DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 150-159

Análisis de iluminación circadiana en cuartos públicos de encamados
Circadian lighting analysis in shared inpatient rooms

Andrés Francisco Chavarro Pérez[a,*], Alejandro Díaz-Infante R[a,b], Cecilia Guadarrama Gándara[a,b], Manuel Ángeles-Castellanos[c]

[a] *Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura - PMDA, Campo de Conocimiento de Tecnologías, Universidad Nacional Autónoma de México, México.*
[b] *Laboratorio de Iluminación Arquitectónica, Facultad de Arquitectura, UNAM*
[c] *Laboratorio de Cronobiología y experimenta; Departamento de Anatomía, Facultad de Medicina, UNAM*

Resumen

La iluminación natural en los espacios arquitectónicos involucra dos componentes principales para su cuantificación: el primero, su desempeño y rendimiento visual; y el segundo, su influencia en la salud de los usuarios, especialmente en la regulación de ritmos biológicos, donde la luz es el principal sincronizador. Los espacios diseñados para la estancia hospitalaria son actualmente evaluados por su capacidad de conciliar estas variables que, en conjunto, propician el bienestar de sus ocupantes. Los cuartos de encamados en los hospitales públicos mexicanos generalmente se resuelven desde un criterio funcional, donde la ubicación de los servicios sanitarios se ha planteado hacia la fachada, generando limitantes para el cumplimiento técnico normativo de cualidades intangibles como el derecho a la luz natural y la conexión visual con el exterior. Este estudio analiza de manera comparativa los niveles de iluminación circadiana para dos tipologías específicas de cuartos de encamados y su estímulo teórico en la ubicación de los pacientes.

Palabras Clave: Iluminación natural, Estímulo circadiano, Hospitales públicos, Cuartos de encamados, Proporción ventana-suelo (PVS).

Abstract

Natural lighting in architectural spaces involves two main components for its assessment: first, its visual performance and impact; and second, its influence user's health, in relation to the regulation of biological rhythms, for which light serves as the primary synchronizer. Spaces designed for hospital stays are currently evaluated for their ability to reconcile these variables, which together foster the well-being of occupants. Inpatient rooms in Mexican public hospitals are generally designed from a functional perspective, with the sanitary facilities placed along the facade, creating limitations for compliance with technical regulations regarding intangible qualities such as the right to natural light and visual connection to the outdoors. This study comparatively analyzes circadian lighting levels for two specific types of inpatient rooms and their theoretical implications for patient placement.

Keywords: Daylighting, Circadian Stimulus, Public Hospitals, Inpatient rooms, Window-to-Floor Ratio (WFR).

1. Introducción

Los seres humanos vivimos en un entorno cíclico de luz y oscuridad, necesario para la sincronización de nuestros ritmos biológicos internos. La alteración de este proceso aumenta el riesgo de desarrollar trastornos circadianos. Los espacios arquitectónicos diseñados para la recuperación de la salud humana son valorados hoy en el mundo desde una visión holística, conformada por una gran variedad de aspectos que atienden las necesidades de habitabilidad y bienestar del ser humano. Prácticas de diseño como el biofílico son cada vez más populares en el medio, reconociendo esa conexión elemental del ser humano con su entorno.

La aplicación de conocimientos prácticos que permitan potenciar nuestros diseños en función de la experiencia del usuario, integrando aspectos psicofísicos en ambientes sanitarios, fortalece la percepción de seguridad y comodidad de los usuarios de estas edificaciones: personal médico, pacientes, operarios y visitantes. La iluminación natural en dichos espacios se revaloriza en función de su relación con nuestra salud.

*Autor para la correspondencia: afchavarrop@gmail.com
Correo electrónico: afchavarroperez@comunidad.unam.mx (Andrés Francisco Chavarro Pérez), alejandro.diazinfante@fa.unam.mx (Alejandro Díaz-Infante Rendón), ceciguadarrama@fa.unam.mx (Cecilia Genoveva Guadarrama Gándara), mangeles_castellanos@unam.mx (Alberto Manuel Ángeles Castellanos)

Historial del manuscrito: recibido el 04/06/2026, última versión-revisada recibida el 07/09/2026, aceptado el 07/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18064

El objetivo de este estudio fue examinar empíricamente las condiciones de iluminación natural en dos habitaciones compartidas, muy comunes en los hospitales públicos de México, con el propósito de establecer el impacto que la orientación de las ventanas tiene en el aprovechamiento de la iluminación y el estímulo circadiano en los pacientes hospitalizados.

2. Antecedentes

Los beneficios de la iluminación natural han sido ampliamente reconocidos a lo largo de la historia. En las civilizaciones antiguas, la energía del sol fue sinónimo de vida y purificación, y se comprendió que una "buena iluminación" prevenía enfermedades. Durante los siglos XVIII y XIX, se descubrió que la falta de sol favorecía el desarrollo de enfermedades, y la cura estándar para padecimientos como la tuberculosis era la exposición a la luz solar. En la actualidad, se ha documentado que pacientes hospitalizados en habitaciones con buena iluminación natural suelen tener periodos de recuperación más cortos, entre otros beneficios (Alzoubi & Al-Rqaibat, 2014) y se ha demostrado que la luz natural del día, con mayor intensidad a la que se suele tener con la luz artificial, sincroniza el inicio y la duración del sueño, mejorando también su calidad (Blume et al., 2019).

Desde mediados del siglo pasado, se empezó a cuantificar la forma en cómo la luz afecta los procesos biológicos, confirmando que la iluminación puede influir de tres formas en el desempeño de las personas: el sistema visual, el sistema circadiano y la percepción (Boyce et al., 2003). Lo que es respaldado por diversas investigaciones (Knoop et al., 2020; Brown et al., 2022), que señalan las ventajas que tiene la luz natural para los procesos biológicos, así como el impacto que tienen las vistas al exterior en el bienestar y la salud mental de las personas.

El descubrimiento de las células ganglionares de la retina intrínsecamente fotosensibles (Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells, ipRGC) y su proyección hacia el núcleo supraquiasmático (NQS) ha permitido comprender los procesos de regulación de los ritmos circadianos, así como el impacto biológico que la luz tiene en el cuerpo humano, más allá de la vista, y la importancia de una correcta exposición lumínica para alcanzar beneficios fisiológicos medibles; a ello se le ha denominado cómo los efectos no visuales de la luz (Xiao et al., 2021). La luz, a través del sistema circadiano, sincroniza el ritmo de producción de melatonina y de cortisol, y la exposición matutina a la luz es clave para el ciclo de vigilia-sueño. De modo tal que normativas internacionales, como la ANSI/IES RP-46-25 o el estándar de construcción WELL, han buscado establecer criterios para llevar los beneficios de la luz natural a las edificaciones, ofreciendo recomendaciones concretas para alcanzar las condiciones óptimas de una exposición adecuada a la luz en interiores.

En la actualidad se reconoce que el estímulo luminoso depende de múltiples factores, donde la intensidad lumínica, el momento y duración de la exposición, así como otras variables individuales, como la edad o el género, son relevantes para determinar el impacto de la luz (Houser & Esposito, 2021). Entre estos factores, el espectro luminoso, que se refiere a las condiciones cualitativas de la fuente de iluminación, es fundamental. En particular, la luz natural no solo proporciona un espectro completo, sino que, debido a las variaciones en intensidad y duración a lo largo del día, ofrece además la "dosis" necesaria para la regulación de los ritmos biológicos. La figura 1 compara las curvas de sensibilidad de las ipRGCs, identificadas con la sigla C(λ), y la curva de sensibilidad de la visión fotópica V(λ), con relación a la curva de distribución espectral (SPD) para tres tipos de cielo: D55 (cielo despejado), D65 (cielo nublado) y D75 (luz del norte). Se destaca la coincidencia entre la eficacia máxima del sistema circadiano C(λ) con la potencia máxima de las tres SPDs de la luz natural. En contraste, una fuente artificial, por ejemplo, una lámpara fluorescente estándar, muestra picos que se ubican fuera de la zona de mayor sensibilidad biológica, lo que limita la eficacia circadiana del estímulo luminoso. Ver figura 2.

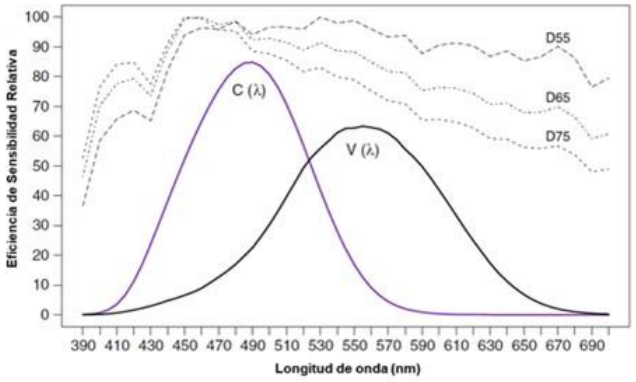


Figura 1. Comparación de la respuesta de sensibilidad visual fotópica - V(λ) y la respuesta circadiana C(λ) en relación con tres fuentes de luz natural: CIE iluminantes (D55) luz de día, (D65), cielo nublado y (D75) luz difusa. (Adaptado y traducido de Konis y Selkowitz, 2017, p.11)

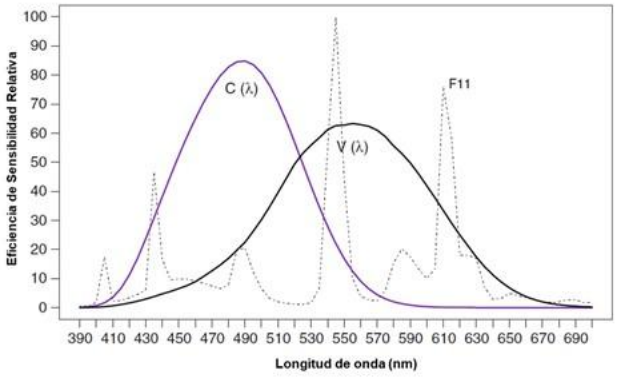


Figura 2. Comparación de la respuesta de sensibilidad visual fotópica - V(λ) y la respuesta circadiana C(λ) en relación con la SPD de una fuente fluorescente tri- 4000K (CIE iluminante F11) (Adaptado y traducido de Konis y Selkowitz, 2017, p.52)

De modo tal que resulta preferible el uso de la luz natural como fuente primaria de iluminación, respecto a las fuentes artificiales, siempre y cuando se garanticen condiciones suficientes en intensidad y duración al interior de las habitaciones. Para lo cual, la proximidad a las ventanas, las vistas al exterior y la iluminación natural en los espacios interiores son elementos primordiales de diseño. Lo que resulta fundamental, especialmente cuando las personas permanecen confinadas en interiores, como es en pacientes hospitalizados.

En el contexto mexicano, las condiciones de iluminación se rigen principalmente por la NOM-025-STPS-2008, la cual establece condiciones mínimas de iluminación en los centros de trabajo, incluyendo los hospitales. Los reglamentos de construcción suelen referir que los locales habitables deben tener una iluminación diurna natural por medio de ventanas y cuyo dimensionamiento no debe ser inferior al 17.5% del área del local. Por su parte, los criterios normativos específicos para la infraestructura hospitalaria establecen la necesidad de contar con condiciones de iluminación que favorezcan el bienestar del paciente, priorizando el uso de la luz natural. Sin embargo, este énfasis no es suficiente para determinar con precisión cuáles son las condiciones que garantizan una óptima iluminación ni refieren parámetros cuantificables para describir cómo las condiciones de la iluminación tienen un impacto en los pacientes.

Existen diferentes métricas relacionadas con la iluminación natural, de las cuales el Factor de Luz Diurna (FLD) ha sido empleado en distintas investigaciones debido a su simplicidad. Sin embargo, esta métrica está basada en una única condición del cielo: cielo nublado. Recientemente se ha optado por el uso de métricas de carácter dinámico, como la Autonomía de Luz de Día (DA) o la Iluminancia Útil de Luz Diurna (UDI), que toman en cuenta las condiciones climáticas y de nubosidad para describir la iluminación natural al interior de los edificios. Sin embargo, el parámetro FLD ni las métricas dinámicas de luz natural son suficientes para describir los efectos no visuales de la luz (Acosta et al., 2017). Para ello se han propuesto métricas, como el Lux Equivalente Melanópico (EML) o el Estímulo Circadiano (CS), que evalúan el impacto de la luz en el sistema circadiano humano, específicamente en la supresión de la melatonina, y que consideran la dirección de la vista y la sensibilidad espectral del ojo para funciones no visuales.

Este trabajo detalla los resultados del análisis y la evaluación de los niveles de autonomía circadiana en dos habitaciones destinadas a pacientes hospitalizados, a partir de la medición de seis posiciones y distancias respecto a la ventana, única fuente de iluminación natural al interior, para las cuatro orientaciones cardinales, en la Ciudad de México (CDMX).

3. Metodología

El diseño de investigación de este estudio se fundamenta en una metodología descriptiva orientada al análisis del fenómeno objeto de estudio. A partir de esta aproximación, se identifican las variables de investigación, las cuales son de naturaleza cuantitativa y se clasifican de la siguiente manera:

Dependientes: Iluminancia Horizontal (Eh), Iluminancia Vertical (Ev) y Estímulo Circadiano (CS).

Independientes: Orientaciones cardinales (Norte, Este, Sur y Oeste), posición de los pacientes dentro de las habitaciones y distancias de estos en relación con la ventana.

Tabla 1.Operacionalización de variables de estudio.

Operacionalización			
Variables	**Dimen-sión**	**Indicador/ es**	**Ítems/ unidades**
Iluminación	Iluminancia	Iluminancia horizontal (Eh) Iluminancia Vertical (Ev)	Lux (Lumen/m2)
Estímulo circadiano	Estímulo circadiano	Estímulo Circadiano (Cs)	Cs 0.1-0.3 (10%-35% de supresión teórica de melatonina)
Orientación	Ángulo Acimutal	Cada 90°	Norte, este, sur y oeste
Ubicación del paciente	Espacial	Disposición del mobiliario	Ubicación planimétrica
Distancia del paciente	Distancia	Posición estática dentro del espacio	Metros

En la primera etapa se optó por realizar un análisis estático mediante la operacionalización de las variables dependientes e independientes en las habitaciones objeto de estudio, empleando el software DIALux Evo 13, una herramienta comúnmente utilizada para el modelado de iluminación artificial que también permite simular la luz natural bajo condiciones estáticas de cielo despejado, medio y cubierto. Posteriormente, para la ejecución de la segunda etapa, fue empleada la aplicación web Dynamic Daylighting (DD), creada por el Dr. Andrew Marsh, un software de dominio público (https://andrewmarsh.com/software/daylight-box-web/) para el modelado dinámico de la distribución espacial de la luz natural bajo las condiciones del clima del lugar.

Como parte de las limitaciones del estudio, la etapa I involucró el cálculo del estímulo circadiano de manera puntual y simplificada, utilizando valores de iluminancia en puntos fijos dentro de la habitación. En cuanto a la etapa II, el estudio contempló las fechas de análisis planteadas en la etapa inicial, como constantes sin ahondar en valores promedio por temporadas. De esta manera, el cálculo del estímulo circadiano se presenta mediante un análisis de cumplimiento traducido a la métrica UDI-u bajo una determinante como la cantidad de tiempo de exposición dentro de un rango de estímulo objetivo. Esto como ejercicio complementario para el análisis lumínico de dos características importantes, pero no únicas dentro del fenómeno de la iluminación circadiana al interior de un espacio arquitectónico.

3.1. Habitaciones tipo y parámetros de simulación.

Con base en una revisión de proyectos arquitectónicos de hospitales públicos construidos en México (2011-2026), se identificaron dos tipologías de diseño para los cuartos de encamados colectivos. La habitación tipo 01 con una superficie de 5.28 metros (m) x 7.00 m, con capacidad para cuatro pacientes, que dispone de un sanitario y una regadera

ubicados en el muro de fachada, y una ventana de 2.00 m x 1.50 m. La habitación tipo 02, para dos pacientes y ventana con las mismas dimensiones y características, y una dimensión de 5.00 m x 3.45 m. La altura de ambas habitaciones es de 2.40 m a nivel de plafón.

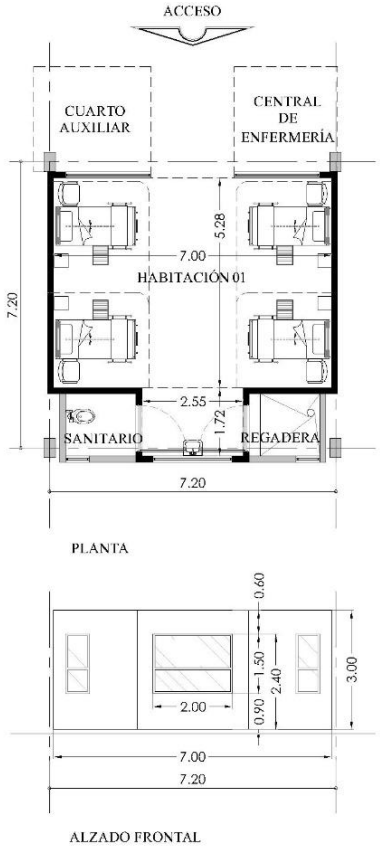


Figura 3. Planta y Alzado frontal de habitación 01.

Las reflectancias en piso, muros y techo fueron determinadas con base en la observación hecha durante visitas a hospitales públicos y la información técnica de los proyectos arquitectónicos analizados, estableciendo para el piso (rollo vinílico antibacterial color azul oscuro) una reflectancia difusa (RD) de 20%; muros (pintura antibacterial color crema claro) RD=50% y techo (pintura antibacterial sobre tablaroca color blanco) RD=70%. Para las ventanas se consideró un coeficiente de transmitancia del 90% e índice de refracción de 1.5 para un vidrio claro simple de 6mm de espesor.

El modelo incluyó un mobiliario básico de camas hospitalarias RD=50% y un lavamanos cerámico RD=80% normativo fijado al muro. Las reflectancias de superficies de puertas, marcos y contramarcos fueron incorporadas con RD=70%.

Consistente con las prácticas de evaluación de las condiciones de iluminación natural, se consideraron, para las simulaciones de la primera y la segunda etapa, el equinoccio de primavera (21 de marzo) y los solsticios de verano e invierno (21 de junio y 21 de diciembre, respectivamente). Se realizaron simulaciones a cada hora (7:00 a 19:00 horas) para las cuatro orientaciones cardinales (norte, sur, este y oeste). Bajo la condición de cielo medio, sin luz solar directa, en la Ciudad de México (CDMX).

Lo anterior considerando estas fechas como las posiciones más extremas del sol con respecto a la tierra, proporcionando valores mínimos y máximos que configuran unos rangos teóricos de incidencia lumínica dentro de los espacios de estudio. La información correspondiente a los hallazgos promedio por temporada son parte de la investigación, pero no de lo propuesto para este documento.

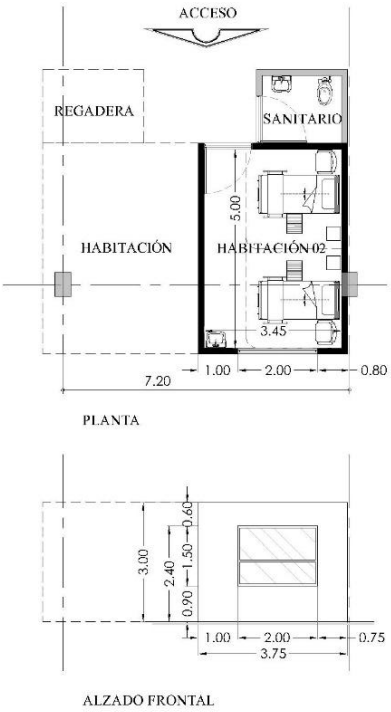


Figura 4. Planta y Alzado frontal de habitación 02.

Como parámetros adicionales, en DIALux es necesaria la selección del perfil de uso, en la que se elige bajo qué normativa y tipología de uso arquitectónico se evaluará el modelo. Para este cálculo se escogió el área de Iluminación para la salud (LZ3), relacionada con IESNA Lighting Handbook (10ª edición), DIN V 18599:2007, CIE 97:2005 y CIE 154:2003, con valores de iluminancia general promedio de 150 lx para las Salas de Encamados tal como lo establecen las Guías de Diseño Arquitectónico institucional del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS).

En la segunda etapa, con simulaciones dinámicas de luz natural, se consideró el clima de la Ciudad de México (Observatorio Meteorológico Central, Tacubaya, CDMX), empleando la información climática de archivos EnergyPlus Weather (EPW) obtenidos de la base de datos Building Simulation Climate Data (https://climate.onebuilding.org/#gsc.tab=0), y se realizaron simulaciones variando los ángulos de orientación. Se estableció, para las simulaciones, un periodo entre las 8:00 y las 12:00 horas para atender las recomendaciones sobre la

exposición a la luz en ambientes interiores para un adecuado estímulo circadiano (Brown et al., 2022).

3.2. Parámetros de evaluación

Las herramientas de simulación lumínica (como DIALux) proporcionan resultados de iluminancia, medidos en lux (lx) sobre un plano horizontal imaginario a 0.76 metros sobre el nivel de piso terminado (m/NPT), que expresan las condiciones de la iluminación fotópica V(λ) y sirven para establecer si dichas condiciones son adecuadas para realizar tareas visuales. Si bien este parámetro es el estándar para determinar las cualidades lumínicas de un espacio, no es suficiente para explicar el estímulo circadiano que la luz puede proporcionar, siendo necesaria la medición de iluminancias a la altura de los ojos del observador.

El área del plano horizontal imaginario corresponde al área de cada habitación, con una variación en la habitación 01, que contempló únicamente la zona de las camas, prescindiendo del área del vestíbulo de los baños para los pacientes. Lo anterior, con el objetivo de identificar los niveles específicos de iluminancia horizontal (Eh) en torno a ellos. Ambos planos de cálculo contienen puntos de medición equidistantes entre sí y están distribuidos proporcionalmente al área del estudio. La habitación 01 se midió con 35 sensores, cada uno con un área de medición aferente de 1.15 m², y la habitación 02 con 15 sensores, cada uno con un área de medición aferente de 1.05 m².

Para el cálculo de iluminancia vertical (Ev) se ubicaron puntos de medición en la posición de los pacientes en cada habitación sobre el eje longitudinal de cada cama a 0.40 m del paño del muro de cabecera y a 1.10 m sobre el nivel de piso.

La medición se realizó para cada paciente con la vista en dirección frontal, perpendicular al muro de cabecera y de manera paralela al eje longitudinal de la ventana. El plano de cálculo tuvo una superficie de 0.20 mx0.20 m, perpendicular al piso.

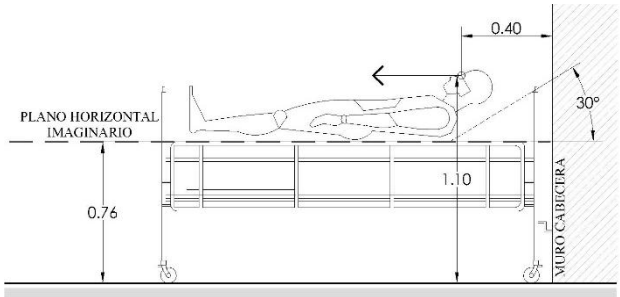


Figura 5. Vista paciente acostado sobre cama hospitalaria con inclinación de 30° sobre el plano horizontal imaginario.

Posteriormente, los valores de iluminancia vertical (Ev) registrados se utilizaron para calcular el estímulo circadiano (CS) que los pacientes reciben mediante la CS Calculator 2.0 (https://cscalc.light-health.org/), una herramienta web de código abierto desarrollada por el Light and Health Research Center (LHRC) que permite calcular la eficacia circadiana de diferentes fuentes y niveles de luz.

Para la simulación dinámica se utilizó el parámetro iluminancia diurna útil (UDI), una métrica que establece el porcentaje de tiempo en que los niveles de luz natural se encuentran dentro de un rango establecido y que corresponde con un objetivo de diseño; este umbral suele ubicarse entre los 300 y los 3000 lx. Con base en la calculadora, se determinó un rango útil UDI-u entre 200 y 800 lx, que corresponde con el umbral donde CS≥0.30, siendo aceptable hasta 2000 lx. El espectro de luz natural empleado fue el iluminante CIE Standard D65 (luz diurna promedio).

3.3. Cálculo de la autonomía circadiana

La autonomía circadiana se enfoca en la provisión de luz natural que los pacientes reciben por la mañana y representa la "dosis" de iluminación necesaria para la regulación de los ritmos circadianos y del ciclo sueño-vigilia. De modo tal que, al alcanzar la autonomía circadiana, también se mide la capacidad del espacio para mantener niveles de iluminación natural adecuados sin depender de iluminación artificial suplementaria. Para la evaluación de este parámetro, se determinó que dicha autonomía se alcanza cuando UDI-u se ubica entre 200 y 2000 lx durante al menos el 75% del tiempo.

Lo anterior indica que la iluminación natural disponible en el interior es suficiente para un adecuado estímulo circadiano y, en consecuencia, para la regulación de los mecanismos de sincronización biológica. Por tanto, una menor dependencia de la luz artificial para alcanzar dichas condiciones de estimulación.

4. Resultados

Los valores encontrados en este estudio se presentan en dos etapas, correspondientes a las distintas fases de desarrollo de la investigación. La primera resulta de la operacionalización de las variables mediante un análisis estático realizado durante las fechas representativas de Solsticio de Verano (SV), Solsticio de Invierno (SI) y Equinoccio de Primavera (EP). En esta fase se calculó la iluminancia horizontal promedio sobre un plano imaginario, denominado plano útil o plano de trabajo, ubicado a una altura h=0.76 m/NPT en cada habitación. De manera subsiguiente se registraron los valores de Iluminancia vertical (Ev) correspondientes a la posición de los ojos de los pacientes en ambas habitaciones, considerando una altura de h=1.10 m/NPT.

En la segunda etapa los resultados se obtuvieron a partir de un análisis dinámico de la iluminación natural utilizando la información climática del lugar, mediante el uso de archivos meteorológicos EPW. Estos valores permitieron evaluar las condiciones de iluminación natural desde la perspectiva de los ocupantes y su potencial incidencia en la estimulación circadiana. Posteriormente, los resultados se contrastaron con los parámetros establecidos en la NOM-025-STPS-2008 y en las guías de diseño arquitectónico para hospitales públicos del IMSS, con el propósito de valorar su desempeño lumínico actual.

Etapa I

4.1. Iluminancia promedio en plano horizontal

La iluminación general en un espacio de encamados está relacionada a requerimientos visuales simples con valores aproximados entre 100 lx y 200 lx mientras que para el desarrollo de tareas con distinción clara de detalles se requieren valores aproximados a los 500 lx a la altura del plano de trabajo tal como lo expresa la NOM-025-STPS-2008.

Los resultados del cálculo de iluminancia promedio a la altura (h) del nivel del plano horizontal de trabajo h=0.76 m/NPT de las habitaciones 01 (H1) y 02 (H2) para las cuatro orientaciones cardinales durante las fechas de estudio, bajo el análisis de simulación estática, se representan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Iluminancia promedio en el plano de trabajo h=0.76 m/NPT.

Iluminancia Promedio (lx)						
Orien-	**Habitación 01 (H1)**			**Habitación 02 (H2)**		
tación	**EP**	**SV**	**SI**	**EP**	**SV**	**SI**
Norte	77.95	109.6	57.76	342.9	498.5	246.8
Este	111.9	113.3	92.78	517.7	**503.9**	443.8
Sur	**131.9**	79.35	**186.7**	**597.7**	362.8	**754**
Oeste	121	**114.3**	109.4	525.8	503.7	458.6

De este análisis se pudo confirmar una mayor aportación de iluminación natural al interior de la habitación 02, en consideración a las características arquitectónicas, como la geometría en planta, la distribución de los elementos arquitectónicos y la proporción de la ventana con el área en planta del local (Window-to-floor ratio, WFR).

Es de anotar que los valores de WFR=8.12% para la habitación 01 en relación a su área en planta de 36.96 m2 y el área de ventana de 3.00 m2; en contraste con un WFR=17.39% para la habitación 02 de 17.25m2 de área en planta y 3.00 m2 de área de ventana, están por debajo de los 17.5% valor mínimo establecido en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal a cualquier grado de orientación en locales habitables.

Los valores más altos para las dos habitaciones se registraron en el solsticio de invierno y en el equinoccio de primavera en su orientación Sur. A diferencia del solsticio de verano, donde también se registra un comportamiento inverso en ambas habitaciones. Durante el SV, los rayos solares son más altos, lo que genera una incidencia lumínica mayormente difusa sobre una fachada orientada al sur en la latitud de estudio.

Los valores más bajos se presentaron en la orientación Norte principalmente para los periodos de equinoccio de primavera y solsticio de invierno. Mientras que en el solsticio de verano se mantuvieron los niveles de iluminancia similares con las orientaciones Este y Oeste por encima de los 100 lx para la H1 y los ~500 lx para la H2.

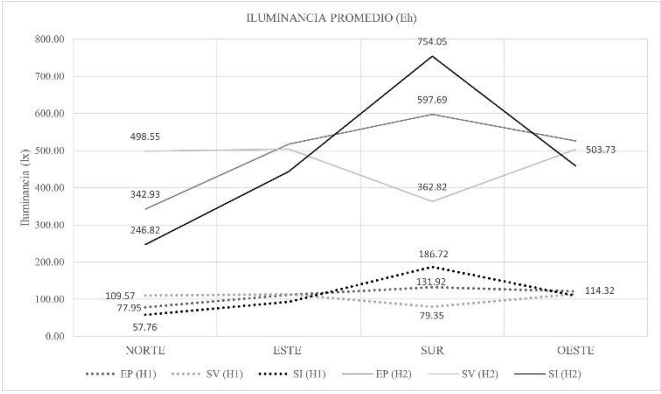


Figura 6. Valores de Iluminancia horizontal promedio en el plano de trabajo.

4.2. Iluminancia en plano vertical

Para medir el estímulo circadiano en las personas dentro de un espacio arquitectónico, es necesario considerar aspectos importantes como la posición del usuario, su distancia a la fuente de luz (en este caso, la ventana) y la dirección a la que está orientada la vista del observador.

En la habitación 01 se identificaron 4 puntos de medición, y en la habitación 02, 2, para un total de 6 puntos, equivalente al número de pacientes ubicados en ambas habitaciones.

Los puntos de medición se ubicaron a una altura de h=1.10m/NPT, y a 0.40 m del muro cabecera, con vista en dirección al corredor. Para facilitar la identificación de los puntos de medición, se enumeraron consecutivamente de 1 a 4 en la habitación 01 y de 5 a 6 en la habitación 02. Ver figura 7.

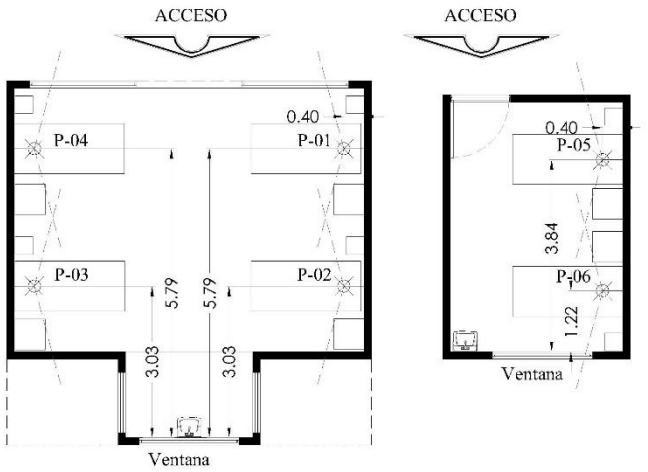


Figura 7. Numeración consecutiva de los pacientes (Puntos de medición).

La distancia entre los pacientes y la ventana es de 5.79 m para los pacientes P-01 y P-04; 3.84 m para el paciente P-05; 3.03 m para los pacientes P-02 y P-03; y 1.22 m para el paciente P-06. En consecuencia, los pacientes más próximos a la ventana son P-02, P-03 y P-06, mientras que los más alejados son P-01, P-04 y P-05.

Tabla 3. Estímulo circadiano promedio de los pacientes 01, 04 y 05.

Estímulo Circadiano Promedio									
Orientación	Paciente 01			Paciente 04			Paciente 05		
	EP	SV	SI	EP	SV	SI	EP	SV	SI
Norte	0.12	**0.19**	0.10	0.12	**0.19**	0.10	0.25	**0.35**	0.20
Este	0.17	0.14	0.18	0.15	0.16	0.13	0.29	0.27	0.29
Sur	**0.18**	0.13	**0.22**	**0.18**	0.12	**0.22**	**0.33**	0.24	**0.36**
Oeste	0.15	0.16	0.13	0.17	0.14	0.18	0.28	0.28	0.27

La tabla 3 muestra los valores promedio del estímulo circadiano (CS_{av}) registrados en los pacientes más alejados de las ventanas. Las lecturas expresan los valores más altos de CS_{av} para el solsticio de invierno con la ventana orientada al Sur. Los valores más bajos de CS_{av} se registran en ambos solsticios orientados al norte. Los pacientes P-01 y P-04, ubicados en la habitación 01, presentan valores similares con variaciones en las orientaciones Este y Oeste a consecuencia de estar ubicados en costados opuestos del mismo espacio.

Estos pacientes alcanzan a superar el CS 0.1 en las tres fechas analizadas, llegando a alcanzar los CS 0.2 en el solsticio de invierno con orientación Sur y en el solsticio de verano con orientación Norte. Ver figura 8.

El paciente P-05 alcanza a superar los niveles objetivo de CS> 0.3 en los dos solsticios con orientación Sur. Y en el equinoccio con orientación Norte. Las lecturas no indican valores inferiores a CS 0.2 en ninguna fecha analizada.

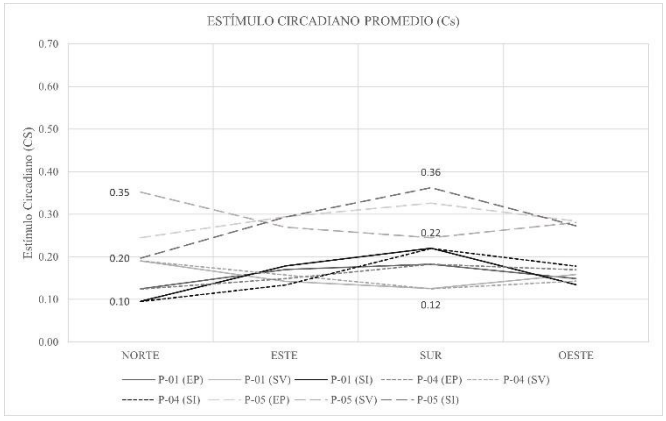


Figura 8. Estímulo Circadiano promedio P-01, P-04 y P-05.

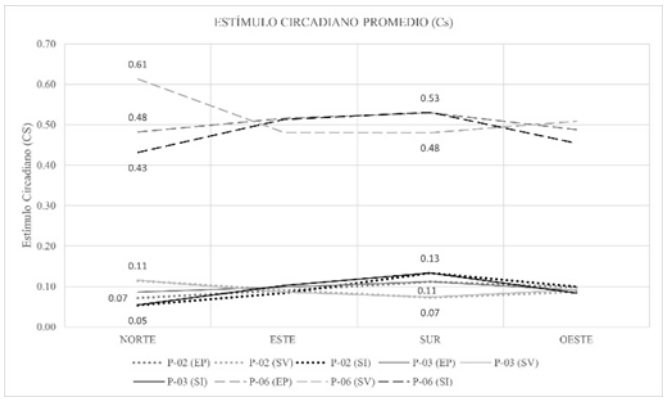


Figura 9. Estímulo Circadiano promedio P-02, P-03 y P-06.

La tabla 4 muestra los valores promedio del estímulo circadiano (CS_{av}) registrados en los pacientes más cercanos a las ventanas. Los valores más altos de CS_{av} se registran con el P-06 principalmente en la orientación Norte donde hay una mayor diferencia entre sus valores por fecha de medición. Las orientaciones Este, Sur y Oeste presentan valores cercanos a CS 0.5, con una varianza menor que la registrada en la orientación Norte.

Tabla 4. Estímulo circadiano promedio de los pacientes 02, 03 y 06

Estímulo Circadiano Promedio									
Orientación	Paciente 02			Paciente 03			Paciente 06		
	EP	SV	SI	EP	SV	SI	EP	SV	SI
Norte	0.07	**0.11**	0.05	0.09	**0.12**	0.05	0.48	**0.61**	0.43
Este	0.09	0.09	0.08	0.10	0.09	0.10	0.52	0.48	0.51
Sur	**0.11**	0.07	**0.13**	**0.11**	0.07	**0.13**	**0.53**	0.48	**0.53**
Oeste	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08	0.49	0.51	0.45

Los pacientes P-02 y P-03 de la habitación 01 presentan valores similares con variaciones en las orientaciones Norte y Sur a consecuencia de los ángulos de altura solar incidentes en la latitud de estudio. Dichos pacientes solo alcanzan a superar el CS 0.1 en las fechas de solsticio de invierno, equinoccio de primavera con orientación Sur y solsticio de verano con orientación Norte. Ver Figura 9.

El paciente P-06 de la habitación 02 supera los niveles objetivo de CS> 0.3 en todas las fechas y orientaciones estudiadas. Alcanzando niveles de CS 0.6 en orientación Norte durante el solsticio de verano y CS 0.5 en orientación Sur durante el equinoccio de primavera y solsticio de invierno. Las lecturas no indican valores inferiores a CS 0.4 en ninguna fecha de análisis.

Etapa II

4.3. Iluminancia Diurna útil (UDI)

En esta fase de la experimentación se utilizó la Useful Daylight Illuminance (UDI), una métrica de carácter dinámico empleada en el ámbito de la iluminación arquitectónica. Esta métrica es parte de las Dynamic Daylight Metrics (DDM) o métricas dinámicas de iluminación natural, las cuales permiten interpretar los valores horarios o subhorarios de las iluminancias obtenidas en los cálculos lumínicos anuales con base climática (Chi Pool, 2021).

La iluminancia Diurna útil (UDI-u) determinada para la autonomía circadiana de este estudio se establece entre los 200 lx hasta los 2000 lx durante al menos el 75% del tiempo anual. El cual se establece en 3 horas diarias matutinas, entre las 08:00 y 11:00 am, equivalentes a un total de 821.3 horas(h)/año.

Los cálculos se realizaron sobre el plano de trabajo h=1.10 m/NPT de cada habitación, en las diferentes orientaciones cardinales, de las cuales se presentan los resultados a fin de ser comparados con los resultados de la etapa I.

Tabla 5. Porcentajes de cumplimiento por orientación para cada habitación.

Niveles de Cumplimiento promedio (%)		
Orientación	**Habitación 1**	**Habitación 2**
Norte	10.19	**78.76**
Este	26.68	**73.53**
Sur	12.48	**79.34**
Oeste	9.76	**83.25**

De acuerdo con los valores registrados en la tabla 5, para las dos habitaciones a la altura del plano de trabajo se encuentra que la habitación 02 supera el valor objetivo del 75% del tiempo anual en 3 de las 4 orientaciones principales, quedando apenas por debajo en la orientación Este con un 73.53%.

Por el contrario, esta misma orientación en la habitación 01 registra sus mayores niveles de cumplimiento con 26.68% sin lograr alcanzar el objetivo en ninguna de las cuatro orientaciones.

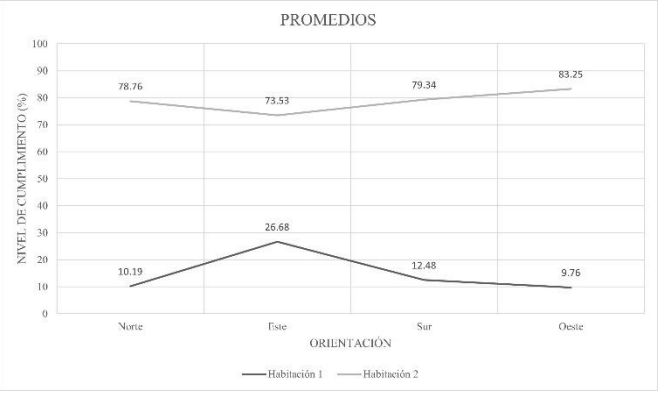


Figura 10. Porcentajes de cumplimiento por orientación para cada habitación.

En la figura 10 se observa la diferencia en los porcentajes de cumplimiento entre las dos habitaciones, con un valor objetivo mínimo de cumplimiento del 75%. Se evidencia gráficamente un comportamiento opuesto entre las dos habitaciones.

A continuación, se describen los resultados particulares de cada habitación:

Habitación 01

Los resultados obtenidos para la habitación 01 se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6. Porcentajes (%) Habitación 01.

Niveles de cumplimento (%) Habitación 01			
Orientación	**Por encima**	**Promedio**	**Por debajo**
Norte	7	10.19	93
Este	18	26.68	82
Sur	9.1	12.48	90.9
Oeste	8	9.76	92

De acuerdo con la información presentada en la tabla 6, se interpreta lo siguiente:

En la orientación Norte se obtuvo un 7% de tiempo con valores iguales o por encima del objetivo de 75% y un promedio de 10.19% equivalente a 111.6 h/año con niveles UDI-u entre 200 y 2000 lx.

En la orientación Este se obtuvo un 18% de tiempo con valores iguales o por encima del objetivo de 75% y un promedio de 26.68% equivalente a 292.1 h/año con niveles UDI-u entre 200 y 2000 lx.

En la orientación Sur se obtuvo un 9.1% de tiempo con valores iguales o por encima del objetivo de 75% y un promedio de 12.48% equivalente a 136.7 h/año con niveles UDI-u entre 200 y 2000 lx.

En la orientación Oeste se obtuvo un 8% de tiempo con valores iguales o por encima del objetivo de 75% y un promedio de 9.76% equivalente a 106.9 h/año con niveles UDI-u entre 200 y 2000 lx.

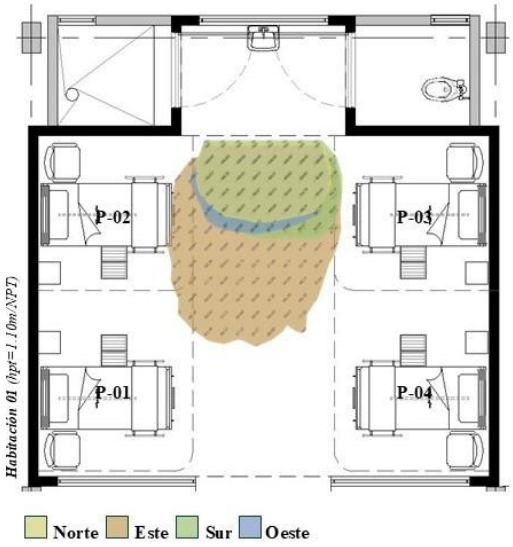


Figura 11. Áreas por encima del valor objetivo por orientación para la habitación 01.

Habitación 02

Los resultados obtenidos para la habitación 02 se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 7. Porcentajes (%) Habitación 02

Niveles de cumplimiento (%) Habitación 02			
Orientación	**Por encima**	**Promedio**	**Por debajo**
Norte	61.4	78.76	39
Este	66.8	73.53	33.2
Sur	70	79.34	30
Oeste	68.6	83.25	31.4

De acuerdo con la información presentada en la tabla 7, se interpreta lo siguiente:

En la orientación Norte se obtuvo un 61.4% de tiempo con valores iguales o por encima del objetivo de 75% y un promedio de 78.76% equivalente a 862.4 h/año con niveles UDI-u entre 200 y 2000 lx.

En la orientación Este se obtuvo un 66.8% de tiempo con valores iguales o por encima del objetivo de 75% y un promedio de 73.53% equivalente a 805.2 h/año con niveles UDI-u entre 200 y 2000 lx.

En la orientación Sur se obtuvo un 70% de tiempo con valores iguales o por encima del objetivo de 75% y un promedio de 79.34% equivalente a 868.8 h/año con niveles UDI-u entre 200 y 2000 lx.

En la orientación Oeste se obtuvo un 68.6% de tiempo con valores iguales o por encima del objetivo de 75% y un promedio de 83.25% equivalente a 911.6 h/año con niveles UDI-u entre 200 y 2000 lx.

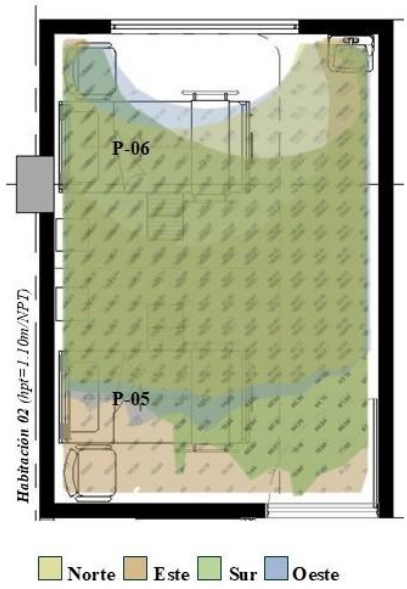


Figura 12. Áreas por encima del valor objetivo por orientación para la habitación 02.

5. Discusión de resultados

La Habitación 02 presentó un mejor desempeño que la Habitación 01 debido principalmente a su diseño arquitectónico, que permite una mayor eficiencia en la captación y distribución de la luz natural. A continuación, se describen cuatro aspectos clave para la consecución de los resultados obtenidos.

Proporción Ventana-Suelo (PVS)

Aunque ambas habitaciones utilizan ventanas del mismo tamaño, la habitación 02 goza de mayor porcentaje de área para iluminación natural (WFR=17.39%) en comparación con la habitación 01 (WFR= 8.12%). Esto derivado a una mayor proporción de ventana por metro cuadrado de superficie, lo que incrementa significativamente los niveles de iluminancia horizontal promedio; sin embargo, las dos habitaciones están por debajo del porcentaje mínimo normativo de 17.5% para locales habitables establecido en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

Ubicación de los Servicios Sanitarios

En la Habitación 01, los cuartos de inodoro y regadera se ubican en el muro de la fachada, lo que genera obstrucciones y limita la entrada de luz natural. En cambio, la configuración de la Habitación 02 permite un mayor aprovechamiento de la luz al no contar con estos elementos que bloquean la entrada principal de luz.

Proximidad de los pacientes a la ventana

El diseño de la Habitación 02 sitúa a los pacientes a distancias más cortas de la fuente de luz (entre 1.22 m y 3.84 m) en comparación con los pacientes más alejados de la Habitación 01 (5.79 m). Esta cercanía es fundamental para alcanzar niveles óptimos de Estímulo Circadiano (CS); por ejemplo, el paciente P-06 en la Habitación 02 superó los niveles objetivo en todas las fechas y orientaciones analizadas.

Autonomía Circadiana

Gracias a estas ventajas de diseño, la Habitación 02 logró superar el objetivo de autonomía circadiana (mantener niveles entre 200 y 2000 lx durante el 75% del tiempo matutino) en tres de las cuatro orientaciones principales. Por el contrario, la Habitación 01 no alcanzó este objetivo en ninguna orientación, lo que evidencia una deficiencia persistente en su desempeño lumínico.

6. Conclusiones

Los resultados encontrados en este estudio nos permiten sugerir que:

- El análisis estático realizado mediante simulación en el software DIALux nos permitió evaluar teóricamente el desempeño lumínico de la luz natural en dos habitaciones de encamados ubicadas en la Ciudad de México durante los días de solsticio y equinoccio de un año específico, en las 4 orientaciones cardinales.

- La iluminancia horizontal promedio de las habitaciones se utilizó como valor teórico para comparar los dos espacios de estudio. Sin embargo, este trabajo no tuvo como objetivo profundizar en el análisis de los niveles máximos y mínimos de iluminancia en cada espacio, aspecto que podría abordarse en futuras investigaciones para determinar los niveles de contraste que caracterizan un diseño de iluminación adecuado desde la percepción del usuario.

- La ubicación de los puntos de medición en el plano vertical al interior de las habitaciones de estudio nos permitió conocer la incidencia lumínica en la posición de los pacientes con relación a la fuente lateral de luz natural e identificar cómo la disposición de los elementos arquitectónicos puede influir de manera

sustancial, en correspondencia con su orientación y disponibilidad de luz natural en el sitio.

- El rango UDI-u utilizado entre 200 y 2000 lx (08:00am - 11:00am) permitió valorar la autonomía circadiana de las habitaciones de estudio bajo el iluminante CIE D65 de luz diurna promedio de manera ágil, permitiendo identificar las áreas de cumplimiento porcentual y zonas con valores superiores de iluminancia donde se pueden presentar fenómenos relacionados con deslumbramientos y ganancias excesivas de temperatura.

7. Abreviaciones y Acrónimos

ANSI (American National Standards Institute)
CS (Circadian Stimulus)
CIE (Comisión Internacional de Iluminación)
DD (Dynamic Daylighting)
DDM (Dynamic Daylight Metrics)
DIN (Instituto Alemán de Normalización)
Eh (Iluminancia Horizontal)
Ev (Iluminancia Vertical)
EPW (EnergyPlus Weather)
FLD (Factor de Luz Diurna)
LHRC (Light and Health Research Center)
NSQ (Núcleo Supraquiasmático)
IES (Iluminating Engineering Society)
IMSS (Instituto Mexicano del Seguro Social)
RD (Reflectancia Difusa)
SPD (Spectral Potencial Distribution)
UDI (Useful Daylight Illuminance)
WFR (Window to Floor Ratio)

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron Grammarly para la corrección gramatical y mejora de redacción. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Agradecimientos

Agradezco al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto.

De manera especial, expreso mi agradecimiento al Mtro. Alejandro Díaz-Infante, a la Dra. Cecilia Guadarrama y al Dr. Alberto Manuel Ángeles Castellanos por su acompañamiento, orientación y valiosas aportaciones a lo largo de la realización de esta investigación.

Asimismo, agradezco al Dr. Carlos Bigurra por su apoyo en la divulgación de este trabajo y por brindar la oportunidad de publicar los resultados preliminares de este estudio.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), actual Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Referencias

Acosta, I., Leslie, R. P., & Figueiro, M. G. (2017). Analysis of circadian stimulus allowed by daylighting in hospital rooms. Lighting Research & Technology, 49(1), 49–61. https://doi.org/10.1177/1477153515592948

Alzoubi HH, Al-Rqaibat SM. The effect of hospital design on indoor daylight quality in children section in King Abdullah University Hospital, Jordan. Sustainable Cities and Society 2015; 14: 449–455. http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2014.08.008.

Benedetti, F., Colombo, C., Barbini, B., Cmpori, E., Smeraldi, E. (2001) Morning sunlight reduces length of hospitalization in bipolar depression, Journal of Affective Disorders, 62 (3): 221-223. DOI :10.1016/s0165-0327(00)00149-x

Blume, C., Garbazza, C., & Spitschan, M. (2019). Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood. Somnologie, 23(3), 147–156. https://doi.org/10.1007/s11818-019-00215-x

Boyce, P., Hunter, C., & Howlett, O. (2003). The Benefits of Daylight through Windows

Brown, T. M., Brainard, G. C., Cajochen, C., Czeisler, C. A., Hanifin, J. P., Lockley, S. W., Lucas, R. J., Münch, M., O'Hagan, J. B., Peirson, S. N., Price, L. L. A., Roenneberg, T., Schlangen, L. J. M., Skene, D. J., Spitschan, M., Vetter, C., Zee, P. C., & Wright, K. P. (2022). Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. PLOS Biology, 20(3), e3001571. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571

Chi Pool, D. A. (2021). Iluminación natural a través de ventanas: Criterios de diseño para climas en México. Fundación Universidad de las Américas Puebla.

Houser, K. W., & Esposito, T. (2021). Human-Centric Lighting: Foundational Considerations and a Five-Step Design Process. Frontiers in Neurology, 12, 630553. https://doi.org/10.3389/FNEUR.2021.630553.

Knoop, M., Stefani, O., Bueno, B., Matusiak, B., Hobday, R., Wirz-Justice, A., Martiny, K., Kantermann, T., Aarts, M. P. J., Zemmouri, N., Appelt, S., & Norton, B. (2020). Daylight: What makes the difference? Lighting Research and Technology, 52(3). https://doi.org/10.1177/1477153519869758.

Konis, K., & Selkowitz, S. (2017). Effective daylighting with high-performance facades: Emerging design practices. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39463-3

Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2008, 30 de diciembre). Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. Diario Oficial de la Federación

Xiao, H., Cai, H., & Li, X. (2021). Non-visual effects of indoor light environment on humans: A review. Physiology & Behavior, 228, 113195. DOI: 10.1016/j.physbeh.2020.113195.