

Dimensionado de huecos en espacios hospitalarios mediante criterios de iluminación saludable: aplicación a box en UCI

Optimización del tamaño y proporción de huecos en espacios hospitalarios de cuidados intensivos mediante análisis dinámico de los niveles obtenidos de confort lumínico, eficiencia energética y estímulo circadiano.



Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de Arquitectura

Autor: **Miguel Ángel Ráez Muñoz**

Tutor: Miguel Ángel Campano Laborda

Grupo B 2019-202



AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad de Sevilla y a la Escuela Superior de Arquitectura de Sevilla he podido realizar el presente trabajo. Asimismo, y no sin menos gratitud, mencionar al Departamento de Construcciones arquitectónicas I y al grupo de investigación TEP130, perteneciente al PAIDI (Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación). Mención especial merecen las personas que han caminado conmigo en el desempeño del presente trabajo, sin las cuales me habría sido imposible realizarlo.

- El equipo docente correspondiente al grupo B de trabajo de fin de grado de la ETSA compuesto por Juan José Sendra Salas, José Carlos Gutiérrez Blanco y Emilio J. Mascort Albea, por el trabajo de corrección realizado durante el curso.
- Miguel Ángel Campano Laborda: Profesor e investigador de la Universidad de Sevilla y el TEP130, por su apoyo incondicional más allá de las competencias propias de un tutor, compartiendo dedicación y esfuerzo sin olvidar el amor a la arquitectura que tanto nos une.
- Ignacio Javier Acosta García: Profesor e investigador de la Universidad de Sevilla y del TEP 130, por su ayuda con las novedosas herramientas utilizadas en este trabajo, de las cuales he aprendido gracias a su ayuda y sus conocimientos.
- Alejandro Ruiz Fernández de Angulo y Oscar Luque Cabezuelo: Compañeros en la escuela desde el primer día, con los que he tenido la suerte de compartir estos años de carrera. Gracias a ellos conocí el trabajo de Miguel Ángel Campano y del grupo de investigación TEP130, además de ayudarme con todas las inquietudes y obstáculos que encontré en el camino.

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se desarrolla con el objetivo de generar una metodología para la optimización de las proporciones de huecos de ventana, según criterios de aprovechamiento de la luz natural mediante métricas dinámicas. Estas están vinculadas tanto a la disminución en el consumo eléctrico como a la correcta adaptación del individuo a los ritmos circadianos, mejorando así su salud general. Para ello, se utilizan los indicadores dinámicos Daylight Autonomy (DA) y Circadian Stimulus Autonomy (CSA), que miden el nivel de aprovechamiento de la luz natural y su impacto en los ritmos circadianos, respetivamente. El estudio se aplica sobre un caso de estudio a modo de ejemplo metodológico, situado en un box de unidad de cuidados intensivos (UCI), en el hospital de rehabilitación y traumatología de Virgen del Rocío.

ÍNDICE

BLOQUE A: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

1. Introducción.

2. Objetivos.

- 2.1 Objetivos generales.
- 2.2 Objetivos específicos.

3. Estado de la cuestión.

- 3.1 Salud y bienestar.
 - 3.1.1 Ciclo Circadiano
- 3.2 Iluminación natural
 - 3.2.1 Normativas respecto de iluminación natural en arquitectura.
 - 3.2.2 Métodos de cálculo de iluminación natural
 - 3.2.3 Métricas estáticas, *Daylight Factor*.
 - 3.2.4 Métricas Dinámicas, *Daylight Autonomy*.
 - 3.2.5 Métricas Dinámicas, *Circadian Stimulus Autonomy*.
 - 3.2.6 Umbral de iluminancia
- 3.3 Métodos de cálculo para iluminación natural.
 - 3.3.1 Radiosidad
 - 3.3.2 *Ray-tracing*
 - 3.3.3 *Daylight Coefficients*

BLOQUE B: METODOLOGÍA

4. Descripción de la metodología de trabajo.

- 4.1 Elección y definición de modelos de cálculo.
 - 4.1.1 Caracterización del modelo base de estudio: Box UCI, en Virgen del Rocío.
 - 4.1.2 Definición de las variables presentes en el estudio.
- 4.2 Selección y validación de las herramientas informáticas de cálculo.
 - 4.2.1 Selección de las herramientas de cálculo (*Rhinoceros, DIVA, Microsoft Excel*)
 - 4.2.2 Validación de la herramienta de cálculo mediante celdas de ensayo.

- 4.3 Protocolo de modelado y cálculo:
 - 4.3.1 Modelado de los modelos 3D mediante la herramienta *Rhinoceros*.
 - 4.3.2 Cálculo del DA mediante la herramienta *DIVA*
 - 4.3.3 Cálculo de CSA mediante procesador de datos *Microsoft Excel*, a partir de los resultados obtenidos de DA.
- 4.4 Producción de Hipótesis de estudio, mediante combinatoria de variables
- 4.5 Herramientas matemáticas para el análisis de datos.
 - 4.5.1 Media Aritmética
 - 4.5.2 Desviación Estándar

BLOQUE C: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5. Comparación y análisis de resultados.

- 6.1 Resultados de cálculo.
- 6.2 Análisis de resultados.
 - 6.2.1 Análisis del indicador de DA.
 - 6.2.2 Análisis del indicador de CSA.

6. Conclusiones.

7. Futuras líneas de investigación.

APÉNDICES

A. Glosario.

B. Referencias.

BLOQUE A

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Desde la invención de la luz eléctrica, la humanidad se ha visto avocada a depender de ella, pudiendo utilizar con ello el periodo nocturno, anteriormente reservado casi exclusivamente al descanso. Debido a los requerimientos laborales y el estilo de vida, muchas actividades pasaron a poder realizarse por la noche, intercambiando el ritmo natural de descanso y trabajo del día a día. Se perdió, en gran parte, la relación del ser humano con la luz natural, cosa que trajo serias consecuencias en la salud pública, debido a la necesidad biológica del ser humano de dormir por la noche para lograr un descanso reparador, definido en nuestros genes, y expresado mediante los ritmos circadianos.

En la actualidad, la arquitectura se ve claramente influenciada por el carácter sostenible y tecnológico de la concienciación medioambiental presente. Principalmente en referencia a la eficiencia energética y económica, los espacios se diseñan en busca de una solución acorde con estos estándares, pasando por alto el bienestar y la salud del individuo. En este sentido, el uso adecuado de la luz natural es esencial en la reducción de demanda energética en luz eléctrica, además de beneficiar la salud y visión de los ocupantes, dado que es necesaria para la sincronización de los ritmos circadianos del individuo.

El diseño del hueco de ventana es la principal herramienta del arquitecto para controlar la entrada de luz natural en el edificio. Un elaborado diseño de hueco de ventana debe poder satisfacer simultáneamente las exigencias de confort térmico, eficiencia energética y salubridad, integrando la relación entre la luz natural y la respuesta al estímulo circadiano.

Por todo ello, la iluminación es de vital importancia en diferentes espacios, como educacionales o de atención médica; esto se hace especialmente cierto en periodos de hospitalización o de confinamiento, como el provocado por la Covid-19, donde se debe dignificar y dotar de una mayor salubridad las estancias de los pacientes internos de media y larga duración.

Teniendo en cuenta la importancia de la luz natural en la salud y bienestar del individuo y observando el contexto actual del sector sanitario, el presente trabajo busca generar una metodología para optimizar el hueco de ventana aplicando indicadores dinámicos de iluminación natural, de reciente desarrollo, aplicándolo como ejemplo metodológico sobre una tipología de alta replicabilidad y presencia en el territorio, según parámetros de salud, bienestar y eficiencia energética, como es la UCI de Traumatología del Hospital Virgen del Rocío (Sevilla).

2.OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología para la optimización de la localización y las proporciones de huecos de ventana, según criterios de aprovechamiento de la luz natural mediante métricas dinámicas, vinculadas tanto a la disminución en el consumo eléctrico como a la correcta adaptación del individuo a los ritmos circadianos, mejorando así su salud general.

Objetivos generales

Este trabajo tiene los siguientes objetivos generales:

- OG.1** Desarrollo de metodología de análisis basada en métricas dinámicas de iluminación natural, vinculadas tanto a parámetros de eficiencia energética como a una adecuada respuesta circadiana, salubridad y confort del paciente.
- OG.2** Aplicación de la métrica dinámica sobre un caso de estudio, consistente en un “box” de unidad de cuidados intensivos del hospital Virgen del Rocío.

Objetivos específicos

Para alcanzar los objetivos generales antes mencionados, se establecen estos objetivos específicos:

- OE.1** Comprobación de la fiabilidad de la metodología de cálculo y la herramienta informática de los indicadores dinámicos de iluminación natural y estímulo circadiano por comparación con un modelo real, (Celdas de ensayo del TEP130).
- OE.2** Aplicar la metodología a un modelo de dimensiones reducidas, alta replicabilidad y de elevada presencia en el territorio.
- OE.3** Analizar el impacto de un conjunto representativo de variables: Orientación, posición, tamaño y reflectancia interior.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Este capítulo describe los conceptos previos que se utilizan en este trabajo, así como otros estudios existentes en los que enmarcarlo dentro del contexto científico, mostrando en qué puntos de partida se apoya y hacia qué líneas se puede dirigir.

CICLO CIRCADIANO

El ciclo circadiano es un ritmo natural de cambios físicos, mentales y de comportamiento que experimentan los seres vivos, vinculado al transcurso del día (24 horas). Dado que los seres humanos tienen un ciclo medio algo superior a 24h, la luz de la mañana se hace necesaria para acompañar y adaptar el ritmo humano a las 24 horas del día terrestre.

Así, los ritmos o ciclos circadianos se ven afectados principalmente por las variaciones cíclicas entre luz y oscuridad, detectadas mediante la retina, y controlados por un área pequeña en el medio del encéfalo. Estos afectan al sueño, la temperatura del cuerpo, la regulación hormonal, el apetito y otras funciones corporales.

Cuando estos ritmos circadianos no son adecuados, pueden generar o fomentar obesidad, diabetes, depresión, trastorno bipolar, trastorno afectivo estacional y trastornos del sueño, como, por ejemplo, el insomnio. El ritmo circadiano por tanto es llamado a menudo "reloj biológico".

Mantener sin variación la temperatura de color de una fuente de iluminación puede provocar en el sujeto de experimentación una disincronía circadiana, lo que reduce e incluso bloquea la secreción de hormonas, tales como la GH (hormona del crecimiento), la hidrocortisona o la melatonina.

Los estudios realizados por Álvarez B. (2013) y Antonio CarriloVico (2015) han verificado en este sentido problemas de salud provocados por la disincronía, tales como:

- Trastornos del sueño: insomnio, hipersomnia, narcolepsia, ronquido y apneas del sueño, parasomnias o síndrome de las piernas inquietas.
- Diabetes tipo 2: riesgo de diabetes 2 por disminución de células beta.
- Enfermedades gastrointestinales: la falta de horas de sueño puede llegar a producir la aparición del síndrome del intestino irritable o úlcera gástrica.
- Enfermedades Neurodegenerativas: la melatonina regula las células T, por lo que su desequilibrio, puede ser causa de enfermedades neurodegenerativas como la Encefalomiелitis Alérgica Experimental (SAE) o la Esclerosis múltiple.
- Enfermedades Cardiovasculares: la presión sanguínea en trabajadores nocturnos, expuestos a iluminación artificial, aumenta con respecto a los trabajadores nocturnos no expuestos a iluminación artificial.
- Cáncer: La supresión de la producción de melatonina se considera factor de riesgo para el cáncer de mama y otros tipos de cáncer.

ILUMINACION NATURAL

Actualmente son conocidos los beneficios que ofrece la luz natural en referencia tanto a la eficiencia energética como a la salud y bienestar. En los siguientes apartados se profundiza en el marco teórico de la luz natural en la Arquitectura, haciendo un breve repaso de la normativa y profundizando en métodos de cálculo estáticos y dinámicos.

NORMATIVAS RESPECTO DE LA ILUMINACION NATURAL ACTUAL EN ARQUITECTURA.

Los principales documentos de normativa española actual referidos a iluminación son el Código Técnico de la Edificación (CTE) en su sección 3 del Documento Básico sobre Ahorro de Energía (HE3) y la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos laborales, que plantean exigencias para la eficiencia energética de los sistemas, así como para el desarrollo de actividades sin riesgo para su seguridad y salud.

Aunque en el CTE DB HE3 se prescriben requisitos mínimos para el aprovechamiento de la iluminación natural, estas únicamente tienen en cuenta el nivel de ahorro energético sin aplicación de métricas dinámicas, además de no teniendo en cuenta las características intrínsecas de la luz natural en relación con los ritmos circadianos.

METODOS DE CÁLCULO DE LA ILUMINACION NATURAL

En la antigüedad, existían diversos métodos de dimensionado de huecos a partir de la iluminación exterior, basados en una serie de relaciones geométricas simples entre el hueco y el espacio a iluminar. Fue a principios del siglo XX cuando se empezaron a desarrollar una nueva serie de métodos de cálculo a partir de la incidencia de iluminación difusa generada en el cielo, dado que esta simplificación derivaba en una mayor sencillez de cálculo.

No fue hasta finales del siglo XX cuando se empezaron a desarrollar métodos informáticos que, además de la luz difusa, comenzaron a tener en cuenta la radiación directa, lo que conllevó una mayor precisión y fidelidad con respecto de la realidad, lo que sin embargo trajo aparejado un mayor coste computacional con elevados tiempos de cálculo.

Se explican a continuación estos sistemas de cálculos, detallando sus diferencias.

MÉTRICAS ESTÁTICAS, DAYLIGHT FACTOR.

El *Daylight Factor* (Factor de Luz Día, DF) se define como la relación de la iluminancia entre un punto interior y un punto exterior. Este método de cálculo es la métrica más extendida para el cálculo de la luz natural en los espacios interiores de las edificaciones.

Se mide bajo un cielo nublado ideal de luminancia conocida, con lo que la luz directa del sol se excluye del cálculo [Cielo nublado ideal, CIE 2003]; es por ello que se puede considerar una métrica estática, ya que no influye ni la orientación ni la ubicación del modelo.

Como este método ignora la radiación solar directa en condiciones de cielo despejado, que dependiendo de su ubicación y orientación puede ser muy relevante, no es una métrica que

pueda ser autónoma por sí misma en muchos de los casos, a pesar de ser el método de cálculo más extendido.

El *Daylight Factor* se expresa en forma de porcentaje, y al ser el resultado directo del cociente entre la iluminancia interior y la exterior, cuanto más elevado sea este indicador, mayor será el aprovechamiento de luz natural en la estancia (Ecuación 01).

Dónde: **DF** es el *Daylight Factor*.

E_i se corresponde con el nivel de iluminancia interior.

E_e se corresponde con el nivel de iluminancia exterior

$$DF = \frac{E_i}{E_e} \%$$

Ecuación 01.

MÉTRICAS DINÁMICAS, DAYLIGHT AUTONOMY

El *Daylight Autonomy* [DA] es la métrica dinámica más extendida. Fue propuesta por la *Association Suisse des Electriciens* en 1989 y reformulada por Reinhart. Se define como “el porcentaje del tiempo ocupado de una estancia en la que la luz natural en su interior alcanza el nivel de iluminancia suficiente para llevar a cabo las tareas necesarias” [Reinhart et al. 2006]. Por tanto, cuanto mayor sea el indicador, menor tiempo habrá que depender de la iluminación eléctrica para suplir las carencias de iluminación.

Basada en numerosos modelos de cielo, es necesario conocer los datos climáticos de la localización del edificio y realizar cálculos complejos, para lo que se hace obligado el uso de programas de simulación de la iluminación que calculan el valor de cada punto, con un alto coste computacional y de tiempo. El *Daylight Autonomy* se define matemáticamente mediante la (Ecuación 02).

$$DA = \frac{\sum_i wf_i \cdot t_i}{\sum_i t_i} \in [0, 1] \quad wf_i = \begin{cases} 1 & \text{if } E_D \geq E_L \\ 0 & \text{if } E_D < E_L \end{cases}$$

Ecuación 02.

Dónde: **DA** es el *Daylight Autonomy*.

E_D se corresponde con el nivel de iluminancia del punto estudiado en un instante dado, en lux.

E_L se corresponde con el umbral de Iluminancia dado, en lux.

t_i es el instante dado dentro del horario de ocupación anual.

wf_i es el factor de ponderación de un instante dado t_i (weighting factor).

Un valor de DA cercano al 100%, significa que apenas se necesitará iluminación eléctrica, mientras que con un valor de DA cercano al 0% se expresa lo contrario, que se dependerá en su totalidad de la iluminación eléctrica para el desarrollo de actividades en dicho recinto interior.

MÉTRICAS DINÁMICAS, CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

La autonomía de estímulo circadiano (*Circadian Stimulus Autonomy, CSA*) es una métrica dinámica que se define como la cantidad mínima de luz que al ser captada por el ojo humano genera una adecuada respuesta al ritmo circadiano. Se basa en determinar el porcentaje de tiempo en un año, en el que se alcanza un umbral específico de estímulo circadiano, que se da durante el día, en horario de mañana. El procedimiento de cálculo de CSA está basado en DA, conociendo la distribución de potencia espectral (*Spectral Power Distribution, SPD*) de una tipología de cielo determinada, el umbral de iluminancia se puede definir a partir de la respuesta al estímulo circadiano deseada. Para un valor de CSA adecuado, suponiendo el SPD resultante percibido por la vista del observador, y enmarcando el cálculo en horario de mañana, de 8:00 a 9:00, se estima un valor de 0.3, siendo 0.7 el máximo. Este concepto se utiliza para estudiar el impacto de la luz natural en el ser humano.

UMBRAL DE ILUMINANCIA

El umbral de cálculo se debe definir dependiendo de los requisitos de iluminancia que existan en el espacio y la métrica empleada.

- En el caso del DA, habitualmente varía entre 100 y 500 lux para la mayoría de los recintos arquitectónicos, siempre que estos no tengan requerimientos especiales. En el caso de estudio del presente estudio se plantea un umbral de iluminancia de 300 lux en el plano definido por la altura de la cama del paciente.
- El umbral de cálculo para CSA se define según Figueiro et al. [2016] con un valor de 0.3. Este se obtiene a partir del espectro de luz visible combinado con la reflectancia interior de un espacio, además de la cantidad de luz recibida por el observador.

MÉTODOS DE CÁLCULO INFORMÁTICO

A continuación, se detallan los métodos de cálculo informático implementados en el estudio, utilizados para calcular la iluminación natural en espacios interiores.

RADIOSIDAD

La radiosidad es un método de cálculo que simula la distribución de la luz en un modelo tridimensional. Es un conjunto de técnicas del cálculo de iluminación global que tratan de resolver el problema básico de la iluminación computacional de la forma más realista posible [J. Sanjurjo, 2011].

En un principio, este método se utilizó para calcular la transferencia de calor entre las superficies, para posteriormente pasar a usarse para calcular la reflexión difusa de la luz entre diferentes superficies.

Para el proceso se discretizan las superficies del modelo en un conjunto de triángulos, en los que se calcula la luz que reciben en su punto central. Conocida la cantidad de luz incidente, de acuerdo a sus características físicas, se procede a emitir de este, y de forma difusa, una gran cantidad de rayos de luz que inciden en otras superficies.

En un proceso reiterativo, estos rayos de luz impactan sobre otras superficies, que a su vez vuelven a emitir, creando un bucle que requiere una potencia y tiempo de cálculo computacional muy elevados, pero que permite conseguir unos resultados muy precisos de la iluminación natural.

RAY TRACING

Este método es más rápido de calcular, pero con el inconveniente de realizarse únicamente desde una posición fija, es decir, solo conoceríamos el nivel de iluminación en las superficies visibles desde el punto de vista escogido.

Es un método de cálculo basado en el lanzamiento de rayos desde el punto de vista del observador hasta cada una de las superficies, teniendo por objetivo crear una imagen en 2D de un entorno 3D. Es por ello que es un método menos completo que la Radiosidad, aunque de menor costo computacional.

DAYLIGHT COEFFICIENTS

Método que se define como el cociente entre la iluminancia total producida por un trozo de cielo en un punto de la estancia ($\Delta E_{\gamma\alpha}$), entre la luminancia de ese trozo de cielo ($L_{\gamma\alpha}$) por el ángulo de incidencia de ese trozo de cielo ($\Delta S_{\gamma\alpha}$), para una altura (γ) y un acimut (α) dados (Mardaljevic, 2000). Se define con la Ecuación 03.

$$D_{\gamma\alpha} = \frac{\Delta E_{\gamma\alpha}}{L_{\gamma\alpha} \Delta S_{\gamma\alpha}} ; \quad E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} D_{\gamma\alpha} L_{\gamma\alpha} \cos \gamma \, d\gamma d\alpha$$

Ecuación 03.

donde:

E es el valor de iluminancia del punto objeto de estudio.

γ es la altura.

α es el acimut.

$D_{\gamma\alpha}$ es el Daylight Coefficient para una altura y acimut dados.

$L_{\gamma\alpha}$ es la luminancia de un fragmento de cielo dado mediante una altura y acimut concreta.

$\Delta S_{\gamma\alpha}$ es el ángulo de incidencia de la luz emitida por un fragmento de cielo dado mediante una altura y acimut concreta.

$\Delta E_{\gamma\alpha}$ es la iluminancia total producida por un trozo de cielo en un punto de la estancia.

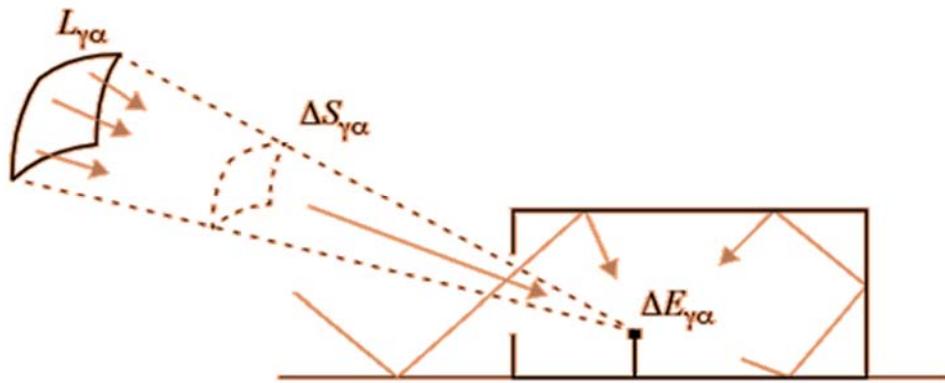


Figura 01: Vista en sección de la incidencia lumínica según el método de los DAYlight Coefficients.

Así, se establece que el Daylight Coefficient varía en función de las características de la estancia y que la iluminancia producida en el punto interior será directamente dependiente de la iluminancia del trozo de cielo.

BLOQUE B

METODOLOGÍA

4.1 Descripción de la metodología de trabajo

La metodología del presente trabajo se plantea a partir de la generación de modelos virtuales mediante una herramienta informática de cálculo dinámico, aplicada sobre un caso de estudio real, planteando sobre él diferentes hipótesis a partir de un conjunto de variables definidas.

El objetivo principal es optimizar el hueco de ventana de una unidad de cuidados intensivos mediante métricas dinámicas de iluminación natural según estándares energéticos y de bienestar.

4.1.2 Caracterización del modelo base de estudio: Box UCI, en Virgen del Rocío.

El caso de estudio escogido para el estudio se sitúa en el Hospital Virgen del Rocío, en el edificio de rehabilitación y traumatología. Se trata de un box tipo, de cuidados intensivos, con dimensiones de 3.50 m de ancho, 3.25 m de profundidad y 3 m de altura libre. La elección se debe a que el box es la unidad mínima de módulo en la UCI, altamente replicable en cada servicio de cuidados intensivos

En esta planta casi cuadrada, situamos el hueco de ventana, en la fachada al sur y huecos de ventana entre boxes, para facilitar la visibilidad de los pacientes, a este y oeste, y el acceso a la habitación situado al norte. La orientación predominante es la sur.



Figura 02: Vista frontal del Hospital de Traumatología

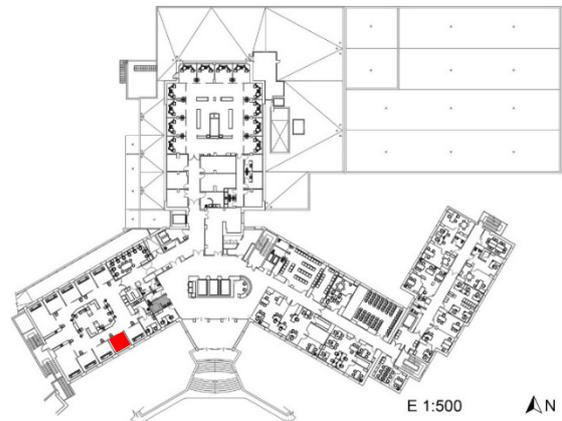


Figura 03: Vista en planta del Hospital de Traumatología

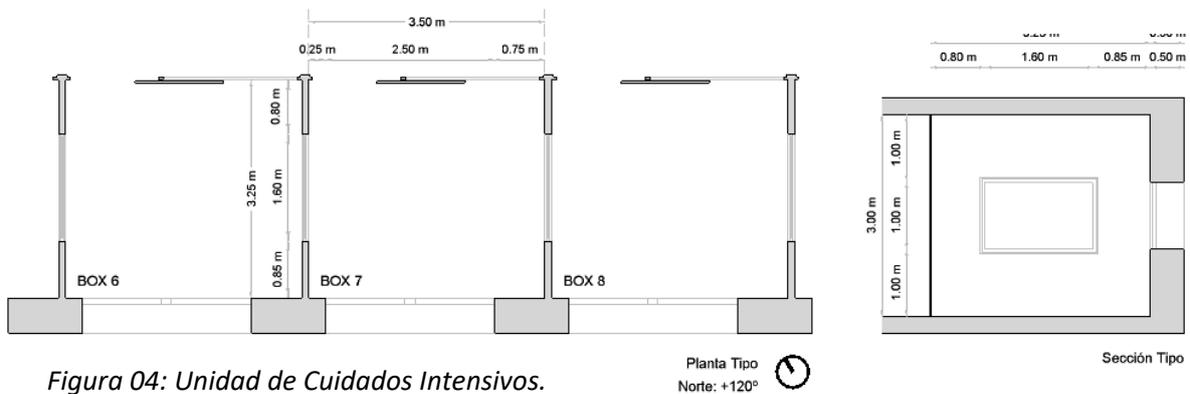


Figura 04: Unidad de Cuidados Intensivos.

Planta Tipo
Norte: +120°

Sección Tipo

4.1.2 Definición de las variables presentes en el estudio.

El ejemplo de estudio se plantea a partir de cuatro variables que, al combinarlas con los modelos independientes necesarios para calcular los dos indicadores dinámicos, genera un total de 48 hipótesis diferentes:

- **Tamaño** (Porcentaje de hueco en fachada): Se plantean tamaños de hueco de 20%, 35% y 50%. De esta forma se estudian los valores de hueco más habituales en estos recintos, permitiendo extrapolar conclusiones. En la Tabla 01 se define el porcentaje de hueco en fachada del caso de estudio, y en la Tabla 02 se definen las variables de porcentaje de hueco en fachada para las hipótesis de cálculo.

ORIGINAL Caso Estudio
TAMAÑO*
24%
*Porcentaje de hueco en fachada

Tabla 01

VARIABLES Hipótesis		
TAMAÑO*		
20%	35%	50%
*Porcentaje de hueco en fachada		

Tabla 02

- **Posición:** Se plantean dos alturas estándar de ventana, alta y media, enrasada al forjado superior, y en el punto medio de la fachada respectivamente. Son las dos posiciones más habituales en estos recintos.
- **Reflectancia Interior:** Las reflectancias interiores de los paramentos se muestran en las tablas 03, 04 y 05. Se han tomado valores comunes en recintos de estas características, buscando dar respuesta a dos tipos de espacio, claros y oscuros.

INTERIOR CLARO					
MATERIALES	SUELO	PARED	TECHO	V. EXT.	V. INT
REFLECTANCIA	0,40	0,60	0,80	0,00	0,00
REFLEXIÓN	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
TRANSMITANCIA	0,00	0,00	0,00	0,70	0,20

Tabla 03. Valores de reflectancia de los paramentos de las variantes con interior claro

INTERIOR OSCURO					
MATERIALES	SUELO	PARED	TECHO	V. EXT.	V. INT
REFLECTANCIA	0,20	0,40	0,40	0,00	0,00
REFLEXIÓN	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
TRANSMITANCIA	0,00	0,00	0,00	0,70	0,20

Tabla 04. Valores de reflectancia de los paramentos de las variantes con interior oscuro

ORIGINAL					
MATERIALES	SUELO	PARED	TECHO	V. EXT.	V. INT
REFLECTANCIA	0,60	0,60	0,90	0,00	0,00
REFLEXIÓN	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
TRANSMITANCIA	0,00	0,00	0,00	0,70	0,20

Tabla 05. Valores de reflectancia de los paramentos del caso de estudio original

En las semanas previas a la epidemia de la COVID_19 fue posible ir a realizar mediciones in-situ al box del hospital para conocer las características espectrométricas de los materiales de su interior. Sin embargo, no fue posible conseguir estos datos de los vidrios interiores y exteriores. Por ello, se propone un valor estándar de transmisividad de 0,7 para el vidrio de fachada por las características de catálogo constructivo; en el caso de los vidrios de las ventanas interiores (Figura 05), dado que son elementos semitransparentes que dejan pasar la mayor parte de la luz incidente, se han de entender en su faceta más desfavorable, como elementos que absorben, pero que no introducen luz al espacio, se propone un valor de reflectancia de 0,2 para emular dicho paso de luz al recinto contiguo.

- **Orientación:** Las orientaciones escogidas, Norte y Sur, son las más relevantes para el cálculo, por ser las dos que arrojan resultados más extremos.

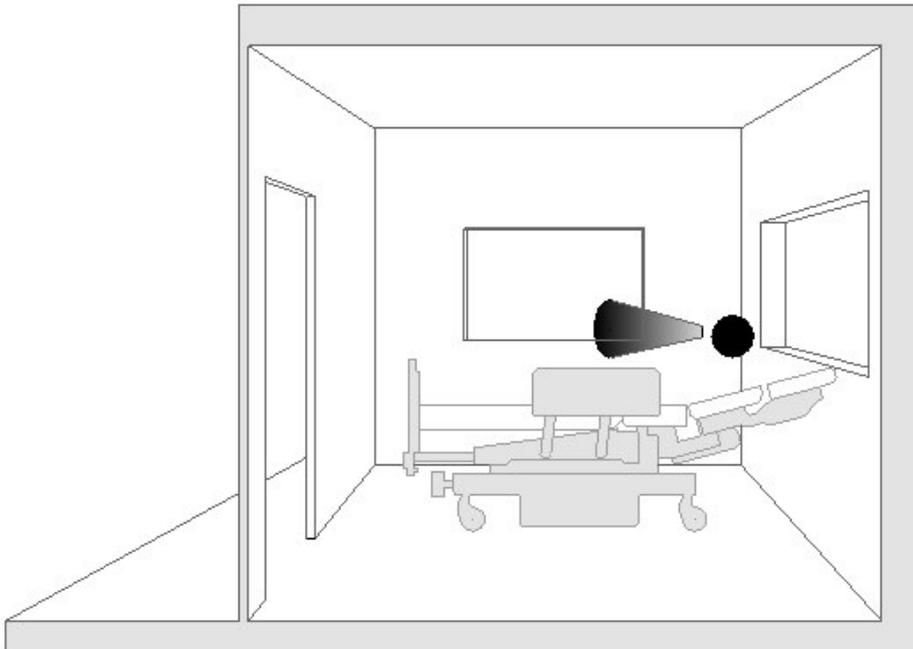


Figura 05. Vista 3D del box tipo, con camilla y punto de vista del observador

4.1 Selección y validación de las herramientas informáticas de cálculo.

4.1.1 Selección de las herramientas de cálculo.

- **Rhinoceros:** El presente estudio se ha realizado con *DIVA 4.0.2* de la empresa de *Solemma*, que utiliza la interfaz de modelado de *Rhinoceros 5.0*. Esta herramienta cuenta con la última versión del motor *Radiance* de C. Reinhart, cuyos resultados han sido ampliamente validados por la comunidad científica internacional.



Rhinoceros[®]
design, model, present, analyze, realize...



DIVA FOR RHINO
ENVIRONMENTAL ANALYSIS FOR BUILDINGS

- **Microsoft Excel:** Para poder realizar los cálculos de CSA, se ha desarrollado una hoja de *Microsoft Excel* (Figuras 06 y 07 en la que se extraen todos los resultados por punto de iluminancia generados en *DIVA*, de forma que se puede calcular cualquier indicador derivado de esta, una vez fijado umbral y horario, entre otros. Esta herramienta fue desarrollada en el seno del grupo de investigación TEP130.

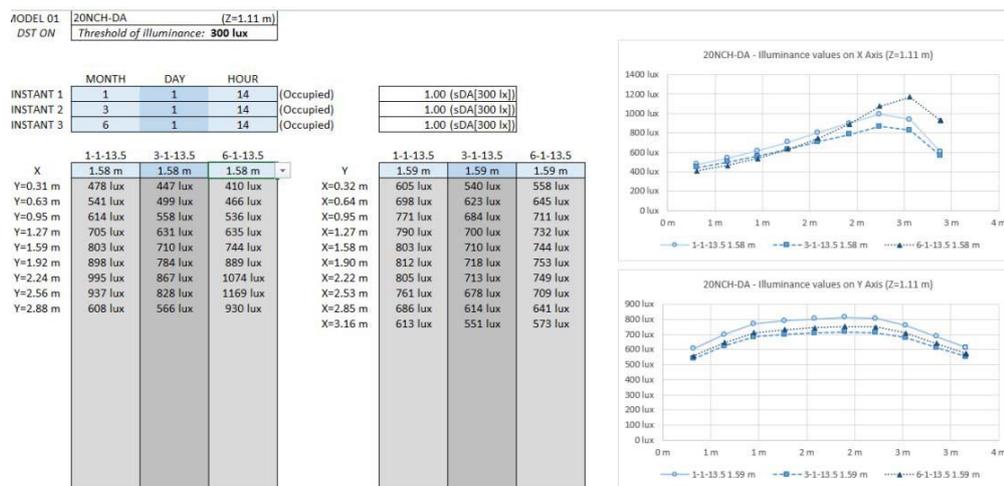


Figura 06. Valores de iluminancia en hoja de cálculo para extracción de resultados de *DIVA*

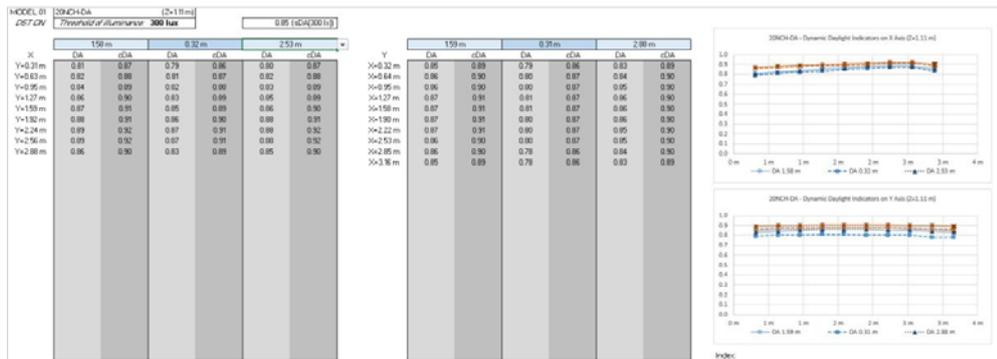


Figura 07. Valores de DA en hoja de cálculo para extracción de resultados de DIVA

4.1.2 Validación de la herramienta de cálculo mediante celdas de ensayo.

Al realizar un estudio con simulación informática, utilizando para ello métodos de cálculo de reciente generación, es necesario verificar los resultados obtenidos mediante una comparación con puntos de contraste fiables, ya sean mediante mediciones in situ o cálculos ya validados. Para el presente estudio encontramos un modelo anterior desarrollado por el grupo de investigación TEP 130 que fue generado siguiendo el mismo proceso que el presente estudio, y de características similares, basado en una pareja de celdas de ensayo existentes (León et al., 2017).

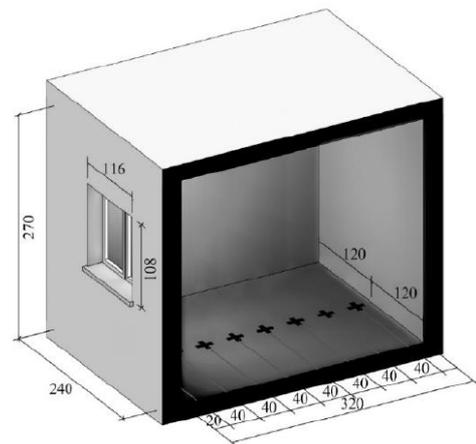


Figura 08. Celdas de ensayo TEP 130.

En el citado estudio, para garantizar la autenticidad y el correcto funcionamiento de esta metodología, se realizan una serie de mediciones in-situ (Figura 08) para comparar los resultados con el modelo generado en *DIVA*, y verificar que éste último se adecua a la realidad.

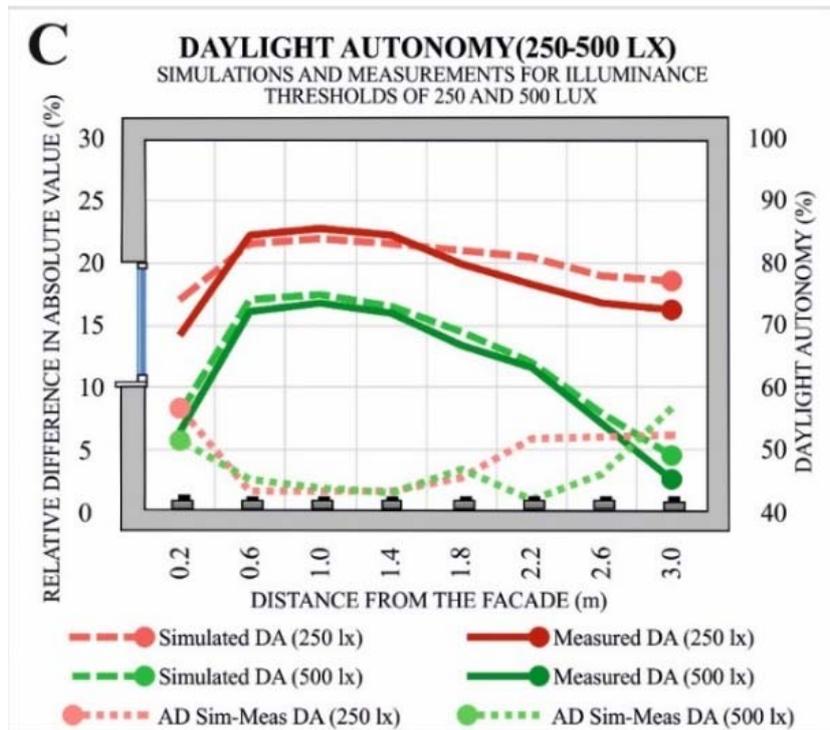


Figura 09. Análisis de resultados de DA para 250 y 500 lx, TEP 130.

Mediante las mediciones in-situ realizadas, se obtienen un conjunto de resultados con una desviación estándar menor al 10% respecto de los resultados obtenidos a partir de la metodología digital. Esto supone la validación del método de cálculo de iluminación natural por el grupo de investigación TEP 130.

4.2 Protocolo de modelado y cálculo.

El protocolo utilizado para la realización del modelado 3D y su cálculo es el siguiente:

- **Modelado de los modelos 3D mediante la herramienta *Rhinceros*.**
- **Definición de planos de trabajo y umbrales de iluminancia para el estudio**
- **Cálculo del DA mediante la herramienta *DIVA*.**
- **Cálculo de CSA mediante procesador de datos *Microsoft Excel*, a partir de los resultados obtenidos de DA.**

4.2.1 Modelado de los modelos 3D mediante la herramienta *Rhinceros*.

Utilizando la herramienta *Rhinceros* v5 se genera el modelo base del caso de estudio, dibujando en planta las dimensiones del espacio y extrusionando cada elemento vertical u horizontal. Para establecer la posición en la cual se ubicará la malla con los nodos de cálculo, se utiliza una superficie situada en la posición requerida dependiendo del indicador, sobre la que *DIVA* superpondrá dicho mallado.

Partiendo de las variables establecidas en el apartado 4.2.2, se generan 24 modelos geométricos diferentes para cada indicador dinámico, además del modelo existente, referidos a las variables de tamaño, posición, orientación y reflectancia interior:

- 20%-35%-50% de hueco en fachada.
- Altura baja y alta.
- Orientación Norte y Sur.
- Reflectancia Interior Clara y Oscura.

4.2.2 Definición de planos de trabajo y umbrales de iluminancia para el estudio

Para realizar el estudio es necesario conocer los planos de trabajo sobre los que realizaremos los cálculos en las herramientas de cálculo. Para el *Daylight Autonomy* se sitúa una malla horizontal de 0.4m x 0.4m, ubicadas a 1.10 m de altura (Figura 09) que se corresponde con el plano superior de la cama del paciente (vectorizado hacia arriba), que coincide con el plano de trabajo del personal sanitario.

Para el cálculo del *Stimulus Circadian Autonomy*, necesitamos medir la luz que recibe el paciente, por lo tanto, este indicador se mide en un plano vertical frente a los ojos de paciente (vectorizado hacia la puerta), constituido por malla vertical de 0.4m x 0.4m, ubicada a una distancia de 2.40 m de la puerta.

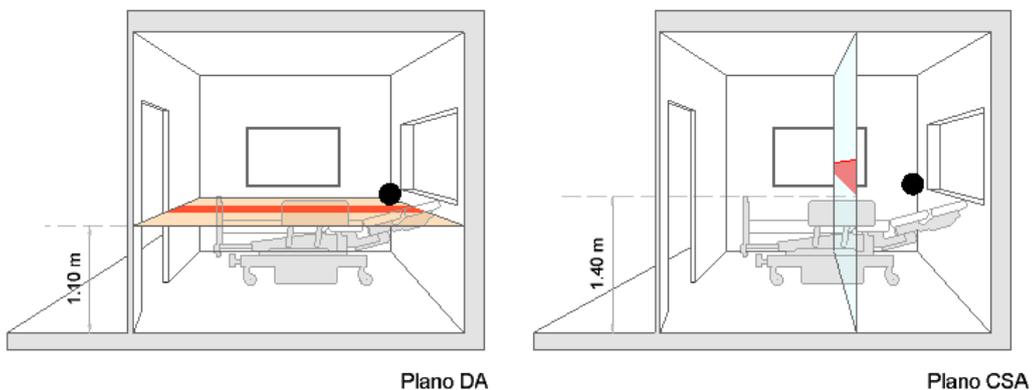


Figura 10. Planos de cálculo para DA y CSA en el modelo objeto de estudio

4.2.3 Cálculo del DA mediante la herramienta *DIVA*

Una vez realizado el modelado 3D de todas las hipótesis de cálculo, mediante la herramienta *DIVA* se sitúan los puntos de cálculo separados 30 cm entre sí, dispuestos en la superficie creada anteriormente a modo de plano de trabajo. A continuación se introduce la localización, la reflectancia de materiales y su asignación a los elementos 3D y para finalizar, se fija el umbral de iluminancia, para terminar introduciendo el patrón de radiosidad utilizado para el cálculo (cada rayo lumínico portador de información rebota 6 veces en la superficies modeladas).

Para el indicador dinámico de DA, se plantea un nivel de luminancia de 300 lux y un horario ininterrumpido semanal de 8:00 am a 8:00 pm para los pacientes internos en UCI.

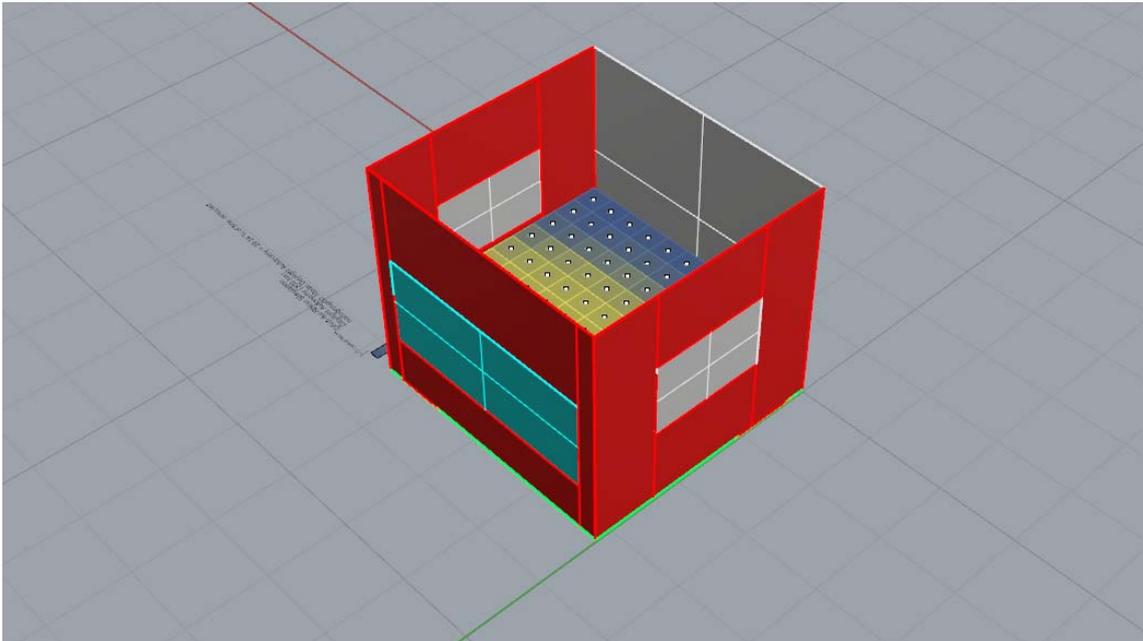


Figura 11. Ejemplo de modelado en *DIVA*

4.2.4 Cálculo de CSA mediante procesador de datos *Microsoft Excel*, a partir de los resultados obtenidos de DA.

Para el valor dinámico de CSA se plantean diferentes niveles de iluminancia:

- Un nivel de 170 lux para los modelos de reflectancia interior “clara”.
- Un nivel de 185 lux para modelos de reflectancia interior “oscura”.

El cálculo de estos umbrales se muestra en las Figuras 10 a 12, basados en la premisa de alcanzar un estímulo circadiano (CS) de 0,30 a partir del espectro resultante del espectro de la luz natural promedio en Sevilla y la reflexión en dichas paredes, usando para ello la herramienta de cálculo *CS calculator* desarrollada por el MIT.

Este análisis de respuesta circadiana se estudia a primera hora de la mañana, de 8:00 am a 9:00 pm de forma ininterrumpida durante la semana.

4.3 Producción de Hipótesis de estudio, mediante combinatoria de variables.

Una vez definidas las diferentes variables de cálculo, se realiza una batería de hipótesis mediante combinatoria de variables, que se traducen en modelos de cálculo a introducir en la herramienta de cálculo. Tras obtener los resultados se podrá discernir entre las variables relevantes y no tan relevantes para el estudio.

48 HIPÓTESIS

ORIGINAL-DA	ORIGINAL-CSA
20NOH-DA	20-NOH-CSA
35-NOH-DA	35-NOH-CSA
50-NOH-DA	50-NOH-CSA
20-SOH-DA	20-SOH-CSA
35-SOH-DA	35-SOH-CSA
50-SOH-DA	50-SOH-CSA
20-NCH-DA	20-NCH-CSA
35-NCH-DA	35-NCH-CSA
50-NCH-DA	50-NCH-CSA
20-SCH-DA	20-SCH-CSA
35-SCH-DA	35-SCH-CSA
50-SCH-DA	50-SCH-CSA
20-NOL-DA	20-NOL-CSA
35-NOL-DA	35-NOL-CSA
50-NOL-DA	50-NOL-CSA
20-SOL-DA	20-SOL-CSA
35-SOL-DA	35-SOL-CSA
50-SOL-DA	50-SOL-CSA
20-NCL-DA	20-NCL-CSA
35-NCL-DA	35-NCL-CSA
50-NCL-DA	50-NCL-CSA
20-SCL-DA	20-SCL-CSA
35-SCL-DA	35-SCL-CSA
50-SCL-DA	50-SCL-CSA

Tabla 06. Combinatoria de hipótesis

TAMAÑO	
20	
35	
50	
ORIENTACIÓN	
N=Norte	S=Sur
REFLECTANCIA INTERIOR	
C=Clara	O=Oscura
ALTURA	
H=Alta	L=Baja
INDICADORES	
DA	CSA

Tabla 07: Leyenda

4.4 Herramientas matemáticas para el análisis de datos.

Para realizar el análisis comparativo de los resultados se utilizan diferentes herramientas matemáticas sencillas.

- La media Aritmética
- La desviación estándar

4.4.1 Media aritmética

Es el valor medio de un grupo de valores. Se obtiene a partir de sumar dichos valores y dividirlo entre el número de sumandos.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Dónde: \bar{x} es la media aritmética.

N es el número de datos de la muestra

i es el número que tiene asignado un dato cualquiera de la muestra en el orden establecido en la misma.

x_i es el valor de un dato cualquiera dentro de la muestra

4.4.2 Desviación Estándar

Es la media de dispersión más utilizada, indica como de alejados están los valores entre sí, separados de la media aritmética.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Dónde: \bar{x} es la media aritmética.

N es el número de datos de la muestra

i es el número que tiene asignado un dato cualquiera de la muestra en el orden establecido en la misma.

x_i es el valor de un dato cualquiera dentro de la muestra

σ es la desviación estándar

BLOQUE C

ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIÓN

5. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras la obtención de resultados, se procede al análisis por comparación de resultados.

5.1.1 Resultados para el indicador dinámico *Daylight Autonomy*.

DA									
NORTE									
	20-NCH	20-NOH	20-NCL	20-NOL	20-SCH	20-SOH	20-SCL	20-SOL	
	X=1.62 m								
0.38 m	0.46	0.31	0	0	0.82	0.73	0.76	0.75	
0.71 m	0.59	0.52	0	0	0.82	0.78	0.8	0.77	
1.03 m	0.69	0.62	0	0	0.82	0.81	0.81	0.81	
1.35 m	0.75	0.71	0	0	0.82	0.82	0.84	0.82	
1.67 m	0.81	0.76	0.18	0.05	0.82	0.84	0.85	0.84	
1.99 m	0.81	0.78	0.69	0.62	0.82	0.85	0.85	0.85	
2.32 m	0.81	0.77	0.82	0.81	0.81	0.85	0.85	0.85	
2.64 m	0.75	0.7	0.87	0.87	0.81	0.82	0.84	0.82	
2.96 m	0.48	0.37	0.9	0.9	0.79	0.71	0.76	0.71	
MEDIA									
DESV. EST.	0.68	0.62	0.38	0.36	0.81	0.80	0.82	0.80	
	0.1401	0.1770	0.4210	0.4237	0.0101	0.0511	0.0373	0.0487	
SUR									
	35-NCH	35-NOH	35-NCL	35-NOL	35-SCH	35-SOH	35-SCL	35-SOL	
	X=1.62 m								
0.38 m	0.91	0.81	0.79	0.01	0	0.84	0.83	0.59	0.48
0.71 m	0.9	0.82	0.81	0.13	0.01	0.85	0.85	0.65	0.54
1.03 m	0.88	0.84	0.83	0.37	0.16	0.86	0.86	0.73	0.65
1.35 m	0.86	0.86	0.85	0.67	0.55	0.87	0.87	0.79	0.76
1.67 m	0.84	0.87	0.86	0.8	0.77	0.88	0.88	0.83	0.82
1.99 m	0.79	0.88	0.88	0.84	0.83	0.89	0.89	0.86	0.86
2.32 m	0.73	0.89	0.89	0.87	0.87	0.9	0.9	0.88	0.88
2.64 m	0.63	0.89	0.89	0.89	0.89	0.9	0.89	0.9	0.9
2.96 m	0.59	0.86	0.85	0.91	0.91	0.87	0.87	0.91	0.91
MEDIA	0.79	0.86	0.85	0.61	0.55	0.87	0.87	0.79	0.76
DESV. EST.	0.1179	0.0291	0.0350	0.3494	0.3906	0.0212	0.0220	0.1141	0.1616
	50-NCH	50-NOH	50-NCL	50-NOL	50-SCH	50-SOH	50-SCL	50-SOL	
	X=1.62 m								
0.38 m	0.89	0.92	0.83	0.89	0.89	0.92	0.84	0.89	
0.71 m	0.89	0.92	0.84	0.89	0.89	0.92	0.85	0.89	
1.03 m	0.89	0.92	0.85	0.89	0.89	0.92	0.86	0.89	
1.35 m	0.9	0.92	0.86	0.89	0.9	0.92	0.86	0.89	
1.67 m	0.9	0.91	0.86	0.89	0.9	0.91	0.87	0.89	
1.99 m	0.9	0.92	0.86	0.89	0.9	0.92	0.87	0.89	
2.32 m	0.91	0.92	0.86	0.89	0.91	0.92	0.87	0.89	
2.64 m	0.91	0.92	0.86	0.89	0.91	0.92	0.87	0.89	
2.96 m	0.92	0.92	0.85	0.88	0.92	0.92	0.86	0.88	
MEDIA	0.90	0.92	0.85	0.89	0.90	0.92	0.86	0.89	
DESV. EST.	0.0105	0.0033	0.0109	0.0033	0.0105	0.0033	0.0105	0.0033	

20%

35%

50%

Tabla 08: Tabla resumen resultados Daylight Autonomy (DA)

5.1.1.1 Grupo de hipótesis: DA-20%-Norte y Sur:

	NORTE				
	ORIGINAL	20-NCH	20-NOH	20-NCL	20-NOL
0.38 m	0.59	0.46	0.31	0	0
0.71 m	0.63	0.59	0.52	0	0
1.03 m	0.73	0.69	0.62	0	0
1.35 m	0.79	0.75	0.71	0	0
1.67 m	0.84	0.81	0.76	0.18	0.05
1.99 m	0.86	0.81	0.78	0.69	0.62
2.32 m	0.88	0.81	0.77	0.82	0.81
2.64 m	0.9	0.75	0.7	0.87	0.87
2.96 m	0.91	0.48	0.37	0.9	0.9

Tabla 09: Comparativa resultados DA en modelos 20%-NORTE

	SUR				
	ORIGINAL	20-SCH	20-SOH	20-SCL	20-SOL
0.38 m	0.59	0.82	0.73	0.76	0.75
0.71 m	0.63	0.82	0.78	0.8	0.77
1.03 m	0.73	0.82	0.81	0.81	0.81
1.35 m	0.79	0.82	0.82	0.84	0.82
1.67 m	0.84	0.82	0.84	0.85	0.84
1.99 m	0.86	0.82	0.85	0.85	0.85
2.32 m	0.88	0.81	0.85	0.85	0.85
2.64 m	0.9	0.81	0.82	0.84	0.82
2.96 m	0.91	0.79	0.71	0.76	0.71

Tabla 10: Comparativa resultados DA en modelos 20%-SUR

Como se observa en las tablas y gráficas, con un 20% de hueco en fachada, los valores de Da comienzan a separarse de los valores aptos para garantizar el umbral de iluminancia establecido de 300 lux, en las hipótesis de hueco de ventana de altura superior.

Como podemos observar en los huecos de fachada de altura baja al norte, encontramos una gran caída de los niveles de iluminancia al final de la estancia, debido principalmente a la orientación y el vidrio interior opuesto a la entrada de luz, que la deja escapar de la estancia y no la refleja al interior.

20%-NORTE

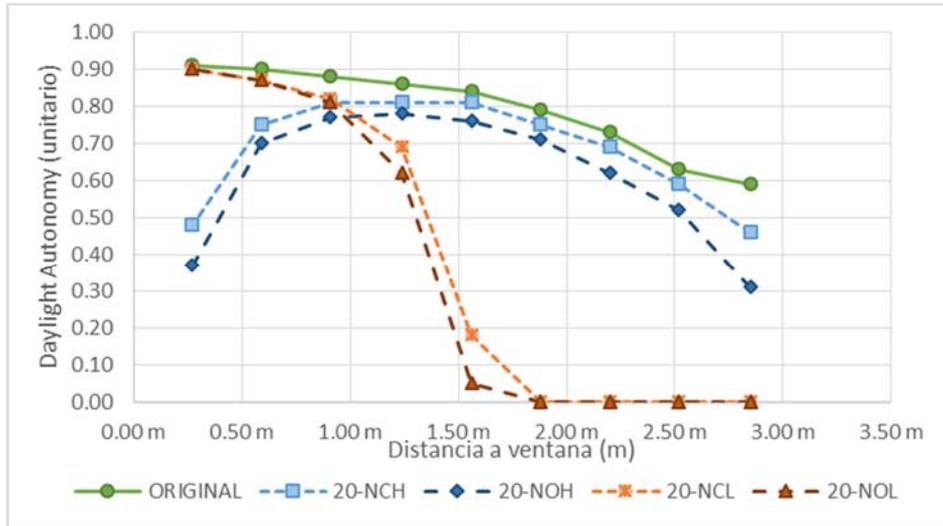


Tabla 11: Relación visual de resultados DA en modelos 20%-NORTE

20%-SUR

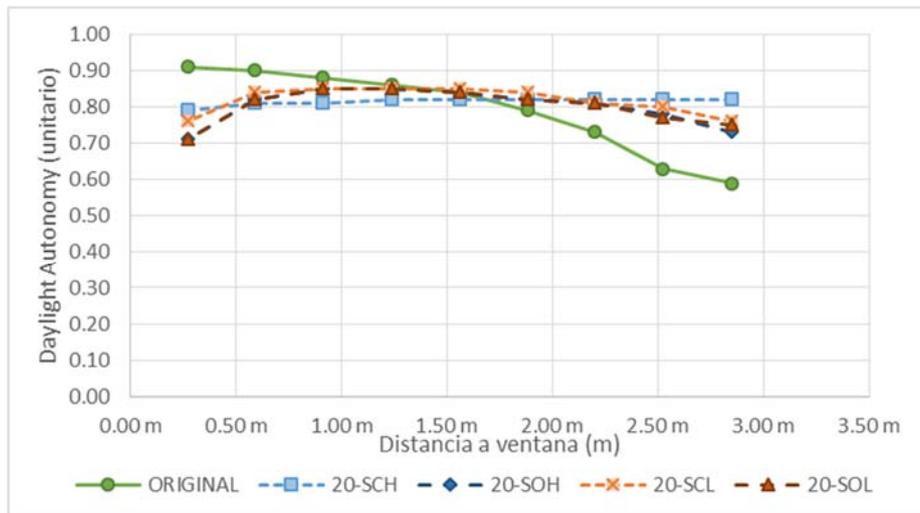


Tabla 12: Relación visual de resultados DA en modelos 20%-SUR

En las gráficas se observa que existe una elevada similitud entre los modelos de 20% de hueco en fachada y orientación Sur con el caso de estudio. Las pequeñas diferencias visibles resultan principalmente de las diferencias en el tamaño del hueco respecto de la fachada.

También se observa un descenso del nivel de iluminancia en la zona próxima de la ventana debido a las sombras arrojadas del antepecho del hueco de ventana, especialmente en los casos donde dicha ventana está elevada (hipótesis "L").

5.2.1.2 Grupo de hipótesis: DA-35%-Norte y Sur:

	NORTE				
	ORIGINAL	35-NCH	35-NOH	35-NCL	35-NOL
0.38 m	0.59	0.81	0.79	0.01	0
0.71 m	0.63	0.82	0.81	0.13	0.01
1.03 m	0.73	0.84	0.83	0.37	0.16
1.35 m	0.79	0.86	0.85	0.67	0.55
1.67 m	0.84	0.87	0.86	0.8	0.77
1.99 m	0.86	0.88	0.88	0.84	0.83
2.32 m	0.88	0.89	0.89	0.87	0.87
2.64 m	0.9	0.89	0.89	0.89	0.89
2.96 m	0.91	0.86	0.85	0.91	0.91

Tabla 13: Comparativa resultados DA en modelos 35%-NORTE

	SUR				
	ORIGINAL	35-SCH	35-SOH	35-SCL	35-SOL
0.38 m	0.59	0.84	0.83	0.59	0.48
0.71 m	0.63	0.85	0.85	0.65	0.54
1.03 m	0.73	0.86	0.86	0.73	0.65
1.35 m	0.79	0.87	0.87	0.79	0.76
1.67 m	0.84	0.88	0.88	0.83	0.82
1.99 m	0.86	0.89	0.89	0.86	0.86
2.32 m	0.88	0.9	0.9	0.88	0.88
2.64 m	0.9	0.9	0.89	0.9	0.9
2.96 m	0.91	0.87	0.87	0.91	0.91

Tabla 14: Comparativa resultados DA en modelos 35%-SUR

Como se observa en tablas y gráficas, un 35% de hueco en fachada es apto para garantizar de forma holgada el umbral de iluminancia establecido de 300 lux en toda la sección para todas las hipótesis de hueco de ventana de altura superior (hipótesis “L”). Sin embargo, con la ventana en posición intermedia no se llega a valores superiores de DA superiores a 0,50 en la parte posterior del box, especialmente con paramentos oscuros.

En este sentido, se observa que con huecos de ventana en posición alta (hipótesis “L”) existe una elevada uniformidad de los valores de DA de la sección ventana-paramento frontal, tanto en orientaciones Norte y Sur, debido principalmente al porcentaje de hueco en fachada propuesto.

35%-NORTE

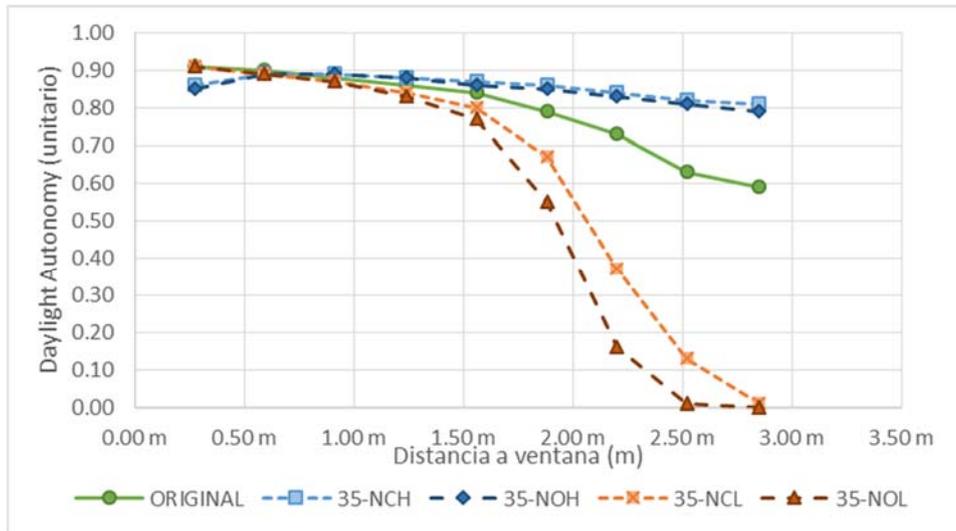


Tabla 15: Relación visual de resultados DA en modelos 35%-NORTE

35%-SUR

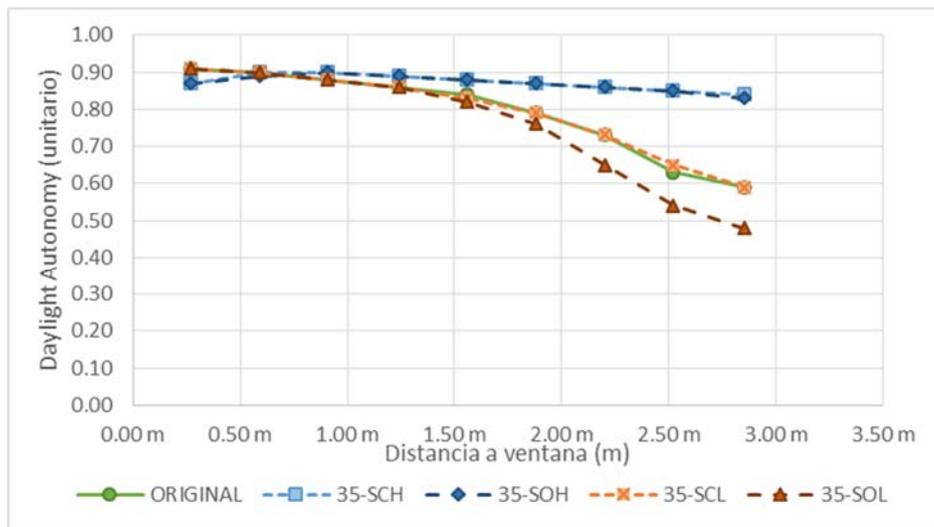


Tabla 16: Relación visual de resultados DA en modelos 35%-SUR

Como es posible observar en los huecos de fachada de altura baja a orientación norte, se aprecia una caída de los niveles de iluminancia al fondo de la estancia, debido principalmente a la orientación y el vidrio interior opuesto a la entrada de luz, dado que esta la deja escapar de la estancia y no la refleja al interior.

5.2.1.3 Grupo de hipótesis: DA-50%-Norte y Sur:

	ORIGINAL	NORTE			
		50-NCH	50-NOH	50-NCL	50-NOL
0.38 m	0.59	0.89	0.92	0.83	0.89
0.71 m	0.63	0.89	0.92	0.84	0.89
1.03 m	0.73	0.89	0.92	0.85	0.89
1.35 m	0.79	0.9	0.92	0.86	0.89
1.67 m	0.84	0.9	0.91	0.86	0.89
1.99 m	0.86	0.9	0.92	0.86	0.89
2.32 m	0.88	0.91	0.92	0.86	0.89
2.64 m	0.9	0.91	0.92	0.86	0.89
2.96 m	0.91	0.92	0.92	0.85	0.88

Tabla 17: Comparativa resultados DA en modelos 50%-NORTE

	ORIGINAL	SUR			
		50-SCH	50-SOH	50-SCL	50-SOL
0.38 m	0.59	0.89	0.92	0.84	0.89
0.71 m	0.63	0.89	0.92	0.85	0.89
1.03 m	0.73	0.89	0.92	0.86	0.89
1.35 m	0.79	0.9	0.92	0.86	0.89
1.67 m	0.84	0.9	0.91	0.87	0.89
1.99 m	0.86	0.9	0.92	0.87	0.89
2.32 m	0.88	0.91	0.92	0.87	0.89
2.64 m	0.9	0.91	0.92	0.87	0.89
2.96 m	0.91	0.92	0.92	0.86	0.88

Tabla 18: Comparativa resultados DA en modelos 50%-SUR

Como se observa en tablas y gráficas, un 50% de hueco en fachada se traduce en un hueco de ventana sobredimensionado, ya que se alcanza el umbral de iluminancia establecido de 300 lux entre un 85%-95% del año independientemente de la orientación, la reflectancia de los paramentos interiores o la posición de la ventana.

50%-NORTE

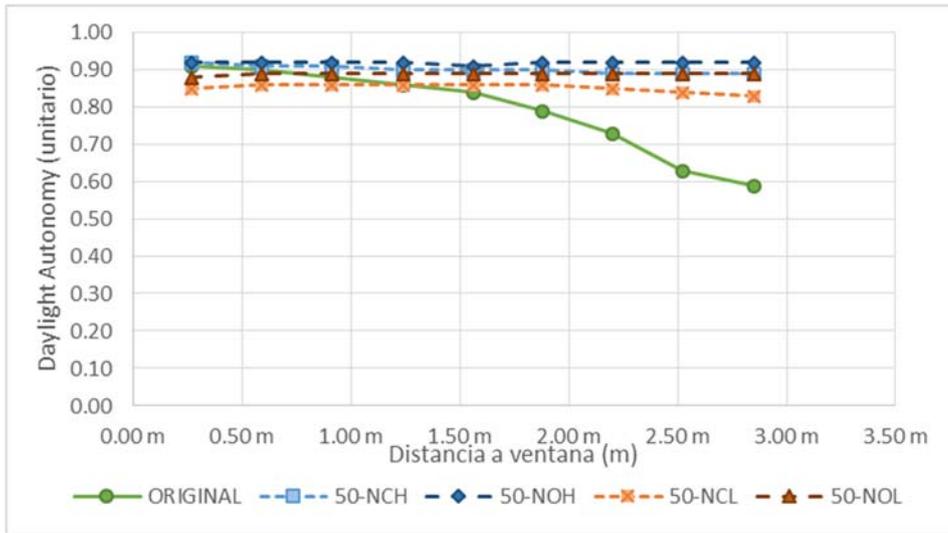


Tabla 19: Relación visual de resultados DA en modelos 50%-NORTE

50%-SUR

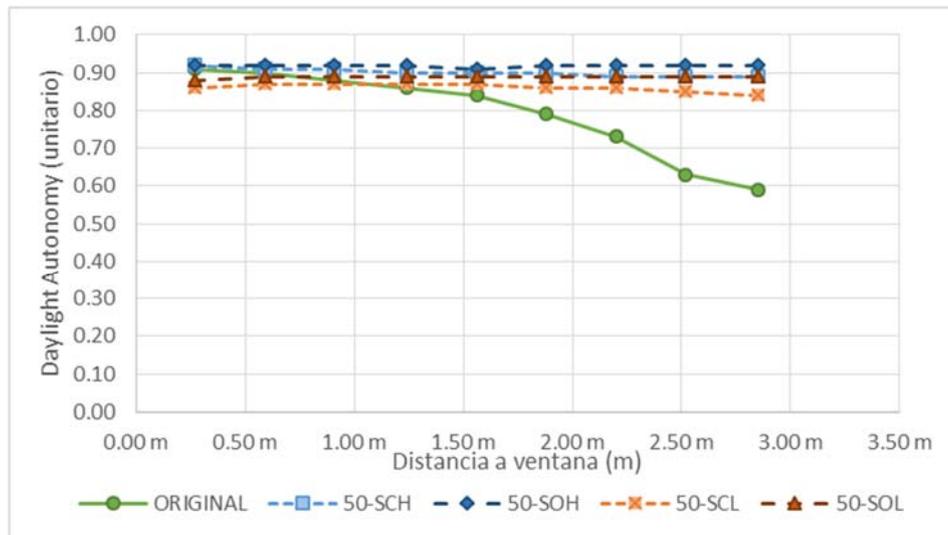


Tabla 20: Relación visual de resultados DA en modelos 50%-SUR

Como podemos observar, debido al excesivo tamaño de hueco de ventana, los resultados Norte no se diferencian de los Sur.

También se verifica durante el proceso de cálculo que la reflectancia interior oscura depende principalmente de las paredes, debido a su mayor superficie. Ello genera un leve descenso respecto de las hipótesis con reflectancias interiores claras, dado que la influencia de los huecos entre boxes y con el pasillo de acceso evita en gran medida las reflexiones interiores de la luz.

5.2.2 Resultados para el indicador dinámico *Circadian Stimulus Autonomy*.

<h1>CSA</h1>									
NORTE					SUR				20%
20-NCH	20-NOH	20-NCL	20-NOL	20-SCH	20-SOH	20-SCL	20-SOL		
Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m		
0.32 m	0.44	0.42	0.45	0.44	0	0	0	0	
0.64 m	0.47	0.46	0.49	0.46	0	0	0	0	
0.95 m	0.48	0.47	0.5	0.49	0	0	0	0	
1.27 m	0.49	0.47	0.51	0.49	0	0	0	0	
1.58 m	0.5	0.47	0.52	0.5	0	0	0	0	
1.90 m	0.5	0.47	0.52	0.5	0	0	0	0	
2.22 m	0.48	0.45	0.51	0.48	0	0	0	0	
2.53 m	0.48	0.45	0.5	0.45	0	0	0	0	
2.85 m	0.45	0.42	0.48	0.44	0	0	0	0	
3.16 m	0.41	0.38	0.44	0.44	0	0	0	0	
MEDIA	0.47	0.45	0.49	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	
DESV. EST.	0.0287	0.0303	0.0278	0.0256	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

ORIGINAL	35-NCH	35-NOH	35-NCL	35-NOL	35-SCH	35-SOH	35-SCL	35-SOL	35%
Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	
0.32 m	0	0.61	0.58	0.55	0.52	0.48	0.45	0.75	
0.64 m	0	0.66	0.63	0.58	0.55	0.52	0.51	0.74	0.65
0.95 m	0	0.67	0.66	0.6	0.57	0.52	0.52	0.74	0.67
1.27 m	0	0.67	0.66	0.6	0.58	0.53	0.52	0.74	0.68
1.58 m	0	0.67	0.67	0.61	0.58	0.53	0.52	0.74	0.68
1.90 m	0	0.67	0.66	0.6	0.58	0.54	0.52	0.74	0.68
2.22 m	0	0.67	0.66	0.6	0.56	0.53	0.52	0.74	0.68
2.53 m	0	0.67	0.64	0.59	0.55	0.53	0.52	0.74	0.67
2.85 m	0	0.64	0.62	0.56	0.52	0.52	0.52	0.74	0.66
3.16 m	0	0.58	0.56	0.52	0.52	0.51	0.47	0.75	0.62
MEDIA	0.00	0.63	0.65	0.58	0.55	0.74	0.66	0.52	0.51
DESV. EST.	0.0000	0.0375	0.0318	0.0288	0.0254	0.0042	0.0305	0.0166	0.0254

50-NCH	50-NOH	50-NCL	50-NOL	50-SCH	50-SOH	50-SCL	50-SOL	50%
Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	Z=1.34 m	
0.32 m	0.78	0.77	0.78	0.77	0.77	0.77	0.74	
0.64 m	0.77	0.76	0.77	0.75	0.77	0.75	0.72	0.7
0.95 m	0.77	0.76	0.77	0.75	0.77	0.75	0.71	0.68
1.27 m	0.77	0.76	0.77	0.75	0.77	0.75	0.71	0.68
1.58 m	0.77	0.77	0.77	0.75	0.77	0.75	0.71	0.68
1.90 m	0.77	0.76	0.77	0.76	0.77	0.76	0.71	0.68
2.22 m	0.77	0.75	0.77	0.75	0.77	0.75	0.71	0.68
2.53 m	0.77	0.75	0.77	0.75	0.77	0.75	0.71	0.68
2.85 m	0.77	0.77	0.77	0.76	0.77	0.75	0.71	0.7
3.16 m	0.78	0.77	0.78	0.77	0.77	0.77	0.74	0.73
MEDIA	0.77	0.76	0.77	0.76	0.77	0.76	0.72	0.69
DESV. EST.	0.0042	0.0079	0.0042	0.0084	0.0000	0.0085	0.0125	0.0207

Tabla 21: Resumen resultados de *Circadian Stimulus Autonomy* (CSA)

5.2.2.1 Grupo de hipótesis: CSA-20%-Norte y Sur:

	NORTE				
	ORIGINAL	20-NCH	20-NOH	20-NCL	20-NOL
0.32 m	0	0.44	0.42	0.45	0.44
0.64 m	0	0.47	0.46	0.49	0.46
0.95 m	0	0.48	0.47	0.5	0.49
1.27 m	0	0.49	0.47	0.51	0.49
1.58 m	0	0.5	0.47	0.52	0.5
1.90 m	0	0.5	0.47	0.52	0.5
2.22 m	0	0.48	0.45	0.51	0.48
2.53 m	0	0.48	0.45	0.5	0.45
2.85 m	0	0.45	0.42	0.48	0.44
3.16 m	0	0.41	0.38	0.44	0.44

Tabla 22: Comparativa resultados CSA en modelos 20%-NORTE

	SUR				
	ORIGINAL	20-SCH	20-SOH	20-SCL	20-SOL
0.32 m	0	0	0	0	0
0.64 m	0	0	0	0	0
0.95 m	0	0	0	0	0
1.27 m	0	0	0	0	0
1.58 m	0	0	0	0	0
1.90 m	0	0	0	0	0
2.22 m	0	0	0	0	0
2.53 m	0	0	0	0	0
2.85 m	0	0	0	0	0
3.16 m	0	0	0	0	0

Tabla 23: Comparativa resultados CSA en modelos 20%-SUR

Como se observa en la tabla de resultados Sur, los valores de CSA son nulos, debido a que el horario establecido para el umbral de CSA, definido habitualmente entre las 8:00 am y 9:00 am, hace que por la peculiaridad de huso horario de la ciudad de Sevilla (desfase de casi dos horas entre hora solar y local), haya un amanecer muy tardío (Fig. 15), con exposición solar aún débil (valores de iluminancia aún por debajo del umbral) y una mayor componente Norte que Sur (tablas 24 y 25).

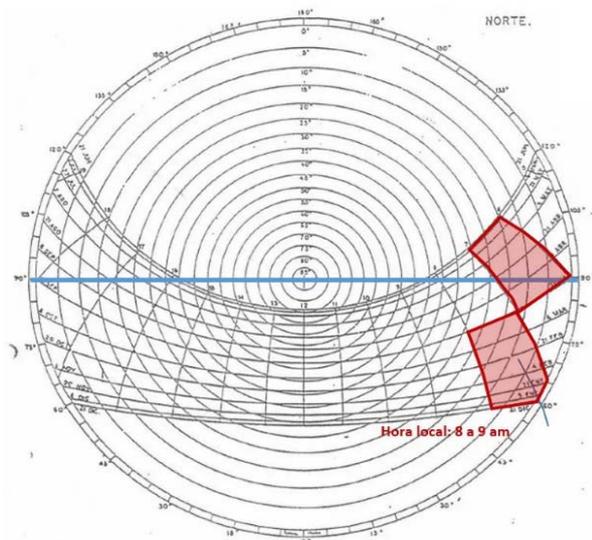


Figura 15. Carta Estereográfica.

20%-NORTE

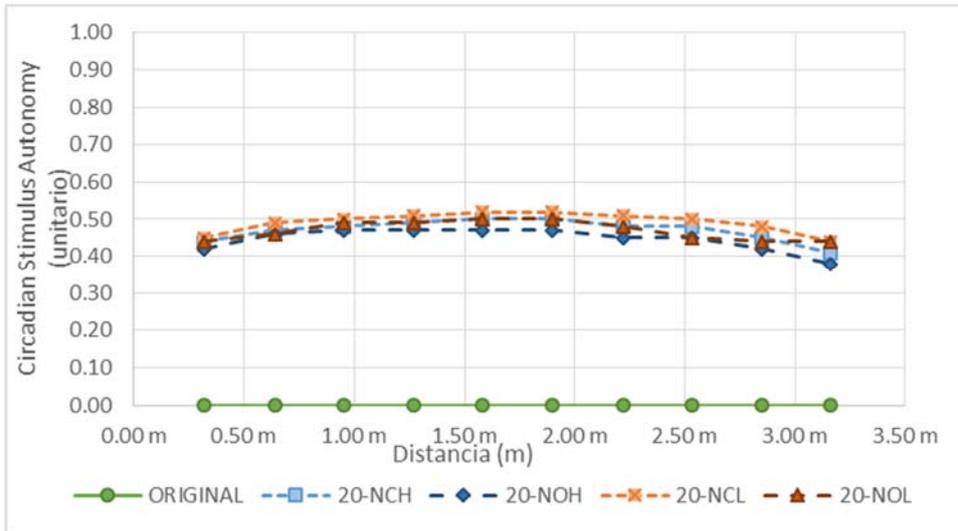


Tabla 24: Relación visual de resultados CSA en modelos 20%-NORTE

20%-SUR

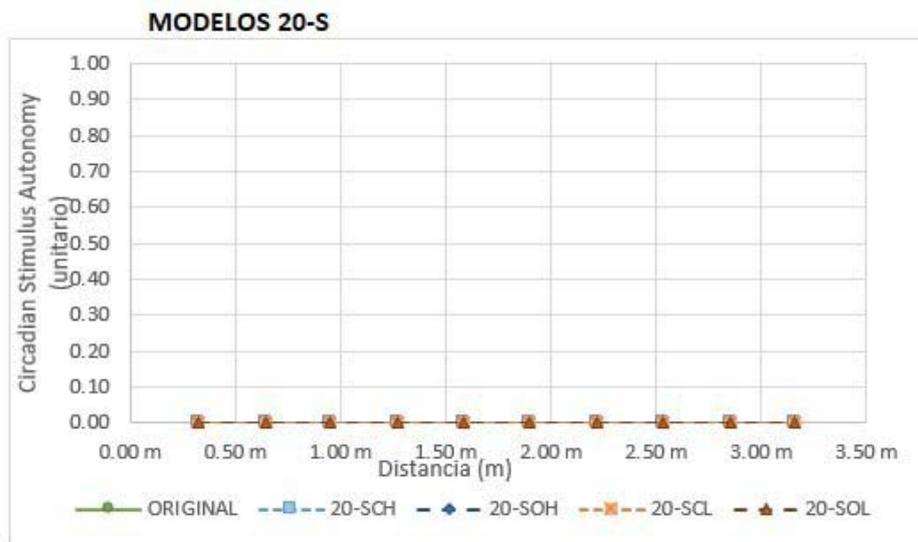


Tabla 25: Relación visual de resultados CSA en modelos 20%-SUR

Como se observa en tablas y gráficas, un porcentaje de hueco en fachada del 20% no es suficiente para satisfacer el umbral requerido de CSA durante la mitad de un año con el umbral y horario dados.

Los resultados en orientación Sur se justifican, como se explicó anteriormente, mediante los análisis de nivel de luminancia y la carta estereográfica, Figuras 13, 14 y 15.

MODEL 01 Original (Z=1.63 m)
 DST ON Threshold of illuminance: 170 lux

	MONTH	DAY	HOUR	
INSTANT 1	6	1	8	(Occupied)
INSTANT 2	6	1	9	(No occupied)
INSTANT 3	7	1	10	(No occupied)

	6-1-7.5	6-1-8.5	7-1-9.5		6-1-7.5	6-1-8.5	7-1-9.5
X	1.43 m	1.43 m	1.43 m	Y	1.34 m	1.34 m	1.34 m
Y=0.34 m	101 lux	167 lux	174 lux	X=0.39 m	83 lux	132 lux	142 lux
Y=0.67 m	95 lux	155 lux	163 lux	X=0.74 m	84 lux	134 lux	143 lux
Y=1.01 m	89 lux	145 lux	154 lux	X=1.09 m	83 lux	134 lux	143 lux
Y=1.34 m	83 lux	135 lux	143 lux	X=1.43 m	83 lux	135 lux	143 lux
Y=1.67 m	77 lux	124 lux	132 lux	X=1.78 m	84 lux	137 lux	146 lux
Y=2.00 m	71 lux	116 lux	123 lux	X=2.13 m	85 lux	140 lux	149 lux
Y=2.34 m	68 lux	111 lux	118 lux	X=2.48 m	88 lux	145 lux	155 lux
Y=2.67 m	68 lux	111 lux	119 lux	X=2.82 m	91 lux	150 lux	162 lux
				X=3.17 m	92 lux	153 lux	166 lux

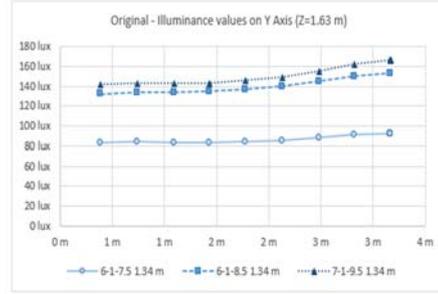
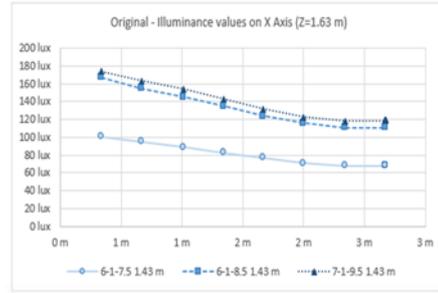


Figura 16. Niveles de iluminancia en modelo ORIGINAL

MODEL 01 20-SUR (Z=1.63 m)
 DST ON Threshold of illuminance: 170 lux

	MONTH	DAY	HOUR	
INSTANT 1	6	1	8	(Occupied)
INSTANT 2	6	1	9	(No occupied)
INSTANT 3	6	1	10	(No occupied)

	6-1-7.5	6-1-8.5	6-1-9.5		6-1-7.5	6-1-8.5	6-1-9.5
X	1.38 m	1.38 m	1.38 m	Y	1.34 m	1.34 m	1.34 m
Y=0.34 m	67 lux	112 lux	136 lux	X=0.34 m	68 lux	110 lux	127 lux
Y=0.67 m	67 lux	113 lux	135 lux	X=0.69 m	71 lux	117 lux	136 lux
Y=1.01 m	70 lux	115 lux	137 lux	X=1.03 m	72 lux	118 lux	138 lux
Y=1.34 m	72 lux	118 lux	139 lux	X=1.38 m	72 lux	118 lux	139 lux
Y=1.67 m	75 lux	123 lux	144 lux	X=1.73 m	73 lux	121 lux	143 lux
Y=2.00 m	78 lux	126 lux	146 lux	X=2.07 m	74 lux	123 lux	147 lux
Y=2.34 m	80 lux	128 lux	148 lux	X=2.42 m	75 lux	127 lux	153 lux
Y=2.67 m	81 lux	130 lux	149 lux	X=2.77 m	76 lux	130 lux	158 lux
				X=3.12 m	74 lux	127 lux	156 lux

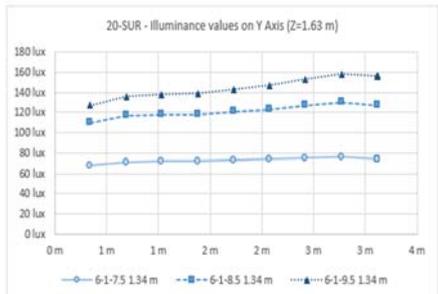
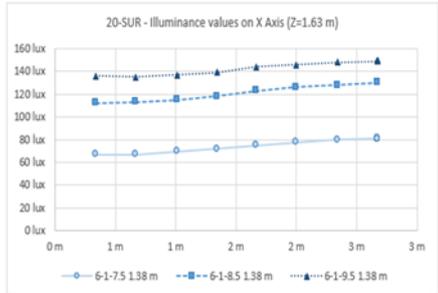


Figura 17. Niveles de iluminancia en modelo 20%-SUR.

2.2 Grupo de hipótesis: CSA-35%-Norte y Sur:

	NORTE				
	ORIGINAL	35-NCH	35-NOH	35-NCL	35-NOL
0.32 m	0	0.61	0.58	0.55	0.52
0.64 m	0	0.66	0.63	0.58	0.55
0.95 m	0	0.67	0.66	0.6	0.57
1.27 m	0	0.67	0.66	0.6	0.58
1.58 m	0	0.67	0.67	0.61	0.58
1.90 m	0	0.67	0.66	0.6	0.58
2.22 m	0	0.67	0.66	0.6	0.56
2.53 m	0	0.67	0.64	0.59	0.55
2.85 m	0	0.64	0.62	0.56	0.52
3.16 m	0	0.58	0.56	0.52	0.52

Tabla 25: Comparativa resultados CSA en modelos 35%-NORTE

	SUR				
	ORIGINAL	35-SCH	35-SOH	35-SCL	35-SOL
0.32 m	0	0.48	0.45	0.75	0.59
0.64 m	0	0.52	0.51	0.74	0.65
0.95 m	0	0.52	0.52	0.74	0.67
1.27 m	0	0.53	0.52	0.74	0.68
1.58 m	0	0.53	0.52	0.74	0.68
1.90 m	0	0.54	0.52	0.74	0.68
2.22 m	0	0.53	0.52	0.74	0.68
2.53 m	0	0.53	0.52	0.74	0.67
2.85 m	0	0.52	0.52	0.74	0.66
3.16 m	0	0.51	0.47	0.75	0.62

Tabla 26: Comparativa resultados CSA en modelos 35%-SUR

Como se observa en la gráfica 35%-Norte, en orientaciones Norte, las diferencias entre reflectancias interiores son poco relevantes. En el caso de la orientación Sur, las diferencias entre reflectancias interiores son de mayor relevancia, llegando a suponer más de un 0,20 del valor de CSA.

35%-NORTE

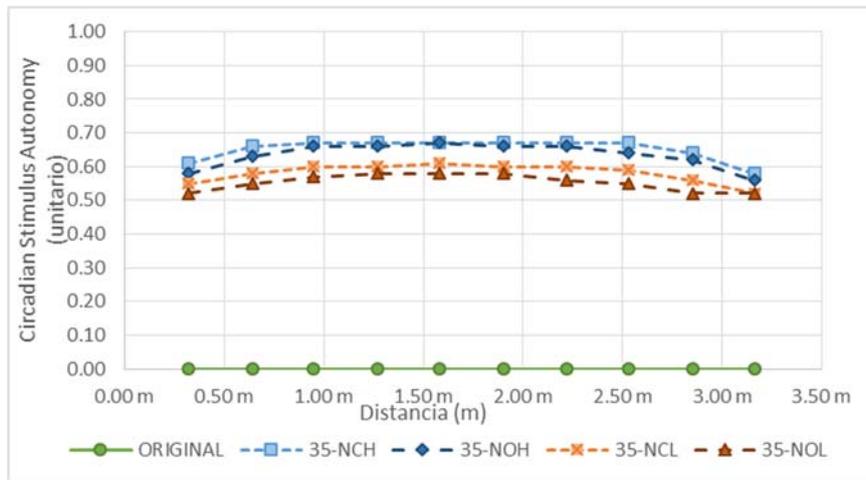


Tabla 27: Relación visual de resultados CSA en modelos 35%-NORTE

35%-SUR

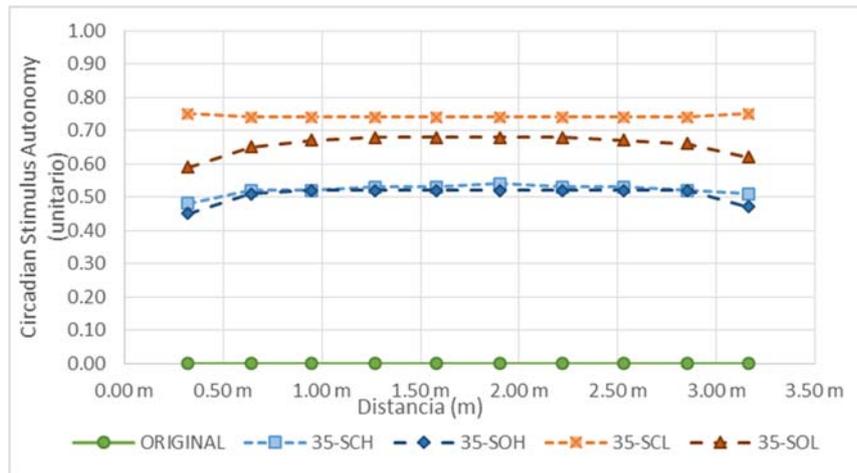


Tabla 28: Relación visual de resultados CSA en modelos 35%-SUR

Como observamos en las gráficas, un hueco en fachada del 35% satisface el umbral establecido en el presente estudio durante al menos el 50% del tiempo, incluso con un horario de 8 a 9 de la mañana.

5.2.2.3 Grupo de hipótesis: CSA-50%-Norte y Sur:

	NORTE				
	ORIGINAL	50-NCH	50-NOH	50-NCL	50-NOL
0.32 m	0	0.78	0.77	0.78	0.77
0.64 m	0	0.77	0.76	0.77	0.75
0.95 m	0	0.77	0.76	0.77	0.75
1.27 m	0	0.77	0.76	0.77	0.75
1.58 m	0	0.77	0.77	0.77	0.75
1.90 m	0	0.77	0.76	0.77	0.76
2.22 m	0	0.77	0.75	0.77	0.75
2.53 m	0	0.77	0.75	0.77	0.75
2.85 m	0	0.77	0.77	0.77	0.76
3.16 m	0	0.78	0.77	0.78	0.77

Tabla 29: Comparativa resultados CSA en modelos 50%-NORTE

	SUR				
	ORIGINAL	50-SCH	50-SOH	50-SCL	50-SOL
0.32 m	0	0.77	0.77	0.74	0.73
0.64 m	0	0.77	0.75	0.72	0.7
0.95 m	0	0.77	0.75	0.71	0.68
1.27 m	0	0.77	0.75	0.71	0.68
1.58 m	0	0.77	0.75	0.71	0.68
1.90 m	0	0.77	0.76	0.71	0.68
2.22 m	0	0.77	0.75	0.71	0.68
2.53 m	0	0.77	0.75	0.71	0.68
2.85 m	0	0.77	0.75	0.71	0.7
3.16 m	0	0.77	0.77	0.74	0.73

Tabla 30: Comparativa resultados CSA en modelos 50%-SUR

Como se puede observar, un hueco en fachada del 50% satisface de forma holgada el tiempo mínimo anual del 50% de exposición por la mañana (valor de CSA de 0,50), generando con ello una excesiva entrada de luz en la estancia, expresada también con el indicador DA, lo que puede resultar contraproducente no solo según estándares de salud, confort y bienestar, sino en lo referente a exceso de radiación solar para la demanda térmica y a posibles deslumbramientos.

50%-NORTE

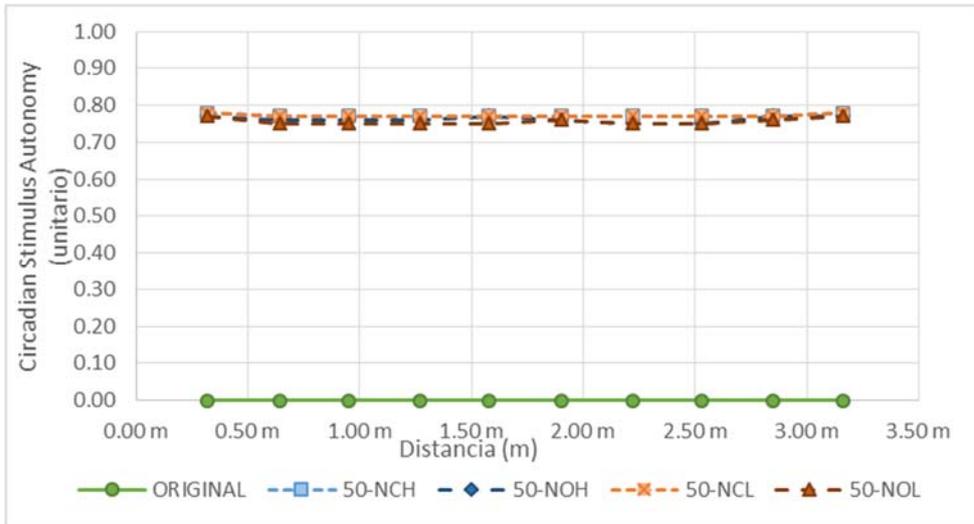


Tabla 31: Relación visual de resultados CSA en modelos 50%-NORTE

50%-SUR

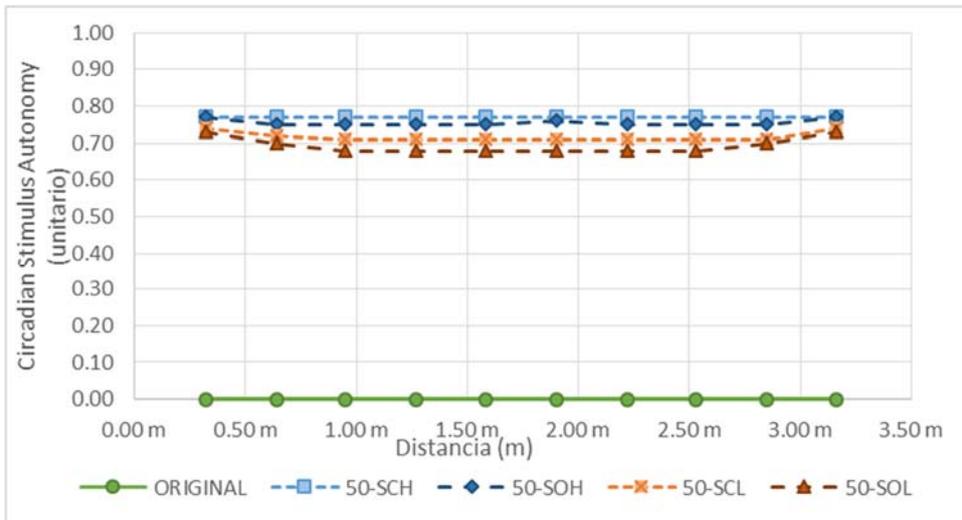


Tabla 32: Relación visual de resultados CSA en modelos 50%-SUR

También se observa en el análisis general de CSA que los huecos situados a una altura elevada superan con mayor solvencia los umbrales mínimos establecidos.

6. CONCLUSIONES

A partir del análisis de resultados realizado, se puede concluir para el caso de estudio planteado que:

C1_ La orientación óptima para conseguir unos valores adecuados de CSA es la Sur, siempre que se supere un tamaño mínimo de hueco.

C2_ Una posición de hueco de ventana de altura elevada es más eficiente que una a altura media para conseguir unos valores adecuados de CSA. Esto es especialmente cierto debido a la mayor altura del plano de evaluación, dada la posición del paciente.

C3_ El tamaño de hueco más eficiente analizado según parámetros de ritmo circadiano es el del 35% de hueco en fachada el indicador CSA, alcanzándose valores superiores al 0,50.

C4_ A nivel de eficiencia energética, el tamaño de hueco más eficiente es el del 20%, dado que los valores obtenidos de DA superan en general de forma holgada el valor de 0,50, salvo con huecos en posición intermedia con orientación norte.

C5_ Los tamaños de hueco de 20% y 50% de hueco en fachada ofrecen resultados alejados de los estándares de salubridad recomendables establecidos por el indicador CSA. Los huecos del 35% y 50% producen una entrada de luz excesiva a nivel de eficiencia energética.

C6_ El impacto de los paramentos interiores de vidrio (paredes frontal y lateral) resulta en una mayor dificultad en lograr valores de CSA adecuados al inicio del día, al disminuir la reflectancia media del recinto.

C7_ Las reflectancias interiores son más relevantes en orientaciones Sur.

Por todo lo expuesto, se puede considerar que la metodología planteada sobre el caso de estudio ofrece resultados que permiten optimizar el diseño de los recintos analizados.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Para el presente estudio se marcan diferentes futuras líneas de investigación que completen y desarrollen en mayor profundidad las conclusiones establecidas en este trabajo.

- Ampliación de variables, para optimizar el porcentaje de hueco con mayor precisión.
- Ampliación de variables, para incluir al estudio orientaciones Este, Oeste, e orientaciones intermedias, Noreste, Sureste, Suroeste y Noroeste.
- Ampliación de variables, para incluir diferentes localizaciones con diferentes propiedades de cielo.
- Introducción de diferentes modelos de ventana (cenital).
- Introducción de sistemas de protección solar pasiva.
- Introducción de sistemas de iluminación eléctrica regulables y análisis mediante indicador dinámico cDA.
- Programación predictiva de iluminación eléctrica regulables mediante indicador dinámico DAo.

ANEXO

GLOSARIO, REFERENCIAS

GLOSARIO

- Flujo luminoso: potencia emitida, transmitida o recibida en forma de luz. Su unidad de medida es el lumen (Lm).
- Iluminancia: Cociente del flujo luminoso incidente sobre un elemento de la superficie que contiene el punto, por el área de ese elemento, siendo la unidad de medida el lux.
- Ciclo circadiano: oscilaciones de las variables biológicas, físicas o metales, en intervalos regulares de 24 horas asociado a los ciclos de iluminación natural que sufren la mayoría de los seres vivos.
- Eficiencia energética: relación entre las necesidades de un edificio y la demanda energética que alcanzar estas necesidades supone.
- Spectral Power Distribution: se define en relación a las características específicas de la luz natural en diferentes tipologías de cielo, se basa en la información de longitud de onda de la luz.
- Métricas dinámicas: indicadores que describen, con mayor precisión que las métricas estáticas, el aprovechamiento de luz de natural en espacios interiores.
- Daylight Autonomy (DA): tiempo del año en el que se alcanza la iluminancia requerida para desarrollar una actividad concreta solo con luz natural.
- Continuous Daylight Autonomy (cDA): tiempo en el año en el que se alcanza un umbral de iluminancia determinado para desarrollar una actividad concreta con luz natural y luz eléctrica regulada.
- Spatial Daylight Autonomy (sDA): porcentaje de tiempo en el año en el que se alcanza un nivel de iluminancia determinado en, como mínimo, un 50% de la estancia.
- Estímulo circadiano (CS): Supresión de melatonina por parte del cerebro que se produce debido a la exposición a la luz natural.
- Circadian Stimulus Autonomy (CSA): Porcentaje de tiempo en el año en que se alcanza, con luz natural, el umbral de iluminancia determinado para un correcto estímulo circadiano.

- Radiosidad: Método de cálculo lumínico basado en la consideración de rayos de luz incidiendo sobre un punto concreto de una superficie lambertiana y siendo rebotados en todas direcciones.
- Superficie lambertiana: superficie que refleja, en todas direcciones y de la misma forma, una onda incidente en ella.
- Ray-tracing: método de cálculo lumínico que genera una imagen estática, basándose en el lanzamiento de rayos desde el punto de vista del observador.
- Daylight Coefficients: método de cálculo lumínico desarrollado por (Mardaljevic, n.d.) y que se basa en una simplificación del método de radiosidad. Utiliza el motor de cálculo Radiance.
- Radiance: motor de cálculo lumínico utilizado por UMI y basado en el *Daylight Coefficients Method*.
- Reflectancia: porcentaje de luz directa que refleja una superficie.
- Absortancia: porcentaje de la radiación solar total, que incide sobre una superficie, que es absorbido por la misma.
- Transmitancia: porcentaje de luz directa que traspasa un material sobre el que incide por unidad de tiempo.
- Desviación estándar: representa la dispersión de una serie de datos o resultados con respecto al valor medio.

REFERENCIAS

ARTÍCULOS

- Acosta, I., Molina, J. F., & Campano, M. A. (2017).** Analysis of Circadian Stimulus and Visual Comfort Provided by Window Design in Architecture. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(3), 198–204.
<https://doi.org/10.7763/ijet.2017.v9.970>
- Acosta, Ignacio, Campano, M. A., Dominguez-Amarillo, S., & Muñoz, C. (2018a).** Dynamic daylight metrics for electricity savings in offices: Window size and climate smart lighting management. *Energies*, 11(11).
<https://doi.org/10.3390/en11113143>
- Acosta, Ignacio, Campano, M. A., Dominguez-Amarillo, S., & Muñoz, C. (2018b).** Dynamic daylight metrics for electricity savings in offices: Window size and climate smart lighting management. *Energies*, 11(11).
<https://doi.org/10.3390/en11113143>
- Acosta, Ignacio, Campano, M. Á., Leslie, R., & Radetsky, L. (2019).** Daylighting design for healthy environments: Analysis of educational spaces for optimal circadian stimulus. *Solar Energy*, 193, 584–596.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.004>
- Acosta, Ignacio, Campano, M. Á., & Molina, J. F. (2016).** Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces. *Applied Energy*, 168, 493–506.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.005>
- Acosta, Ignacio, Munoz, C., Campano, M. A., & Navarro, J. (2015).** Analysis of daylight factors and energy saving allowed by windows under overcast sky conditions. *Renewable Energy*, 77(1), 194–207. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.017>
- Akpınar, Z., Tokgöz, S., Gökbel, H., Okudan, N., Uğuz, F., & Yılmaz, G. (2008).** The association of nocturnal serum melatonin levels with major depression in patients with acute multiple sclerosis. *Psychiatry Research*, 161(2), 253–257.
<https://doi.org/10.1016/j.psychres.2007.11.022>
- Bullough, J. D., Rea, M. S., & Figueiro, M. G. (2006).** Of mice and women: Light as a circadian stimulus in breast cancer research. In *Cancer Causes and Control* (Vol. 17, Issue 4, pp. 375–383).
<https://doi.org/10.1007/s10552-005-0574-1>
- Calcagni, B., & Paroncini, M. (n.d.).** Daylight factor prediction in atria building designs.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.01.009>
- Campano, M. A., Acosta, I., León, A. L., & Calama, C. (2018).** Validation Study for Daylight Dynamic Metrics by Using Test Cells in Mediterranean Area. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(6), 487–491.
<https://doi.org/10.7763/ijet.2018.v10.1107>

- Campano, M. A., Aguilar, M. T., Fernández-Agüera, J., & Domínguez, S. (2019).** Optimization of the Window Design in Offices for a Proper Circadian Stimulus: Case Study in Madrid. *International Journal of Engineering and Technology*, 127–131.
<https://doi.org/10.7763/ijet.2019.v11.1134>
- Froy, O. (2011).** Circadian Rhythms, Aging, and Life Span in Mammals. *Physiology*, 26(4), 225–235.
<https://doi.org/10.1152/physiol.00012.2011>
- Kriszbacher, I., Bódis, J., Boncz, I., Koppan, Á., & Koppan, M. (2010).** The time of sunrise and the number of hours with daylight may influence the diurnal rhythm of acute heart attack mortality. *International Journal of Cardiology*, 140(1), 118–120.
<https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2008.11.019>
- Leon, A.L., Suárez, R., Bustamante, P., Campano, M.A., Moreno-Rangel, D. (2017).** Design and Performance of Test Cells as an Energy Evaluation Model of Facades in a Mediterranean Building Area. *Energies*, 10(11), 1816.
<https://doi.org/10.3390/en10111816>
- Leslie, R. P., Radetsky, L. C., & Smith, A. M. (2012).** Conceptual design metrics for daylighting. *Lighting Research and Technology*, 44(3), 277–290.
<https://doi.org/10.1177/1477153511423076>
- Leslie, R., Raghavan, R., Howlett, O., & Eaton, C. (2005).** The potential of simplified concepts for daylight harvesting. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 21–38.
<https://doi.org/10.1191/1365782805li127oa>
- Melamud, L., Golan, D., Luboshitzky, R., Lavi, I., & Miller, A. (2012).** Melatonin dysregulation, sleep disturbances and fatigue in multiple sclerosis. *Journal of the Neurological Sciences*, 314(1–2), 37–40.
<https://doi.org/10.1016/j.jns.2011.11.003>
- Mardaljevic, J. M. (n.d.).** *Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients*. Retrieved April 28, 2020, from <http://www.lboro.ac.uk/departments/civil-building/staff/mardaljevicjohnPersonaldaylightingwebsite:http://climate-based-daylighting.com>
- Mardaljevic, J. M. (2000).** *Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients*. Loughborough University.
<http://www.lboro.ac.uk/departments/civil-building/staff/mardaljevicjohnPersonaldaylightingwebsite:http://climate-based-daylighting.com>
- Ricciardi, P., & Buratti, C. (2018).** Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. *Building and Environment*, 127, 23–36.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>
- Rodrigo, J., & Amado, S. (n.d.).** *Técnicas de altas prestaciones para métodos de iluminación global*.
- Touitou, Y., Reinberg, A., & Touitou, D. (2017).** Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of

circadian disruption. In *Life Sciences* (Vol. 173, pp. 94–106). Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2017.02.008>

TRABAJOS FIN DE GRADO (TFG)

(Ruiz, 2019). Autonomía de Luz del Día Parcial: Adaptación de métrica dinámica de iluminación natural para recintos con uso estacional. Aplicación a aulas de centros docentes no universitarios.

<https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/89591>

(Luque, 2019). Optimización del vínculo entre las métricas estáticas y dinámicas en el cálculo de la iluminación natural: Minimum Daylight Autonomy.

<https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/89611>

TESIS DOCTORALES

(Campano, 2015). Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía.

<http://hdl.handle.net/11441/30632>

BIBLIOGRAFÍA WEB

<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>

<https://www.certificadosenergeticos.com/>

<https://www.rhino3d.com/es/>

<http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html>

https://umidocs.readthedocs.io/en/latest/docs/examples/_tutorials.html

