{\text{G}}$ [-]	$r_{\text{B}}$ [-]	$\sigma$ [-]	$\rho$ [-]
Concreto, alero sur	Light_grey_stone_tiles	plastic	0.2805	0.2811	0.2644	0.0000	0.0000
Muros	White_painted_pillars	plastic	0.8988	0.8674	0.7560	0.0054	0.0000
Techo	White_ceiling_panels	plastic	0.8574	0.8495	0.7980	0.0047	0.0000
Protecciones y canceles	Aluminium_grey_overhang	plastic	0.1835	0.1787	0.1641	0.0201	0.0000

Tabla 3.1: Propiedades de materiales opacos utilizados en el modelo del NELIER.

En cuanto a los materiales transparentes, se asignaron las propiedades de transmitancia en los canales rojo verde y azul ( $\tau_{\text{R}}, \tau_{\text{G}}$  y  $\tau_{\text{B}}$ , respectivamente) presentes en la Tabla 3.2.

Puesto que Radiance así lo requiere [27], se calculó la transmitancia  $\tau$  para las ventanas y ventanas con acabado esmerilado a partir del factor de transmisión solar  $TN$  utilizando la ecuación:

$$\tau = \frac{\sqrt{0.8402528435 + 0.007252229 * TN^2 - 0.9166530661}}{0.0036261119 * TN}. \quad (3.1)$$

Los valores obtenidos a partir la ecuación 3.1 se presentan en la Tabla 3.2, para  $TN = 0.90$  en el caso de las ventanas y  $TN = 0.84$  en el caso de las ventanas con acabado esmerilado.

Dado que para simular los árboles se utilizó un material tipo trans, se le asignaron adicionalmente las propiedades de especularidad  $\sigma$ , rugosidad  $\rho$ , factor de transmisión  $\mathbf{t}$  y factor de transmisión especular  $\mathbf{t}_s$  sugeridas en [28] para el modelado de árboles en Radiance. Por otra parte, se les asignó una transmitancia de 0.1551 correspondiente al haya americana de acuerdo con [29], que fue el árbol que se encontró con hojas más parecidas al ciso, la especie que se escogió para el proyecto.

<b>Materiales en modelo</b>	<b>Tipo</b>	$\tau_{\mathbf{R}}$ [-]	$\tau_{\mathbf{G}}$ [-]	$\tau_{\mathbf{B}}$ [-]	$\sigma$ [-]	$\rho$ [-]	$\mathbf{t}$ [-]	$\mathbf{t}_s$ [-]
Ventanas	glass	0.7939	0.7939	0.7939	-	-	-	-
Ventanas acabado esmerilado	glass	0.6456	0.6456	0.6456	-	-	-	-
Árboles	trans	0.1551	0.1551	0.1551	0	0	1	1

Tabla 3.2: Propiedades de materiales transparentes utilizados en el modelo del NELIER.

### Parámetros de la simulación

Los parámetros que se utilizaron para la simulación de Radiance y que son distintos de los establecidos por defecto para `rfluxmtx` se muestran en la Tabla 3.3.

<b>Parámetro</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>valor</b>
Ambient bounces	-ab	10
Ambient division	-ad	65536
Ambient super-samples	-as	2048
Limit weight	-lw	1e-6
Direct jitter	-dj	1
Direct threshold	-dt	0
Direct certainty	-dc	1
Direct pretest density	-dp	1

Tabla 3.3: Parámetros utilizados para las simulaciones del área administrativa del NELIER.

### Matriz de sensores de iluminancia

Para la generación de los mapas de iluminancia así como para el cálculo de iluminancia útil por luz diurna de las secciones 3.3.2 y 3.3.3 se utilizó una matriz de  $134 \times 100$  sensores, distribuidos en todo el espacio con una distancia aproximada de 0.12 m y colocados a una altura de 0.80 m, viendo hacia arriba.

### 3.1.2. Casos de estudio

Con el fin de predecir el impacto que tendrá la construcción del edificio de la segunda etapa del proyecto en la iluminación natural del área de administración del NELIER, se propusieron dos casos de estudio: el caso árboles (CA) que consiste en el NELIER más la consideración de tres árboles que serán colocados 6 m al sur del edificio y el caso árboles y edificio (CAE), que contempla el CA más un plano vertical que representa el edificio que será construido en la segunda etapa del proyecto “Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables UNAM (291600)”. En la Figura 3.7 se muestran las capturas de pantalla del modelo en SketchUp para cada caso.

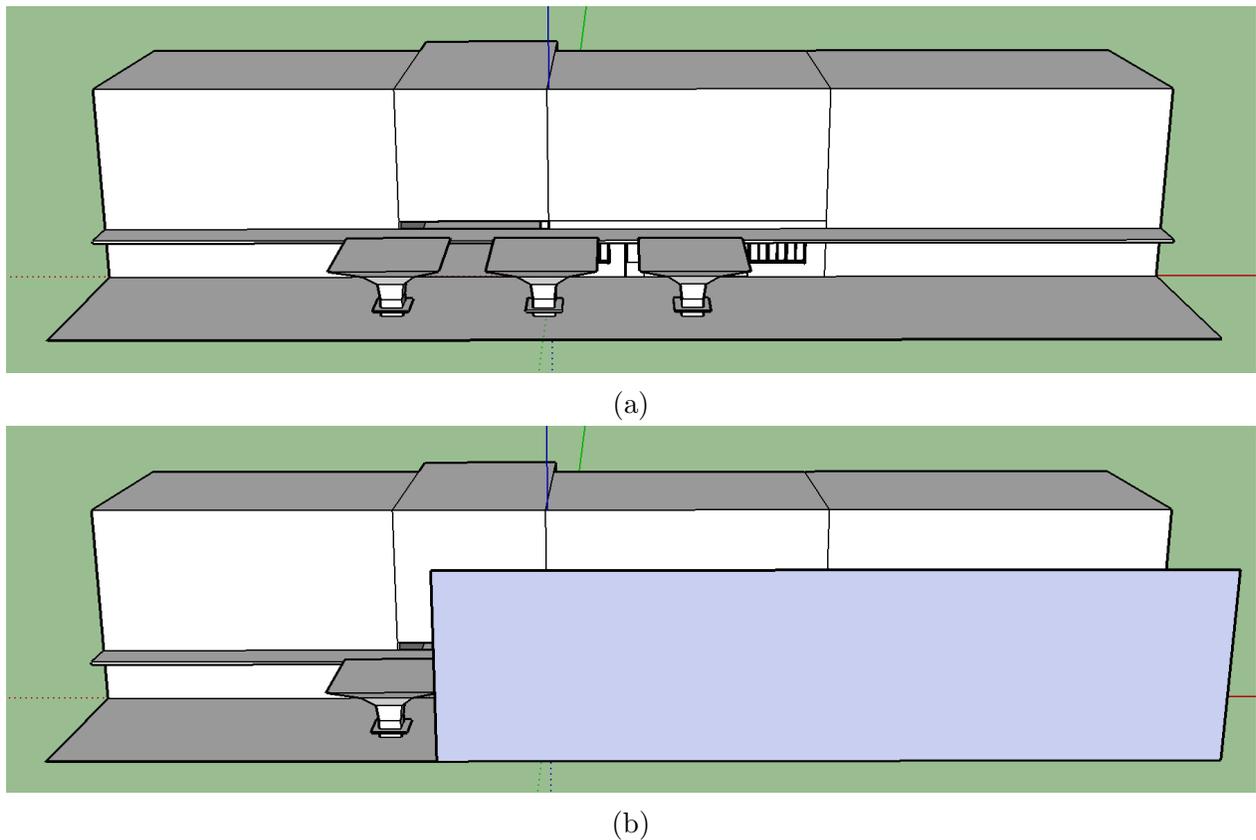


Figura 3.7: Modelo en SketchUp de los dos casos analizados: a) Caso Árboles (CA) y b) Caso Árboles y Edificio (CAE).

### 3.2. Selección de días críticos

Se seleccionaron tres días críticos:

- Día soleado con trayectoria solar aparente al norte.

- Día soleado con trayectoria solar aparente al sur.
- Día nublado.

Para cada uno de estos días, se presenta la revisión cualitativa de incidencia de radiación solar directa al interior del espacio iluminado así como los mapas horarios de iluminancia en las secciones 3.3.1 y 3.3.2, respectivamente.

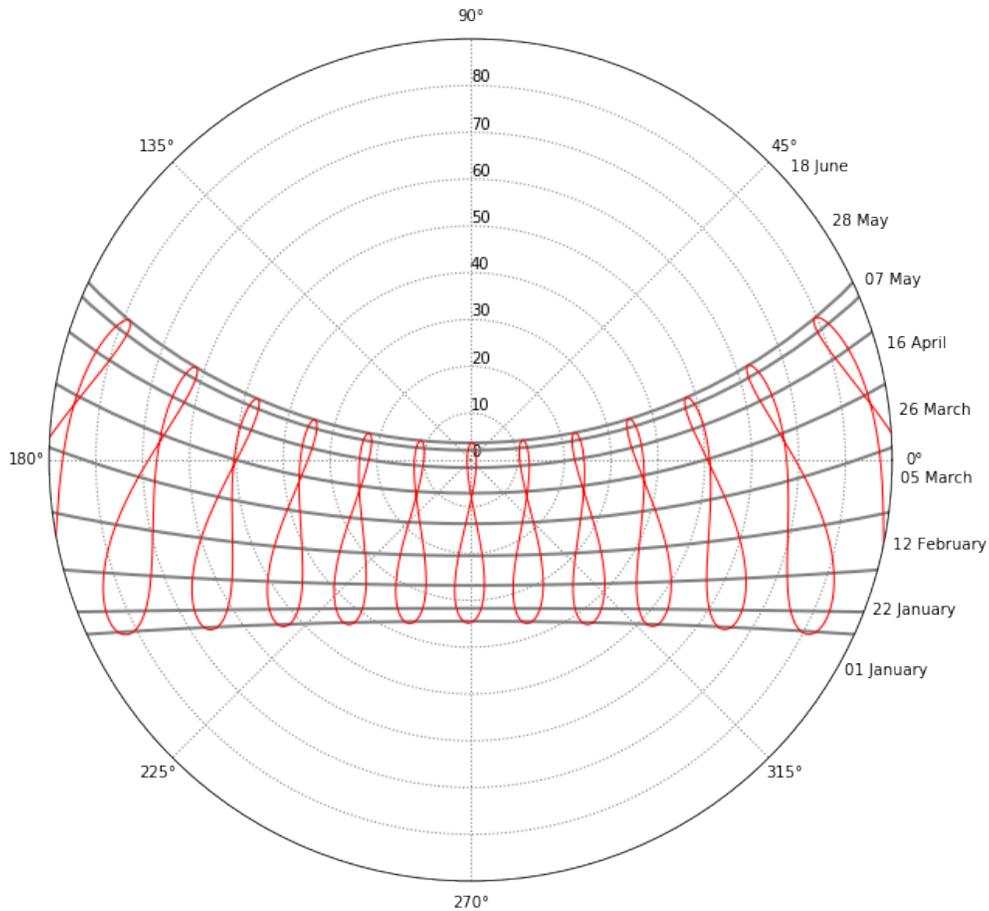


Figura 3.8: Carta solar estereográfica para Temixco, Morelos.

El proceso para la selección de los días soleados consistió en graficar la irradiancia solar directa del archivo EPW en los días más cercanos a los solsticios de verano e invierno, que es cuando el sol se encuentra más al sur y al norte respectivamente. La carta solar estereográfica de Temixco se presenta en la Figura 3.8. En la Figura 3.9 se muestra la irradiancia solar directa para los días próximos al solsticio de verano. Se escogió el 20 de junio por ser el que presentó mayor irradiancia solar directa al medio día solar, como se puede ver en la figura.

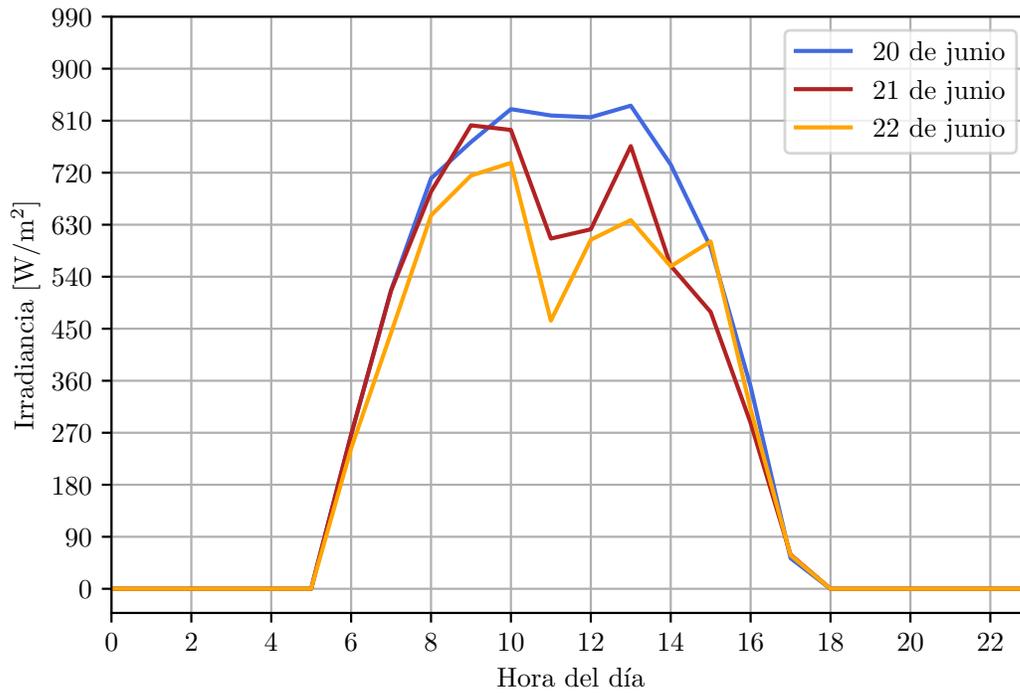


Figura 3.9: Gráfica de irradiancia solar directa para selección del día soleado con trayectoria solar aparente al norte.

La Figura 3.10 corresponde a los valores de irradiancia solar directa en los días cercanos al solsticio de invierno. Se eligió el día 22 de diciembre por presentar mayor irradiancia directa al medio día solar que los otros dos días, aunque la diferencia con el día 21 fue pequeña.

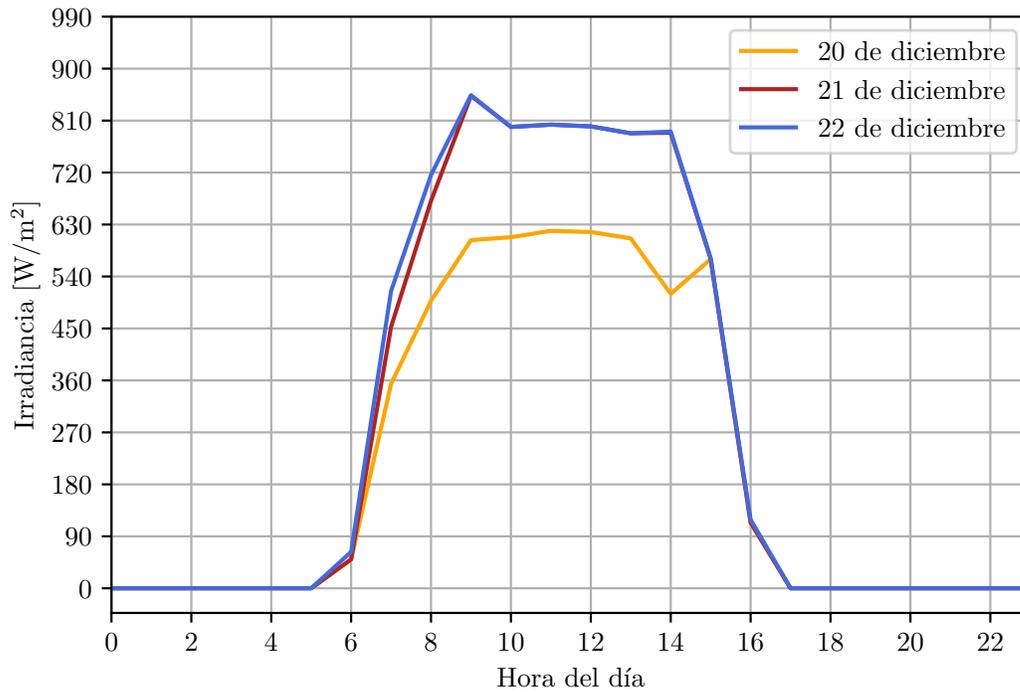


Figura 3.10: Gráfica de irradiancia solar directa para selección del día soleado con trayectoria solar aparente al sur.

Por último, para la selección del día más nublado, se buscó en el conjunto de datos del EPW aquel día para el cuál la irradiancia solar directa al medio día fuera la menor, encontrando que para el año en que se registraron dichos datos el día más nublado fue el 3 de enero, cuya irradiancia solar directa y difusa para cada hora se muestra en la Figura 3.11.

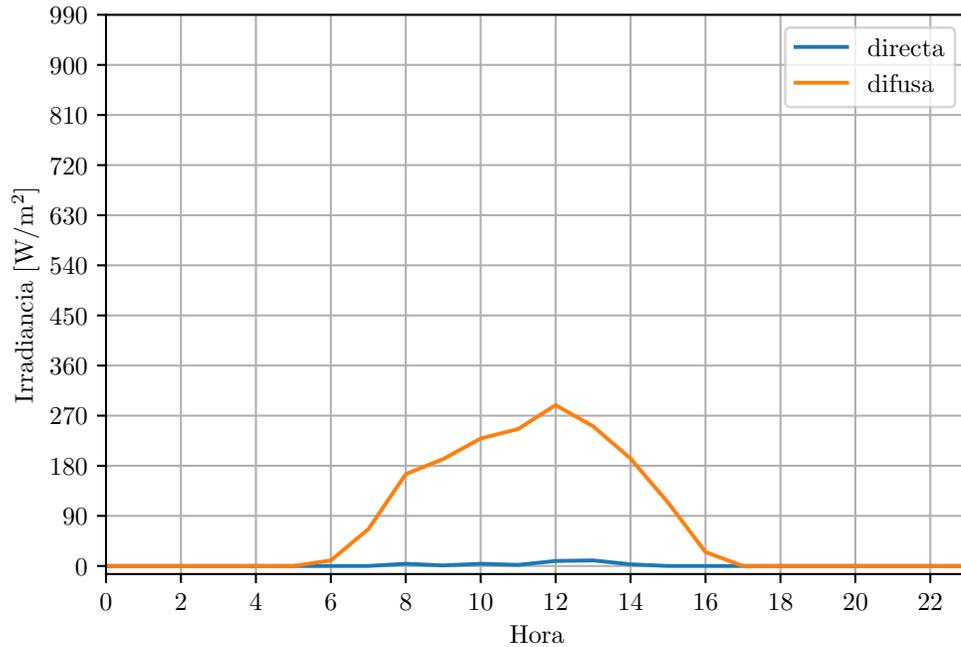


Figura 3.11: Irradiancia solar directa y difusa para el día crítico nublado (3 de enero) en Temixco, Morelos.

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. Radiación directa al interior del espacio

Con el fin de comprobar que no incidiera radiación directa en el espacio de estudio, se generaron imágenes en las cuales se visualiza la iluminancia sobre las superficies del modelo, observadas desde los dos puntos de vista indicados en la Figura 3.12, uno con orientación sur-norte (marcado con el número 1) y otro con orientación norte-sur (marcado con el número 2), para los días críticos soleados.

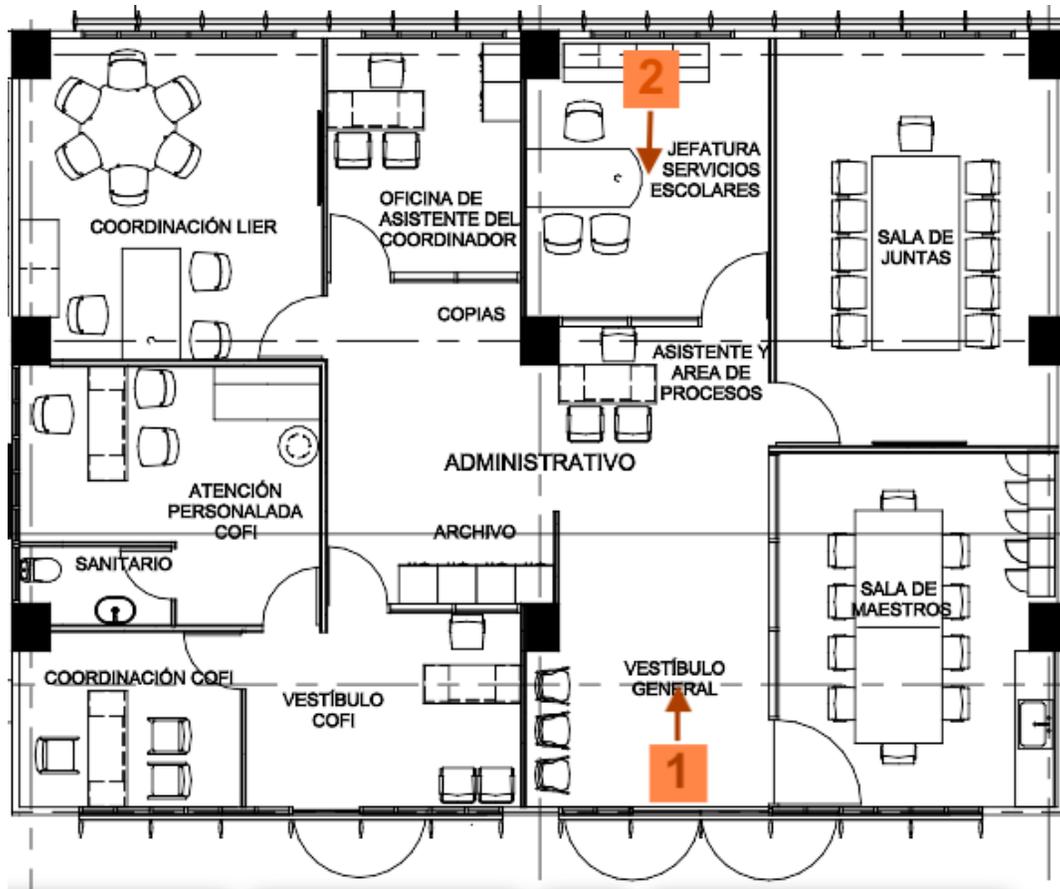


Figura 3.12: Puntos de vista para la revisión de radiación directa al interior del espacio.

En la Figura 3.13 se presentan las imágenes de iluminancia en falso color para la revisión de incidencia de radiación directa al interior del espacio para los casos de estudio en el día soleado al sur a las 9 a.m. desde el punto de vista 1 y en el día soleado al norte a las 9 a.m. desde el punto de vista 2. En estas imágenes se pueden observar que para el día soleado al sur sí existe incidencia de radiación solar directa representada por manchas amarillas con iluminancia mayor a 2100 lx en el caso CA (fig. 3.13a), que desaparecen con la inclusión del edificio 2 en el CAE (fig. 3.13b). Por otra parte, para el día soleado al norte la radiación directa incidente es mínima (como se ve en la esquina inferior derecha de las figuras 3.13c y 3.13d) pero se mantiene en ambos casos. Si bien aquí se presentan las imágenes únicamente para las 9 a.m., en la revisión se realizaron imágenes para todas las horas con luz durante los dos días críticos soleados, encontrando que el horario con mayor incidencia de radiación directa fue en este horario. Es importante considerar también que el día crítico soleado al sur (22 de diciembre) forma parte del período vacacional, por lo que las molestias causadas por la incidencia de radiación directa serán mínimas.

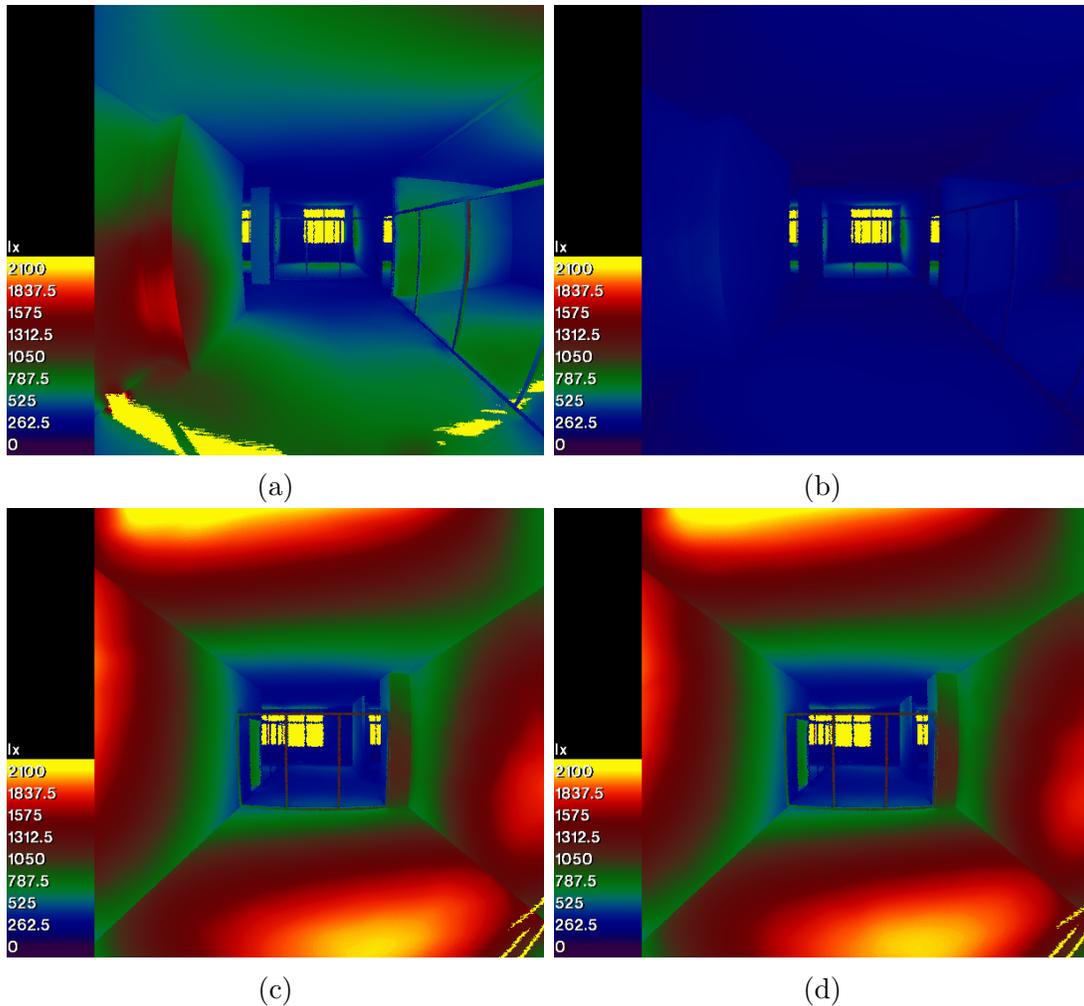


Figura 3.13: Imágenes para revisión de iluminancia al interior a las 9:00 en horario solar para a) CA en día soleado al sur b) CAE en día soleado al sur, c) CA en día soleado al norte y d) CAE en día soleado al norte.

### 3.3.2. Mapas horarios de iluminancia

En esta sección se presentan los mapas horarios de iluminancia en el plano de trabajo (a una altura de 0.80 m sobre el piso) para cada caso de estudio, desde las 7:00 hasta las 16:00 en horario solar, para los tres días críticos.

#### Día crítico soleado al norte

En la Figura 3.14 se presentan los mapas horarios para el CA durante el día crítico soleado al norte, donde se observan valores de iluminancia mayores a 300 lx en todos los espacios desde las 7:00 hasta antes de las 16:00, exceptuando el área de atención personalizada COFI. Se observa también iluminación abundante en todos los espacios con ventanas en la fachada

norte, sobrepasando los 2100 lx en las zonas a distancias menores de 3 m de las ventanas, esto debido a que la trayectoria solar aparente del sol en este día crítico se encuentra al norte de la edificación. Por otra parte, en la zona sur del área administrativa se observan valores de iluminancia que varían desde los 300 lx a las 7:00 hasta un máximo de 2100 lx a las 11:00 en las zonas cercanas a las ventanas de la fachada sur.

La Figura 3.15 muestra los mapas horarios de iluminancia correspondientes al CAE, que presenta un comportamiento similar al CA durante este día: valores de iluminancia superiores a 300 lx la mayor parte del tiempo e iluminación abundante en los espacios con ventanas en la fachada norte. Difiere, por otra parte, del CA en que presenta valores de iluminancia ligeramente mayores en los espacios con ventanas en la fachada sur. Esto se debe a que el Edificio 2, que será construido en un futuro, refleja la luz del sol hacia el interior del área administrativa.

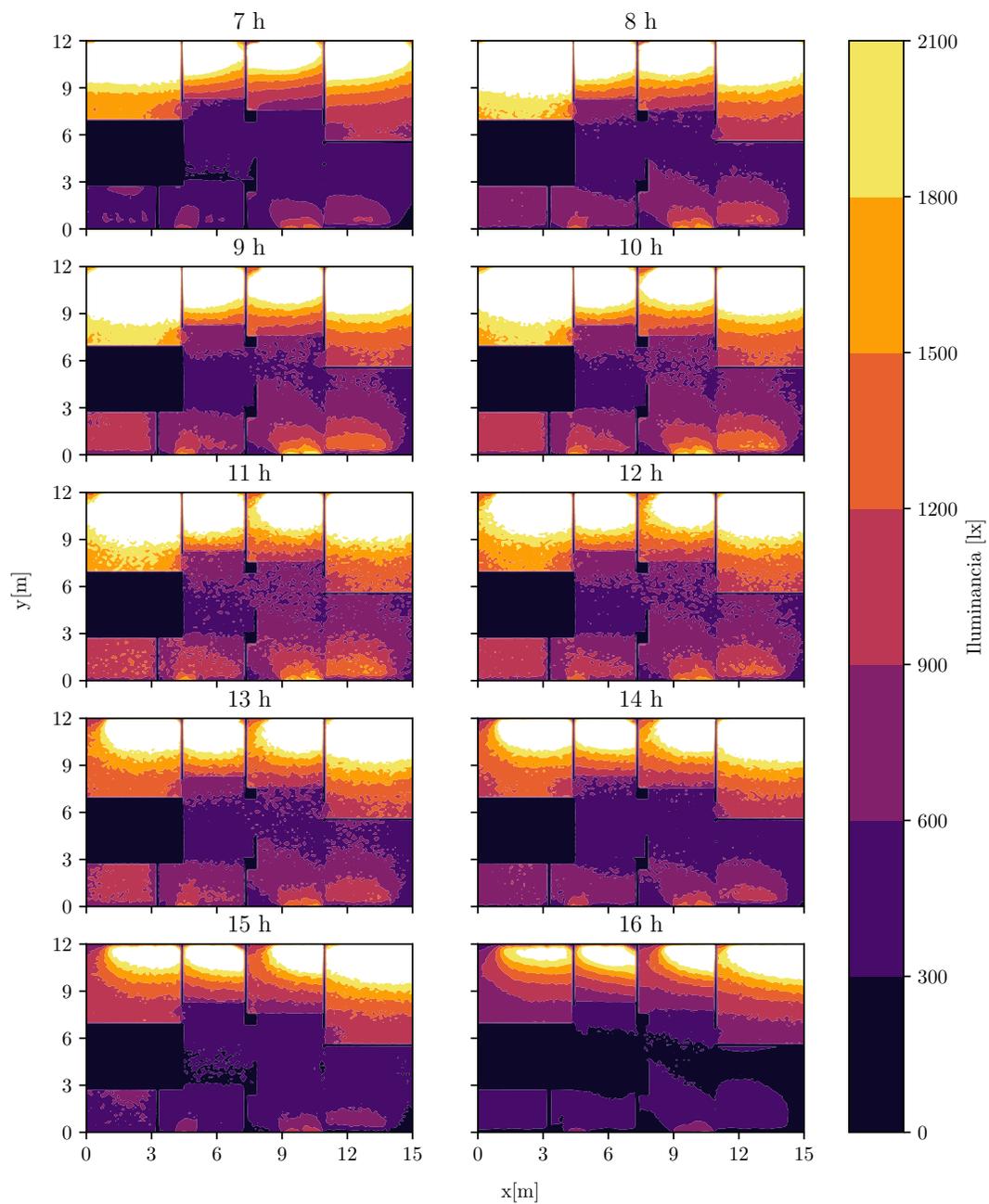


Figura 3.14: Mapas horarios de iluminancia para el CA durante el día soleado al norte (20 de junio).

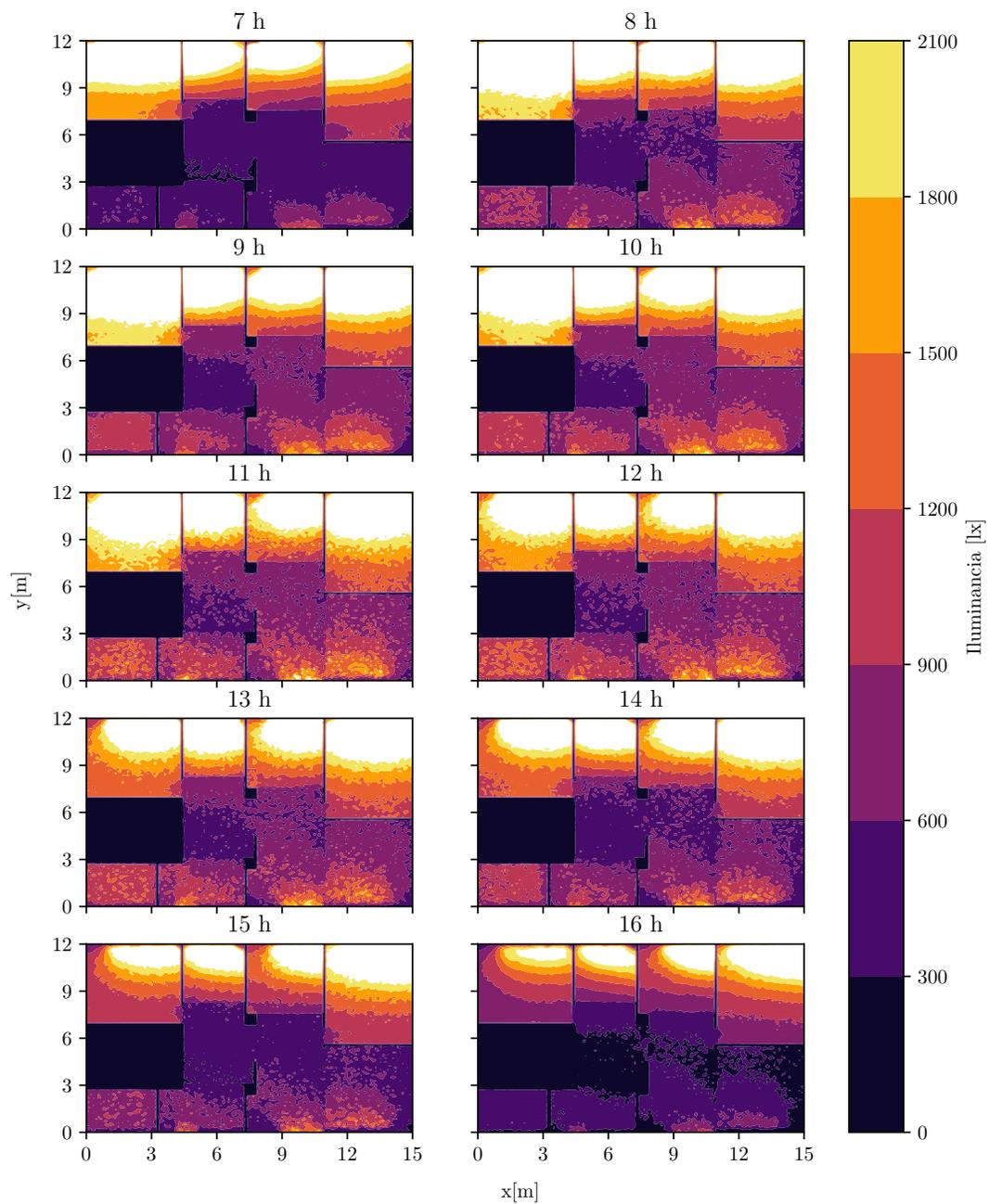


Figura 3.15: Mapas horarios de iluminancia para el CAE durante el día soleado al norte (20 de junio).

### **Día crítico soleado al sur**

La Figura 3.16 muestra los mapas horarios de iluminancia para el CA durante el día soleado al sur. En ella se observan valores de iluminancia mayores a 300 lx para todo el espacio a excepción del área de atención personalizada COFI de 7:00 a antes de las 15:00, una hora menos que para el día soleado al norte. Para este día crítico, con la trayectoria solar aparente al sur, se observan mayores valores de iluminancia en los espacios con ventanas en la fachada sur llegando a sobrepasar los 2100 lx en las zonas cercanas a las ventanas.

Los mapas horarios de iluminancia para el CAE en este día crítico (Figura 3.17) presentan iluminancia mayor a 300 lx en todos los espacios solamente durante tres horas, de las 10:00 a antes de las 13:00. Se observa que en este día el Edificio 2 obstruye considerablemente el ingreso de iluminación natural por las ventanas en la fachada sur, haciendo disminuir de más de 2100 lx en las zonas cercanas a las ventanas en el CA hasta un máximo de 1800 lx en las mismas zonas para el CAE. Esto no afecta únicamente a las zonas mencionadas sino que el área central recibe mucha menos iluminación también.

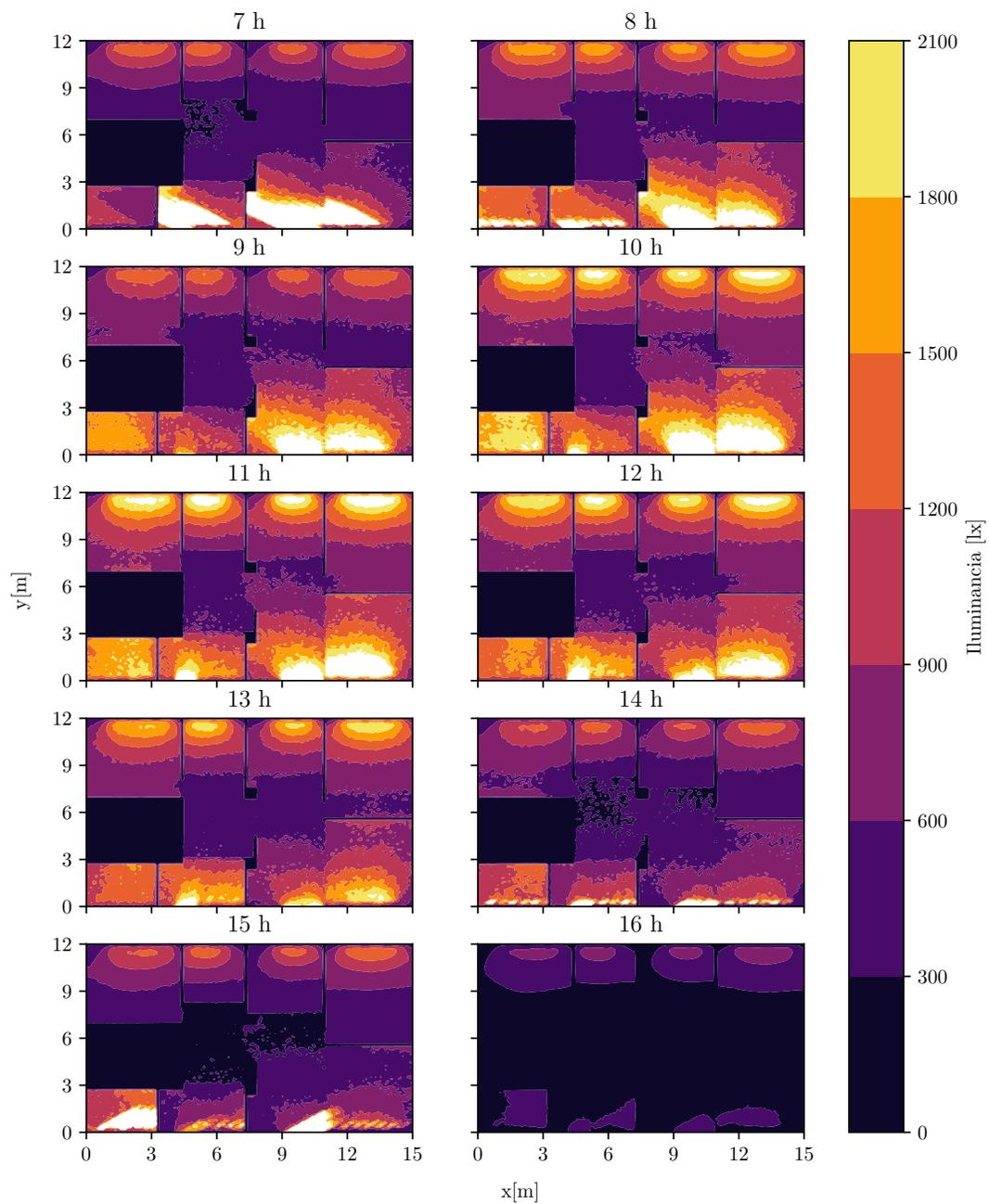


Figura 3.16: Mapas horarios de iluminancia para el CA durante el día soleado al sur (22 de diciembre).

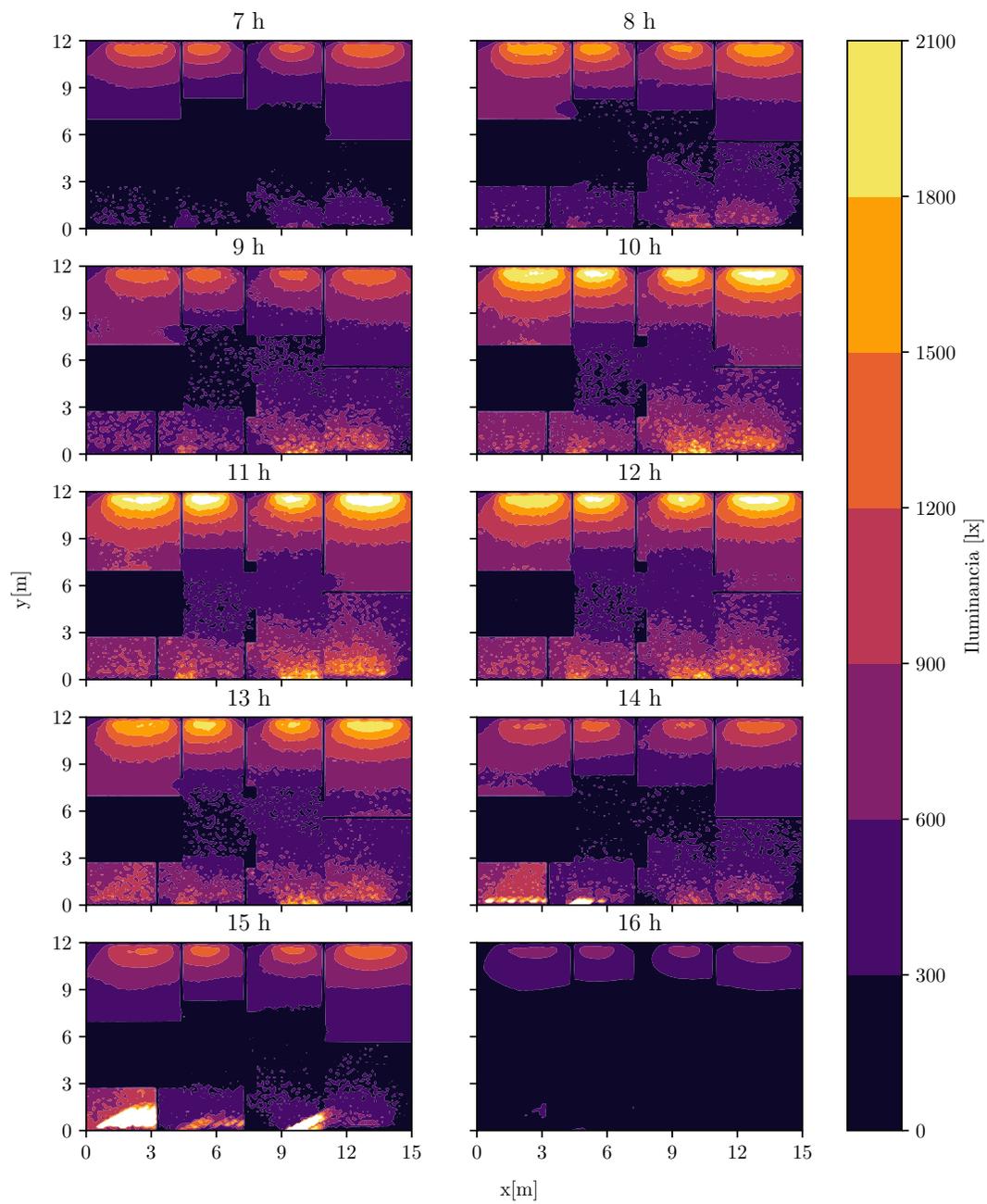


Figura 3.17: Mapas horarios de iluminancia para el CAE durante el día soleado al sur (22 de diciembre).

## Día crítico nublado

En las figuras 3.18 y 3.19 se presentan los mapas horarios de iluminancia durante el día crítico nublado para el CA y CAE, respectivamente. En la Figura 3.18, correspondiente al CA, se observa que en ninguno de los horarios se tienen valores de iluminancia mayores a 300 lx en todo el espacio. Podemos observar que de las 9:00 a las 13:00 se tiene una distribución de la luz muy similar en el tiempo, con valores de iluminancia mayores en las zonas cercanas a las ventanas de la fachada norte a pesar de que la trayectoria solar aparente para este día se encuentra mayormente al sur. Esto se debe a que en los días nublados la posición del sol tendrá poca influencia en la distribución de luminancia de la bóveda celeste, de modo que la iluminancia en un punto al interior de un espacio dependerá únicamente del tamaño de la porción de la bóveda celeste que sea visible desde este punto, que para este caso de estudio es mayor en las zonas con ventanas al norte porque las protecciones solares en esta fachada son de menor tamaño. Para este día el CAE (Figura 3.19), presenta valores de iluminancia menores a 300 lx en la zona central y sur del área administrativa a lo largo de todo el día, y valores que superan los 2100 lx en las zonas cercanas a las ventanas de la fachada norte. Así como para el CA, se observan valores de iluminancia que cambian poco con el tiempo en un horario de 9:00 a 13:00, con mayor iluminación en los espacios con ventanas en la fachada norte por los motivos expuestos anteriormente. Por otra parte, se observa una variación del CAE con respecto al CA en los espacios con ventanas al sur, donde es visible el efecto de obstrucción de la luz causado por el Edificio 2. Ejemplo de esto es lo que sucede en la coordinación COFI, ubicada en la esquina inferior izquierda: en el CA para las horas 11, 12 y 13 se mantienen iluminancias de entre 600 y 900 lx mientras que para el CAE en el mismo horario la iluminancia baja a estar entre los 300 y 600 lx.

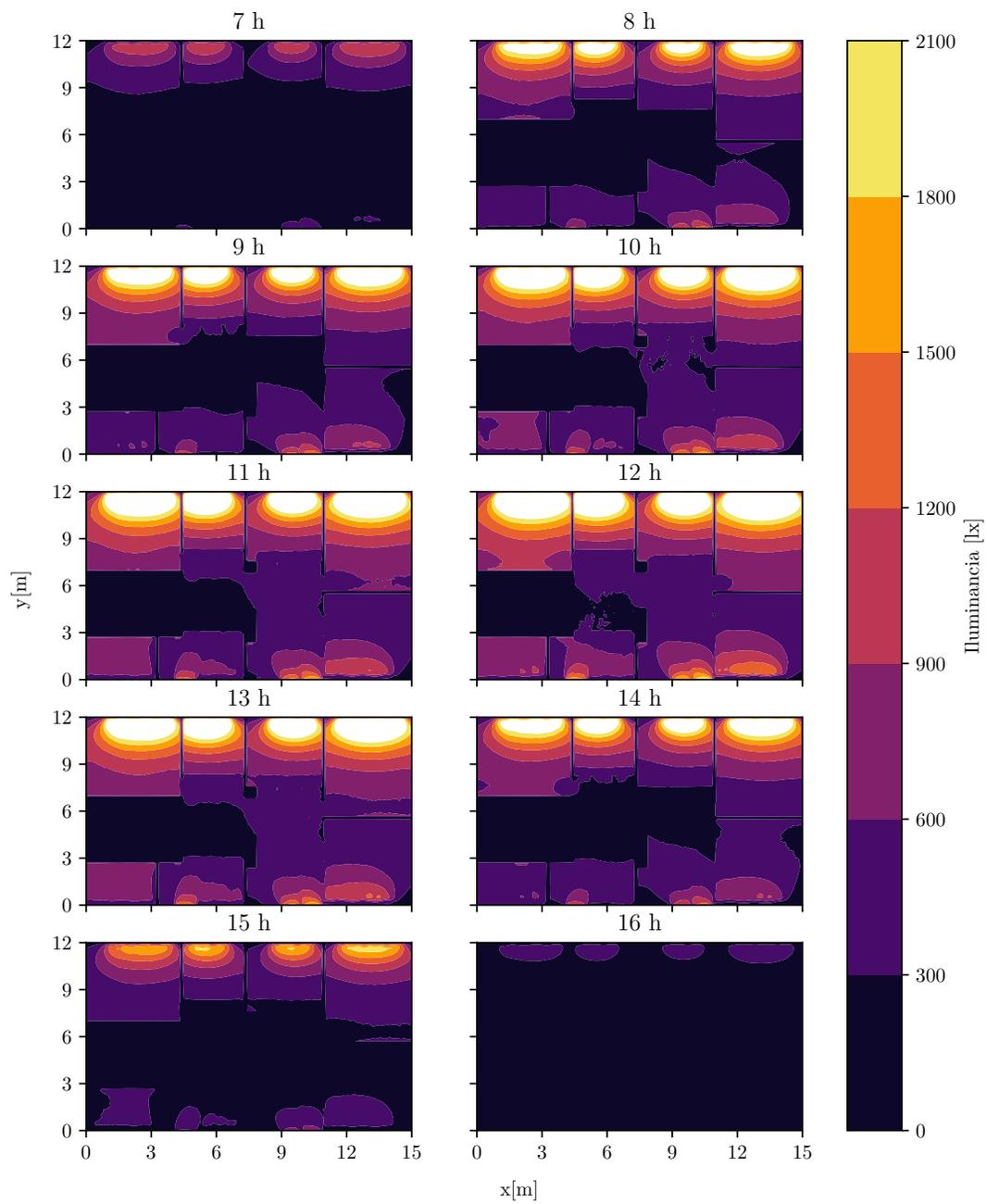


Figura 3.18: Mapas horarios de iluminancia para el CA durante el día nublado (3 de enero).

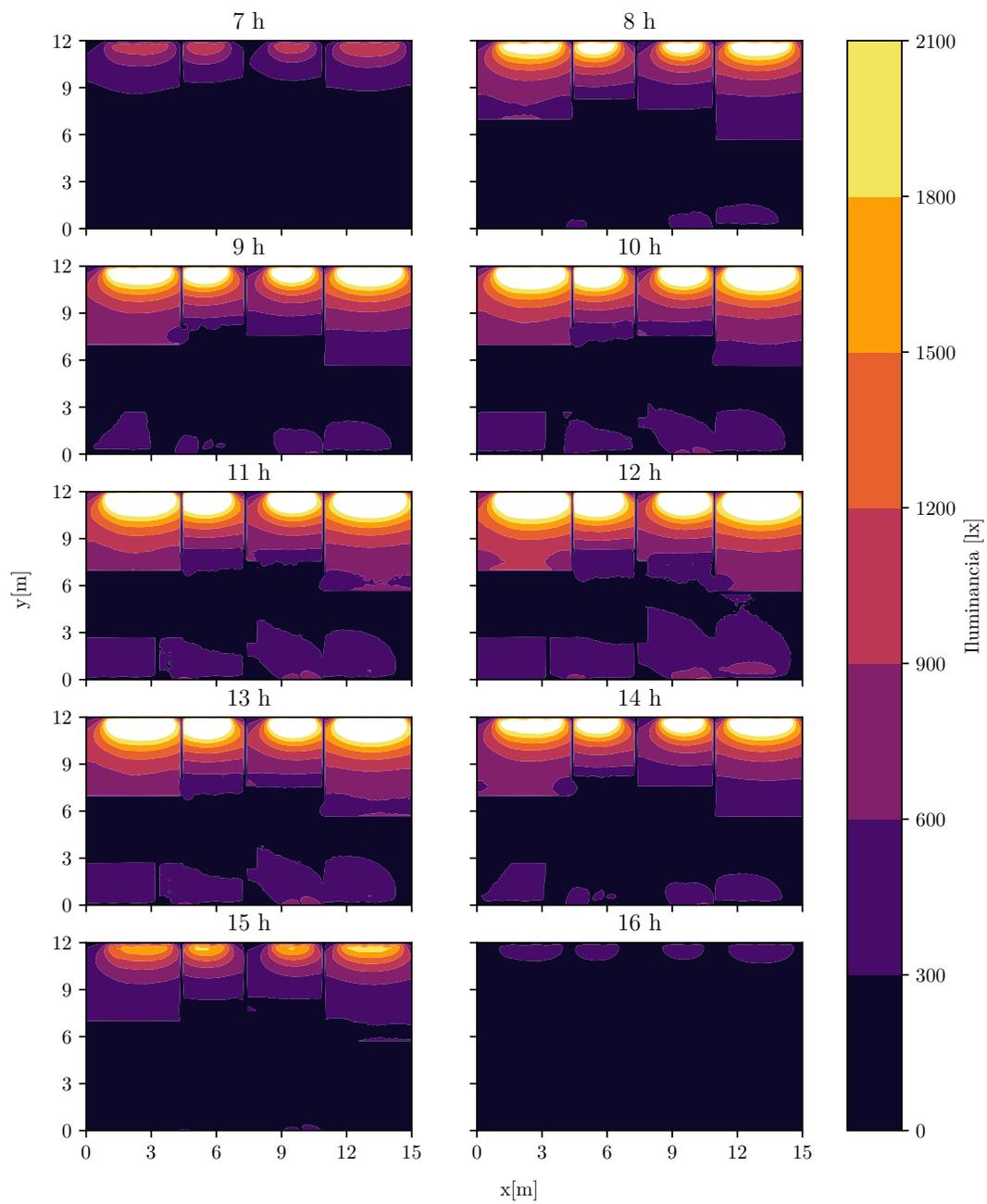


Figura 3.19: Mapas horarios de iluminancia para el CAE durante el día nublado (3 de enero).

### 3.3.3. Cálculo de la iluminancia útil por luz diurna (*UDI*)

La iluminancia útil por luz diurna (*UDI* por sus siglas en inglés) se define como el porcentaje de horas anuales en las que la iluminancia en un punto del espacio evaluado cae en un rango determinado. Así, se definen un límite inferior y uno superior para clasificar en tres categorías los valores de iluminancia medidos en el período analizado. Para este trabajo se seleccionaron 300 lx y 2000 lx como límite inferior y límite superior, respectivamente. El límite inferior se definió con base en la NOM-025-STPS-2008, que establece como 300 lx la iluminancia requerida en espacios donde se realizan actividades de oficina [30], mientras el límite superior es el propuesto en [31], a partir del cual puede experimentarse incomodidad tanto visual como térmica. Por otra parte, el cálculo de *UDI* requiere definir un horario de trabajo durante el cual se analizará la contribución de iluminación natural al espacio. En el presente trabajo se tomó en cuenta un horario laboral de las 8 h a las 18 h.

A continuación se presentan los mapas de *UDI* para cada caso de estudio, donde  $UDI_{und}$  representa el porcentaje de horas laborales durante las cuales la iluminancia en cada punto se encuentra por debajo de los 300 lx,  $UDI_u$  representa el porcentaje de horas durante las cuales la iluminancia está entre los 300 lx y 2000 lx y  $UDI_{over}$  muestra el porcentaje de horas en las que la iluminancia superó los 2000 lx.

En la Figura 3.20 se presenta el *UDI* para el CA. En la parte superior se presenta el mapa para el  $UDI_{und}$ , donde se puede observar que los espacios con ventanas al norte están entre el 0 y 10% del tiempo subiluminados mientras que los espacios con ventanas en la fachada sur tienen condiciones de subiluminación entre el 10 y 20% de las horas laborales. La zona central, correspondiente al archivo y área de procesos, se encuentra subiluminada entre el 20 y 30% del tiempo. La sala de atención personalizada COFI se encuentra subiluminada el 100% del tiempo, sin embargo, al ser un espacio en el que no se llevan a cabo actividades de oficina ni clases, los niveles mínimos de iluminación que requiere son inferiores a los utilizados para calcular el *UDI*.

El segundo mapa de la misma figura corresponde al  $UDI_u$ , donde se observa que en los espacios con ventanas en la fachada norte el  $UDI_u$  varía desde el 100% a 20%, disminuyendo según la cercanía a las ventanas mientras que en los espacios con ventanas al sur se tienen condiciones de iluminación adecuadas entre el 80 y 90% del tiempo. La zona central, por su parte tiene niveles de iluminación adecuados entre el 70 y 80% de las horas laborales.

El tercer mapa corresponde al  $UDI_{over}$ , donde se observa que especialmente en las zonas cercanas a las ventanas de la fachada norte estarán sobreiluminadas variando desde el 10% del tiempo, aumentando con la cercanía a las ventanas hasta el 70%. Para los espacios con ventanas al sur se tiene sobreiluminación sólo en áreas pequeñas cercanas a algunas ventanas, con un máximo del 20% de las horas.

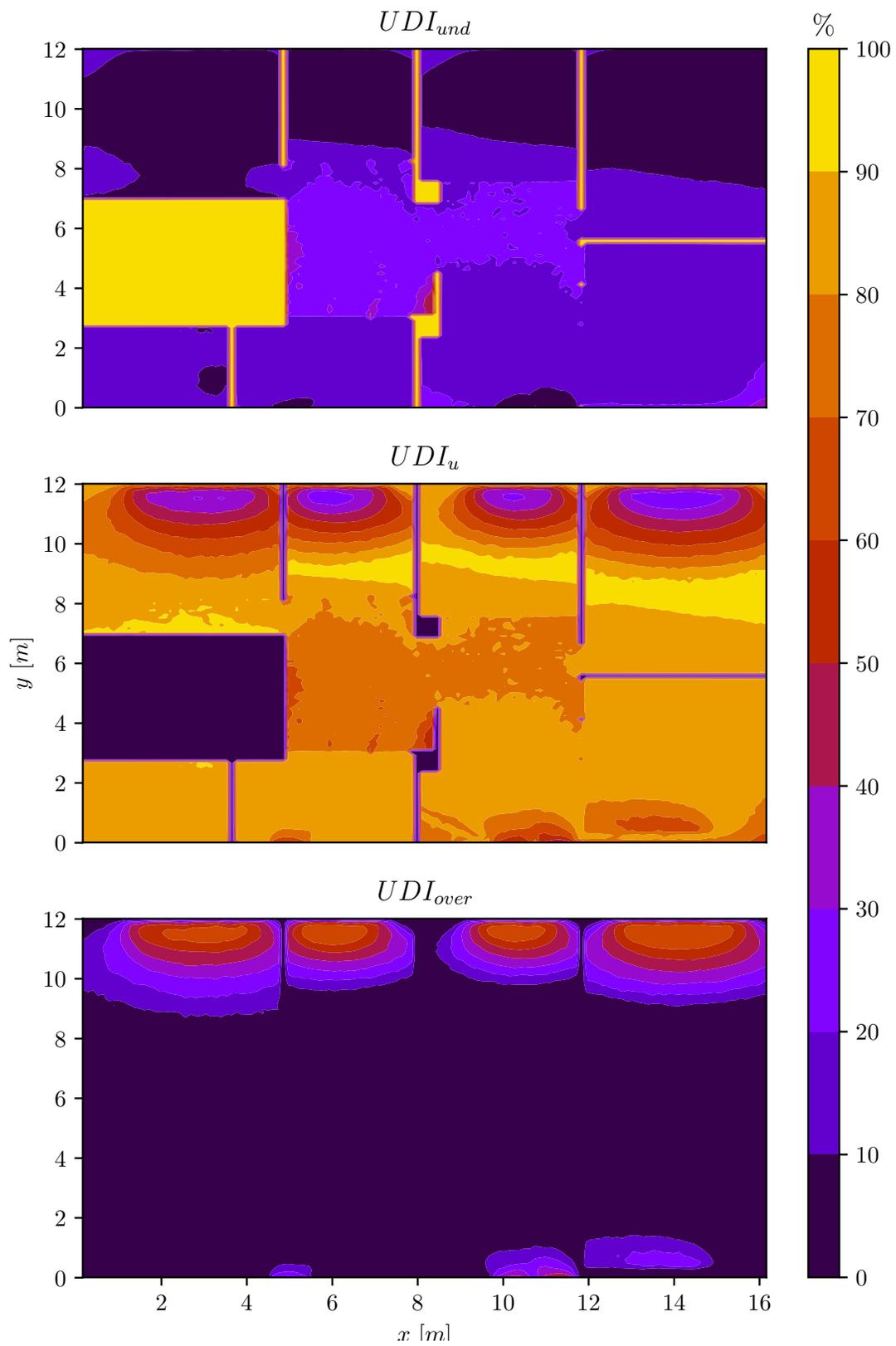


Figura 3.20: Iluminancia útil por luz diurna para CA.

Pasando ahora al CAE, en la Figura 3.21 se presenta el  $UDI$  correspondiente. Este caso presenta valores de  $UDI$  muy similares a los del caso anterior para los espacios con ventanas al norte, como es de esperarse ya que la obstrucción que se añade se encuentra al sur. El  $UDI_{und}$  para el CAE aumenta con respecto al CA especialmente en la zona central del área de administración, donde se tienen condiciones de subiluminación entre 30 y 50 % de las horas laborales.

Por otra parte, observamos en el segundo mapa que el  $UDI_u$  disminuye tanto en la parte central como en las zonas alejadas de las ventanas en los espacios al sur. El porcentaje de horas con condiciones de iluminación adecuadas va disminuyendo del 90 % al 60 % con la distancia a las ventanas.

Por último, en el tercer mapa de la figura observamos que habrá sobreiluminación sólo en las zonas cercanas a las ventanas de la fachada norte, variando del 10 al 70 % de las horas. El efecto del Edificio 2 en el  $UDI_{over}$  consiste en la desaparición de la sobreiluminación en los espacios con ventanas al sur.

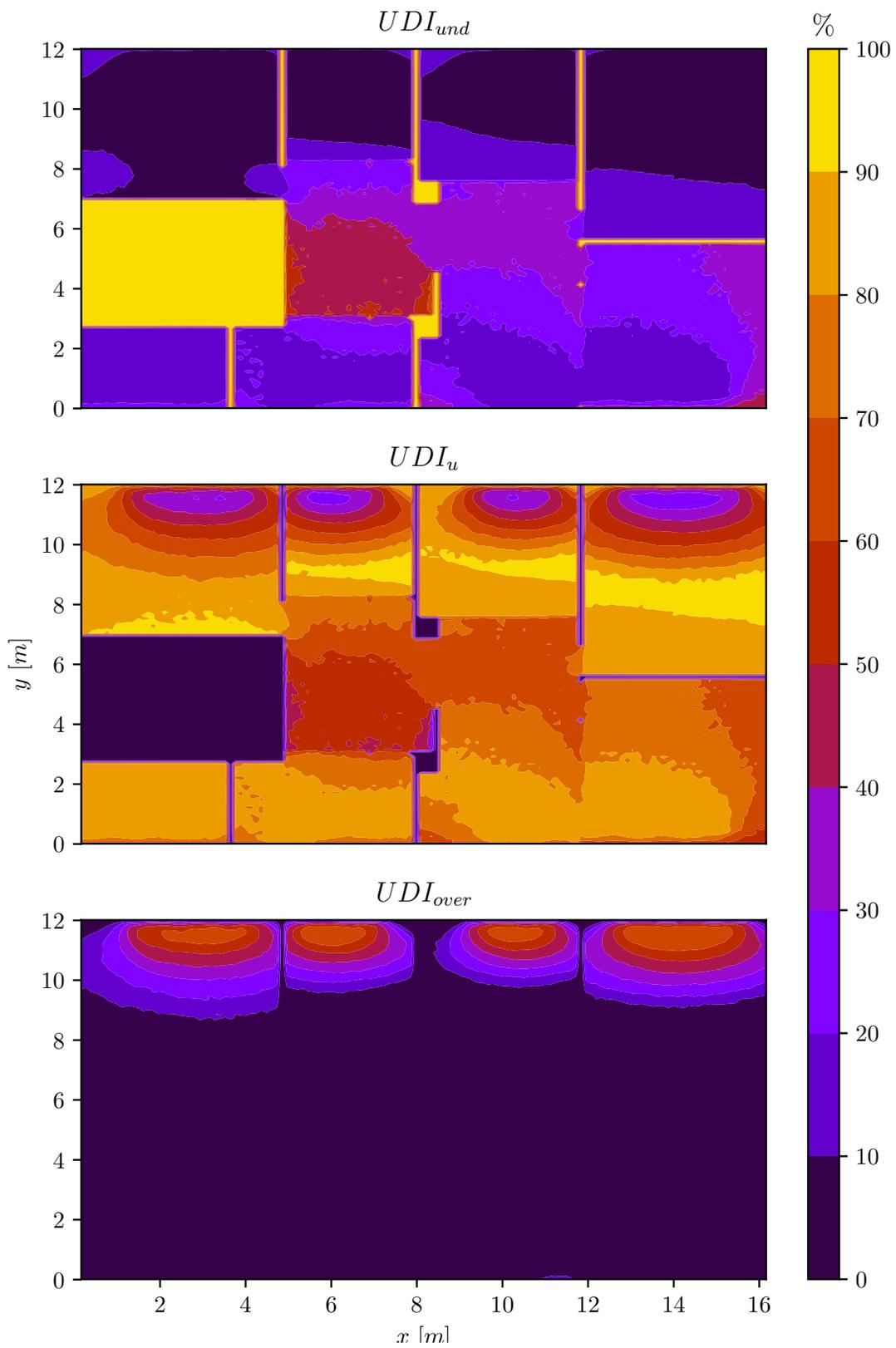


Figura 3.21: Iluminancia útil por luz diurna para CAE.

### 3.3.4. Evaluación del deslumbramiento

Para la evaluación del deslumbramiento se definieron nueve puntos de vista (Figura 3.22), estableciendo como criterio de selección la orientación en dirección a alguna ventana (puntos 2-9) y la cercanía a la ventana para el punto de vista 1.

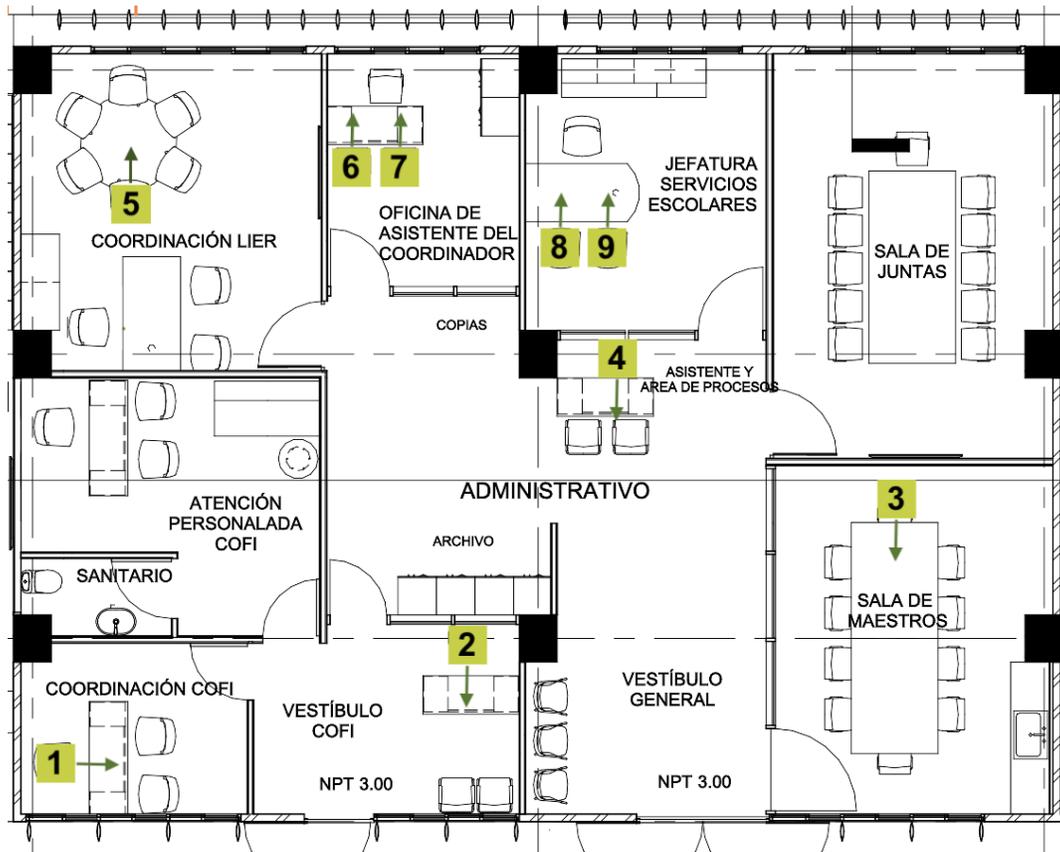


Figura 3.22: Puntos de vista considerados para la evaluación de deslumbramiento.

La Figura 3.23 muestra los valores de DGPs obtenidos para los nueve puntos de vista en el CA a lo largo del año. Podemos observar que las únicas posiciones con probabilidad de deslumbramiento son los puntos de vista 5, 6 y 7 (orientados los tres hacia el norte) y que lo presentan sobre todo en los meses de abril a septiembre, cuando la trayectoria solar aparente está más al norte. En esta figura se distingue también que para los casos en los que se presenta deslumbramiento este llega a ser molesto de acuerdo con la Tabla 2.3 presentada en el Capítulo 2. El deslumbramiento en el CAE presenta un comportamiento muy similar al del CA, por lo que se omite la gráfica correspondiente. La similitud entre los casos de estudio se debe a que la obstrucción añadida (Edificio 2) al CAE se encuentra al sur del edificio y los puntos problemáticos (5, 6 y 7) están en dirección al norte.

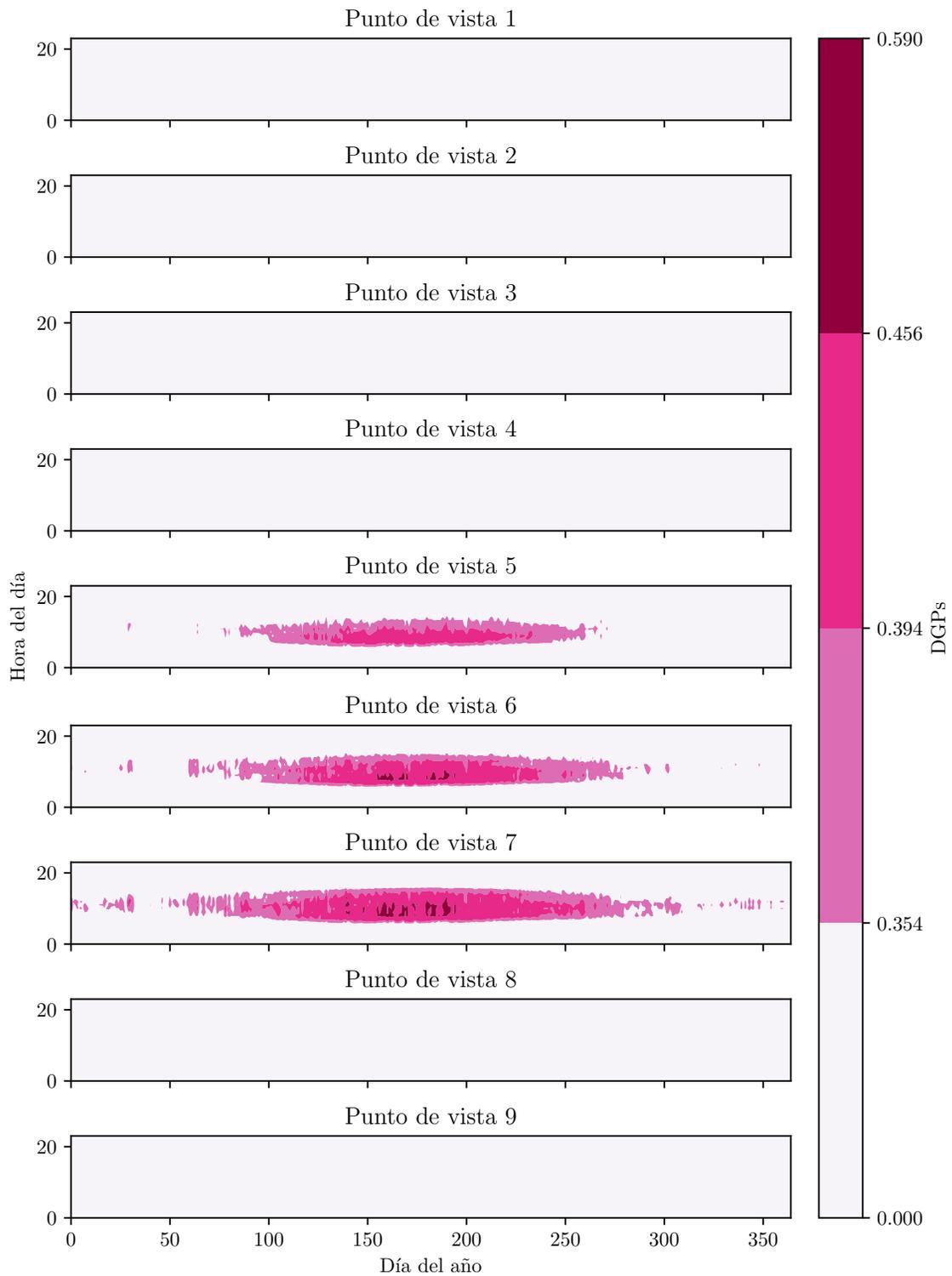


Figura 3.23: DGPs en CA para cada punto de vista, a lo largo del año.

En la Tabla 3.4 se enlistan los momentos en los que se obtuvo el mayor DGPs para cada punto de vista en el CA, destacando en negritas los obtenidos para los puntos de vista 5, 6

y 7 que corresponden a deslumbramiento molesto e insoportable mientras que el DGPs en el resto de los puntos de vista corresponde a un deslumbramiento imperceptible, de acuerdo con los límites de la Tabla 2.3.

Punto de vista	Hora	Fecha	DGPs máximo
1	14:30	14 de diciembre	0.297
2	10:30	26 de septiembre	0.267
3	10:30	1 de abril	0.268
4	11:30	18 de junio	0.254
5	8:30	17 de junio	<b>0.451</b>
6	9:30	8 de julio	<b>0.487</b>
7	9:30	8 de julio	<b>0.508</b>
8	8:30	17 de junio	0.329
9	8:30	17 de junio	0.345

Tabla 3.4: Fecha, hora y valor de las ocurrencias de DGPs máximo para cada punto de vista en CA.

Los valores de la Tabla 3.5 corresponden a los máximos de *DGPs* para cada punto de vista en el CAE, así como la fecha y hora a la que ocurrieron. Se observa que para este caso, el *DGPs* máximo aumenta ligeramente para la mayoría de los puntos de vista con respecto al CA pero sin representar un cambio en el nivel de deslumbramiento, a excepción del punto de vista 1 donde se alcanza un *DGPs* 0.376 que corresponde a un deslumbramiento perceptible y que para el CA era imperceptible (0.297). Esto se debe a que el punto de vista 1 está orientado ligeramente en dirección al Edificio 2, de modo que la luz reflejada en él puede causar problemas de deslumbramiento perceptible.

Punto de vista	Hora	Fecha	DGPs máximo
1	5:30	1 de diciembre	<b>0.376</b>
2	11:30	14 de diciembre	0.325
3	9:30	8 de diciembre	0.309
4	8:30	9 de diciembre	0.264
5	8:30	17 de junio	<b>0.446</b>
6	9:30	8 de julio	<b>0.487</b>
7	9:30	8 de julio	<b>0.507</b>
8	6:30	20 de mayo	0.327
9	9:30	8 de julio	0.343

Tabla 3.5: Fecha, hora y valor de las ocurrencias de DGPs máximo para cada punto de vista en CAE.

### 3.4. Evaluación de un ducto solar

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del ducto solar de sección rectangular que se propuso para mejorar iluminación en la zona central del área administrativa del NELIER, empezando por las características geométricas del ducto. Posteriormente se presenta el coeficiente de transferencia del mismo en función de su longitud y de la reflectancia del material que se le asigne y se calcula la eficiencia de un ducto de 5 m de longitud y reflectancia de 0.80 y 0.95 colocados en los casos CA y CAE. Dichas reflectancias se escogieron porque dentro de ese rango se encuentra la reflectancia del aluminio pulido, material del que se construiría el ducto solar.

Después se compara el flujo luminoso introducido por el ducto al área administrativa con el flujo luminoso proporcionado a esa área con iluminación artificial así como una comparación entre el flujo luminoso proporcionado por el ducto en el CA y el CAE de forma mensual. Por último se presenta el cambio en el *UDI* de ambos casos de estudio causado por la inclusión del ducto.

#### 3.4.1. Características del ducto solar

La geometría del ducto evaluado se presenta en la Figura 3.24. En el extremo izquierdo se encuentra el colector, que va colocado al exterior del edificio como se muestra más adelante en la figura 3.25.

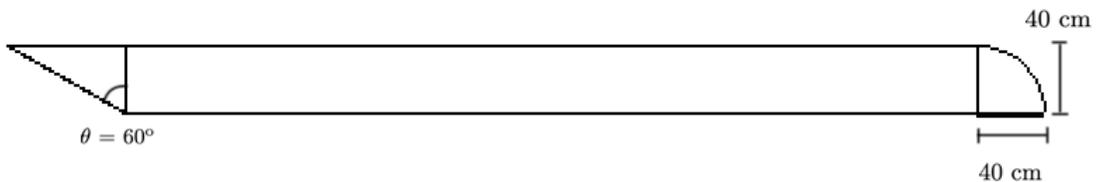


Figura 3.24: Geometría del ducto evaluado.

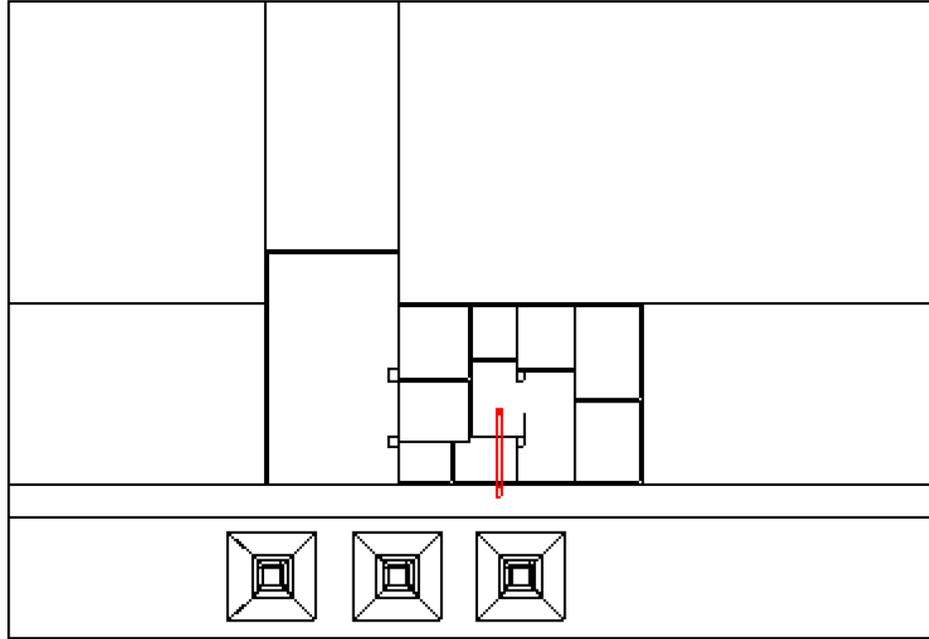


Figura 3.25: Planta del CA con el ducto (en rojo) ubicado de forma que contribuya a la iluminación de la zona central - izquierda del espacio administrativo del edificio.

### 3.4.2. Coeficiente de transferencia

Dado que un ducto solar tiene una geometría más compleja que la de una ventana, no es recomendable utilizar la metodología descrita en la sección 2.2 y se recomienda la obtención de una matriz de transferencia asociada a la geometría y materiales del ducto para realizar su evaluación de acuerdo con el método de tres fases [18]. Esto se lleva a cabo con Radiance utilizando el programa `rfluxmtx`, asignando una superficie emisora (de rayos) y una receptora que serán discretizadas en 145 parches cada una. El resultado entregado por `rfluxmtx` será una matriz de  $145 \times 145$  elementos, donde cada valor de la fila  $n$  indicará la fracción de rayos emitidos desde el parche  $n$  de la superficie emisora que alcanza a llegar hasta cada uno de los parches  $m$  de la superficie receptora (cada columna corresponde a un parche de la superficie receptora).

Con la finalidad de obtener un sólo número que indique la cantidad de luz transmitida al interior de la edificación por el ducto solar, se propone el uso de un coeficiente de transferencia  $CT$ , que se obtiene con la expresión:

$$CT = \frac{\sum_{n=1}^{n=145} \left( \sum_{m=1}^{m=145} c_{nm} \right)}{145}, \quad (3.2)$$

donde  $c_{nm}$  es el valor en la fila  $n$  y columna  $m$  de la matriz de transferencia.

Se realizaron varias simulaciones del ducto para obtener el  $CT$  en función de la longitud. De igual manera, se le asignaron materiales de distintas reflectancias con el fin de conocer la variación del  $CT$  según la reflectancia del material utilizado.

En la Figura 3.26 se presentan las curvas del  $CT$  según la longitud y la reflectancia del ducto. Observamos que para materiales perfectamente especulares ( $r = 1.0$ ) el  $CT$  disminuye de forma lineal con la longitud, sin embargo al considerar reflectancias menores se obtiene una curva con decaimiento exponencial. Esto último se debe a que la interacción de la luz con el material de las paredes del ducto hace disminuir su intensidad, pues es absorbida parcialmente por el ducto en cada punto que interactúa con él.

El aumento de pérdidas con la longitud cuando  $r = 1.0$  puede estar relacionado a la mayor interacción de la luz con las paredes del ducto al aumentar su longitud pero ahora no siendo absorbida por ellas sino siendo dejada de tomar en cuenta por Radiance. Esto se debe a que en Radiance se fija un parámetro  $-ab$  que indica a partir de cuántos “rebotes” dejará de tomarse en cuenta la contribución de un rayo. Así, al aumentar la longitud del ducto aumenta el número de rebotes de la luz dentro del mismo para llegar al otro extremo y por tanto aumentará el número de rayos que sobrepasen los  $-ab$  rebotes, traduciéndose en una disminución de la cantidad de luz transmitida por el ducto. Otra posible causa de la disminución de la eficiencia con respecto a la longitud podría ser la fuga de rayos hacia el exterior tras múltiples rebotes en el ducto, sin embargo con las pruebas realizadas en este trabajo no es posible determinar la causa cierta de la disminución de la eficiencia con la longitud con  $r = 1.0$ .

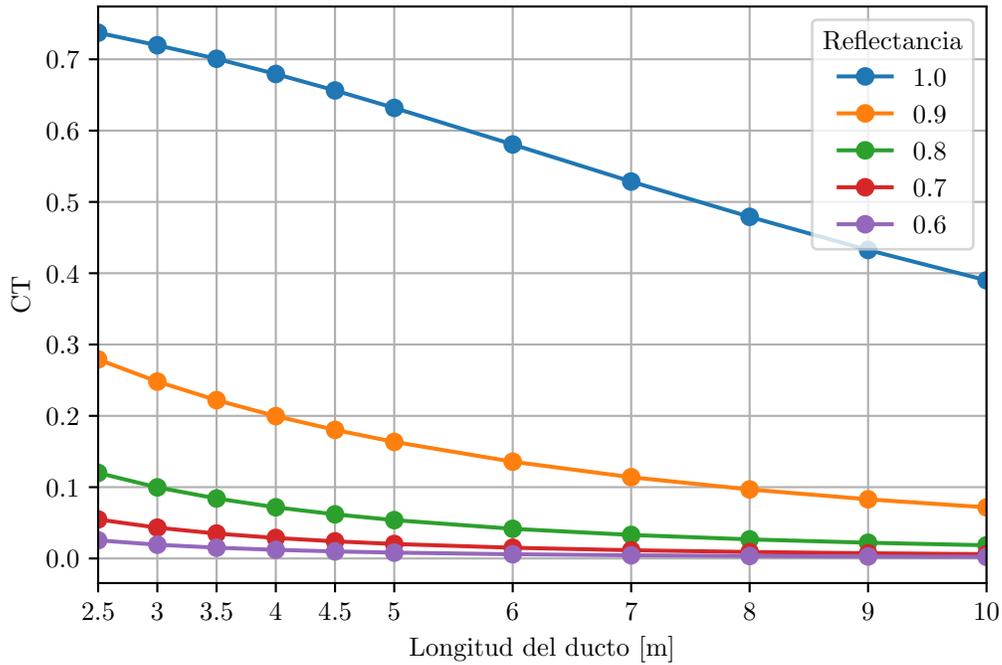


Figura 3.26: Coeficiente de transferencia CT en función de la longitud y reflectancia del ducto.

De acuerdo con las medidas del NELIER, se necesitaría un ducto solar de al menos 5 m de longitud para iluminar la zona central del espacio de oficinas; en la Figura 3.27 se muestra la variación del CT en función de la reflectancia para un ducto de 5 m de longitud. Se observa que para una reflectancia de 0.90 (la reflectancia de las láminas de aluminio pulido va de 0.80 a 0.95, dependiendo la calidad del acabado [32]), el CT es de 0.17.

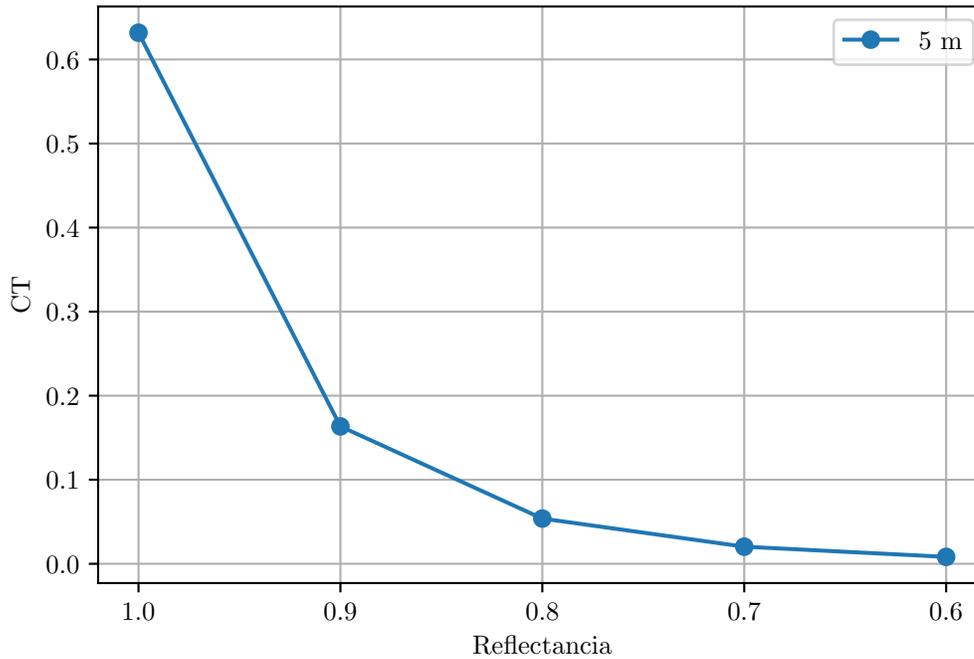


Figura 3.27: Coeficiente de transferencia en función de la reflectancia, para un ducto de 5 m de longitud.

### 3.4.3. Eficiencia

Para el cálculo de la eficiencia, se colocó el ducto solar en el modelo de los dos casos de estudio (Figura 3.25) y se evaluó el flujo luminoso en la entrada y la salida del ducto. La eficiencia del ducto se calculó de la forma:

$$\eta = \frac{\Phi_{int}}{\Phi_{ext}}, \quad (3.3)$$

donde  $\Phi_{ext}$  es el flujo luminoso en [lm] en la apertura del ducto que da al exterior y  $\Phi_{int}$  es el flujo luminoso en el extremo que da al interior del edificio.

En la Figura 3.28 se presenta la eficiencia anual horaria del ducto solar con  $r = 0.95$  y  $r = 0.80$  colocado en el CA. En la primera gráfica, correspondiente a la eficiencia del ducto con reflectancia de 0.95, podemos observar que la eficiencia va de 0.1 a 0.4 a lo largo del día desde mediados de septiembre hasta marzo, mientras que en los meses de abril a agosto la eficiencia máxima es menor a 0.3. Esta variación mensual de la eficiencia está relacionada con la posición del sol y la orientación del ducto. El colector del ducto solar (entrada) está ubicado en la fachada sur y el emisor (salida) se encuentra al norte en el interior del edificio.

Cuando el sol se encuentra al sur, se tiene mayor incidencia de radiación solar directa en el colector del ducto y por ello se tiene una mayor eficiencia en los meses de septiembre a marzo en comparación con los meses de abril a agosto. En la segunda gráfica, correspondiente a la eficiencia del ducto con  $r = 0.80$ , observamos una disminución considerable en la eficiencia a lo largo de todo el año si bien se mantiene visible el comportamiento mencionado anteriormente: mayor eficiencia para algunos de los meses en el que el sol está al sur, pero ahora alcanzando un máximo anual de 0.2 y solamente en horas cercanas al medio día solar.

En la Tabla 3.6 se presenta la eficiencia promedio anual de ductos con  $r = 0.95$  y  $r = 0.80$  para los casos CA y CAE. Dicha eficiencia está alrededor de 0.2 cuando  $r = 0.95$  y alrededor de 0.03 si  $r = 0.80$  para los dos casos de estudio. La variación en la eficiencia al añadir el Edificio 2 es mínima (del orden de 0.001) por lo que se consideró innecesario presentar la gráfica de eficiencia horaria anual para el CAE, que presenta un comportamiento muy similar al CA.

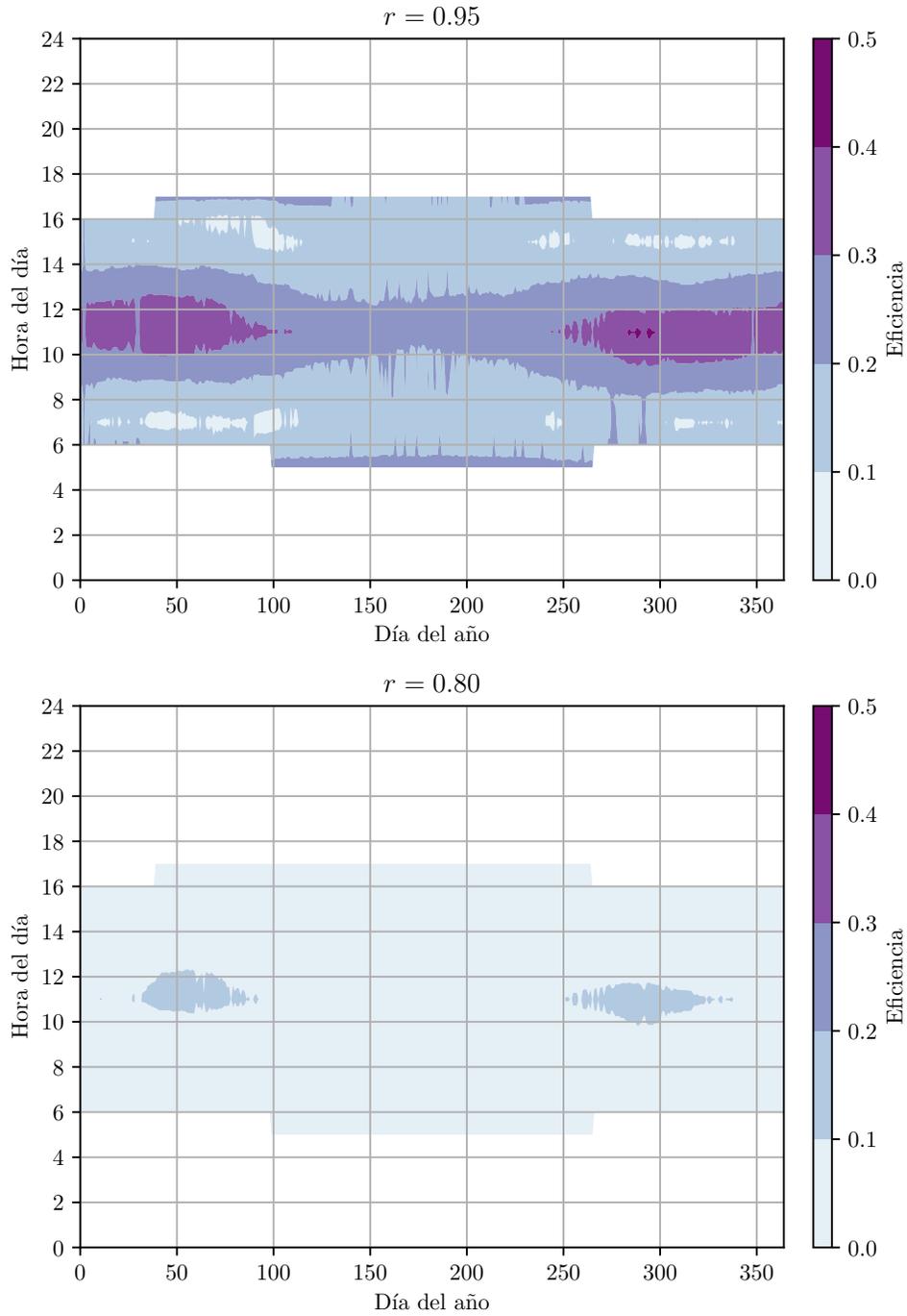


Figura 3.28: Eficiencia para ducto de 5 m con  $r = 0.95$  y  $r = 0.80$  colocado en CA.

$r$	$\eta_{CA}$	$\eta_{CAE}$	$\eta_{CA} - \eta_{CAE}$
0.95	0.2099	0.2088	0.0011
0.80	0.0358	0.0355	0.0003

Tabla 3.6: Eficiencia anual promedio para los casos CA y CAE durante las horas de trabajo, para las dos reflectancias simuladas.

Se calculó también la eficiencia mensual promedio durante las horas de trabajo (8 a.m. a 6 p.m.) y los resultados se presentan en la Figura 3.29. En esta gráfica se observa que la eficiencia tanto para el ducto con  $r = 0.80$  como para el ducto con  $r = 0.95$  alcanza su máximo en el mes de octubre seguido después del mes de febrero. La eficiencia mínima se alcanza para el mes de mayo y se mantiene en valores similares durante los siguientes 4 meses, variando probablemente por la misma variación en relación de radiación directa/difusa que se tiene en esos meses debido a las lluvias.

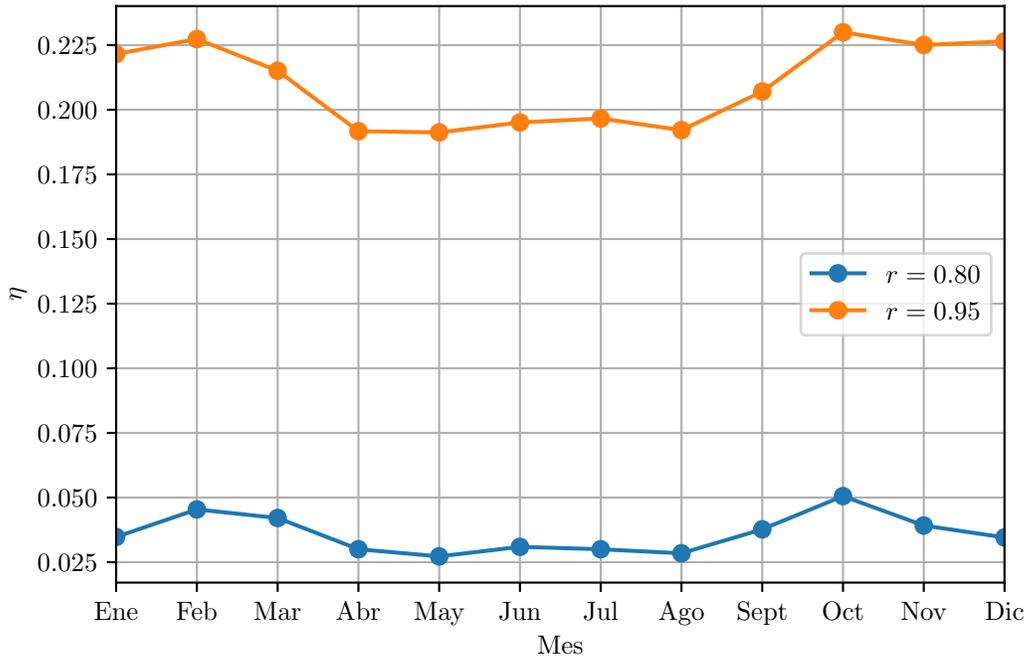


Figura 3.29: Eficiencia promedio mensual para ducto de 5 m con  $r = 0.95$  y  $r = 0.80$  colocado en CA.

### Flujo luminoso emitido por el ducto hacia el espacio de oficinas

Como parte de la evaluación de la factibilidad de la inclusión del ducto se calculó el flujo luminoso introducido al espacio por el ducto solar  $\Phi_{ducto}$ , para su posterior comparación con el flujo luminoso  $\Phi_{luminaria}$  emitido por las luminarias que se utilizarían en su lugar, cuya ficha técnica se presenta en el Apéndice B. Para representar esta relación de flujos luminosos, se propone en este trabajo el concepto de luminarias equivalentes que se obtiene del cociente:

$$LE = \frac{\Phi_{ducto}}{\Phi_{luminaria} \times \text{No. de luminarias}}. \quad (3.4)$$

La Figura 3.30 corresponde a las luminarias equivalentes horarias para el ducto con  $r = 0.95$  (superior) y  $r = 0.80$  (inferior), colocados en el CA. Observamos que para  $r = 0.95$  las LE llegan a un máximo de 1.8 en un horario de 11:30 a 12:00 para los meses de febrero y octubre, y un mínimo de entre 0 y 0.3 para junio y parte de julio. Se observa un comportamiento general similar al de la eficiencia, aumento en meses con el sol al sur y disminución para los meses con el sol al norte. Para el ducto con  $r = 0.80$  se observa una disminución considerable en el valor de LE, al grado de tener un máximo de 0.9, para el mismo periodo que el ducto con mayor reflectancia.

En la Tabla 3.7 se presenta la diferencia en el promedio anual de LE durante las horas de trabajo para entre el CA y el CAE. La diferencia de LE entre casos para los ductos de ambos valores de reflectancia es menor al 1 %.

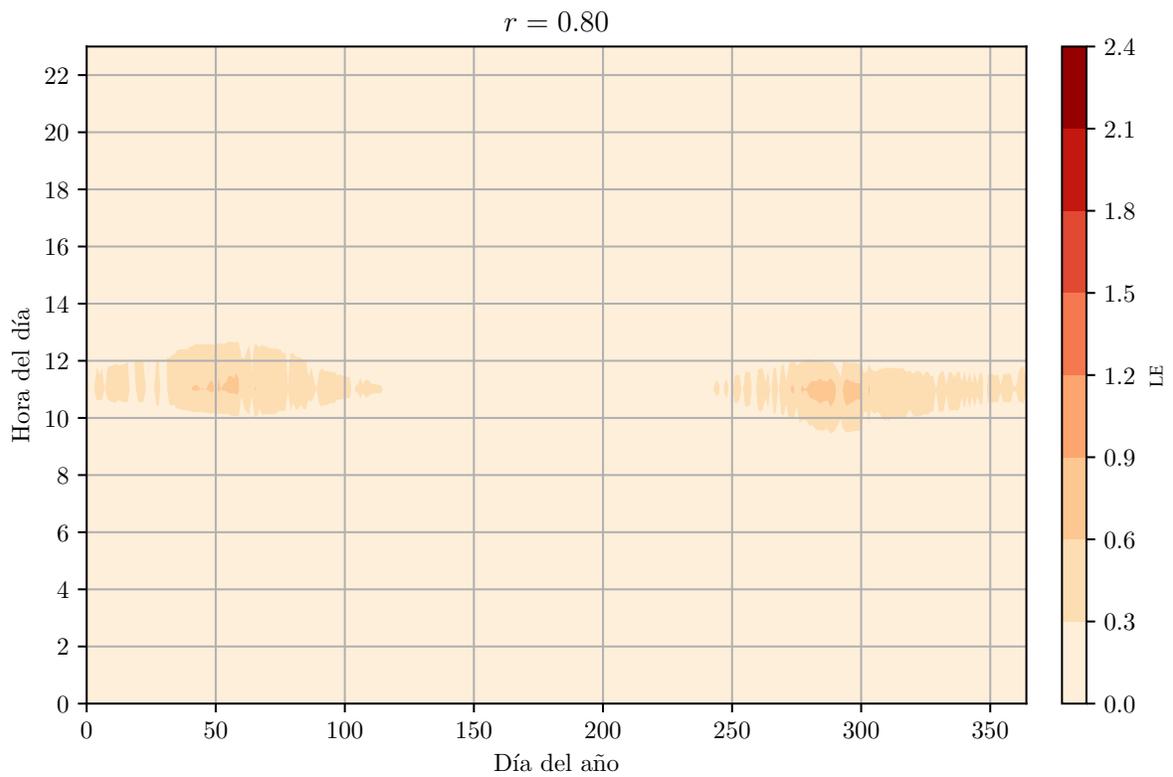
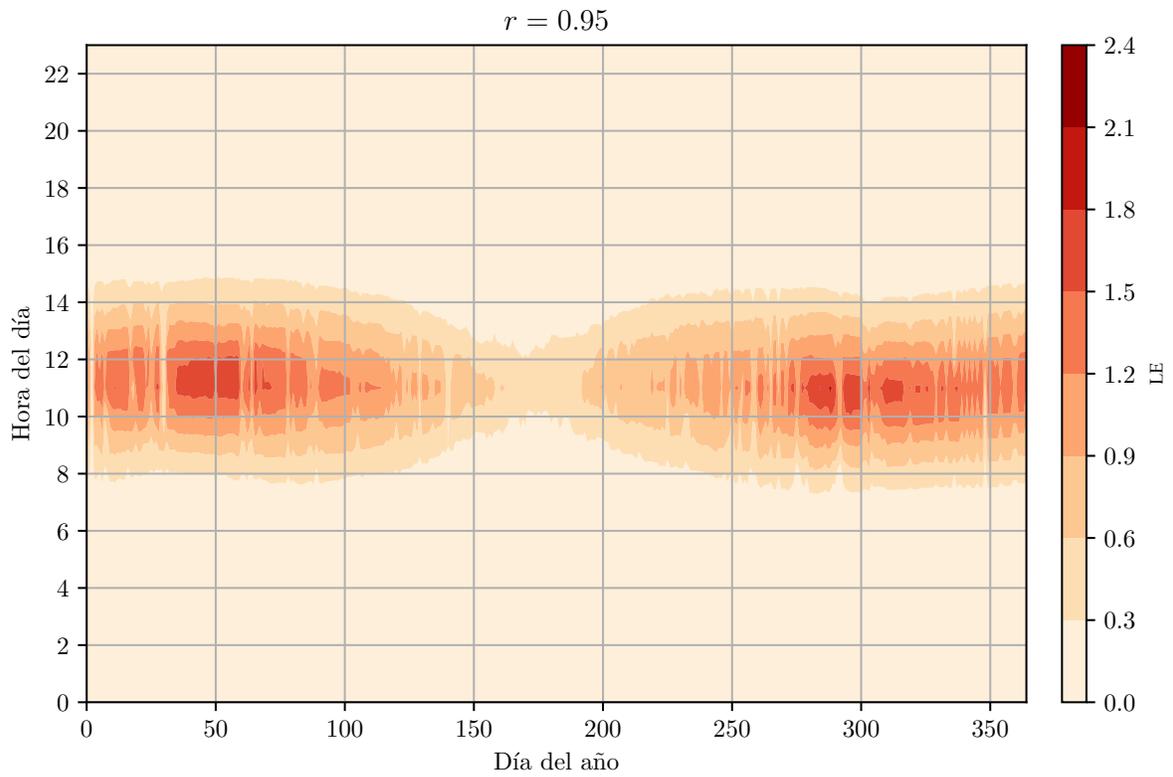


Figura 3.30: Luminarias equivalentes para ducto de 5 m con  $r = 0.95$  y  $r = 0.80$  colocado en CA.

$r$	$LE_{CA}$	$LE_{CAE}$	$LE_{CA} - LE_{CAE}$
0.95	0.2764	0.2688	0.0076
0.80	0.0454	0.0442	0.0012

Tabla 3.7: Diferencia en LE promedio entre CA y CAE durante las horas de trabajo.

Por último en esta sección se presenta en la Figura 3.31 la diferencia en el flujo luminoso (CA–CAE) entregado por los ductos para cada mes. Esta gráfica es útil para observar el efecto que tiene el Edificio 2 en el desempeño del ducto solar, el cual varía de acuerdo con el mes observando que para cuando el sol está más al sur (diciembre y enero) la diferencia CA–CAE alcanza su máximo debido a que el Edificio 2 obstruye parcialmente la incidencia del sol en el colector del ducto, mientras que para el mes de Junio, donde el sol se encuentra más al norte, el efecto del Edificio 2 es positivo pues refleja hacia el colector parte de la radiación solar. Este comportamiento es más visible para el ducto solar con  $r = 0.95$  puesto que cuando  $r = 0.80$  una cantidad de luz importante es absorbida por las paredes del ducto. De cualquier forma, la magnitud de esta diferencia es pequeña (no mayor a 150 lm) considerando que una luminaria como las que se colocarán en el NELIER emite 3800 lm.

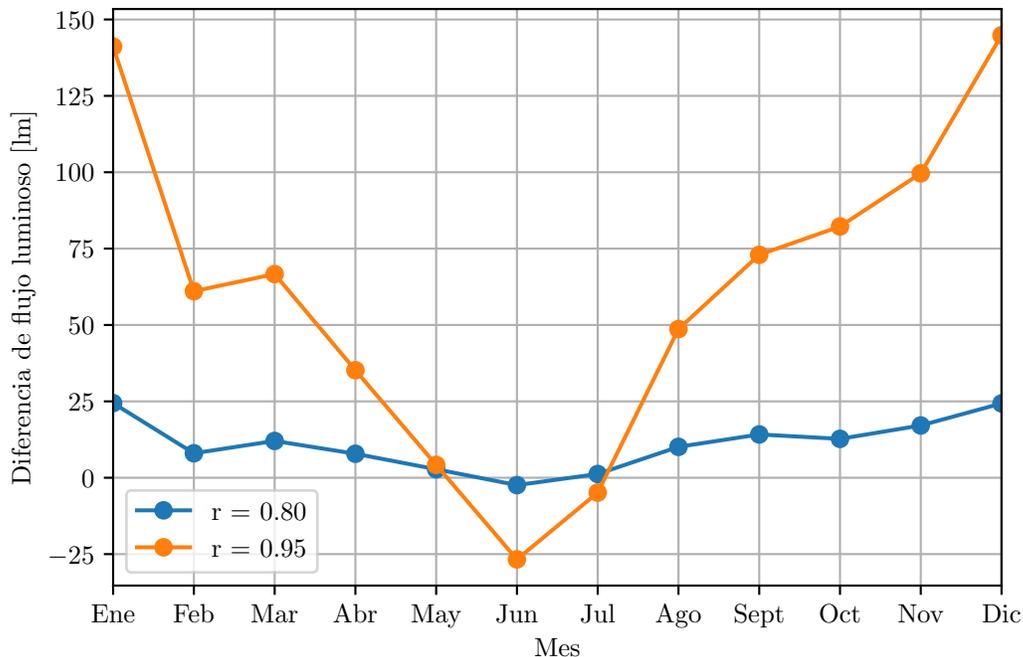


Figura 3.31: Diferencia en flujo luminoso mensual entregado por el ducto en CA–CAE.

### 3.4.4. *UDI* con implementación del ducto

Para concluir la evaluación del ducto, se presentan los mapas de iluminancia útil por luz diurna *UDI* para los casos CA y CAE con la implementación tanto de un ducto con  $r = 0.80$  como con  $r = 0.95$ .

En La Figura 3.32 se muestra el *UDI* del CA con el ducto con  $r = 0.95$ . La primera gráfica de esta figura muestra el porcentaje de horas laborales en condiciones de subiluminación ( $UDI_{und}$ ), donde se alcanza a percibir el efecto de la inclusión del ducto con reflectancia de 0.95 especialmente en la zona central, manifestándose en la aparición de algunas manchas más oscuras (correspondientes a un tiempo de entre 10 y 20 % de subiluminación) en comparación al color más claro que se tenía (correspondiente a un 20 - 30 % de las horas en la misma condición) para el CA sin ducto. En la segunda gráfica, que corresponde a las horas con valores de iluminancia adecuados, se percibe de nuevo la aparición de manchas de un color diferente, en este caso de aumento en el porcentaje de tiempo con condiciones de iluminación adecuadas. Por último, en la tercera gráfica aparecen también manchas más claras que indican un aumento en el porcentaje de horas que se tiene sobre iluminación.

La Figura 3.33 corresponde al *UDI* del CA con el ducto de reflectancia igual a 0.80. Para este caso no se distinguen las diferencias en el *UDI* con respecto al del CA descrito en la sección 3.3.3.

En la Figura 3.34 se muestra el *UDI* para el CAE con el ducto de  $r = 0.95$ , cuyo conjunto de gráficas presenta un comportamiento similar al descrito para el CA con ducto de reflectancia igual a 0.95: la aparición de manchas en la zona central que indican una disminución de alrededor del 10 % en el porcentaje de horas subiluminadas ( $UDI_{und}$ ), aumento del mismo orden en el porcentaje de horas con iluminación adecuada ( $UDI_u$ ) y ligero aumento en el porcentaje de horas sobreiluminadas ( $UDI_{over}$  en el área central).

Para terminar, en la Figura 3.35 se presenta el *UDI* en el CAE con el ducto de  $r = 0.80$ . Para este caso sí se distingue un cambio en el *UDI* con respecto al caso correspondiente sin ducto, dicho cambio se ve reflejado en la aparición de manchas moradas (disminución del 10 %) en la zona central para el  $UDI_{und}$  y manchas anaranjadas (aumento del 10 %) para el  $UDI_u$ . En el caso del  $UDI_{over}$ , no se distingue cambio alguno con respecto al CAE sin ducto solar.

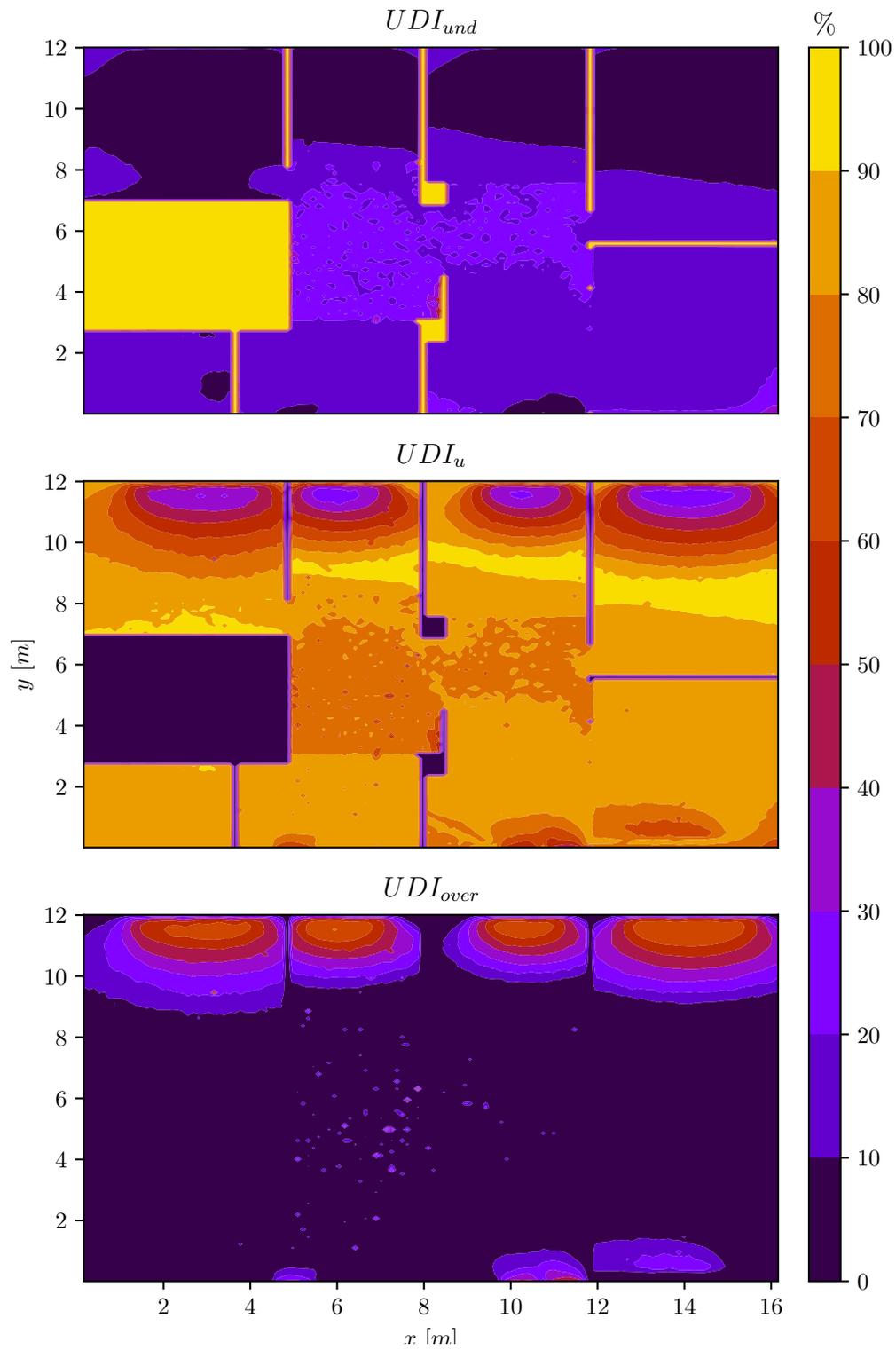


Figura 3.32: Iluminancia útil por luz diurna para CA con ducto de  $r = 0.95$ .

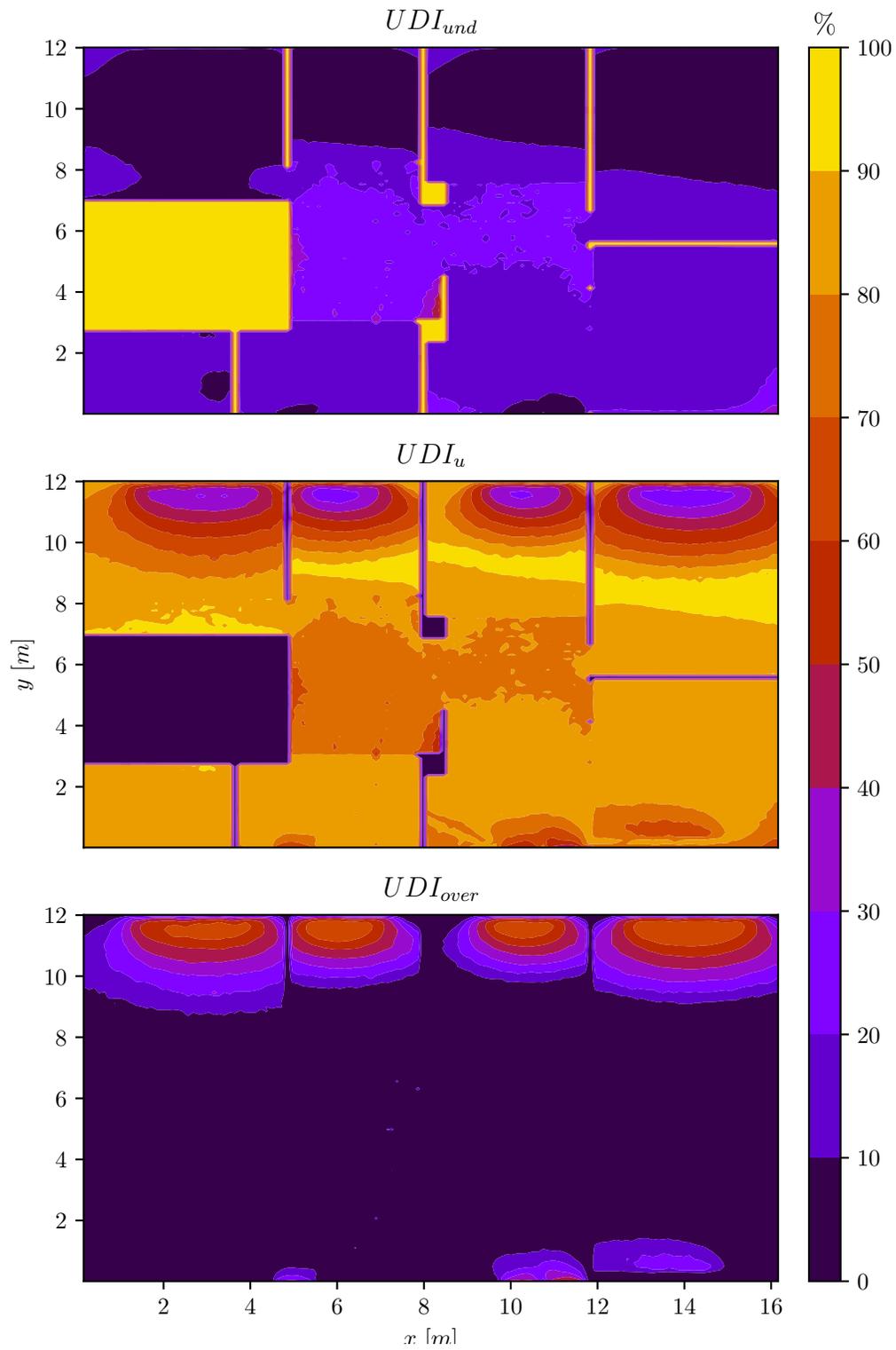


Figura 3.33: Iluminancia útil por luz diurna para CA con ducto de  $r = 0.80$

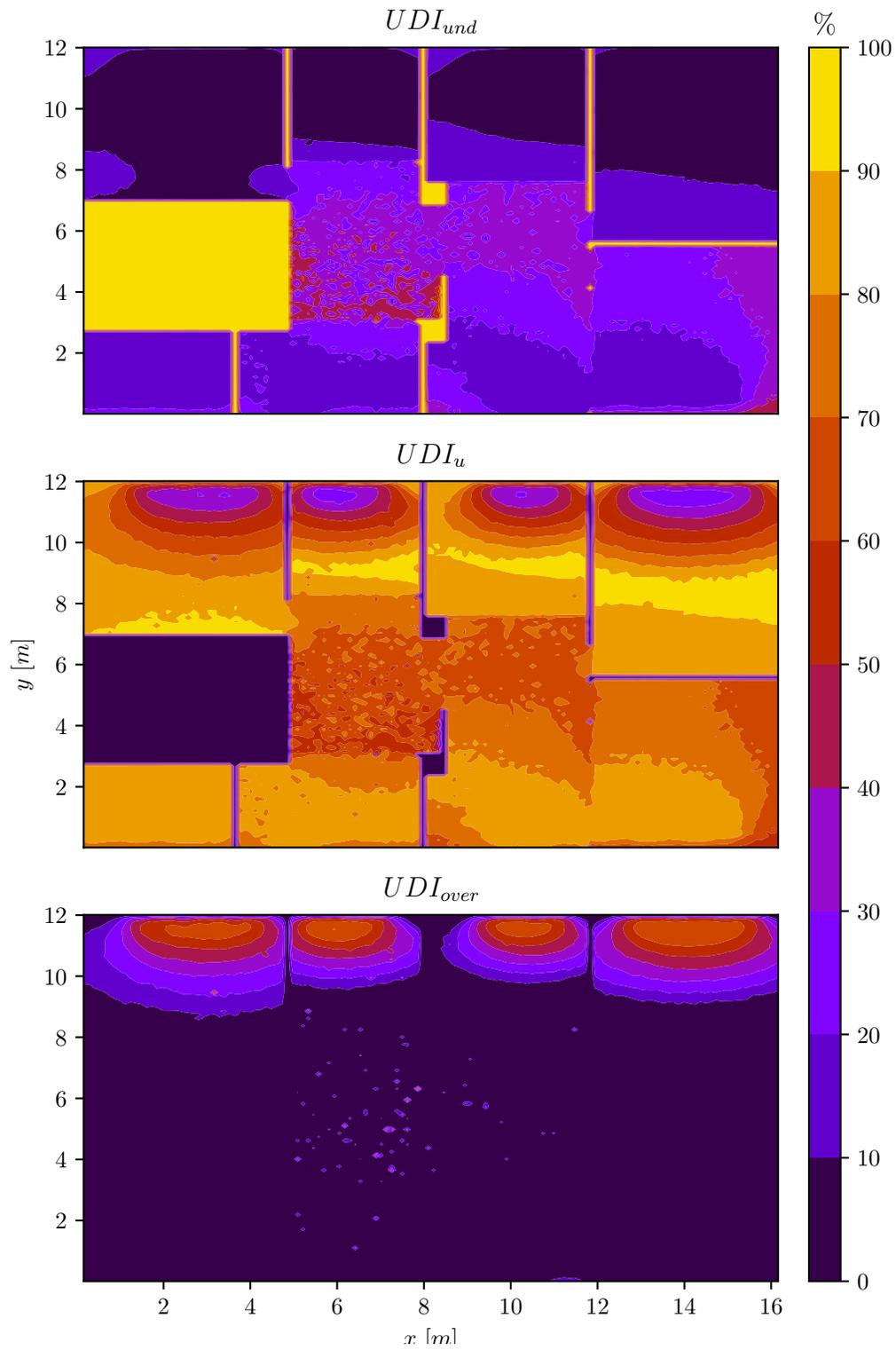


Figura 3.34: Iluminancia útil por luz diurna para CAE con ducto de  $r = 0.95$ .

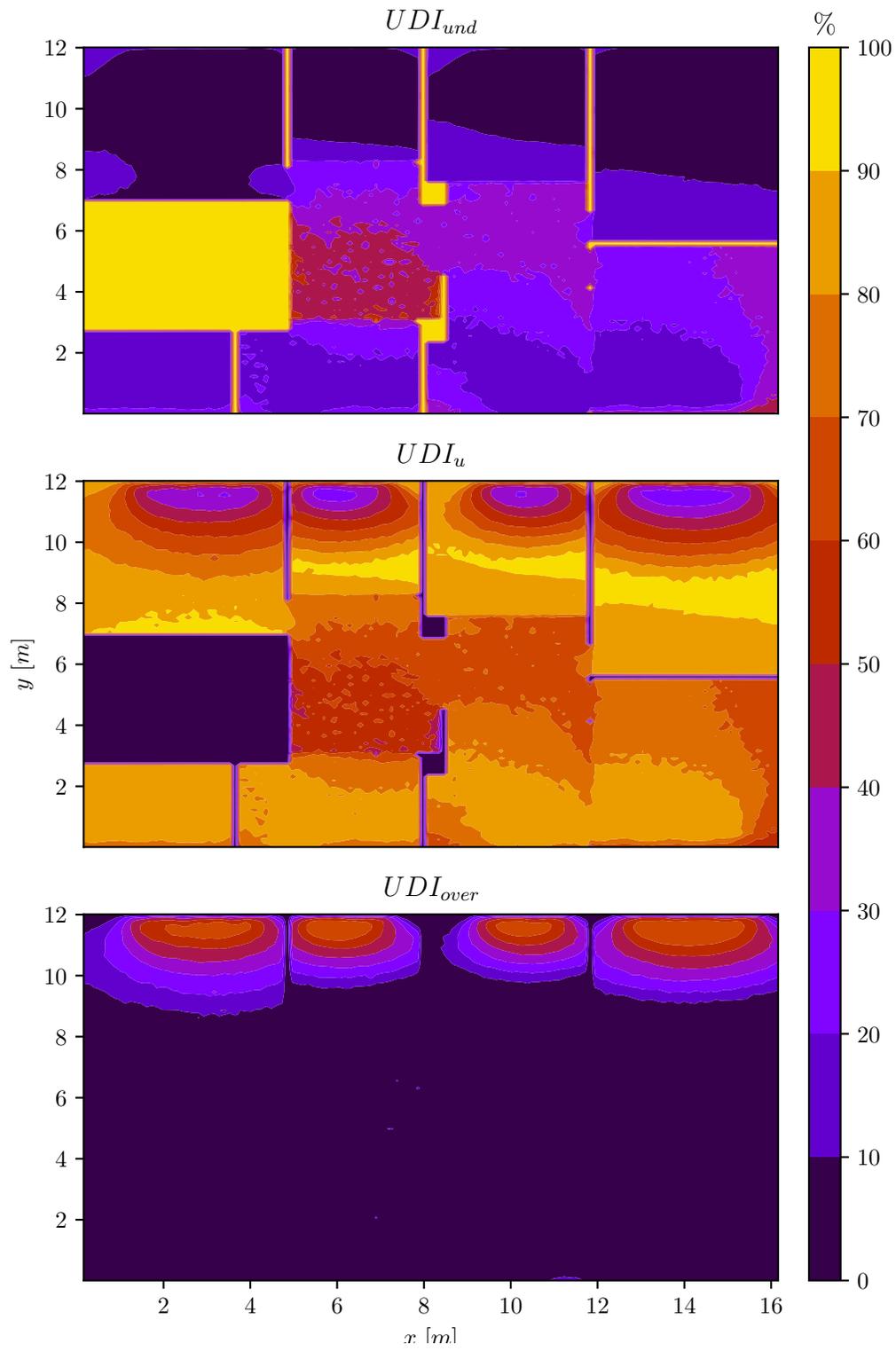


Figura 3.35: Iluminancia útil por luz diurna para CAE con ducto de  $r = 0.80$ .

# Capítulo 4

## Conclusiones

El consumo de energía para fines de iluminación ha adquirido especial atención en los estudios de eficiencia energética en edificaciones educativas debido a su potencial de ahorro y con este interés viene la búsqueda de estrategias y dispositivos que contribuyan al máximo aprovechamiento de la iluminación natural; una de estas estrategias es el uso de herramientas computacionales para el análisis de las condiciones de iluminación en edificaciones que están en la etapa de planeación. Tal es el caso de este trabajo, en el que se utilizó el conjunto de programas de código abierto Radiance para esbozar una vista preliminar de la iluminación natural que tendrá el área administrativa del edificio de docencia del proyecto “Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables UNAM (291600)”. Como consecuencia de la comparación de los resultados entre los casos aquí analizados, queda en evidencia la importancia de la consideración de obstrucciones exteriores en los estudios de iluminación natural, puesto que pueden contribuir de forma importante en la protección de espacios sobreiluminados así como pueden generar problemas de deslumbramiento al reflejar la luz de la bóveda celeste.

Por otra parte se puede concluir que, para las horas laborales establecidas, la iluminación natural no bastará para mantener la iluminancia en el plano de trabajo por encima del valor establecido por la NOM-025 en toda el área administrativa, específicamente en la zona central del espacio estudiado, que requerirá de iluminación artificial por lo menos el 20 % de las horas laborales sin considerar la construcción de un ducto solar. Se encontró también que la probabilidad de deslumbramiento es baja para la mayoría de los puntos de vista establecidos como críticos, con únicamente tres de ellos mostrando probabilidad de deslumbramiento perceptible y molesto.

En cuanto a la evaluación del ducto solar de sección rectangular, los resultados más relevantes indican que, con la geometría propuesta, la cantidad de luz transferida desde un extremo del ducto a otro disminuye de forma exponencial para cualquier ducto construido

con un material con reflectancia diferente de 1.0. De la comparación entre los casos CA y CAE con el ducto colocado se puede concluir que la inclusión del Edificio 2 en el modelo no afecta significativamente ni la eficiencia ni el flujo luminoso emitido por el ducto. La eficiencia está ligada a la posición solar y la orientación del ducto, alcanzando valores máximos de 0.5 para un ducto con reflectancia de 0.95.

En lo que respecta a la comparación del flujo luminoso proporcionado por el ducto y el emitido por las dos luminarias que serían colocadas en el espacio estudiado, se encontró que el flujo luminoso del ducto puede equivaler desde 0 veces el flujo de las luminarias hasta 2 veces para un ducto de  $r = 0.95$  y 0.9 veces si  $r = 0.80$ , por lo que la construcción de un ducto con materiales de reflectancia igual o menor a 0.80 puede no resultar conveniente y se recomienda un posterior análisis económico para determinar si la energía eléctrica ahorrada con la implementación de un ducto solar con  $r = 0.95$  es suficiente para compensar el alto costo de manufactura del mismo.

Se recomienda también una refinación en el cálculo de la iluminancia una vez que se incluye el ducto en el modelo, puesto que los resultados de cambio en el *UDI* podrían interpretarse como ruido numérico derivado del método estocástico implementado por Radiance.

# Bibliografía

- [1] Lira-Oliver, A.: *Indoor Illumination for the Stimulation of the Human Circadian System: Assessing the Interaction of Spectral and Intensity Characteristics of Light, Optical Properties of Materials, and Surface Texture*. Harvard University, 2006. <https://books.google.com.mx/books?id=I1BXHAAACAAJ>.
- [2] Pauley, Stephen M.: *Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue*. *Medical Hypotheses*, 63(4):588 – 596, 2004. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306987704002336>.
- [3] Hazell, Jane y Arnold J. Wilkins: *A contribution of fluorescent lighting to agoraphobia*. *Psychological Medicine*, 20(3):591–596, 1990.
- [4] Basso Jr, MR: *Fluorescent lighting caused increased stress in humans*. *Journal of Neuroscience*, 2001.
- [5] Waide, Paul, Satoshi Tanishima y Phil Harrington: *Light's labour's lost: Policies for energy-efficient lighting*. *OECD*, 12:255–292, 2006.
- [6] SENER: *Balance Nacional de Energía 2017*. Informe técnico, SENER, 2018.
- [7] Escobedo, A: *Análisis y modelación del consumo de energía eléctrica en edificios universitarios con base a usos finales y parámetros arquitectónicos: caso UNAM-CU*. Tesis de Doctorado, UNAM, 2009.
- [8] Fracastoro, GV: *Fisica Tecnica Ambientale*. Parte VI: Illuminotecnica, Politecnico di Torino, 2003.
- [9] Colaboradores de Wikipedia: *Espectro de las ondas electromagnéticas — Wikipedia, La enciclopedia libre*, 2008. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM\\_spectrum.es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.es.svg), [En línea; consultado el 15 de noviembre de 2019].
- [10] Ding, Jianhua, Qi Yao y Lei Jiang: *Comparisons of Scotopic/Photopic Ratios Using 2- and 10-Degree Spectral Sensitivity Curves*. *Applied Sciences*, 9:4471, Octubre 2019.

- [11] *Appendix 7: Spectral Luminous Efficiency Functions*, páginas 678–679. John Wiley and Sons, Ltd, 2005. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470024275.app7>.
- [12] Perez, R., R. Seals y J. Michalsky: *All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation*. *Solar Energy*, 50(3):235 – 245, 1993. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9390017I>.
- [13] Hviid, Christian Anker, Toke Rammer Nielsen y Svend Svendsen: *Simple tool to evaluate the impact of daylight on building energy consumption*. *Solar Energy*, 82(9):787–798, sep 2008. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08000492>.
- [14] Colaboradores de Wikipedia: *Ray tracing (graphics) — Wikipedia, La enciclopedia libre*, 2008. [https://en.wikipedia.org/wiki/Ray\\_tracing\\_\(graphics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing_(graphics)), [En línea; consultado el 21 de octubre de 2019].
- [15] Ward, Gregory J.: *The RADIANCE lighting simulation and rendering system*. En *SIG-GRAPH '94 Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, páginas 459–472, Orlando, Florida, 1994.
- [16] Dimov, Ivan T., Anton A. Penzov y Stanislava S. Stoilova: *Parallel Monte Carlo Sampling Scheme for Sphere and Hemisphere*. En Boyanov, Todor, Stefka Dimova, Krassimir Georgiev y Geno Nikolov (editores): *Numerical Methods and Applications*, páginas 148–155, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer Berlin Heidelberg.
- [17] Tregenza, P. R. y I. M. Waters: *Daylight coefficients*. *Lighting Research & Technology*, 15(2):65–71, jun 1983. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/096032718301500201>.
- [18] Subramaniam, Sarith: *Daylighting Simulations with Radiance using Matrix-based Methods*, 2017. <https://www.radiance-online.org/learning/tutorials/matrix-based-methods>.
- [19] Mardaljevic, John: *Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients*. Tesis de Doctorado, De Montfort University, 2000.
- [20] Perez, Richard, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky y Ronald Stewart: *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*. *Solar Energy*, 44(5):271 – 289, 1990. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9090055H>.
- [21] Carlucci, Salvatore, Francesco Causone, Francesco De Rosa y Lorenzo Pagliano: *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, 2015. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002154>.
- [22] Wienold, Jan y Jens Christoffersen: *Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras*. Energy and Buildings, 38(7):743 – 757, 2006. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806000715>, Special Issue on Daylighting Buildings.
- [23] Wienold, Jan *et al.*: *Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis*. En *Building Simulation*, páginas 1197–1204, 2007.
- [24] Wienold, Jan: *Dynamic daylight glare evaluation*. En *Building Simulation*, páginas 944–951, 2009.
- [25] Mardaljevic, J.: *Validation of a lighting simulation program under real sky conditions*. Lighting Research & Technology, 27(4):181–188, dec 1995. <http://lrt.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/14771535950270040701>.
- [26] *Lighting Materials for Simulation. Design for Climate and Comfort Lab at the Singapore University of Technology and Design*, 2015. <http://spectraldb.com/>, [En línea; consultado el 15 de octubre de 2019].
- [27] Antonutto, Giulio y Andrew McNeil: *Radiance Primer*, 2013. <https://www.radiance-online.org/learning/tutorials/radiance-primer.pdf>.
- [28] *Modeling trees in Radiance. Radiance Forum*, 2015. <https://discourse.radiance-online.org/t/modeling-trees-in-radiance/3757>, [Comentario en foro en línea].
- [29] Sadeghi, Reza y Richard Mistrick: *Optimization of surface material properties for modeling trees in architectural daylighting simulations*. Agosto 2017.
- [30] Oficial, Diario: *Secretaría del Trabajo y Previsión Social, Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, “Condiciones de iluminación en los centros de trabajo”*, 2008.
- [31] Nabil, Azza y John Mardaljevic: *Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors*. Energy and buildings, 38(7):905–913, 2006.
- [32] Rea, M: *IESNA Handbook 9 th editions*. The Illuminating Engineering Society of North America, E.E.U.U., 2002.



# Apéndice A

## Selección de parámetros para la simulación con Radiance

Los parámetros utilizados en las simulaciones de Radiance de la tabla 3.3 se escogieron a través de un análisis de los resultados obtenidos en veinte simulaciones y la desviación estándar del conjunto de datos obtenido para cada valor de los parámetros  $-ab$  y  $-ad$ . Para estas simulaciones se utilizó una única línea de nueve sensores que atraviesa el área administrativa de norte a sur y que pasa por  $x = 6.1$  m y se realizó para el día nublado a las 9.5 h horas solares. El primer parámetro a seleccionar y uno de los más importantes es el número de rayos emitidos  $-ad$ . En la Figura A.1 se muestran los resultados obtenidos para distintos valores de  $-ad$ , desde 2 hasta 65536 con sus respectivas desviaciones estándar, donde es posible observar que es hasta las simulaciones con  $-ad$  igual a 16,384 que los valores de iluminancia comienzan a converger, mientras que en valores de  $-ad$  menores la iluminancia obtenida para cada sensor varía entre una simulación y otra resultando en una mayor desviación estándar. Por otra parte, en la Figura A.2 se presentan los valores de iluminancia obtenidos para la misma línea de sensores, utilizando distintas combinaciones de  $-ad$  y  $-as$ . Este conjunto de gráficas nos hace ver que la influencia del parámetro  $-as$  en los resultados es más sutil, es decir que existe poca variación en la desviación estándar entre los valores obtenidos utilizando distinto  $-as$ .

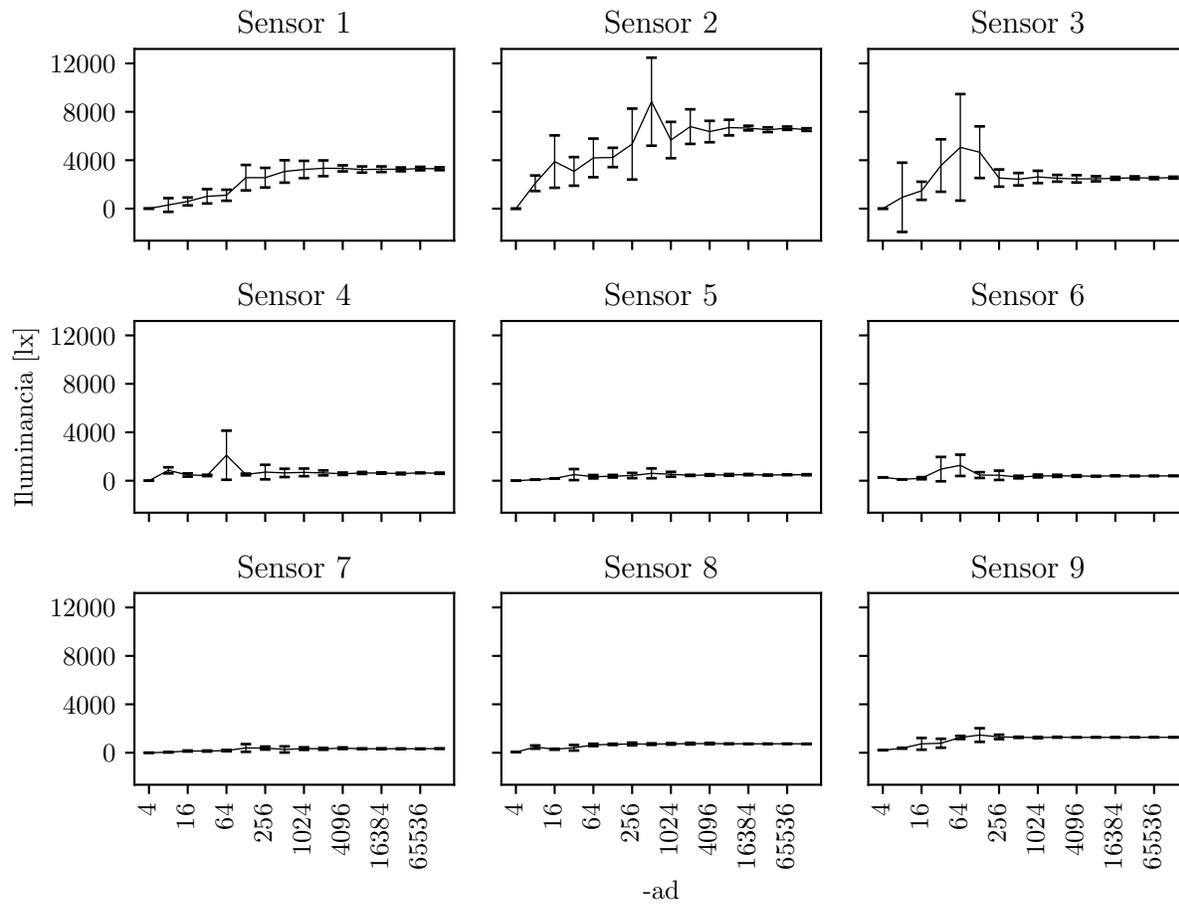


Figura A.1: Simulaciones de iluminancia para determinación de parámetro  $-ad$ .

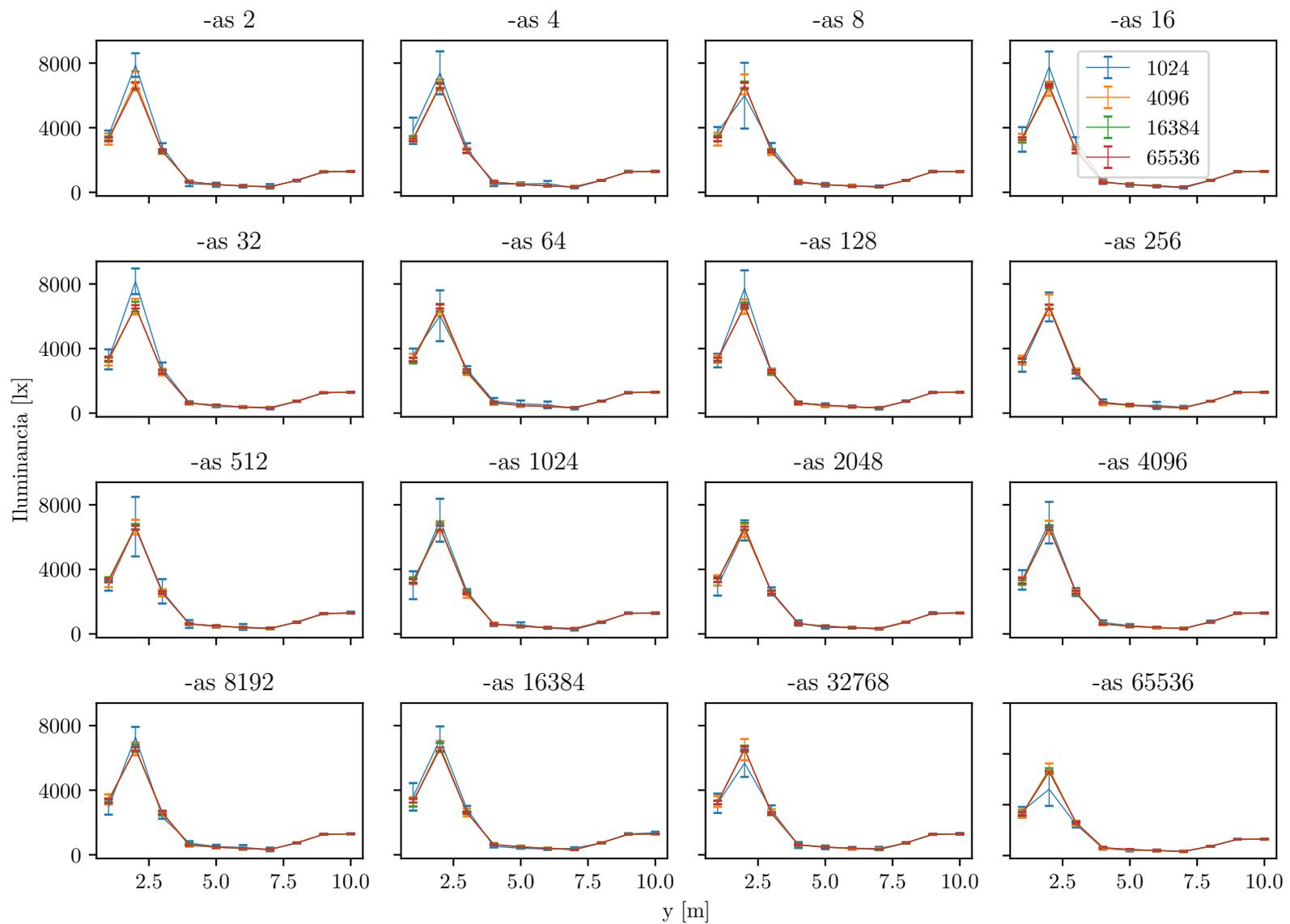
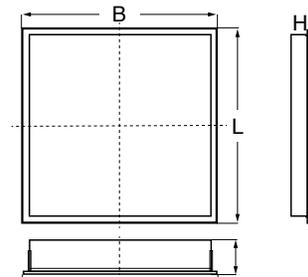


Figura A.2: Simulaciones de iluminancia para determinación de parámetro  $-as$ .



## Apéndice B

### Ficha técnica luminarias



L	B	H
605 mm	605 mm	60 mm

## ■ MONTAJE

Empotrar en plafón modular con accesorio disponible para montaje en plafón liso.

## ■ DESCRIPCIÓN LUMINARIO

**Cuerpo:** lámina de acero Cal.24, acabado con pintura poliéster de aplicación electrostática. Color blanco RAL9003.

**Óptica:** refractor de acrílico microprismático 100% puro resistente a los rayos UV, sellado al marco.

## ■ EQUIPO ELÉCTRICO

**Fuente de poder:** driver multivoltaje (120-277V, 50/60 Hz) de AFP(>0.9), atenuable del 100%-10% con controlador de 0-10V, THD <20%.

\*Con batería de emergencia de instalación remota como opción sobre pedido.

**LEDs:** módulo LED de alta eficiencia.

**Conector:** clema de conexión rápida.

## ■ CERTIFICACIONES

· NOM

## ■ TEMPERATURA DE OPERACIÓN AMBIENTE

-20°C a 40°C.

## ■ APLICACIONES

Oficinas, pasillos, recepciones, boutiques, aulas, hospitales, salas de conferencia, salas de lectura, comedores, salas de espera, cómputo y bibliotecas.

## ■ GARANTÍAS

Con garantía de fábrica de 5 años, consulte términos y condiciones en la página web.

CÓDIGO	POTENCIA NOMINAL	POTENCIA DEL SISTEMA	LM	IRC	TEMPERATURA DE COLOR	HORAS DE VIDA	KG
6160LED44WWT40K	39W	44W	3 882	>80	4000 K	>50 000 L80	5.0

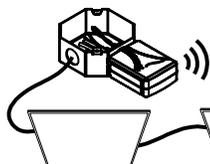
## ACCESORIOS (SE ORDENAN POR SEPARADO)

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
KSPLX	Juego de 4 soportes de acero para el montaje en plafón liso

## ■ SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN

### CONTROL POR GRUPOS DE LUMINARIOS

**LOG-RLY**  
RELAY  
INALÁMBRICO  
(INTERIORES)



**LOG-ESRP**  
SWITCH  
(ACCESORIO)  
(INTERIORES)

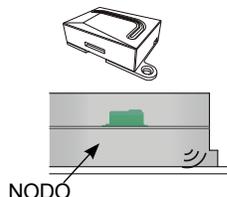


**LOG-ML2**  
SENSOR REMOTO  
(ACCESORIO)  
(INTERIORES)



### CONTROL INDIVIDUAL / NODO INTERNO + SENSOR REMOTO

**LOG-10V12**  
(NODO 0-10V)  
(INTEGRADO)



**LOG-ESRP**  
SWITCH  
(ACCESORIO)  
(INTERIORES)

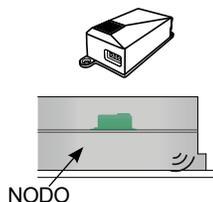


**LOG-ML2**  
SENSOR REMOTO  
(ACCESORIO)  
(INTERIORES)



### CONTROL INDIVIDUAL / NODO Y SENSOR ALÁMBRICO

**LOG-DR10V**  
(NODO 0-10V)  
(INTEGRADO)



+

**LOG-HPML**  
(SENSOR HIGH-BAY)



**LOG-LPML**  
(SENSOR LOW-BAY)



**LOG-ESRP**  
SWITCH  
(ACCESORIO)  
(INTERIORES)

