IMPACTO DE LA LUZ NATURAL SOBRE EL CICLO CIRCADIANO EN VIVIENDA CONSIDERANDO VARIACIONES DE POSTURA Y DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MOBILIARIO

Alejandra Jiménez Gómez (1); Alejandro Naranjo Ortiz (2); Jorge Hernán Salazar (3)
(1) Estudiante de Arquitectura, email: aljimenez@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Arquitectura, Calle 59 A N 63-20 Edificio 24. Medellín, Colombia.
(2) Estudiante de Arquitectura, email: alnaranjoo@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Arquitectura, Calle 59 A N 63-20 Edificio 24. Medellín, Colombia.
(3) Msc. Profesor Titular, email: jhsalaza@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Arquitectura, Calle 59 A N 63-20 Edificio 24. Medellín, Colombia.

RESUMEN
Los ciclos circadianos son responsables de la regulación del sueño, el metabolismo, la atención y el rendimiento de las personas en las distintas actividades que realizan. Estos ciclos dependen de estímulos lumínicos oportunos y suficientemente intensos, lo cual no siempre se puede lograr en un espacio interior, especialmente ahora en tiempos de pandemia cuando se permanece en casa la mayor parte de las horas diurnas. Los efectos no visuales de la iluminación natural se han estudiado en espacios laborales, pero en espacios domésticos la experiencia es menor. Esta investigación evalúa el rendimiento lumínico de una habitación de una vivienda oficial de bajo presupuesto en Colombia con el fin de valorar si el diseño típico actual permite alcanzar los niveles mínimos de Luz Melanópica Equivalente (EML) y generar un Estímulo Circadiano (CS) efectivo. Las simulaciones de iluminación circadiana se hicieron con el plug-in ALFA que opera sobre la plataforma Rhinoceros, pero no en un recinto vacío como regularmente se hace, sino considerando la presencia de los muebles que comúnmente componen una habitación y un cuerpo humano en las diferentes posturas y dirección de la mirada que inducen las diversas configuraciones de mobiliario consideradas. Alternativas en el posicionamiento de la ventana permitieron identificar combinaciones de ventana/orientación/mobiliario que permiten obtener una iluminación visualmente correcta con la adecuada estimulación del ciclo circadiano en las personas.

Palabras clave: Iluminación natural, ciclos circadianos, simulación computacional.

ABSTRACT
Circadian cycles are responsible for the regulation of sleep, metabolism, attention and performance of people in the different activities they perform. These cycles depend on timely and sufficiently intense light stimuli, which cannot always be achieved indoors, especially now in times of pandemic when most of the daytime hours are spent at home. The non-visual effects of natural lighting have been studied in workspaces, but in domestic spaces the experience is less. This research evaluates the light output of a room in a low-budget official home in Colombia in order to assess whether the current typical design allows reaching the minimum levels of Equivalent Melanopic Light (EML) and generating an effective Circadian Stimulus (CS). The circadian lighting simulations were made with the ALFA plug-in that operates on the Rhinoceros platform, but not in an empty room as is usually done but considering the presence of the furniture that commonly makes up a room and a human body in the rooms. different postures and direction of gaze induced by the various furniture configurations considered. Alternatives in the orientation of the facade and the positioning of the window made it possible to identify window / orientation / furniture combinations that allow obtaining a visually correct lighting with the adequate stimulation of the circadian cycle in people.

Keywords: Natural lighting, illuminance, circadian cycles, computational simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Los desórdenes metabólicos estacionales, así como los intentos por explicar los trastornos experimentados por personas cuya cotidianidad laboral les obliga a permanecer largas temporadas expuestos a unas condiciones lumínicamente adversas, ayudaron a comprender que los ojos no sólo sirven para ver. En los años 90 fue popular la hipótesis de que se trataba de receptores ubicados en la piel, en la exploración por identificar el mecanismo bioquímico que permite al cuerpo humano identificar las condiciones lumínicas a las que está expuesto. Hoy sabemos que en la retina hay conos y bastones, responsables de la visión fotópica y escotópica, respectivamente, pero que hay otras muchas células allí y entre ellas, un conjunto de fotorreceptores denominados "células ganglionares de la retina intrínsecamente fotosensibles" (ipRGCs por sus siglas en inglés). Estas células ganglionares también son fotorreceptores, células sensibles a la luz a pesar de que aportan poco o nada a la visión (Berson, 2003). Estas células ganglionares dan origen a los efectos no visuales de la iluminación, entre ellos el reflejo muscular que responde a la intensidad de la luz que llega al ojo y por el cual cambia el tamaño de la pupila y la contribución a la regulación de los ritmos circadianos.

La información que aportan al cerebro las células ganglionares participa del proceso de regulación del estado de alerta y los ritmos del sueño, hacen parte del patrimonio evolutivo del cuerpo humano y operan apropiadamente ante las condiciones ambientales de la vida al aire libre, concretamente luz natural en ciclos de exposición día-noche con los ritmos de alternancia propios a nuestro planeta. Pero la permanencia prolongada en ambientes interiores, al igual que las alteraciones de horario que permite la existencia de la luz artificial, han llegado acompañadas de la posibilidad de alejarse de este ritmo impuesto por la naturaleza. Ante una exposición a la fuente de luz inapropiada, o en los horarios en que no corresponde, estos fotorreceptores envían al cerebro señales inoportunas, con el riesgo de dañar la sincronía entre el reloj metabólico interno y el horario exterior. Las consecuencias pueden derivar en desajustes en el horario del sueño, aminoramiento en la calidad del descanso y bajo nivel de alerta, con la correspondiente pérdida del rendimiento intelectual (Shishegar y Boubekri, 2016). Al igual que otras situaciones insalubres asociadas a una exposición prolongada, el desorden metabólico puede derivar en enfermedades acumulativas, afectando la salud, la seguridad y la productividad en medios de transporte (CRC, 2020), en industrias (Figueiro, Sahin, Wood, y Plitnick, 2016), en el diseño de habitaciones hospitalarias (Acosta, Leslie, y Figueiro, 2017) en aulas escolares (Bellia, Pedace, y Barbato, 2013) y también en oficinas (KONIS, 2017).

Hace décadas que los efectos no visuales de la iluminación se comenzaron a reportar en la literatura médica. Los resultados demuestran que la exposición a una iluminación correcta, oportuna y suficientemente intensa deriva en una mayor vitalidad, una menor somnolencia diurna y promueve un mejor sueño nocturno. Pero el interés por este tema en los estudios de iluminación arquitectónica es mucho más reciente, considerando que la evaluación de las condiciones de iluminación natural desde un punto de vista circadiano es notoriamente diferente de la evaluación de la iluminación desde un punto de vista puramente visual, donde se analiza exclusivamente la iluminación sobre el plano horizontal (Brainard, 2008) y las características espectrales de la luz no son tenidas en consideración.

El desempeño laboral declina cuando el estado de alerta está aminorado; los tiempos de reacción se alargan, la capacidad de concentración se reduce y el riesgo a caer dormido a destiempo se vuelve un riesgo laboral importante. Por estos motivos el tema ha comenzado a ocupar la atención de quienes administran recurso humano en espacios productivos (Potočnik y Košir, 2020) y de las entidades encargadas de prevenir los riesgos laborales. El estilo de vida contemporáneo impone largas jornadas laborales, frecuentemente en ambientes lumínicamente inapropiados y como las edificaciones se diseñan y operan sin mayores reflexiones acerca del impacto metabólico que tendrán sobre sus ocupantes y como resultado, los desajustes circadianos son un asunto endémico en la sociedad actual (Harvey, 2016). A nivel nacional todavía no tenemos referentes de iniciativas legislativas al respecto, pero el elevado nivel de confinamiento característico de la sociedad post-Covid19 aportará matices de agravamiento a la situación, la cual obligará a estudiar con detalle la calidad lumínica ya no solo de los espacios laborales, sino también en los espacios domésticos. Hasta la fecha no ha sido posible encontrar ninguna publicación científica que vincule espacios domésticos y afectaciones al ritmo circadiano, a pesar de que ahora una buena parte de nuestra población estudiantil y laboral permanece justamente en espacios domésticos para realizar allí sus tareas cotidianas. Es pronto para tener evidencia epidemiológica acerca del tema, pero se trata de situaciones de iluminación insalubre que se pueden prevenir mediante un diseño mejor informado.

1.1. Estado del arte

Los efectos no visuales de la iluminación son un tema emergente acerca del cual se investiga y publica desde hace pocos años, pero con una frecuencia cada vez mayor. A pesar de ello continúan existiendo grandes

vacíos en temas metabólicos, bioquímicos y en especial, las implicaciones en la salud pública que se derivan de no haber considerado el fenómeno durante la fase de diseño arquitectónico. En este tipo de análisis muchas nuevas variables tienen que entrar en consideración, desde el rango de movimiento de la cabeza que permite una determinada tarea, las propiedades ópticas de los cristales y los materiales empleados en los acabados arquitectónicos. También es preciso considerar los posibles efectos adversos de un campo visual que, por asegurar un adecuado estímulo circadiano, podría estar sometiendo a las personas a unas condiciones de deslumbramiento prolongados.

A la fecha se sabe que la edad influye en los valores de umbral (Konis, 2017) dado que con el paso de los años la lente del ojo (cristalino) se va tornando amarilla y con ello menos luz llega a la retina. Por este motivo la intensidad lumínica suficiente para una persona joven no tiene relevancia funcional para una persona anciana. Sin embargo, aún no hay evidencia científica acerca de si existen grupos poblacionales de mayor riesgo ni se conocen los umbrales mínimos de exposición a la luz en intensidad, duración y frecuencia. Claramente faltan estudios epidemiológicos que ayuden a determinar los riesgos asociados a una permanencia prolongada y regular en espacios inapropiadamente iluminados desde el punto de vista circadiano. Faltan también parámetros objetivos que permitan discernir a partir de qué umbrales de exposición a la luz las personas comienzan a recibir el estímulo lumínico suficiente, así como los umbrales a partir de los cuales se comienza a generar una saturación del efecto, que es cuando un aumento en la exposición a la luz no vendrá acompañado de beneficio alguno.

Algunos autores (Figueiro, Nagare, y Price, 2018) recomiendan exposiciones lumínicas con la intensidad suficiente por lo menos durante una hora durante la primera parte del día, pero otros investigadores recomiendan valores notoriamente mayores. A la fecha no hay consenso acerca de los valores de iluminancia a la altura de los ojos y medidos sobre un plano vertical necesarios para asegurar un estímulo efectivo del ritmo circadiano. Algo similar sucede con las métricas para la valoración del fenómeno, entre ellas: Circadian Action Factor (CAF), Circadian Stimulus (CS), y Equivalent Melanopic Lux (EML) asunto acerca del cual tampoco hay concenso. En la actualidad se observa una postura cautelosa de parte de la comunidad científica al momento de determinar si un estímulo lumínico posee la suficiente intensidad, duración, horario y frecuencia (efecto de arrastre), pero a pesar de tantas cosas aún por conocer, el tema ya comienza a encontrar lugar en la industria de la construcción.

En octubre de 2014 fue fundado el International Well Building Institute (IWBI), una organización orientada a transformar la manera como las personas habitan las edificaciones y que dentro de sus programas ya ha incluido un estándar y procedimiento de certificación para el tema de la iluminación circadiana: “Circadian Lighting Features-WELL v1: Feature 54, WELL v2: Feature L03” (IWBI, 2020). En este estándar, el primero en su tipo en el mundo, se establecen los umbrales de intensidad lumínica mínima, así como los procedimientos de cálculo y medición para poder tramitar la correspondiente certificación. Como sería de esperar se trata de documentos en permanente perfeccionamiento y que manejan los umbrales de valoración con criterios de provisionalidad, los cuales serán ajustados a medida que la evidencia médica y científica aporte mayor comprensión acerca del tema.

Por su parte, desde el año 2019 está disponible una herramienta informática comercial denominada ALFA (Adaptive Lighting for Alertness) que hace posible la predicción y control de los efectos no visuales de la iluminación en espacios arquitectónicos. La herramienta aplica los valores de umbral y los procedimientos de cálculo y certificación definidos por el instituto Well y permite cuantificar e identificar visualmente los sectores de una edificación en los cuales, de presentarse una ocupación de largo plazo, se podría generar una interrupción o desfase del ritmo circadiano en sus ocupantes. La herramienta opera en la plataforma de Rhino y está soportada en un procedimiento para analizar y mapear las plantas arquitectónicas en términos de la frecuencia diaria del estímulo circadiano efectivo. Para ello se emplea la métrica “Equivalent Melanopic Lux” (EML) y una serie de suposiciones y simplificaciones que su autor claramente señala. Para la fecha existen herramientas gratuitas como Lark y Circadian Design Assist Tool (CDAT) (KONIS, 2019), adicionales al software comercial de ALFA, sería interesante comparar los criterios de simplificación empleados por Konis con otras aproximaciones metodológicas, pero a la fecha esta labor sigue pendiente. Búsquedas en los foros de ayuda de la plataforma colaborativa de Rhino no arrojan todavía ningún algoritmo de código abierto con un propósito similar.

Hay mucha discusión en torno al EML, métrica espacial (area based) que reclama la definición de una métrica complementaria que sería de carácter temporal con base diaria, semanal o mensual. Pero datos acumulados anuales, similares a un UDI, están descartados de entrada porque las métricas acumulativas no resultan apropiadas para estudiar un efecto que por la mañana es deseable, pero por la noche no. Además, el metabolismo humano posee un efecto de arrastre, que permite que la sincronización del ritmo circadiano no se pierda a pesar de que una persona permanezca en recintos interiores, incluso expuesto a la luz artificial,

con cierta periodicidad todavía insuficientemente estudiada. Es un tema que reclama mucho refinamiento e investigación adicional y por esta razón aquí se utiliza como punto de partida una métrica de base diaria para comenzar a discutir acerca de los estímulos circadianos en la vivienda en Colombia. En un futuro cercano es seguro que valorar mejor aquellas zonas donde la disponibilidad de un estímulo circadiano efectivo es más frecuente obligará a estudiar el impacto no visual de los diferentes vidrios, de los acabados interiores, de las manchas de incursión solar sobre las paredes y por supuesto, a estudiar los campos visuales con un enfoque complementario a los clásicos estudios de comodidad visual que hoy se dedican exclusivamente a prevenir el deslumbramiento.

Clasificar los espacios interiores en términos de su efectividad circadiana permite hoy día diferenciar las zonas efectivas (ZE) para mantener el ciclo circadiano de aquellas otras zonas biológicamente oscuras (ZO) donde la frecuencia del estímulo es baja, las mismas que los diseñadores deberían minimizar durante el proceso de diseño. Al respecto, es oportuno resaltar que es posible satisfacer los umbrales de iluminancia requeridos por la norma y sin embargo que esa zona esté incorrectamente iluminada desde el punto de vista circadiano. Las conversiones entre iluminancia fotópica (visual) y circadiana tienen una dependencia espectral y por este motivo es imposible emplear un único factor de conversión. Basándose en el color del cielo o de las superficies circundantes habrá ocasiones en que haya más Lux que EML y en otros momentos podrá suceder lo contrario. Lo cierto es que nuestros ojos no nos permiten discernir acerca de la calidad circadiana de un recinto porque el tipo de luz que estimula y mantiene en sincronía el ritmo circadiano es muy diferente a la que requerimos para ver.

2. OBJETIVO

Valorar el rendimiento lumínico y circadiano en la habitación de una vivienda oficial típica de bajo presupuesto en Colombia, considerando la presencia de muebles y un cuerpo humano en las diferentes posturas y dirección de la mirada que induce cada configuración de mobiliario, variando la posición de su ventana para identificar las combinaciones que permiten obtener una iluminación visual y metabólicamente correcta.

3. MÉTODO

Se aplicó el esquema de análisis propuesto por Andersen (Andersen, Mardaljevic, y Lockley, 2012), quien agrupa los análisis circadianos en franjas horarias para valorar el efecto de la luz de una forma continuada. Anteriormente Konis (2019) había señalado que una métrica diaria del tipo DA, por ejemplo, puede obedecer a una colección de instantes dispersos a lo largo del día y que dicha cifra estaría indicando un estímulo circadiano aparentemente suficiente, pero intermitente y/o inoportuno. Atendiendo a ello, Andersen propone hacer simulaciones por franjas horarias, tres por día, fraccionando la jornada diurna en tres intervalos de operación: de 6:00 a 10:00 a.m., correspondiente al intervalo en que es más importante el estímulo circadiano y que la literatura médica denomina normalmente el “circadian resetting” (Choi, 2020). Una segunda franja horaria corresponde al intervalo comprendido entre las 10:00 y las 18:00, que es cuando se mantienen los efectos benéficos de alerta derivados de la iluminación natural. Andersen propone una tercera franja entre las 18:00 y las 6:00am del día siguiente, con el propósito de estudiar el efecto circadiano de la luz artificial en horarios nocturnos. Pero esta tercera franja aquí no fue calculada porque en este estudio sólo interesaba considerar los efectos no visuales de la luz natural.

Todas las simulaciones se realizaron con el plugin ALFA en la plataforma Rhinoceros 5. El modelo empleado para realizar el estudio corresponde a la alcoba típica de una torre de apartamentos de vivienda social en Colombia. Las dimensiones de tal habitación son: 2.75m de ancho sobre la fachada, 3.0m de profundidad y 2.30m de altura libre. En el modelo se ubicó una ventana rectangular de 1.15m de ancho y 1.30m de altura con un sillar a una altura de 0.90m sobre el piso y sin ningún tipo de elemento exterior que pudiera proyectar sombra sobre la ventana.

Se decidió analizar dos posibles ubicaciones de la ventana: centrada en el muro de fachada y adyacente a la pared interior que tiene visibilidad hacia el sur, con el propósito de estudiar el posible efecto benéfico que se derivaría de contar con una incursión solar sobre una de las paredes de la habitación, tal como se presenta en la Figura 1. En ambos casos se utilizó un vidrio claro de transmitancia 0.88% y se mantuvieron las tonalidades de las paredes y techo de la habitación en un color claro, mientras que para el piso se utilizó un tono gris medio.

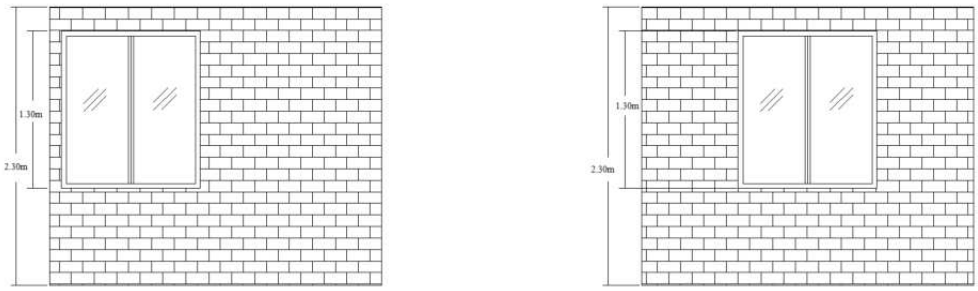

Figura 1 - Dimensiones de los modelos empleados para realizar las simulaciones de iluminancia y de rendimiento circadiano. Izquierda, ventana centrada en el muro de fachada. Derecha, ventana adyacente a la pared que mira al sur.

Las simulaciones de iluminancia y la mayor parte de los trabajos en los que se reportan resultados de simulaciones circadianas se realizan sobre mallas de puntos distribuidas a lo largo y ancho del recinto estudiado. Es una práctica apropiada para espacios de oficina, muy especialmente si se trata de plantas abiertas, pero en vivienda las configuraciones de mobiliario son mucho menos variadas. La presencia de una puerta en un recinto con un mueble tan grande como la cama ofrece un conjunto de configuraciones bastante restringido y por esta razón en esta investigación no se modelaron mallas de puntos ni se asumió un plano de trabajo único sobre el cual hacer todos los cálculos de iluminancia, sino que las simulaciones consideraron la presencia de los tres muebles básicos que se pueden encontrar en una habitación: cama, silla y escritorio. Esto permitió incluir el efecto de la absorción de la luz natural en el interior de la habitación, pero, sobre todo, establecer una línea de visión inducida por la posición y tipo de mueble.

Se eligieron las dos configuraciones de mobiliario más probables y para cada una de ellas se simularon dos ubicaciones del cuerpo: sentado sobre la cama o sentado en la silla frente al escritorio. Para las posturas A, que corresponden a una persona sentada sobre la cama, se consideró que el plano de trabajo está a una altura de 0.76m sobre el piso, lo que equivalente a trabajar apoyándose sobre las piernas. Por su parte, la postura B corresponde a una persona sentada frente a un escritorio convencional, para este tercer punto los cálculos de iluminancia fueron hechos para un punto ubicado en la mitad del escritorio a dos alturas, 1.2m y 0.76m sobre el nivel del piso. (Figura 2).

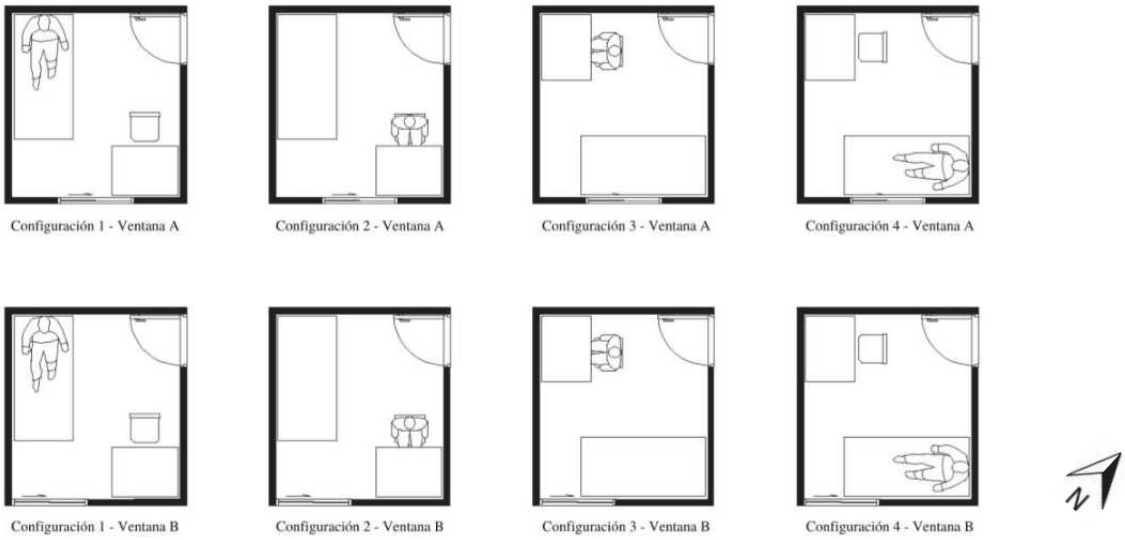

Figura 2 - Dimensiones y ubicación del mobiliario empleado en las simulaciones. Arriba, configuración de ventana A, abajo, configuración de ventana B.

Las simulaciones de iluminación circadiana se realizan sobre un plano vertical, en un punto a la altura de los ojos y mirando hacia el frente, dependiendo de la orientación del cuerpo. Para cada una de las posturas en consideración A y B, se calculó la correspondiente posición de los ojos, teniendo en consideración una persona de sexo masculino de percentil p50 de acuerdo con la base de datos de la población laboral colombiana (Estrada, Camacho, Restrepo, y Parra, 1998). Se decidió trabajar a partir de la altura de los ojos de un varón porque teniendo una talla ligeramente mayor que las mujeres, tienen los ojos un poco más altos, lo que corresponde a la situación más desfavorable desde el punto de vista circadiano porque la visibilidad hacia el cielo disminuye a medida que aumenta la altura a la que se encuentran los ojos.

Para realizar una simulación circadiana se requiere calcular la distribución espectral de la energía lumínica (Spectral power distribution SPD) y por esta razón ya no basta considerar un coeficiente de reflectancia único para cada material, sino que se debe emplear un listado de coeficientes de reflectancia para cada una de las 81 franjas espectrales comprendidas en el rango entre 380 y 780 nm con las que ALFA opera. Los materiales empleados en ALFA para simular paredes y techo fueron: white painted room walls, and White painted room ceiling, para el piso: light grey painted floor. Para el mobiliario se seleccionaron tonos ligeramente más oscuros que los de las paredes, y en las ventanas se empleó el material: single plane clear 6mm TVis 88%.

El modelo, localizado en latitud 6.25°N, se simuló en el rango comprendido entre las 7:00 y las 17:00 horas para enero 11 y junio 21 con el propósito de valorar el rendimiento lumínico y circadiano en la habitación en sus dos condiciones extremas: con y sin incursión solar. Se realizaron simulaciones para la orientación Este. Cada configuración simulada da como resultado dos datos por punto (una iluminancia sobre el plano de trabajo en lux y un estímulo circadiano efectivo en EML, tomando como límite mínimo 314 de acuerdo con (Giraldo, Arango, y Herreño, 2020) sobre un plano vertical a la altura de los ojos y mirando al frente). Como se evaluaron dos puntos se obtuvieron 4 datos por cada hora para cada una de las 2 fechas, 2 configuraciones de mobiliario y 2 posiciones de ventana que fueron simuladas. Los resultados horarios fueron agrupados en el periodo de la mañana y el de la tarde. El resumen de las alternativas simuladas se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros y alternativas simuladas.

PARÁMETRO	**ALTERNATIVAS**	**TOTAL**
ORIENTACIÓN	Este	1
FECHAS	Enero 11	2
	Junio 21	
VENTANA	Centrada (A)	2
	Lateral (B)	
CONFIGURACIONES	1	4
	2	
	3	
	4	
UBICACIÓN DEL CUERPO	A	2
	B	
PUNTOS	Cama	2
	Escritorio	
GRUPO DE HORARIOS	AM (7:00 a 12:00)	2
	PM (12:00 a 17:00)	

4. RESULTADOS

En esta investigación se agruparon los resultados de acuerdo con la configuración del mobiliario, posición de la ventana y la fecha de simulación, adicional con las horas establecidas (Tabla 2). Este mismo procedimiento se aplicó para el resto de las configuraciones de mobiliario, en cada una de las dos posiciones de la ventana y con una única orientación al este. (Tabla 3).

Tabla 3. Evolución horaria de la iluminancia sobre el plano de trabajo (lux) y el correspondiente estímulo circadiano calculado a la altura de los ojos (EML) para dos puntos de análisis com la configuración de mobiliario 1 y la ventana A ubicada sobre el punto medio de la pared con fecha Enero 11.

Configuración 1	Ventana A Enero 11			
	Escritorio		Cama	
Hora	Lux workplane	EML view	Lux workplane	EML view
7:00 AM	3314.103	2582.037	3808.863	3963.973
8:00 AM	5803.416	6828.783	7623.944	9077.833
9:00 AM	4699.766	5768.69	7244.139	6256.616
10:00 AM	4906.131	6312.347	6850.71	5019.764
11:00 AM	5198.498	5576.132	4511.058	4469.867
12:00 PM	4927.371	4219.415	3897.038	4039.469
1:00 PM	38871.42	3712.221	3400.214	3386.744
2:00 PM	2811.607	2889.049	2355.906	2620.094
3:00 PM	2268.429	2359.751	2672.078	2846.99
4:00 PM	1568.71	1793.614	1947.129	1749.872
5:00 PM	1064.302	1126.417	1204.066	1159.159

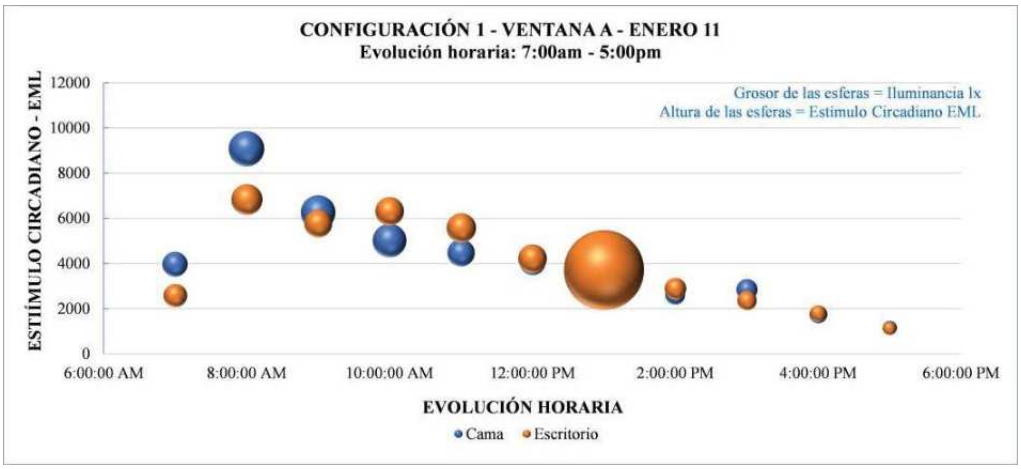

Figura 3 - Gráfica de los datos correspondientes a la Tabla 1. Configuración 1 con ventana A centrada en la pared. El estímulo circadiano y la iluminancia superan el nivel de iluminancia establecido por la norma nacional (500lx) y simultáneamente superan el minimo estímulo circadiano recomendable por hora.

Los rangos de Estímulo Circadiano por el total de los datos son altos, están entre los 900 EML y algunos incluso llegan los 12000 EML, se pueden notar más la variación que tienen a lo largo del día cuando se comparan en evoluciones horarias entre las 7:00 – 10:00 am y entres las 10:00 y las 17:00 cómo se muestra en la figura 4.

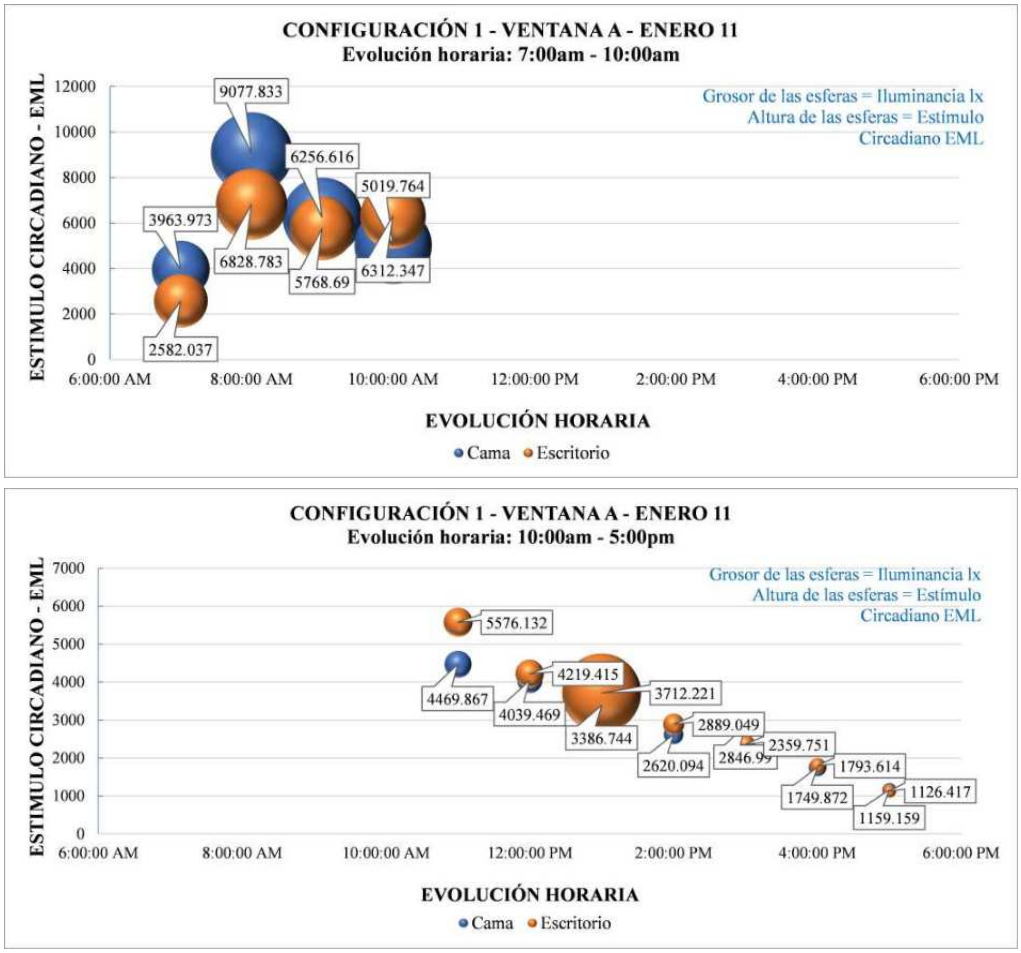

Figura 4 - Mismos datos del caso presentado en Tabla 1, pero ahora segmentados por franjas horarias. Arriba intevalo matutino comprendido entre las 7:00 y las 10:00am. Abajo intervalo entre las 10:00 y las 17:00.

Las variaciones entre las fechas muestran cambios importantes cuando estamos evaluando la ventana A, los factores de iluminancia y estímulo circadiano evolucionan de una forma más constante y los valores son semejantes entre ambas partes, se puede decir que se tiene un buen estímulo circadiano a la vez que se tiene una buena iluminancia tanto para el punto de la cama como para el punto ubicado en el escritorio, cómo se muestra en la figura 5.

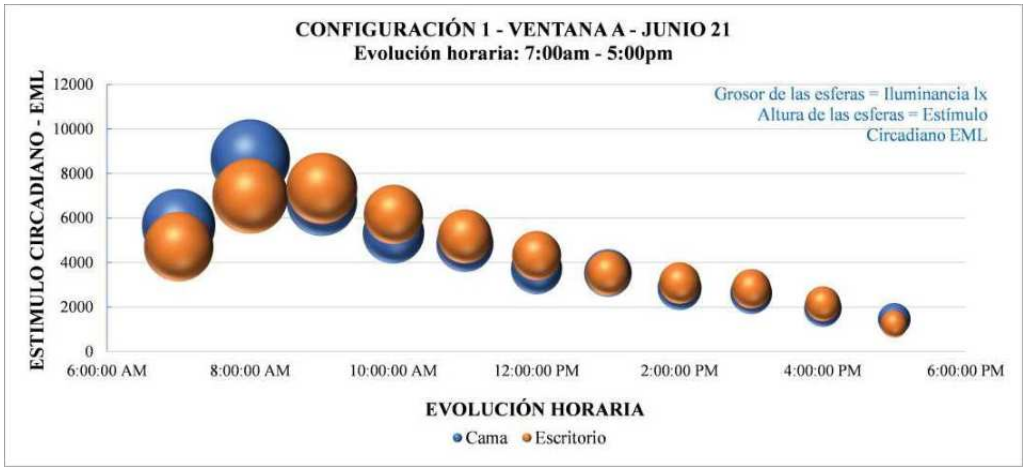

Figura 5. Configuración 1 con ventana A centrada en la pared, para Junio 21. Muestra de que el crecimiento del estímulo circadiano y la iluminancia crecen constante y en intervalos similares a lo largo del día.

Cuando la evolución horaria se muestran en los intervalos entre las 7:00 – 10:00 y 10:00 – 17:00, podemos notar que los valores más altos presentes en los puntos evaluados se dan en el intervalo matutino, al contrario del intervalo comprendido entres las 10:00 y las 17:00 donde el estímulo circadiano alcanza los 6000 EML y la iluminancia no sobrepasa los 5000 lx. Esto da muestra de cómo cuando los valores comienzan a decrecer de esta forma, en el caso del estímulo circadiano, la persona va entrando en un estado de "reposo", es decir, los valores ya no están ejerciendo el incentivo de alerta, sino del sueño y el descanso. Figura 6.

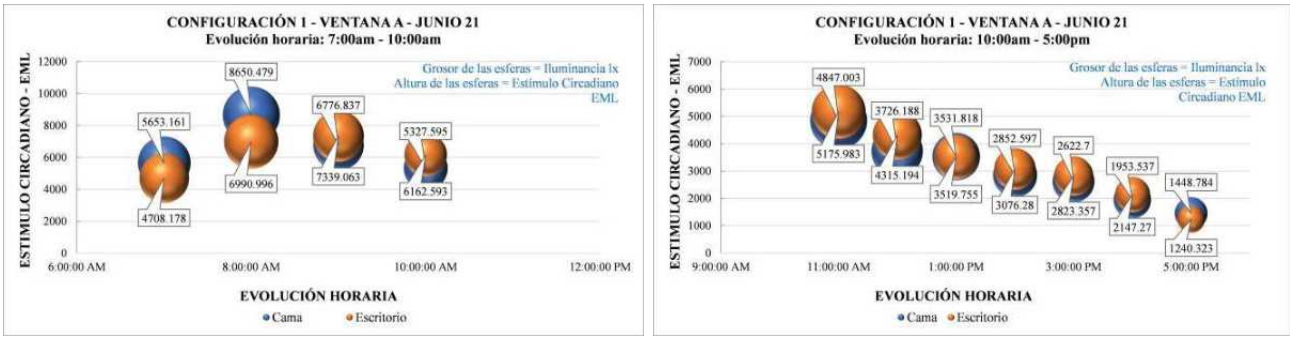

Figura 6. Configuración 1 con ventana A centrada en la pared. Segmentados por dos franjas horarias: arriba el intervalo matutino comprendido entre las 7:00 y las 10:00, abajo el intervalo comprendido entre las 10:00 y las 17:00.

Las diferencias en valores tanto estímulo circadiano como de iluminancia, se dan en la configuración 4 con ventana A centrada en la pared y comparando las dos fechas, enero 11 y junio 21. Los valores más altos tanto de EML como de lx, se dan en enero 11, donde el estímulo circadiano alcanza valores de hasta 29000 EML y la iluminancia 61000 lx en el punto ubicado en la cama con ubicación del cuerpo A, es decir, sentado en la cama, y dichos valores corresponden a la hora 12:00, es decir una hora en la que la posición del cuerpo respecto a la ventana está teniendo una mayor exposición lumínica. Los valores de la fecha de junio 21, por el contrario, en estímulo circadiano no sobrepasan los 14000 EML y la iluminancia los 10000 lx, a pesar de tener la misma posición del cuerpo en el espacio y la ventana, son iguales. Figura 7.

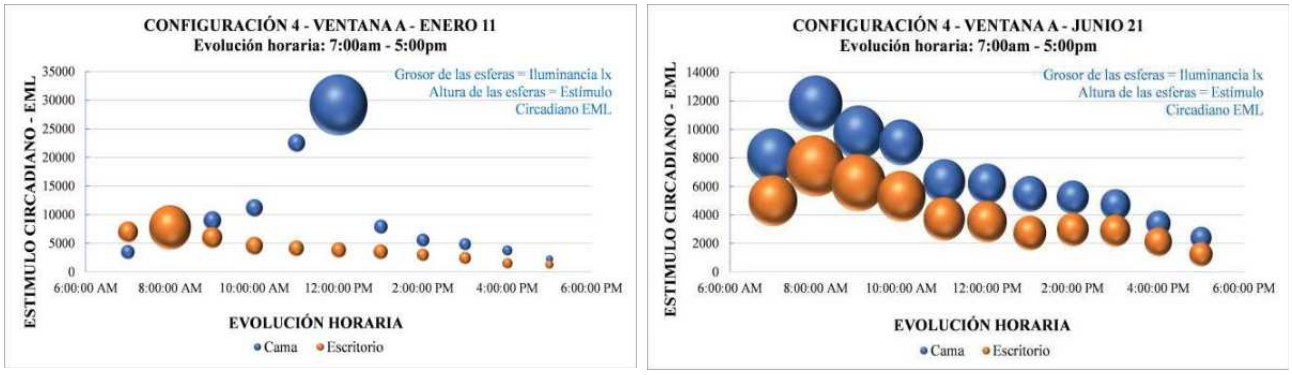

Figura 7. Configuración 4 con ventana A centrada en la pared. Evolución horaria entre las 7:00 y las 17:00. Izquierda con fecha de enero y derecha con fecha de junio.

El factor de la incursión solar o no es un aspecto que se hace bastante notorio y más a la hora de comparar las distintas configuraciones respecto a las fechas. En la ventana B ubicada en el lateral izquierdo, los valores para junio están entre los 10000 EML y los 10000 lx, mientras que para enero nuevamente hay valores entre los 35000 EML y los casi 70000 lx. Además, se puede notar que las configuraciones 3-4 no son tan recomendables cuando se tiene la idea de que en este espacio no solo se descansa sino que también se trabaja, estudia, etc. Las condiciones que responden mejor a las variables son las dadas en las configuraciones 1 y 2. Figura 8.

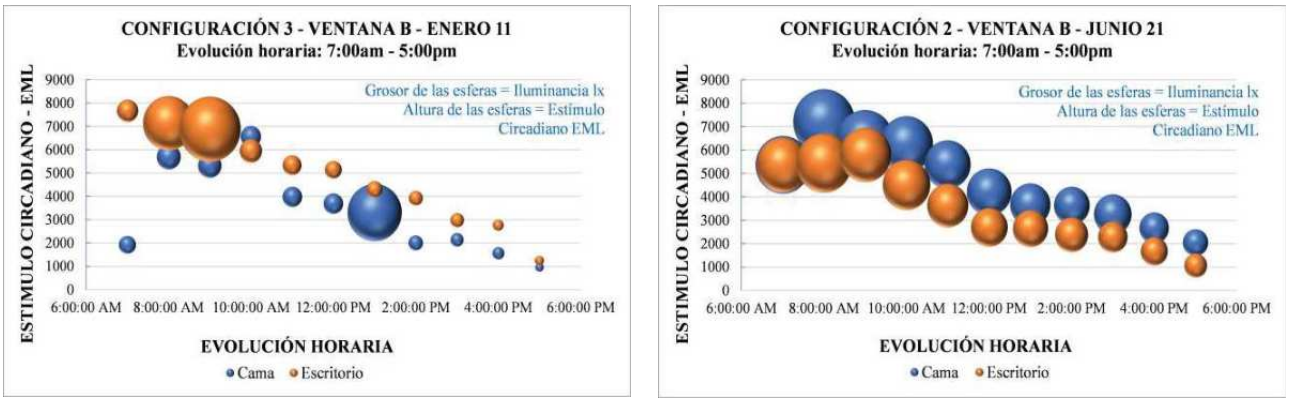

Figura 8. Comparación entre fechas de simulación y configuraciones. A la izquierda configuración 3, con ventana B ubicada en el lateral izquierdo y a la derecha configuración 2, con ventana B. Evolución horaria entre las 7:00 y las 17:00.

A pesar de que los puntos de evaluación son los mismos, las evaluaciones realizadas en las dos posiciones de las ventanas A y B, muestran que la ventana B presenta una mayor constancia en el rango de los valores, a pesar de que en algunas configuraciones como la 3 – 4 se arrojan valores altos, en esta posición los valores entre 10000 EML y 10000 lx se mantiene más constantes a lo largo de las simulaciones. Figura 9.

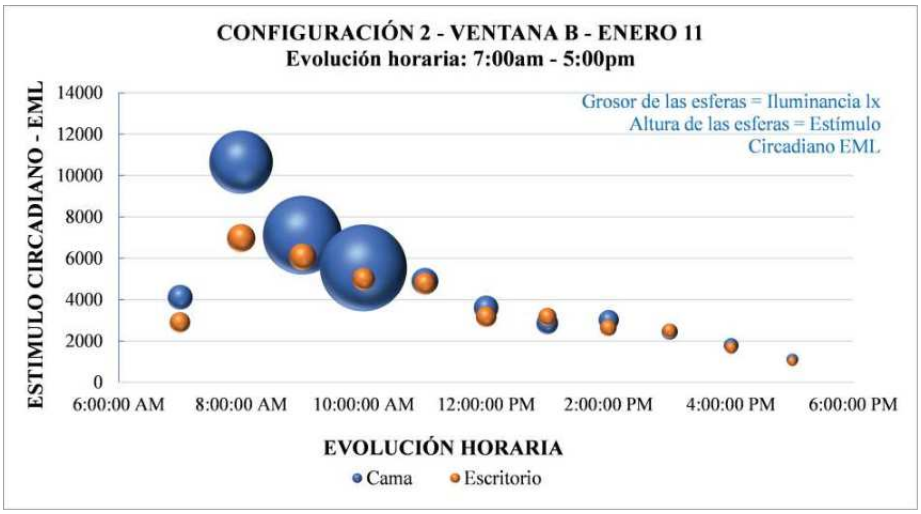

Figura 9. Configuración 2 con ventana B, para enero 11. Evolución horaria entre las 7:00 – 17:00. Se resalta el rango entre 10000 EML y 10000 lx.

Se destaca dentro de todos los resultados, que las configuraciones 1 – 2 muestran más congruencia con los resultados y rangos obtenidos, a pesar de que son muy pocos los puntos que en las configuraciones 3 – 4 muestran diferencia en el rango de valores. Además, la ventana B, mostró un mejor rendimiento respecto a la iluminancia y al estímulo circadiano al interior del espacio evaluado.

5. CONCLUSIONES

Se debe considerar que el espacio evaluado es de dimensiones pequeñas, equivalente al tamaño estándar usado para habitaciones de vivienda en altura en Colombia, si se estudiara un espacio distinto de la vivienda en el cuál la condición de profundidad es mayor y con otro tipo de mobiliario, es posible que se obtenga una diferencia considerable en los resultados por el tamaño del espacio y, además, dependen de la posición del observador en el espacio.

Se hace necesario desde la parte de la investigación tener información de análisis a profundidad sobre los níveles mínimos y máximos adecuados para el Estímulo Circadiano, esto permitiría tener un análisis de los espacios y viviendas más preciso y por tanto se optimizaría la disponibilidad natural de la iluminación enfocados no solo en la respuesta a un buen Estímulo Circadiano sino también al cantidad de luz necesaria para el desarrollo de las actividades que allí se realicen.

La realización de este tipo de simulaciones son significantes para entender cómo el diseño del espacio en conjunto con la iluminación que se tiene en estos afectan a las personas que lo habitan, dado que el rendimiento, sueño, digestión y alerta se puede ver afectado. La herramienta ALFA se vuelve muy importante porque es amigable y ayuda a la compresión de estos fénomenos sobre el espacio y las personas. De igual manera al ser un software tan nuevo, aún tiene falencias y esto hace necesario que se exploren otro tipo de herramientas como Lark y Circadian Design Assist Tool (CDAT) para corrobar y comparar los rangos de los resultados entregados por ALFA.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

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

ALFA, **Adaptative Lighting for Alertness** Software. https://www.solemma.com/alfa

ANDERSEN, M, J MARDALJEVIC, AND SW LOCKLEY. "A Framework for Predicting the Non-Visual Effects of Daylight – Part I: Photobiology- Based Model." ***Lighting Research & Technology*** 44, no. 1 (March 2012): 37–53.

BELLIA, F. FRAGLIASSO, Y E. STEFANIZZI. Daylit offices: A comparison between measured parameters assessing light quality and users' opinions, **Building and Environment,** v.113, pp. 92–106, 2017.

BELLIA, L., PEDACE, A., & BARBATO, G. Lighting in educational environments: An example of a complete analysis of the effects of daylight and electric light on occupants. ***Building and Environment***, *68*, 50–65. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.005. 2013.

BERSON, D. M. Strange vision: Ganglion cells as circadian photoreceptors. ***Trends in Neurosciences***, *26*(6), 314–320. https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00130-9. 2003.

BRAINARD GC, SLINEY D, HANIFIN JP, GLICKMAN G, BYRNE B, GREESON JM, JASSER S, GERNER E, ROLLAG MD. Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420-nm) light. **Journal of Biological Rhythms**, 23: 379–386, 2008.

CHOI Y, CHO J, NO MH, HEO JW, CHO EJ, CHANG E, PARK DH, KANG JH, KWAK HB. Re-Setting the Circadian Clock Using Exercise Against Sarcopenia. Int J Mol Sci. 2020 Apr 28;21(9):3106. Doi: 10.3390/ijms21093106. PMID: 32354038; PMCID: PMC7247148.

CRC, **Cooperative Research Centre**. Australia. Disponible en Web: https://www.alertnesscrc.com/ 2020.

ESTRADA M., J., CAMACHO P., J., RESTREPO C., M., & PARRA M., C. Parámetros antropométricos de la población laboral colombiana 1995 (Acopla95). ***Rev. Fac. Nac. Salud Pública***, *15*(2), 112–139.1998.

FIGUEIRO, M. G. R. NAGARE, AND L. L. A. PRICE, Non-visual effects of light: How to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness, **Lighting Research Technology**, vol. 50, no. 1, pp. 38–62, 2018, doi: 10.1177/1477153517721598.

FIGUEIRO M, SAHIN L, WOOD B, PLITNICK B. Light at night and measures of alertness and performance: implications for shift workers**.** ***Biological Research for Nursing*** 18(1) 90-100. 2016.

GIRALDO, V., ARANGO, L., & HERREÑO, E. ***ACE Architecture , City and Environment*** *Valoración del desempeño lumínico de puestos de trabajo a partir de los efectos no visuales de la luz natural sobre la ACE Architecture , City and Environment Assessment of light performance in work environments , b*. *15*(43), 1–14. 2020.

HARVEY, A. G. A Transdiagnostic Intervention for Youth Sleep and Circadian Problems. *Cognitive and Behavioral Practice*, *23*(3), 341–355. https://doi.org/10.1016/j.cbpra.2015.06.001. 2016.

HYDRASHARE, Rhinoceros Forums. http://hydrashare.github.io/hydra. Abril, 2021.

IWBI, **Well Building Standard**, 2014.

IWB**, Well Building Standard**, Feature 54: Circadian Lighting Design, 2020.

K. KONIS. A novel circadian daylight metric for building design and evaluation, **Building and Environment**, vol. 113, pp. 22–38, feb 2017.

K. KONIS. A circadian design assist tool to evaluate daylight access in buildings for human biological lighting needs, **Solar Energy**, vol. 191, September, pp. 449–458, 2019.

PECHACEK, C.S. M. ANDERSEN AND S. W. LOCKLEY, Preliminary Method for Prospective Analysis of the Circadian Efficacy of (Day)Light with Applications to Healthcare Architecture, **LEUKOS**, 5, 1-26, 2008.

POTOČNIK, J., & KOŠIR, M. Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office. ***Building and Environment***, *171*(December 2019). https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.10662. 2020.

SHISHEGAR, N., & BOUBEKRI, M. Natural Light and Productivity: Analyzing the Impacts of Daylighting on Students' and Workers' Health and Alertness. ***International Journal of Advances in Chemical Engineering and Biological Sciences***, *3*(1). https://doi.org/10.15242/ijacebs.ae0416104. 2016.