

SUFICIENCIA LUMÍNICA DE AMBIENTES INTERIORES EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Recibido 30/08/2022
Aceptado 07/12/2022

DAYLIGHT SUFFICIENCY OF INDOOR ENVIRONMENTS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

SUFICIÊNCIA LUMÍNICA DE AMBIENTES INTERNOS EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA

Lucas Arango-Díaz

Doctor en Arquitectura y Urbanismo
Investigador de la Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-3638-3379>
lucas.arango@usbmed.edu.co

María Alejandra Garavito-Posada

Arquitecta
Estudiante de Máster en Bioclimática, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-5336-4292>
maria.garavito@tau.usbmed.edu.co

Juan Sebastian Calle-Medina

Conservador-Restaurador de Bienes Muebles
Estudiante de Máster en Bioclimática, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-3445-4134>
juan.calle212@tau.usbmed.edu.co

Adriana Marcela Murcia-Cardona

Arquitecta Interiorista
Estudiante de Máster en Bioclimática, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-7969-2542>
adriana.murcia@tau.usbmed.edu.co

Olga Lucia Montoya-Flórez

Doctora en Arquitectura y Urbanismo
Investigadora de la Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Cali, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-2814-0382>
olmontoy@usbcali.edu.co

Sebastián Pinto-Quintero

Magíster en Arquitectura y Urbanismo
Investigador de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de Manizales, Manizales, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-3189-7140>
spinto@ucm.edu.co



RESUMEN

El desempeño bioclimático de edificaciones en escenarios de cambio climático ha sido ampliamente estudiado desde la perspectiva termo-energética, pero escasamente abordado desde la suficiencia lumínica interior. Esta escasez está relacionada con la invariabilidad de los datos de radiación en los archivos climáticos disponibles de escenarios futuros. La presente investigación propone identificar los impactos que, sobre la suficiencia lumínica, tendría la variabilidad de datos de radiación en archivos climáticos de escenarios futuros. La metodología incluye la adaptación de archivos climáticos disponibles y la realización de simulaciones computacionales de luz natural para espacios de trabajo hipotéticos localizados en Medellín, Colombia. Los resultados evidencian diferencias en la métrica Spatial Daylight Autonomy – SDA de hasta 18% en diversos escenarios futuros. Como conclusión, se plantea la necesidad de afinar las predicciones sobre la disponibilidad lumínica exterior que permitan optimizar las evaluaciones de desempeño lumínico en escenarios de cambio climático.

Palabras clave

iluminación natural, cambio climático, radiación solar.

ABSTRACT

The bioclimatic performance of buildings under climate change scenarios has been extensively studied from a thermo-energy perspective but hardly studied at all from the perspective of indoor daylight sufficiency. This shortcoming is related to the invariability of radiation data in the available weather files of future scenarios. This research proposes identifying the impacts that the variability of radiation data in weather files of future scenarios would have on daylight sufficiency in indoor spaces. The methodology includes the adaptation of available weather files and the running of daylight simulations for hypothetical workspaces located in Medellín, Colombia. The results show differences in the Spatial Daylight Autonomy – SDA metric of up to 18% in different future scenarios. In conclusion, the need is outlined to refine predictions of outdoor daylight availability that allow improving daylight performance evaluations under climate change scenarios.

Keywords

daylight, climate change, solar radiation

RESUMO

O desempenho bioclimático de edifícios em cenários de mudança climática tem sido amplamente estudado sob a perspectiva termoenergética, mas dificilmente abordado sob a perspectiva da suficiência lumínica interior. Essa escassez está relacionada à invariabilidade dos dados de radiação nos arquivos climáticos disponíveis de cenários futuros. Esta pesquisa teve como objetivo identificar os impactos que a variabilidade dos dados de radiação em arquivos climáticos de cenários futuros teria na suficiência lumínica em espaços interiores. A metodologia incluiu a adaptação de arquivos climáticos disponíveis e a realização de simulações computacionais de luz natural para espaços de trabalho hipotéticos localizados em Medellín, Colômbia. Os resultados mostram diferenças na métrica Spatial Daylight Autonomy – SDA de até 18% em diferentes cenários futuros. Conclui-se que é necessário refinar as previsões de disponibilidade lumínica exterior para que permitam melhorar as avaliações de desempenho lumínico em cenários de mudanças climáticas.

Palavras-chave

iluminação natural, mudanças climáticas, radiação solar

INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta las variaciones del clima producidas por la influencia humana han adquirido un ritmo sin precedentes. Desde 1970 la temperatura de la atmósfera ha aumentado más rápido que en cualquier otro periodo de 50 años, en los últimos 2000 años (IPCC AR6 WG I, 2021). En el más reciente reporte sobre cambio climático (AR6), se llama la atención sobre la necesidad de extremar medidas para garantizar un aumento de la temperatura por debajo de 1.5°C, tal como fue estimado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, COP21 (ONU, 2015).

Para lograr lo anterior, se requeriría reducir de manera inmediata las emisiones de gases efecto invernadero (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). Rodríguez (2010) ya había planteado que, en caso de que los combustibles fósiles siguieran siendo la principal fuente de energía por lo menos hasta 2030, se generarían aumentos en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que favorecería notablemente el calentamiento global en mayor medida que durante el siglo pasado.

En el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) se actualizan los escenarios de calentamiento global con relación a reportes anteriores. En este se consideran cinco nuevos escenarios climáticos las Trayectorias

Socioeconómicas Compartidas (SSPx-y), que evalúan distintos futuros posibles de las emisiones de gases efecto invernadero, uso de la tierra y los contaminantes del aire. Cada uno de esos escenarios se dividen en tres periodos de tiempo: corto plazo, 2021–2040; mediano plazo, 2041–2060 y largo plazo, 2081–2100 (IPCC AR6 WG I, 2021). Estos fueron considerados a partir de las proyecciones demográficas y económicas.

En la Tabla 1 se muestran los distintos escenarios de cambio climático, el aumento de la temperatura a largo plazo y el pico máximo que alcanzará en el periodo de tiempo desde la actualidad hasta el año 2100. Los últimos 3 escenarios no alcanzarán su punto máximo antes del 2100, ya que presentan constantes tendencias en aumento.

A pesar de la identificación y descripción de estos escenarios, se resaltan dos características del cambio climático escasamente consideradas en los análisis de desempeño bioclimático de edificaciones. Por un lado, es reconocido que el cambio climático, además de generar variaciones graduales en las condiciones climáticas, también significa cambios abruptos en estas (Fan, Chen, Fu y Li, 2020). Por el otro, las variaciones climáticas no se refieren únicamente al aumento de temperatura sino también, entre otras, a variaciones en la radiación, pluviosidad, nubosidad y ventilación natural. Por ejemplo, Wild (2009) relaciona cambios en la radiación solar con el cambio climático y enfatiza en que estos

Escenario	Descripción	Alineado con SSP	Cambio de la temperatura media global °C	
			Pico de calentamiento	Año 2100
C1	Limitar el calentamiento a 1.5°C (>50%) con exceso limitado o nulo		1,6	1,3
C1a	Limitar el calentamiento a 1.5°C con Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GHG) Net Zero	SSP1-1,9	1,6	1,2
C1b	Limitar el calentamiento a 1.5°C sin GHG Net Zero		1,6	1,4
C2	Regresando el calentamiento a 1.5°C (>50%), después de sobrepasar el límite superior		1,7	1,4
C3	Limitando el calentamiento a 2°C (>67%)		1,7	1,6
C3a	Limitando el calentamiento a 2°C y empezando acciones al 2020	SSP1-2,6	1.7	1,6
C3b	Limitando el calentamiento cerca de 2°C con Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) hasta 2030		1.8	1,6
C4	Limitando el calentamiento a 2°C (>50%)		1.9	1,8
C5	Limitando el calentamiento a 2,5 °C (>50%)		2.2	2,1
C6	Limitando el calentamiento a 3 °C (>50%)	SSP2-4,5	la temperatura no alcanza su punto máximo en 2100	2,7
C7	Limitando el calentamiento a 4 °C (>50%)	SSP3-7,0		3,5
C8	Exceder el calentamiento de 4 °C (>50%)	SSP5-8,5		4,2

Tabla 1. Categorías de escenarios de calentamiento global, según AR6. Fuente: Elaboración de los autores a partir de información de AR6-WG3 (IPCC AR6 WG III, 2022).

cambios son generados por actividades antropogénicas y no por cambios en el sol. En adición, señala que estas variaciones, en general, son subestimadas en los modelos climáticos. Paralelamente, en el grupo de *The Physical Science Basis, Working Group 1 – WG I*, del AR6, se establece que se han observado cambios no solo en la temperatura, sino también fenómenos meteorológicos y climáticos como fuertes precipitaciones, ciclones tropicales y sequías en muchas regiones del mundo y que, debido al aumento de temperatura, se prevé que el ciclo del agua se intensifique generando aumento en las precipitaciones y su variabilidad en el tiempo (IPCC AR6 WG I, 2021).

PANORAMA ACTUAL DE INVESTIGACIONES SOBRE DESEMPEÑO BIOCLIMÁTICO DE EDIFICACIONES EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Además de investigaciones sobre las amenazas a las que están sometidas comunidades enteras y edificaciones por cuenta de los riesgos de desastres naturales asociados con el cambio climático, existen diversos estudios que se enfocan en evaluar el desempeño bioclimático y la habitabilidad de edificaciones en escenarios de cambio climático. Algunos de ellos se centran en el diseño de edificios que tengan un buen desempeño térmico, pero que a la vez puedan soportar el aumento de la temperatura, lo que conllevaría al mayor consumo de energía (Pajek y Košir, 2021). Otros ven, de manera general, la influencia que tienen en el rendimiento energético de una edificación los efectos del cambio climático y a partir de ello, analizan los posibles mecanismos que pueden llevar a la adaptación o la mitigación de estos efectos (Barea, Victoria, Filippín, Monteoliva y Villalba, 2022; Yassaghi y Hoque, 2019). Existen trabajos que se concentran en establecer qué porcentaje de incertidumbre tienen los modelos que establecen las consecuencias del cambio climático sobre las edificaciones con relación al consumo de energía (Fonseca, Nevat y Peters, 2020), como también aquellos en los que se analiza, en torno al panorama mundial, cómo las condiciones climáticas del exterior de la edificación influyen en los cambios que se producen en temas del confort interior (Congedo, Baglivo, Seyhan y Marchetti, 2021). Distintos esfuerzos se han enfocado exclusivamente en el consumo de energía: Joarder Price y Mourshed (2009), entre otros, advierten que, por cuenta del aumento de temperatura que se ha proyectado, las edificaciones ya construidas corren el riesgo de ser inhabitables en el futuro, en caso de que no usen sistemas de refrigeración adicionales. De otro lado, de acuerdo con Berardi y Jafarpur (2020), el incremento en la temperatura exterior produce un mayor uso de sistemas de refrigeración o calefacción según sea necesario, el que se traduce en un aumento en el consumo de energía. Por último, algunas investigaciones centran su atención en evaluar los efectos a futuro en el desempeño energético de las edificaciones que se encuentran en climas tropicales, con el fin de establecer,

en la etapa de diseño, estrategias más eficientes para enfrentar las variaciones climáticas (Vong, 2016)

Con este panorama, se evidencia que existe una razonable cantidad de estudios abocados al cambio climático y sus vínculos con el desempeño térmico o el consumo de energía en las edificaciones. Sin embargo, en relación a luz natural, se constata cierto vacío en este marco. Dada, entonces, la escasez de investigaciones en las que se relacione cambio climático y suficiencia o desempeño lumínico, aquí se plantea al menos tres posibles enfoques para aproximarse a dicha temática en probables escenarios futuros de cambio climático, concretamente, respecto a la iluminación natural en espacios construidos. El primer enfoque consiste en abordar la luz natural y la salud a partir de la necesidad de optimizar la protección frente al aumento en la exposición a rayos ultravioletas (Joarder et al., 2009) y a partir de las vistas al exterior y la salud de las personas en general (Lee, Szybinska, Geisler Selkowitz y Heschong, 2022).

Otro posible enfoque de abordaje del que no se tiene evidencia bibliográfica, se concentra en las afectaciones a la suficiencia lumínica en edificaciones construidas que se podrían generar tras la aplicación de estrategias para la adaptación que deban realizarse, a fin de optimizar la eficiencia energética asociada al consumo de aire acondicionado, o atender necesidades de confort térmico en escenarios de cambio climático con notable aumento de temperatura.

El tercer enfoque, en el que se centra principalmente el presente trabajo, se aboca a posibles variaciones en la radiación global horizontal, radiación directa normal y radiación difusa horizontal en determinada localidad geográfica, asociadas con el cambio climático, por cambios en la nubosidad, contaminantes y la combinación entre estos factores. Estos cambios implican variaciones en la disponibilidad lumínica exterior. Con relación a este enfoque, existen múltiples investigaciones que enfatizan el rol de la radiación solar sobre la disponibilidad lumínica local desde diferentes perspectivas: (i) generación de tipos de cielo a partir de datos de radiación o relación entre la radiación solar y la disponibilidad lumínica local (Dervishi y Mahdavi, 2013; Fakra, Boyer, Miranville y Bigot, 2011; Perez, Ineichen y Seals, 1990; Perez, Seals y Michalsky, 1993); (ii) diferencias entre los datos de radiación solar de los archivos climáticos, datos de mediciones y datos calculados y su impacto en el desempeño lumínico estimado a través de simulaciones computacionales (Bre, e Silva Machado, Lawrie, Crawley y Lamberts, 2021; Fan, 2022; Monteoliva, Villalba y Pattini, 2017; Wang, Wei y Chen, 2019); y (iii) impacto del archivo climático usado en los resultados de simulaciones computacionales (Arango-Díaz, Parra, Puerta y Salazar, 2021; Arango-Díaz, Piderit y Ortiz, 2022; Bellia, Pedace y Fragliasso, 2015a; Bellia et al., 2015b; González Cáceres y Díaz Cisternas, 2013; Hosseini, Bigtashi y Lee, 2021; Iversen, Svendsen y Nielsen, 2013; Sun, Li y Xiao, 2017).

A pesar de la reconocida importancia del rol de la luz natural en edificaciones y de la necesidad de predecir el desempeño bioclimático de edificaciones en escenarios futuros, no hay evidencia de investigaciones que aborden, en el marco del cambio climático, la variabilidad de la radiación solar y su incidencia en el desempeño lumínico de edificaciones.

ARCHIVOS CLIMÁTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO BIOCLIMÁTICO EN ESCENARIOS FUTUROS

Frente a la importancia de prever el desempeño bioclimático de edificaciones en el marco del cambio climático, tal como lo expone Vong (2016), se vio la necesidad de revisar los archivos climáticos con los que se realizan normalmente las simulaciones termoenergéticas. Actualmente, se dispone de varias herramientas que modifican archivos climáticos con base en los escenarios futuros de aumento de temperatura definidos por la IPCC (Tabla 1).

Belcher, Hacker y Powell (2005) desarrollaron el método denominado *morphing* con el cual se generan datos climáticos que permiten realizar simulaciones térmicas para el proceso de diseño de la edificación teniendo en cuenta cómo podría ser el clima a futuro. Este método utiliza archivos climáticos actuales que, a partir de una serie de algoritmos, transforman los datos medios de temperatura mensuales de forma predictiva. El mismo considera los cuatro escenarios posibles que provienen del reporte especial del IPCC de 2007: escenarios A1 - bajas emisiones; A2 - emisiones medias-bajas; B1 - emisiones medias-altas; y B2 - altas emisiones. Se resalta que *morphing* no considera variaciones perceptibles en la radiación asociadas a los escenarios de cambio climático y, finalmente, que gracias a este método se han desarrollado varias herramientas que facilitan la construcción de archivos climáticos como, por ejemplo, Meteororm y CC World Weather Gen (Vong, 2016).

De acuerdo con Remund Jan *et al.* (2014), Meteororm es una base de datos climatológica global que se emplea para hacer cálculos, simulaciones e investigaciones en torno a la energía solar. Se basa en un sistema estocástico que, en función de la toma de los datos del comportamiento climático anual típico en los diferentes lugares del mundo, da como resultado medias mensuales que se intercalan en los diferentes escenarios futuros. Este procedimiento utiliza entre 1 y 4 modelos para realizar los cálculos, considerando condiciones de cielo despejado y los máximos valores posibles de radiación cada mes. Con relación a la radiación solar, los datos usados por esta herramienta se obtienen de las mediciones realizadas durante 20 años ya que, para periodos más largos, se da entre un 2 y un 3% de diferencia en las mediciones que arrojan todas las estaciones meteorológicas. Los demás parámetros los

recoge de las medias correspondientes a los intervalos 1961 – 1990 y 2000 – 2009.

Por otro lado, CC World Weather Gen fue desarrollado con el objetivo de generar datos a partir de un proceso automatizado, con los cuales se producen archivos climáticos que puedan ser utilizados en escenarios de cambio climático (Jentsch, James, Bourikas y Bahaj, 2013). Para ello, utiliza los datos producidos por el modelo HadCM3 A2 del Centro de Distribución de Datos del IPCC (Jentsch *et al.*, 2013), puesto que posee los parámetros que se requieren para hacer los archivos climáticos. Esta herramienta encierra los promedios meteorológicos de los escenarios climáticos al mismo tiempo que mantiene las secuencias reales del clima (Vong, 2016) y, de esa manera, proyecta los escenarios del cambio climático.

Finalmente, Weather Shift TM, desarrollado como un proyecto colaborativo entre Arup North America Ltda (ARUP) y Argos Analytics LLC, utiliza el método de *morphing*, a partir de la combinación de 14 modelos globales climáticos – GCM que hayan sido simulados actualmente en dos de los escenarios de emisión, 4,5 y 8,5, conocidos como Vías de Concentración Representativas (RCP), y los convierte en funciones de distribución acumulativa (CDF) (Troup y Fannon, 2016). Esto permite que los porcentajes tengan una distribución que mitiga hasta cierto punto la incertidumbre intermodal y el comportamiento estocástico del clima, con la cual se da una probabilidad en la frecuencia, pero esto no quiere decir que genere total confianza en la proyección que se realiza (Troup y Fannon, 2016).

Frente a este contexto, en el cual no se consideran variaciones en la radiación solar de los archivos climáticos para escenarios que permitan también revisar el desempeño lumínico de edificaciones en el futuro, esta investigación se planteó como objetivo identificar los impactos que tendría, sobre la evaluación de la suficiencia lumínica de espacios interiores, el uso de archivos climáticos en los que se alteren los datos de radiación solar debido al cambio climático. En ese sentido, se realizó un comparativo de archivos climáticos existentes para la ciudad de Medellín, Colombia, con los datos oficiales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y se escogió el archivo climático con más similitud. A partir del archivo climático en formato .epw, se efectuó una modificación de la radiación de los archivos para la evaluación de las variaciones de acuerdo con hallazgos descritos por Wild (2009).

METODOLOGÍA

A fin de identificar el impacto sobre el desempeño lumínico de variaciones en la radiación solar de archivos climáticos para escenarios futuros, fueron realizadas comparaciones de resultados de simulaciones computacionales sobre

Criterio	Nombre de archivo climático	Descripción de la modificación
10% de aumento de la radiación solar global	WF-2 ^a	La radiación difusa y la radiación directa aumentan proporcionalmente en un 10%
	WF-2b	La radiación directa aumenta y la radiación difusa permanece igual al WF-1
10% de disminución de la radiación solar global	WF-3 ^a	La radiación difusa y la radiación directa disminuyen proporcionalmente en un 10%
	WF-3b	La radiación directa disminuye y la radiación difusa permanece igual al WF-1

Tabla 2. Modificaciones archivos climáticos de escenarios futuros. Fuente: Elaboración de los autores.

espacios hipotéticos localizados en Medellín (lat. 6,25N, long.75,5O, alt.1450 m.s.n.m), haciendo uso de archivos climáticos intervenidos.

En función de correcciones realizadas para un archivo climático actual, fueron construidos cuatro archivos climáticos adicionales, de acuerdo con cuatro criterios de variación de la radiación solar para escenarios futuros. En total, los cinco archivos climáticos fueron usados para realizar simulaciones computacionales en tres espacios hipotéticos con dos orientaciones.

ARCHIVO CLIMÁTICO UTILIZADO

Medellín es una ciudad tropical andina que posee una temperatura promedio de 22°C y un clima estable, con predominio de cielos parcialmente nublados a lo largo del año. En investigaciones previas se han detectado algunas inconsistencias en los archivos climáticos de la ciudad (Arango et al. 2021). Debido a estas inconsistencias, que están relacionadas con los datos de radiación solar global y datos de radiación difusa y directa, fue necesario llevar a cabo ajustes manuales en el archivo climático empleado para la ciudad de Medellín. Dichas inconsistencias hacen referencia a las diferencias, hora a hora, del dato de radiación solar global y de la sumatoria entre radiación directa normal y radiación difusa horizontal. Por lo tanto, el ajuste consistió en garantizar que, para cada hora, la sumatoria de la radiación difusa horizontal y la radiación directa normal de los archivos climáticos fuera igual o muy similar al dato de radiación global de este. Para ello se efectuó, en frecuencia horaria, una sumatoria entre la radiación difusa y la radiación directa del archivo climático.

Posteriormente, se identificó qué porcentaje de ese valor sumado correspondía a la radiación difusa y qué porcentaje, a la radiación directa. Estos porcentajes se usaron para recalcular datos horarios en el archivo climático de la radiación directa normal y la radiación difusa horizontal a partir del dato de radiación global. Este archivo climático, en formato .epw modificado, se

denominó WF1 y sirvió de insumo para construir nuevos archivos climáticos con escenarios futuros de radiación.

ARCHIVOS CLIMÁTICOS DE ESCENARIOS FUTUROS

Debido a que los archivos climáticos disponibles para escenarios futuros no incorporan variaciones en la radiación solar y, en consecuencia, no evidenciarían modificaciones en la disponibilidad lumínica ni en el desempeño lumínico de edificaciones, a partir del 10% de variación en la radiación reportado por Wild (2009) y tomando como base el archivo climático WF1, fueron considerados 2 criterios para la modificación de archivos climáticos. Los criterios y la descripción de los nuevos archivos climáticos se explican en la Tabla 2. Las modificaciones de los datos climáticos se realizaron en Microsoft Excel.

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Para las simulaciones computacionales se usó el software Dynamic Daylighting (Marsh, 2020), que se encuentra validado con Radiance y DIVA/DAYSIM como se describe en la página de internet. Los parámetros de reflexión tomados para los muros fueron de 0,60; para el suelo, una reflexión de 0,40; y en cielo, del 0,70. La grilla de análisis se definió a una altura de 0,75m sobre el nivel de piso, con una distancia de 0,25 entre celdas. Las métricas que se analizaron fueron *Daylight Autonomy* (DA) [300 lx] y *Spatial Daylight Autonomy* (SDA) [300 lx; 50%], considerando un horario de entre las 08 h y las 18 h, en un período de tiempo anual.

MODELO HIPOTÉTICO

Para las simulaciones computacionales fueron contemplados tres ambientes hipotéticos con dos orientaciones diferentes: norte y occidente. La geometría de los modelos corresponde con áreas y alturas típicas de los usos planteados en la ciudad de Medellín. Los tipos de vidrio también se escogieron según los más usados para edificaciones de oficinas. La descripción de los modelos se resume en la Figura 1.

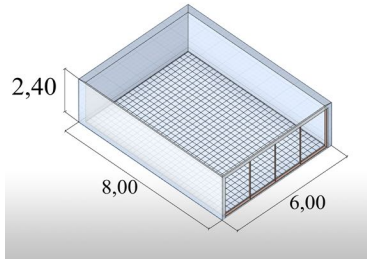
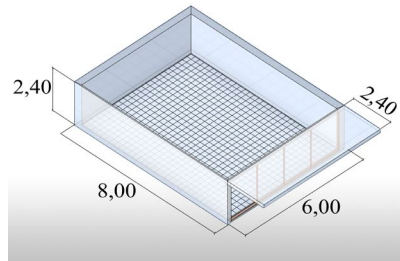
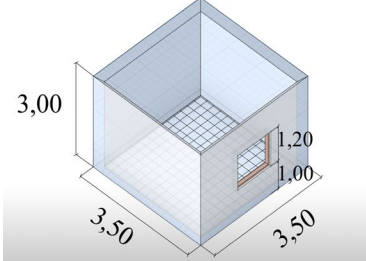
OLT 40	OLT 50 APV °45	HLT 90
		
Oficina de 8,00 x 6,00 x 2,40m con vidrio de piso a techo, Transmitancia lumínica - TL = 40%	Oficina de 8,00 x 6,00 x 2,40m con vidrio de piso a techo, TL = 50% y ángulo de protección vertical de 45°	Habitación de 3,50 x 3,50 x 3m, con ventana de 1,20 x 1,20m, sillar de 1m vidrio con TL = 90%

Figura 1. Resumen de modelos. Las unidades de medida están en metros (m). Fuente: Elaboración de los autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta investigación los resultados se analizaron desde dos puntos de vista. En primer lugar, se realizó un análisis de los tipos de cielo y la radiación solar en escenarios futuros y, en segundo lugar, se efectuó un análisis comparativo de las simulaciones computacionales.

RADIACIÓN SOLAR EN ESCENARIOS FUTUROS

El resultado de la adaptación de los archivos climáticos se expone a continuación. La Figura 2 muestra la radiación solar global media horaria de los tres archivos climáticos adaptados, WF1, WF2 y WF3, en comparación con los datos oficiales para los años 2016 y 2017 del IDEAM de Colombia (IDEAM, 2019). A pesar de que el promedio de Radiación Solar Global del WF1 es de 172 Wh/m² y el de los datos del IDEAM es aproximadamente 180 Wh/m², se evidencian diferencias de hasta 100 Wh/m² en los datos de radiación para determinados horarios.

Como complemento, la Figura 3 muestra la frecuencia de valores de radiación global, en rangos entre las 07h hasta las 18h para los archivos climáticos manipulados en comparación con los datos oficiales del IDEAM. En esta se evidencia mayor frecuencia de valores altos de radiación solar global para los archivos WF2.

Estas diferencias en los datos de radiación se registran también en los tipos de cielo que, en términos del *Clearness Index* (Perez et al., 1990), se generarían a partir de los archivos climáticos analizados. La Tabla 3 expresa la frecuencia de los tipos de cielo en 3 de los archivos climáticos. Se evidencia que la metodología utilizada para la adaptación de los datos de radiación modifica la frecuencia tiempo con la que se generarían los tipos de cielo, principalmente en los tipos de cielo 1 y 2, que corresponden a cielos cubiertos/nublados. Este hallazgo también se observa en la Figura 4, en la que las diferencias

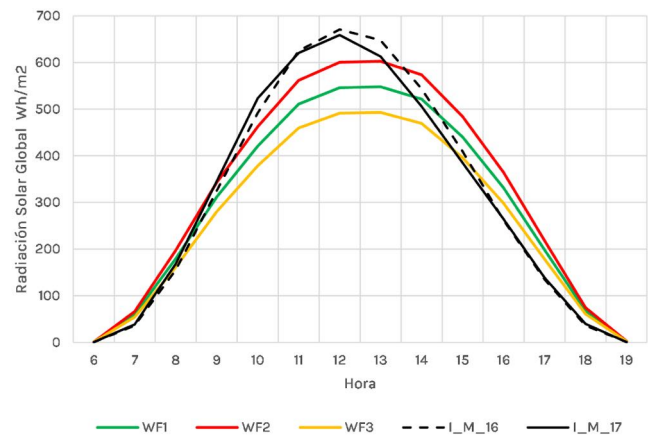


Figura 2. Radiación solar global de archivos climáticos usados vs. datos oficiales del IDEAM de 2016 y 2017. Fuente: Elaboración de los autores.

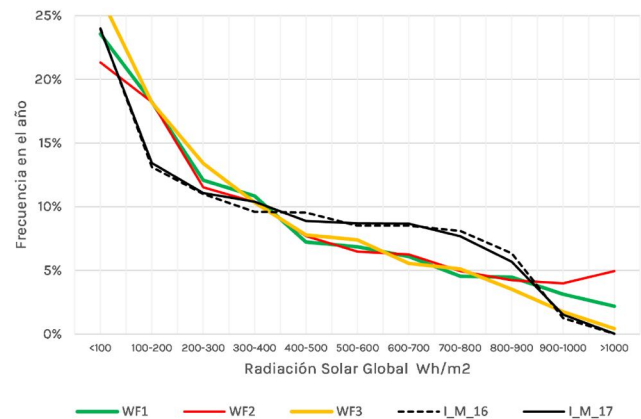


Figura 3. Comparativo de frecuencia de valores radiación solar global por rangos. Fuente: Elaboración de los autores.

Clearness Index								
	1	2	3	4	5	6	7	8
WF1	43%	12%	10%	8%	9%	8%	3%	7%
WF2b	21%	30%	11%	9%	9%	9%	3%	8%
WF3b	50%	9%	8%	7%	9%	7%	3%	6%

Tabla 3. Frecuencia de tipos de cielo en archivos climáticos según *Clearness Index*, que utiliza una escala de 1 al 8, donde 1 corresponde a cielo cubierto/nublado, 4-5 a parcialmente cubierto/intermedio y 8 a cielo despejado/claro. Fuente: Elaboración de los autores.

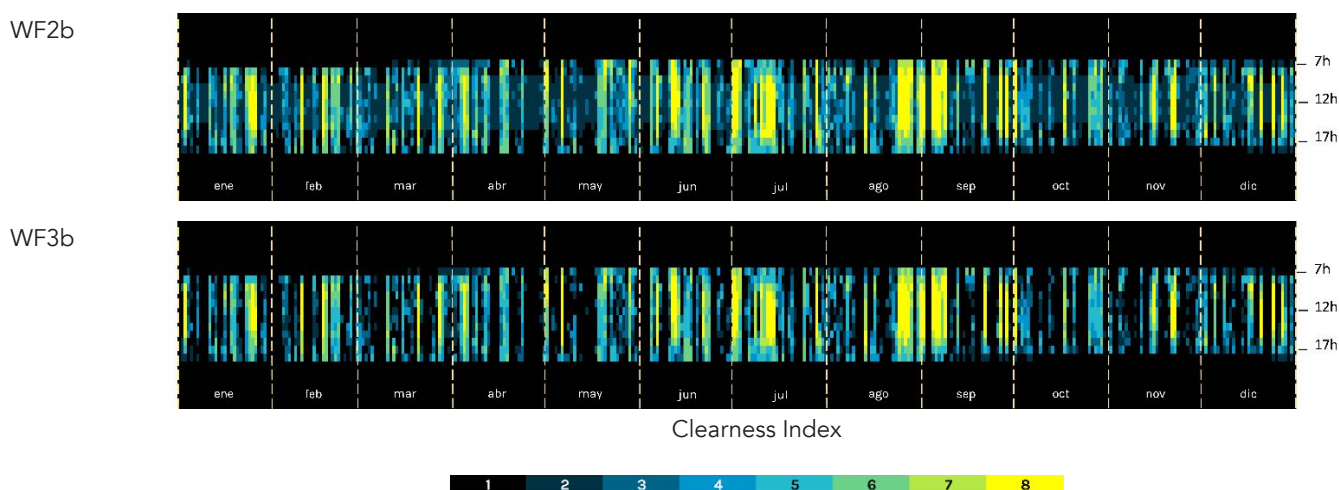


Figura 4. Distribución de tipos de cielo según *Clearness Index* con la escala 1 - 8 para los Archivos WF2b y WF3b.

se advierten con mayor claridad principalmente entre las 09h y las 17h de los días oscuros. El aparente bajo impacto de las modificaciones de los datos de radiación sobre la distribución de frecuencia de los tipos de cielo no necesariamente significa diferencias menores en la disponibilidad lumínica exterior, puesto que con el mismo tipo de cielo podría obtenerse disponibilidad lumínica muy diferente. Sin embargo, se evidencian variaciones, sobre todo, en los tipos de cielo de la mañana y los del final de la tarde, cuando menor disponibilidad lumínica existe para la ciudad de Medellín.

DIFERENCIAS EN LA SUFICIENCIA LUMÍNICA

La Tabla 4 ilustra los resultados de DA y SDA para los 3 modelos hipotéticos en las orientaciones estudiadas. En los resultados se evidencia una variación considerable en los resultados de SDA de cada modelo hipotético en los diferentes escenarios, mientras que los resultados de DA no muestran tanta variación.

El análisis de los resultados de SDA se realizó desde dos enfoques para cada modelo en cada orientación: (i) diferencias entre los valores de SDA para las simulaciones realizadas con archivo climático WF1 y con los otros archivos climáticos, y (ii) máximas diferencias entre los valores de SDA. Con relación al primer enfoque, se

evidencian diferencias de hasta +14% haciendo uso del archivo climático WF2a en el modelo de mejor desempeño lumínico, OLT40, en la orientación Norte, y -14% con el archivo climático WF3a en el modelo HLT90, con ventana de menor tamaño típico de las viviendas en altura en Medellín, con orientación Oeste. Las diferencias menores se registraron en $\pm 4\%$ para las dos orientaciones del modelo OLT50 APV 45°. Estas diferencias sugieren el error que se generaría en la valoración de la suficiencia lumínica de espacios interiores en escenarios de cambio climático cuando se usa un archivo climático actual. Las mismas hacen referencia tanto a aumento del espacio con suficiencia lumínica como a disminución, de acuerdo con el archivo climático usado.

El segundo enfoque, las máximas diferencias entre los valores de SDA para cada caso en cada orientación, remarcan la variabilidad en la valoración anual de suficiencia lumínica que los espacios interiores podrían sufrir en el futuro por cuenta de la variabilidad de la radiación solar. Se registraron diferencias de hasta 22% en el modelo OLT40 orientación Norte, hasta 18% en el modelo OLT40 orientación Oeste, hasta 7% en el modelo OLT50 APV 45° al Norte, hasta 8% en el modelo OLT50 APV 45° al Oeste, hasta 18% en el modelo HLT90 al Norte y hasta 21% en el modelo HLT90 al Oeste.

Código	Orientación	Archivos climáticos	DA (300 lx)	sDA [300lx, 50%]
OLT40	N	WF1	74%	83%
		WF2a	77%	97%
		WF2b	73%	82%
		WF3a	71%	75%
		WF3b	73%	79%
	O	WF1	77%	91%
		WF2a	80%	100%
		WF2b	78%	97%
		WF3a	74%	82%
		WF3b	76%	87%
OLT50 APV 45°	N	WF1	48%	46%
		WF2a	52%	49%
		WF2b	47%	45%
		WF3a	43%	42%
		WF3b	47%	44%
	O	WF1	51%	50%
		WF2a	56%	54%
		WF2b	52%	52%
		WF3a	47%	46%
		WF3b	46%	49%
HLT90	N	WF1	45%	44%
		WF2a	49%	52%
		WF2b	42%	37%
		WF3a	40%	34%
		WF3b	44%	41%
	O	WF1	50%	54%
		WF2a	54%	61%
		WF2b	48%	46%
		WF3a	45%	40%
		WF3b	48%	49%

Tabla 4. Resultados DA y SDA escenarios. Fuente: Elaboración de los autores.

Si bien sería necesario incluir más modelos para confirmarlo, estos resultados sugieren que para espacios con mayor proporción de vidrio en fachada y sin dispositivos de sombra incluidos, es decir, mayormente expuestos a la radiación, así como para espacios con ventanas pequeñas y sin elementos de protección solar en fachada, la variabilidad en la valoración anual de suficiencia lumínica haciendo uso de SDA podría ser mayor. Entretanto, para espacios con elementos de control solar horizontales y un desempeño lumínico menos favorable, las diferencias serían menores.

A pesar de no ser objetivo de esta investigación, si se consideraran las modificaciones que tendrían las edificaciones en el futuro para adaptarse a las condiciones térmicas o para disminuir el consumo de aire acondicionado, se prevería que los valores de SDA podrían disminuir incluso más. Asimismo, la probabilidad

de deslumbramiento podría aumentar en caso de no realizar modificaciones en escenarios de aumento de la radiación solar directa.

En general, el modelo con mayores distancias en los resultados lumínicos con la métrica SDA es el OLT 40, con una diferencia en relación con el caso WF1 de 13,9% y entre los escenarios, de 22,3% (ver Figura 5). Mientras que el espacio con menores variaciones es el OLT 50 APV °45, donde la mayor variación es de 3,9% con respecto al escenario WF1 y entre escenarios es de 7,5%. Estas variaciones entre escenarios, 22,3% y 7,5%, representan las máximas diferencias detectadas y aquellas a las que se podría llegar en el desempeño lumínico, en caso de considerar variaciones en los datos de radiación de los archivos climáticos.

Con relación a los archivos climáticos generados, se

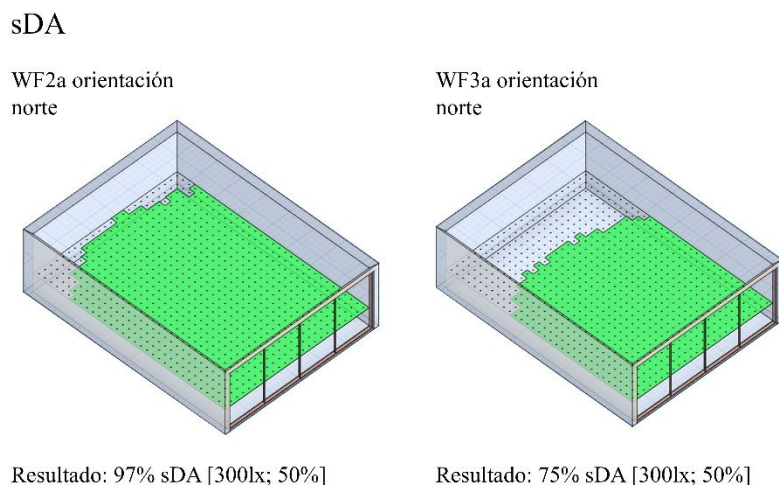


Figura 5. Comparativo de resultados SDA para modelo OLT40. Fuente: Elaboración de los autores.

patentiza que para todos los modelos se presentaron mayores diferencias del caso base con los escenarios de aumento proporcional de radiación directa y difusa WF2a, y disminución proporcional de radiación directa y difusa WF3a con los escenarios en los que la radiación difusa permanecía igual y se aumentaba únicamente la directa, WF2b y WF3b. Esto indica, preliminarmente, que si los cambios en la radiación detectados por Wild (2009) son más o menos proporcionales en la Radiación difusa y la Radiación directa, los cambios en el desempeño lumínico de espacios interiores podrían ser mayores que en otros escenarios. Por consiguiente, para mayor precisión sobre el impacto del cambio climático sobre la variabilidad del desempeño lumínico será necesario definir como se darían los ciclos de *dimming* y *brightening* descritos por Wild (2009).

CONCLUSIÓN

Este artículo abordó la evaluación del desempeño lumínico de ambientes interiores considerando futuros escenarios de cambio climático.

En el proceso no se constataron fuentes o archivos climáticos que se pudieran utilizar para revisar la disponibilidad lumínica interior o exterior a partir de cambios de radiación solar o nubosidad. A pesar de esto, y con los hallazgos de Wild (2009) sobre alteraciones del 10% en la radiación solar global asociadas al cambio climático, se construyeron archivos climáticos modificados con base en datos de archivos climáticos usados actualmente para la ciudad de Medellín. Si bien estos archivos no fueron útiles para predecir cómo sería la radiación solar global en el futuro, sí sirvieron para identificar los cambios en la disponibilidad lumínica local que se podría alcanzar

considerando varios escenarios de cambio en la radiación solar global.

Con los resultados de las simulaciones computacionales se concluyó lo siguiente: por un lado, resultan diferencias de hasta 14% en evaluaciones de SDA, al comparar un escenario actual con un escenario futuro de aumento de radiación solar global, y de 10% cuando ese escenario actual se compara con un escenario futuro de menor radiación, sumado a las diferencias de SDA de hasta 22,3% para todos los casos de un mismo modelo simulado. Esto demuestra el nivel de incertidumbre que se podría generar frente al desempeño lumínico en el futuro con resultados de simulaciones en la actualidad. Evidentemente, estos porcentajes podrían ver ampliada la incertidumbre en otros estudios de caso. Tal incertidumbre se relaciona directamente con imprecisiones en estimativas de consumo energético, suficiencia lumínica y probabilidad de deslumbramiento de edificaciones.

Por otro lado, pese a que no es parte de los objetivos de la investigación, los resultados también permiten prever las variaciones en el desempeño lumínico de edificaciones en los que se efectúen adaptaciones en la fachada para minimizar ganancias térmicas en escenarios de cambio climático. Por ejemplo, si bien una edificación como la OLT 40 posee actualmente un SDA de 91%, en caso de que involucre aleros y cambie sus vidrios para favorecer su eficiencia energética, tal como el caso OLT 50 APV 45°, disminuirá notablemente este valor de acuerdo con el escenario de cambio climático. Frente a este panorama, se advierte sobre la importancia de considerar el desempeño lumínico de espacios interiores en escenarios de cambio climático.

Se resalta de igual forma que, aunque el número de modelos evaluados fue limitado, los resultados permiten concluir preliminarmente que las diferencias entre el desempeño lumínico actual y en el futuro serían más evidentes en ambientes con fachadas vidriadas sin elementos de control solar.

Finalmente, estos hallazgos también llaman la atención sobre la necesidad de profundizar en el estudio de la disponibilidad lumínica exterior en diferentes escenarios de cambio climático en los que se considere modificaciones en la radiación solar, en los tipos de cielo de cada localidad y, por supuesto, en el desempeño lumínico de ambientes interiores. Para esto es fundamental contar con archivos climáticos que incorporen escenarios de cambio climático, no desde el punto de vista térmico sino lumínico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de San Buenaventura Medellín, la Universidad de San Buenaventura Cali y la Universidad Católica de Manizales

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arango-Díaz, L., Parra Correa, E., Puerta Suárez, A. y Salazar, J. H. (2021). Discrepancies in dynamic daylight simulations in the tropic associated with the differences between measured and weather files solar radiation. *Building Simulation*, 8. DOI: [10.26868/25222708.2021.31015](https://doi.org/10.26868/25222708.2021.31015)

Arango-Díaz, L., Piderit, M. B. y Ortiz Cabezas, A. (2022). Estudio de las discrepancias en los tipos de cielo para análisis dinámico de la luz natural según los archivos climáticos disponibles. Caso Colombia. *Revista de Arquitectura*, 24(1), 84–97. DOI: <https://doi.org/10.14718/revarq.2022.24.1.4050>

Barea, G., Victoria Mercado, M., Filippín, C., Monteoliva, J. M. y Villalba, A. (2022). New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environments. *Energy and Buildings*, 266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112100>

Belcher, S. E., Hacker, J. N. y Powell, D. S. (2005). Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(1), 49–61. DOI: <https://doi.org/10.1191/0143624405bt1120a>

Bellia, L., Pedace, A. y Fragliasso, F. (2015a). Dynamic daylight simulations: Impact of weather file's choice. *Solar Energy*, 117, 224–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.002>

Bellia, L., Pedace, A. y Fragliasso, F. (2015b). The role of weather data files in Climate-based Daylight Modeling. *Solar Energy*, 112, 163–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.033>

Berardi, U. y Jafarpur, P. (2020). Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109681>

Bre, F., e Silva Machado, R. M., Lawrie, L. K., Crawley, D. B. y Lamberts, R. (2021). Assessment of solar radiation data quality in typical meteorological years and its influence on the building performance simulation. *Energy and Buildings*, 250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111251>

Congedo, P. M., Baglivo, C., Seyhan, A. K. y Marchetti, R. (2021). Worldwide dynamic predictive analysis of building performance under long-term climate change conditions. *Journal of Building Engineering*, 42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103057>

Dervishi, S. y Mahdavi, A. (2013). A simple general luminous efficacy model of global irradiance. En *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association* (pp. 3639–3644). Recuperado de: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_2222.pdf

Fakra, A. H., Boyer, H., Miranville, F. y Bigot, D. (2011). A simple evaluation of global and diffuse luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate. *Renewable Energy*, 36(1), 298–306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.042>

Fan, X. (2022). A method for the generation of typical meteorological year data using ensemble empirical mode decomposition for different climates of China and performance comparison analysis. *Energy*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122822>

Fan, X., Chen, B., Fu, C. y Li, L. (2020). Research on the influence of abrupt climate changes on the analysis of typical meteorological year in China. *Energies*, 13(24). DOI: <https://doi.org/10.3390/en13246531>

Fonseca, J. A., Nevat, I. y Peters, G. W. (2020). Quantifying the uncertain effects of climate change on building energy consumption across the United States. *Applied Energy*, 277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115556>

González Cáceres, A. y Díaz Cisternas, M. (2013). Función e impacto del archivo climático sobre las simulaciones de demanda energética. *Hábitat Sustentable*, 3(2), 75–85.

Hosseini, M., Bigtashi, A. y Lee, B. (2021). Evaluating the applicability of Typical Meteorological Year under different building designs and climate conditions. *Urban Climate*, 38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100870>

IDEAM (2019). *Datos climáticos para Colombia*. Recuperado de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

IPCC (2021). *El cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando*. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

IPCC AR6 WG I (2021). *Summary for Policymakers*. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

IPCC AR6 WG III (2022). *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers*. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

- Iversen, A., Svendsen, S. y Nielsen, T. R. (2013). The effect of different weather data sets and their resolution on climate-based daylight modelling. *Lighting Research and Technology*, 45(3), 305–316. DOI: <https://doi.org/10.1177/1477153512440545>
- Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L. y Bahaj, A. B. S. (2013). Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy*, 55, 514–524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>
- Joarder, M. A. R., Price, A. y Mourshed, M. (2009). The changing perspective of daylight design to face the challenge of climatechange. En *SASBE 2009, 3rd International Conference on Smart and Sustainable Built Environments*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/48354707>
- Lee, E. S., Szybinska Matusiak, B., Geisler Moroder, D., Selkowitz, S. E. y Heschong, L. (2022). Advocating for view and daylight in buildings: Next steps. *Energy and Buildings*, 265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112079>
- Marsh, A. (2020). *Dynamic Daylighting Software Details*. AndrewMarch.Com. Recuperado de: <http://andrewmarsh.com/software/daylight-box-web/>
- Monteoliva, J. M., Villalba, A. y Pattini, A. E. (2017). Variability in dynamic daylight simulation in clear sky conditions according to selected weather file: Satellite data and land-based station data. *Lighting Research and Technology*, 49(4), 508–520. DOI: <https://doi.org/10.1177/1477153515622242>
- ONU (2015). *Acuerdo de París*. Recuperado de: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Pajek, L. y Košir, M. (2021). Exploring climate-change impacts on energy efficiency and overheating vulnerability of bioclimatic residential buildings under central european climate. *Sustainability (Switzerland)*, 13(12). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13126791>
- Perez, R., Ineichen, P. y Seals, R. (1990). Modeling Daylight Availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44, 271–289.
- Perez, R., Seals, R. y Michalsky, J. (1993). All_Weather model for sky luminance distribution. Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235–245.
- Remund, J., Müller, S., Kunz, S., Huguenin-Landl, B., Studer, C., Klauser, D. y Schilter, C. (2014). *Handbook Part I: Software*. METEOTEST.
- Rodríguez Roa, A. (2010). *Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de Cambio Climático con el clima presente en Colombia*. Nota Técnica IDEAM, IDEAM-METEO/009-2010. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evaluaci%C3%B3n+de+Modelos+Globales+-+IPCC.pdf/6d9d1816-6ce0-4346-8a69-043f04cbf580>
- Sun, J., Li, Z. y Xiao, F. (2017). Analysis of Typical Meteorological Year selection for energy simulation of building with daylight utilization. *Procedia Engineering*, 205, 3080–3087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.303>
- Troup, L. y Fannon, D. (2016). Morphing climate data to simulate building energy consumption. En *ASHRAE and IBPSA-USA Building Simulation Conference* (pp. 439–446). Recuperado de: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=simbuild2016_C058
- Vong, N. K. (2016). *Climate change and energy use: Evaluating the impact of future weather on building energy performance in tropical regions*. Tesis Doctoral. Universidad de Hawái-Mānoa. ScholarSpace repositorio de la Universidad de Hawái. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10125/45569>
- Wang, J., Wei, M. y Chen, L. (2019). Does typical weather data allow accurate predictions of daylight quality and daylight-responsive control system performance. *Energy and Buildings*, 184, 72–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.029>
- Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(12). <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>
- Yassaghi, H. y Hoque, S. (2019). An Overview of Climate Change and Building Energy: Performance, Responses and Uncertainties. *Buildings*, 9(7). DOI: <https://doi:10.3390/buildings9070166>