

Estudio de las discrepancias en los tipos de cielo para análisis dinámico de la luz natural según los archivos climáticos disponibles. Caso Colombia

Study of discrepancies in sky types for dynamic daylight analysis according to available climate files. Colombia case

Lucas Arango-Díaz

Universidad de San Buenaventura. Medellín (Colombia)
Facultad de Artes Integradas, Programa de Maestría en Bioclimática
Grupo de investigación: Hombre Proyecto y Ciudad

María Beatriz Piderit

Universidad del Bío-Bío (Chile).
Facultad de arquitectura, Construcción y Diseño
Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura
Grupo de Investigación: Confort ambiental y Pobreza Energética

Alejandro Ortiz-Cabezas

Universidad de San Buenaventura. Medellín (Colombia)

Lucas Arango-Díaz

Arquitecto, Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)
Magíster en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Federal de Santa Catarina. Florianópolis (Brasil)
Doctor en Arquitectura y Urbanismo, Universidad del Bío-Bío. Concepción (Chile)
<https://scholar.google.com/citations?user=BKEjaugAAAJ&hl=es>
<https://orcid.org/0000-0002-3638-3379>
<mailto:lucas.arango.diaz@gmail.com>

María Beatriz Piderit

Arquitecta, Universidad del Bío-Bío. Concepción (Chile)
Magíster en Ciencias Aplicadas, Universidad Católica de Lovaina (Bélgica)
Doctora en Art de Bâtir et Urbanisme, Universidad Católica de Lovaina (Bélgica)
https://www.researchgate.net/profile/Maria_Piderit
<https://orcid.org/0000-0001-9733-6608>
<mailto:mpiderit@ubiobio.cl>

Alejandro Ortiz Cabezas

Arquitecto, Universidad de Costa Rica (Costa Rica)
Magíster en Bioclimática, Universidad de San Buenaventura. Medellín (Colombia)
<https://scholar.google.com/citations?user=h39CQ-EAAAAJ&hl=en>
<https://orcid.org/0000-0001-6744-0279>
<mailto:alejoooc@gmail.com>

Arango-Díaz, L., Piderit, M. B., & Ortiz-Cabezas, A. (2021). 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 (Bogotá)*, 24(1), 84-97. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.4050>



doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.4050

Resumen

Para realizar un estudio de iluminación preciso es fundamental conocer los tipos de cielo predominantes de una localidad, pues estos son clave para estimar el desempeño lumínico de ambientes interiores. El objetivo de esta investigación es analizar las discrepancias en la valoración del desempeño de la luz natural de espacios interiores según los archivos climáticos usados y considerando las diferencias en los tipos de cielo predominantes de acuerdo con los datos de radiación de estos. Para ello, haciendo uso del Clearness Index, de All Pérez All Weather Sky Model, fueron estimados y comparados los tipos de cielo a partir de la información de radiación de archivos climáticos disponibles para trece ciudades colombianas. Adicionalmente, fueron realizadas simulaciones dinámicas de luz natural sobre ambientes hipotéticos, con diferentes archivos climáticos. Los resultados de la investigación evidencian, para cada ciudad analizada, notables diferencias en cuanto a los tipos de cielo predominantes según el archivo climático utilizado. Estas diferencias derivaron en notables discrepancias —en muchos casos, de más del 10%— en la aplicación de métricas dinámicas haciendo uso de los archivos climáticos disponibles para cada ciudad. Si bien no es objetivo de la investigación concluir cuál de los archivos climáticos es más confiable, sí se resalta la necesidad de contar con datos de radiación confiables en los archivos climáticos, para favorecer la precisión en la valoración del desempeño lumínico de ambientes interiores a través de simulación computacional.

Palabras clave: archivo climático; bioclimática; iluminación natural; simulación computacional

Abstract

To perform an accurate lighting study, it is essential to know the predominant sky types in a locality, as these are key to estimating the lighting performance of indoor environments. The objective of this research is to analyze the discrepancies in the assessment of the natural light performance of indoor spaces according to the climatic files used and consider the differences in the predominant sky types according to their radiation data. For this purpose, using the Clearness Index, from the All Pérez All-Weather Sky Model, the sky types were estimated and compared from the radiation information of climate files available for thirteen Colombian cities. Additionally, dynamic daylight simulations were performed on hypothetical environments with different climate files. The results of the research show, for each city analyzed, notable differences in the predominant sky types according to the climate file used. These differences resulted in significant discrepancies - in many cases of more than 10% - in the application of dynamic metrics using the climate files available for each city. Although it is not the objective of the research to conclude which of the climate files is more reliable, it does highlight the need for reliable radiation data in the climate files, to favor accuracy in the assessment of the lighting performance of indoor environments through computational simulation.

Key words: bioclimatic; climate files; daylight; computational simulation

Recibido: mayo 18 / 2021

Evaluado: julio 16 / 2021

Aceptado: agosto 25 / 2021

Introducción

Derivado del proyecto de investigación doctoral titulado *Nueva métrica dinámica de luz natural: relación entre la percepción de suficiencia lumínica y la disponibilidad lumínica exterior*, desarrollado en la Universidad del Bío-Bío, en Chile, por el primer autor, bajo la orientación de la segunda autora de este artículo, surge la inquietud por caracterizar los tipos de cielo en Colombia. Esta caracterización facilitaría, para el territorio colombiano, la escogencia de parámetros de cielo para la realización de simulaciones computacionales de iluminación natural evaluando y caracterizando los tipos de cielo predominantes de cada localidad; además, permitiría establecer, en las normativas locales, las mejores estrategias para mejorar el desempeño lumínico de ambientes interiores para los distintos tipos de cielo. Para esto, fue formulada una investigación en la Universidad de San Buenaventura, Medellín, que tiene por objetivo caracterizar los tipos de cielo predominantes en varios municipios del territorio colombiano a partir de la consideración de la radiación solar.

Garantizar ambientes suficientemente iluminados es una estrategia eficaz para disminuir el consumo energético de las edificaciones y, al mismo tiempo, permite crear espacios más confortables y saludables, con el fin de aumentar el bienestar de las personas y, potencialmente, hacerlas más productivas (Al Horr et al., 2016a; Al Horr et al., 2016b y 2017; Alrubaih et al., 2013; Gago et al., 2015; Pellegrino et al., 2017; Yu & Su, 2015). Para lograrlo, dada la dinámica de la luz natural, es necesaria la predicción mediante herramientas de simulaciones computacionales que, a través del uso de métricas dinámicas, caracterizan de manera muy precisa lo que ocurriría en el ambiente interior.

Las simulaciones con métricas dinámicas, o Climate Based Daylight Modelling (CBDM), de acuerdo con Reinhart y Wienold (2011), han ido ganando terreno sobre las métricas estáticas, como el factor de luz día (DF), desde principios del siglo XXI. De estas CBDM se destacan: Daylight Autonomy (DA) (Reinhart & Walkenhorst, 2001); Useful Daylight Illuminance (UDI) (Mardaljevic et al., 2012; Nabil & Mardaljevic, 2005; 2006); Continuous Daylight Autonomy (Dacon) (Reinhart et al., 2006); Spatial Daylight Autonomy (SDA), y Anual Solar Exposure (ASE) (IESNA-The Daylight Metric Committee, 2012). A diferencia de las métricas estáticas, que, a partir de la escogencia del día, la hora y el tipo de cielo, realizan cálculos de admisión y distribución de la luz natural, las simulaciones dinámicas realizan cálculos anuales en los que se identifica el porcentaje de tiempo al año o el porcentaje de espacio que cumple determinado objetivo lumínico (Piderit et al., 2014). Para estos cálculos anuales, las herramientas de simulación estiman los tipos de cielo predominantes a partir de los

datos de radiación solar (global, directa normal y difusa) contenida en los archivos climáticos.

Además de su uso, indispensable en las simulaciones dinámicas, la identificación de los tipos de cielo de una localidad representa información valiosa para verificar la variación de la disponibilidad del recurso lumínico natural a lo largo del día y del año. A fin de estimar los tipos de cielo, diversos estudios se han enfocado en la proposición de modelos considerando, además de la radiación solar, la localidad geográfica y la posición del sol (Comission Internationale de l'Eclairage [CIE], 2003; Igawa et al., 1997; Igawa & Nakamura, 2001; Inanici & Hashemloo, 2017; Kittler et al., 1997 y 1998; Kleindienst et al., 2008; Li & Lou, 2018; Pérez et al., 1990; Pérez et al., 1993; Piderit et al., 2014). De acuerdo con Inanici y Hashemloo (2017), actualmente el modelo All Pérez All Weather Sky Model, desarrollado por Pérez et al. (1993), es el más comúnmente utilizado por diversos programas de simulación computacional, pues requiere como insumo la radiación directa normal y la radiación difusa, y no requiere especificar un tipo en particular de cielo, así como el modelo CIE (CIE, 2003).

En Pérez (1993) *All Weather Sky model*, a partir de los datos de radiación son calculadas Sky Clearness (ϵ) y Sky Brightness (Δ).

$$\epsilon = Dh + kZ^3 / 1 + kZ^3 \text{ (Ecuación 1)}$$

$$\Delta = Dh * m / I_0 \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde Dh es la radiación difusa horizontal, I es la radiación directa normal, k es una constante igual a 1,041, Z es el ángulo solar cenital, m es la masa óptica relativa del aire y I_0 es la irradiancia extraterrestre.

El resultado del cálculo del Sky Clearness (ϵ) se agrupa en ocho variables discretas que indican el tipo de cielo, desde *muy nublado* (1) hasta *despejado* (8). Especial cuidado debe tenerse con la escogencia del archivo climático para extraer los datos de radiación o para realizar simulaciones computacionales (Bellia et al., 2015a y 2015b; González Cáceres & Díaz Cisternas 2013; Iversen et al., 2013), en tanto que podrían poseer datos que generen errores en las estimaciones térmicas (De Almeida & De Vasconcellos, 2019) o lumínicas. En general, los archivos climáticos *Typical meteorological Year (TMY)* o *International Weather for Energy calculation (IWECC)* han mostrado ser consistentes y confiables (Bellia et al., 2015a; 2015b). Los archivos TMY hacen referencia a la construcción de un año hipotético típico, a partir de la incorporación de los meses más representativos entre varios años y según la variable a la que se le dé mayor importancia (temperatura del aire, velocidad del viento, radiación, etc.). Desde el punto de vista de las simulaciones de luz natural, las variables relacionadas con radiación son las que influyen en los cálculos.

Si bien en el territorio colombiano no hay evidencia de que exista una fuente oficial que posea y distribuya archivos climáticos, en la actualidad existen dos fuentes de las que se pueden extraer estos: Climate.OneBuilding.org (Crawley & Lawrie 2019), que usa archivos TMYx; es decir, archivos TMY derivados de datos climáticos horarios registrados hasta 2017 por la *US Integrated Surface Database de la National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (NOAA, 2019), y Clima-Colombia (Hudson et al., 2019), que, haciendo uso del *Synthetic Year Method*, que sintetiza datos climáticos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019) y de la NOAA (2019) haciendo uso de estaciones climáticas cercanas.

La caracterización de los tipos de cielo predominantes en distintas localidades del territorio colombiano es un insumo fundamental para la optimización de las estimaciones del desempeño lumínico que se podría alcanzar con una u otra estrategia arquitectónica; por tanto, esta caracterización podría contribuir también al ajuste de las normativas climáticas locales, como, por ejemplo, la Resolución 549 de 2015 o la NTC 4595, de manera que las estrategias para favorecer la eficiencia energética asociada al uso de la luz natural por encima de la luz artificial consideren la disponibilidad lumínica local, y no únicamente la temperatura. Es decir, en estas normativas, comúnmente, las estrategias para el aprovechamiento de la luz natural se consideran

según la clasificación climática del municipio, y no según la disponibilidad lumínica.

Esta investigación parte de las siguientes hipótesis: i) para cada ciudad colombiana considerada en la investigación existen grandes discrepancias en los tipos de cielo predominantes según el archivo climático utilizado, y ii) esas discrepancias generan grandes diferencias en los resultados de simulaciones computacionales dinámicas para evaluar el desempeño de luz natural para una misma ciudad, de acuerdo con el archivo climático utilizado; por tanto, no existe certeza de que se pueda contar con una aproximación adecuada al desempeño lumínico a través de simulaciones dinámicas de luz natural en el territorio colombiano.

Frente a lo anterior, esta investigación se planteó un doble objetivo. Por un lado, a fin de verificar la existencia de diferencias significativas entre datos de los archivos climáticos, se propuso identificar, a partir de los archivos climáticos disponibles, los tipos de cielo predominantes de distintas ciudades colombianas. Desde estas diferencias, se trazó como meta verificar las variaciones en la valoración del desempeño de la luz natural de un espacio hipotético, según el archivo climático seleccionado. Estas posibles variaciones resaltarían en la necesidad de contar con insumos más confiables para la simulación computacional, de manera que se favorezca la predicción del desempeño lumínico de espacios interiores a través de simulaciones dinámicas de luz natural. Para lograr los objetivos, tanto la metodología como los resultados se dividieron en dos etapas; una por cada objetivo planteado.

Tabla 1. Descripción de información básica de ciudades colombianas seleccionadas.
Fuente: elaboración propia (2019).

Ciudad	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Tipo de clima según Res. 0549 de 2015
Armenia	4°53'N	75°68'O	1551	Templado
Barranquilla	10° 57'N	74°47'O	18	Cálido húmedo
Bogotá	4°42'N	74°4'O	2640	Frío
Bucaramanga	7° 8'N	73° 0'O	959	Cálido seco
Cali	3° 25'N	76°31'O	1018	Cálido seco
Cartagena	10° 24'N	75° 30'O	2	Cálido húmedo
Ibagué	4° 26'N	75° 14'O	1285	Templado
Leticia	4° 12'N	69° 56'O	96	Cálido húmedo
Manizales	5° 06'N	75°33'O	2160	Frío
Medellín	6° 13'N	75° 35'O	1495	Templado
Montería	8° 45'N	75° 53'O	18	Cálido seco
Pereira	4° 48'N	75° 41'O	1411	Templado
Quibdó	5° 41'N	76° 39'O	43	Cálido húmedo

Metodología

De los archivos climáticos disponibles para trece ciudades colombianas se extrajeron los datos de radiación solar. Con esta información fue calculado el Clearness Index, del *All Weather Sky Model*. Los resultados de estos cálculos fueron agrupados en tablas y figuras, con los que se compararon y se identificaron los cielos predominantes para cada ciudad según las fuentes de generación de los archivos climáticos. Adicionalmente, fueron realizadas simulaciones computacionales sobre un espacio hipotético localizado en Bogotá, Cali y Medellín haciendo uso de los archivos climáticos disponibles. Con los resultados fueron evaluadas las diferencias por ciudad en el desempeño lumínico evaluado, según el archivo climático utilizado.

Ciudades colombianas seleccionadas

Para la investigación fueron seleccionadas 13 ciudades colombianas. El criterio de selección obedece a la disponibilidad de archivos climáticos asociados a esta. La tabla 1 contiene información de la ciudad relevante para este estudio.

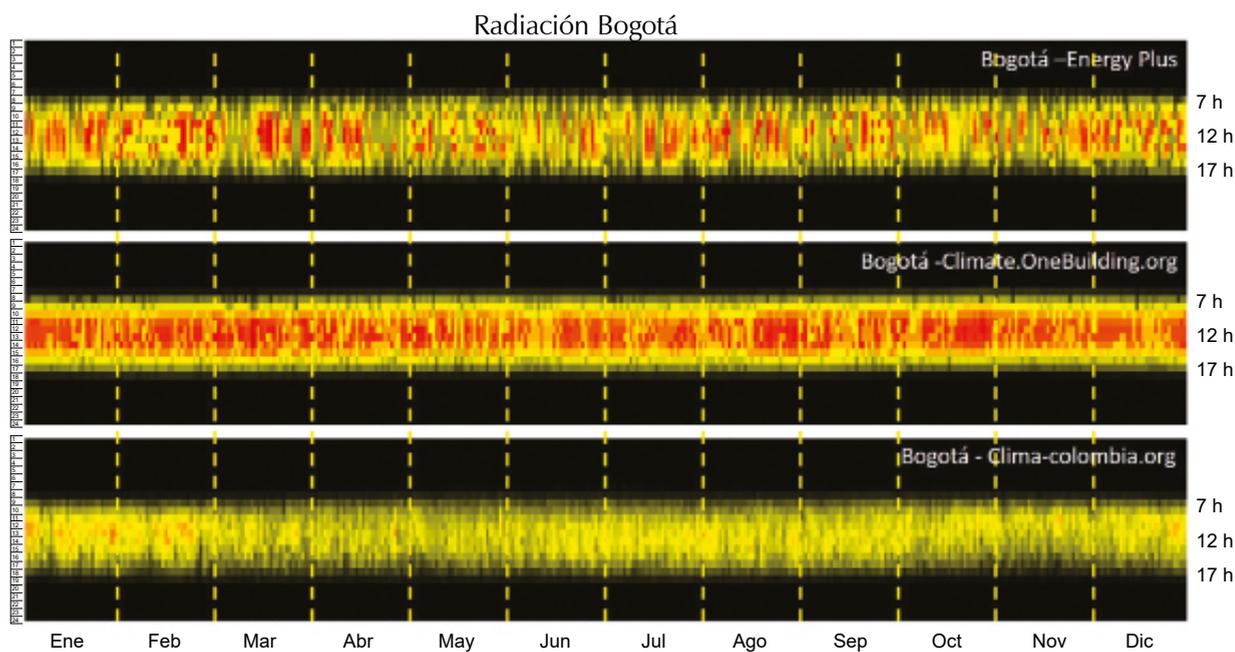


Figura 1. Comparación de la distribución de la radiación solar global horizontal a lo largo del año en Bogotá, D. C., Colombia, según archivo climático. Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC

Etapa 1

Radiación solar en ciudades colombianas

En esta investigación fueron consideradas dos fuentes para la obtención de los archivos climáticos:

- Climate.OneBuilding.org (Crawleu & Lawrie 2019), disponibles en la página http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/default.html
- Clima-Colombia (Hudson et al., 2019), disponibles en la página <http://clima-colombia.org/>

La tabla 2 muestra la radiación solar global horizontal promedio anual, según la fuente de los archivos climáticos para cada ciudad, y muestra la diferencia entre los datos de radiación obtenidos entre ambas fuentes, lo que implicaría diferencias en las simulaciones según se use un archivo climático u otro.

La figura 1 ejemplifica las diferencias en los datos de radiación global horizontal obtenido para Bogotá en tres fuentes distintas: la primera hace referencia al archivo International Weather for Energy Calculation (IWECC), de la página del programa de simulación computacional Energy Plus (US Department of Energy's & Building Technologies Office, 2019), en la que para Colombia solo está disponible el archivo de Bogotá. El segundo hace referencia a un archivo TMYx 2003-2017 de Climate.OneBuilding.org (Crawleu & Lawrie, 2019), mientras que el tercero hace referencia al archivo TMY Synthetic Year Method de Clima-Colombia (Hudson et al., 2019). En la misma figura, en el eje de las abscisas se muestran los meses, y en las ordenadas, las horas. Se estima que estas diferencias en la radiación global podrían derivar en diferencias entre los tipos de cielo generados para los cálculos de desempeño de luz natural y, por tanto, en diferencias en la valoración del desempeño lumínico de ambientes interiores según el archivo climático usado.

Ciudad	Radiación solar global horizontal promedio año. Fuente: Climate.OneBuilding.org Wh/m ²	Radiación solar global horizontal promedio año. Fuente: Clima-Colombia Wh/m ²	Diferencia (Wh/m ²)
Armenia	246,2	162,4	83,8
Barranquilla	234,5	215,7	18,8
Bogotá	240,1	136,5	103,6
Bucaramanga	233,2	181,8	51,4
Cali	240,7	185,6	55,1
Cartagena	248,3	205,8	42,5
Ibagué	239,3	172,4	66,9
Leticia	203,8	183,8	20
Manizales	211,0	141,1	70
Medellín	259,5	197,6	61,9
Montería	220,6	209,7	10,9
Pereira	250,2	162,4	87,8
Quibdó	186,4	37,4	149

Cálculo del Clearness Index

Para la identificación de los tipos de cielo fue calculado el Clearness Index, del *All Weather Sky model*, como se ve en la ecuación 1, en frecuencia horaria y haciendo uso de la información de radiación contenida en los dos archivos climáticos por ciudad.

En esta ecuación, el ángulo solar cenital (Z) fue calculado de acuerdo con Salazar (1995), según la ecuación 3.

Tabla 2. Diferencia de la radiación global horizontal media según el archivo climático. Fuente: elaboración propia (2019).

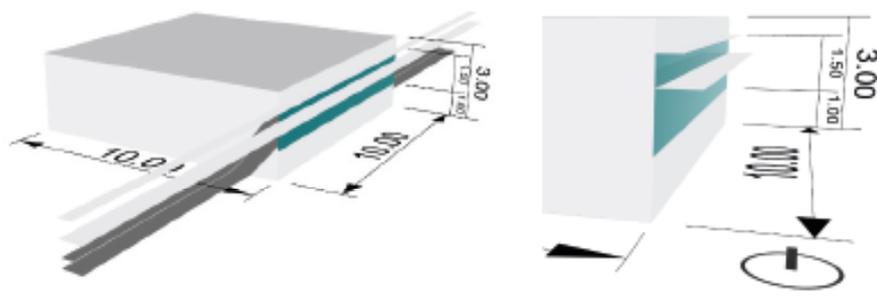


Figura 2. Modelo 1 para simulación computacional.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC

Ambient bounces	Ambient division	Ambient sampling	Ambient accuracy	Ambient resolution
5	1000	20	0,1	300

Tabla 3. Parámetros utilizados en la simulación computacional.

Fuente: elaboración propia (2019).

Materiales	
Piso	GenericFloor_20
Techo	GenericCeiling_70
Paredes	GenericInteriorWall_50
Dispositivos de sombra	GenericFurniture_50
Vidrio claro	Glazing_SinglePane88
Vidrio de protección solar	Glazing_Customized60

Tabla 4. Materiales utilizados en la simulación computacional.

Fuente: elaboración propia (2019).

$$Z=90^\circ-\beta \text{ (ecuación 3)}$$

Donde β es el ángulo de altura solar, calculado según la ecuación 4

$$\beta = \arcsen^*(senL * sen\delta - cosH * cos\delta * cosL) \text{ (ecuación 4)}$$

Donde L es la latitud, δ la declinación solar para un día n , y H , el ángulo solar horario.

Los resultados de los cálculos en frecuencia horaria fueron agrupados en ocho variables discretas, entre 1 y 8, de acuerdo con los rangos establecidos por Pérez et al. (1990), las cuales indican desde el tipo de cielo 1 para cielos muy nublados hasta 8, para cielos despejados. A partir de esta agrupación fue identificada la frecuencia de los tipos de cielo en cada una de las ciudades seleccionadas, y fueron realizados gráficos anuales que muestran la distribución de los tipos de cielo calculados a lo largo del año. Tanto los análisis de frecuencia como la distribución de los tipos de cielo a lo largo del año dan una idea de las diferencias entre los insumos para la simulación computacional, que podrían derivar en discrepancias de resultados de análisis para un mismo espacio según el archivo climático utilizado.

Etapa 2

Simulaciones computacionales

A fin de verificar la incidencia del archivo climático sobre la evaluación del desempeño lumínico de ambientes interiores, fueron reali-

zadas simulaciones computacionales dinámicas haciendo uso del *plugin Diva for Rhino* sobre dos ambientes hipotéticos localizados en tres ciudades (Bogotá, Cali y Medellín), y a partir de dos posibles archivos climáticos.

Para las simulaciones dinámicas fueron usados dos archivos climáticos por ciudad, obtenidos de las fuentes ya mencionadas. Las métricas calculadas fueron: DA (Reinhart & Walkenhorst, 2001); UDI (Mardaljevic et al., 2012; Nabil & Mardaljevic, 2005 y 2006); SDA y ASE (IESNA-The Daylight Metric Committee, 2012).

Ambientes hipotéticos evaluados

Para las simulaciones dinámicas se construyeron dos ambientes hipotéticos: un espacio de 10 m de largo \times 10 m de ancho \times 3 m de altura, iluminados unilateralmente con una ventana de 1,5 m de altura \times 10 m de ancho y con un sillar de 1 m orientada al este. La diferencia entre los dos ambientes hipotéticos es el tipo de vidrio y los dispositivos de control solar. Para el modelo 1 fue usado un vidrio simple, con 0,88 de transmitancia lumínica, y fueron dispuestos dos dispositivos de control solar horizontales. El dispositivo superior fue dispuesto a una altura de 2,5 m, y tenía 0,4 m de profundidad. El dispositivo inferior fue dispuesto a una altura de 2,0 m y tenía una profundidad de 0,7 m, como se muestra en la figura 2. A efectos de la simulación, los aleros se extendieron 10 m más a lado y lado.

El modelo 2 no contó con elementos de control solar, pero sí con un vidrio de 0,6 de transmitancia lumínica.

Parámetros de simulación computacional

Se dispuso una malla de cálculo a 0,7 m del piso, considerando un plano de trabajo, y con una grilla de 0,3 m de separación entre los nodos.

Para la simulación en Diva fueron usados los parámetros que se describen en la tabla 3 y los materiales descritos en la tabla 4.

Tratamiento de diferencias de resultados de simulaciones

Los resultados de las métricas dinámicas usadas en esta investigación hacen referencia al promedio del porcentaje de tiempo que un grupo de puntos sobre la malla de cálculo posee un nivel lumínico superior a un valor de referencia: DA (Reinhart & Walkenhorst 2001), o en un rango lumínico, como es el caso de UDI (Mardaljevic et al., 2012; Nabil & Mardaljevic, 2005 y 2006). Las otras hacen referencia al porcentaje del espacio interior que posee un nivel lumínico superior a una iluminancia de referencia durante al menos el 50% del tiempo al año (SDA), y al porcentaje del espacio que se encuentra expuesto a la radiación solar directa por más de 250 horas al año (ASE) (IESNA-The Daylight Metric Committee, 2012).

No hay evidencia de investigaciones anteriores en las que se determine cuándo son significativas estas diferencias o discrepancias entre resultados de simulaciones dinámicas de luz natural. En el ejercicio práctico, un punto porcentual en los resultados de simulaciones puede favorecer o evitar que se consigan puntos para certificaciones. Para esta investigación se estimó que diferencias mayores que el 5% son notables y diferencias superiores al 10% son significativas, pues representan, aproximadamente, más de 365 horas al año de diferencia en la valoración de un ambiente lumínico interior.

Ciudad de Armenia

Para el caso de la ciudad de Armenia, como se puede ver en la tabla 5, los resultados muestran una notable diferencia entre ambos archivos climáticos. OneBuilding presenta, principalmente, dos tipos de cielo predominantes y opuestos: muy nublado (tipo 1) y parcialmente despejado (tipo 6). El primero de ellos está asociado más al principio y el final del día, y el segundo, hacia el mediodía. Clima_Colombia, en cambio, muestra un cielo en la tendencia de los nublados (tipos 1-4) el 97,3% del tiempo. Un análisis cualitativo de la distribución de los tipos de cielo en el año permite concluir que existe una notable diferencia entre ambos archivos climáticos, y que dependiendo del que se escoja podría modificarse notablemente la valoración lumínica.

Ciudad de Barranquilla

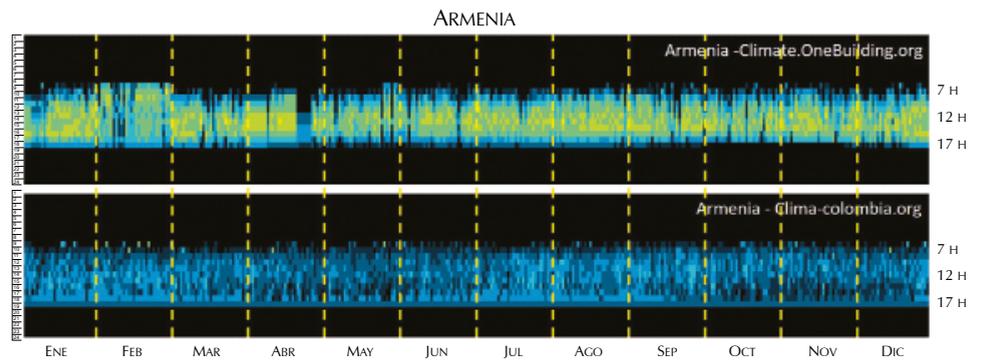
Los resultados de la ciudad de Barranquilla, como se muestra en la tabla 6, permiten ver mayor homogeneidad de tipos de cielo, pero resaltando el parcialmente claro (tipo 5) en OneBuilding, y muy nublado (tipo 1) y parcialmente nublado (tipo 4) en Clima_Colombia. Los tipos de cielo muy claros (tipo 7-8) son poco frecuentes o inexistentes en este clima, de acuerdo con estos archivos climáticos, lo que podría resultar contradictorio con la idea general que se tiene de este clima.

Resultados

Etapa 1

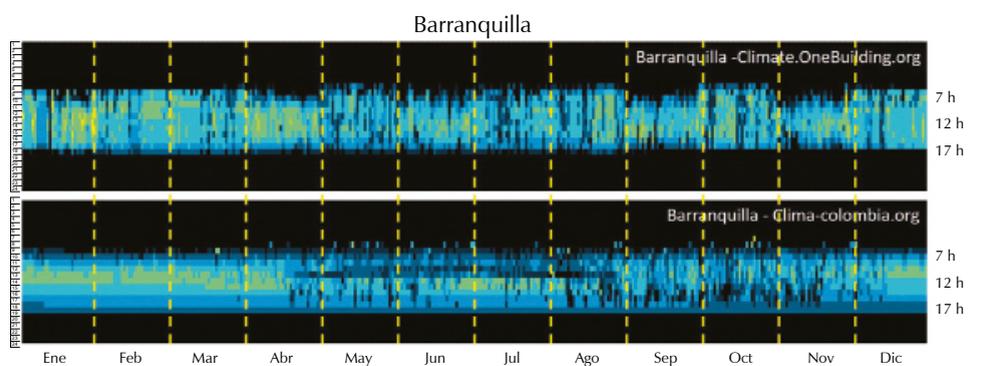
Descripción de tipos de cielo predominantes según el Clearness Index

Los resultados que se presentan en las imágenes que aparecen a continuación permiten visualizar la comparación de la frecuencia de los tipos de cielo, según la fuente del archivo climático, entre las 7:00 a. m. y las 5:00 p. m., anualmente. En las tablas se resaltan los tipos de cielo predominantes.



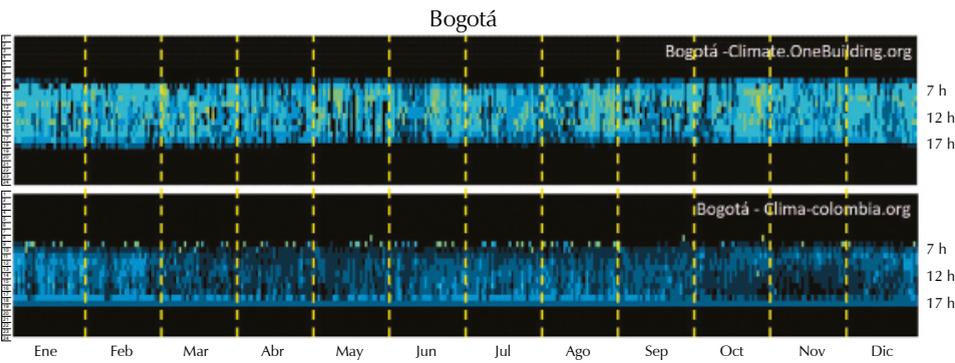
	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate. OneBuilding.org (% tiempo)	22,8%	4,0%	7,0%	9,9%	15,9%	29,5%	10,8%	0,2%
Clima-colombia.org (% tiempo)	24,1%	19,3%	33,9%	20,0%	2,5%	0,2%	0,0%	0,0%

Tabla 5. Resultados de tipo de cielo para Armenia. Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC



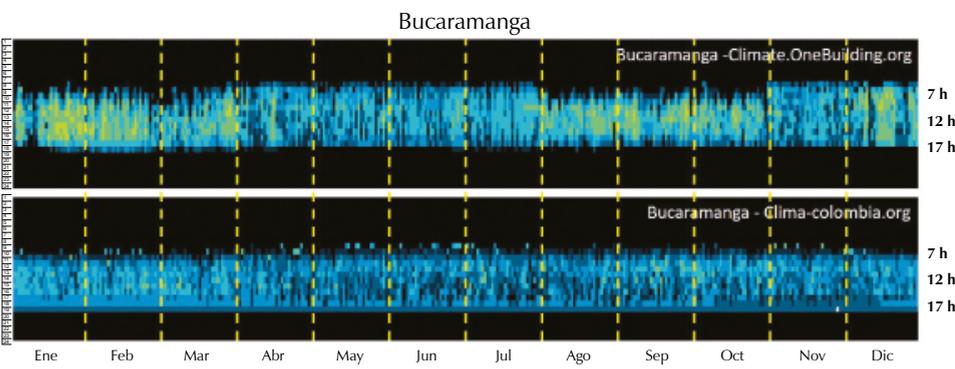
	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate. OneBuilding.org (% tiempo)	12,0%	8,5%	13,2%	16,3%	34,6%	14,2%	1,0%	0,2%
Clima-colombia.org (% tiempo)	22,9%	11,8%	16,5%	20,2%	19,6%	8,8%	0,0%	0,0%

Tabla 6. Resultados de tipo de cielo para Barranquilla. Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC



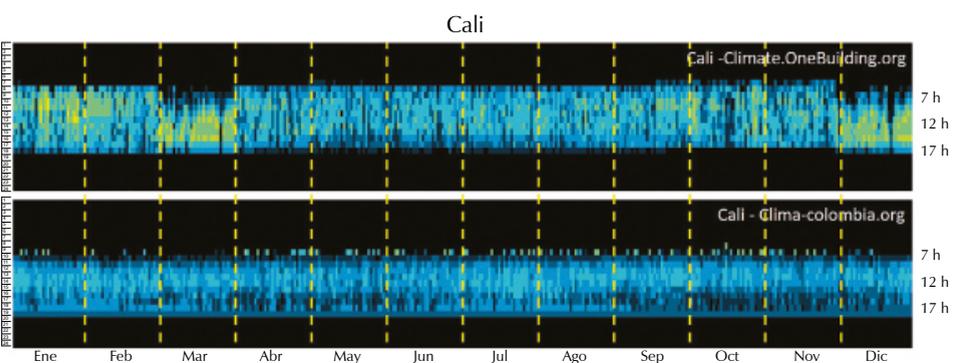
	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	8,8 %	6,4 %	20,3 %	22,8 %	33,7 %	7,5 %	0,4 %	0,0 %
Clima-colombia.org (% tiempo)	27,9 %	34,4 %	28,5 %	7,3 %	0,7 %	1,1 %	0,0 %	0,0 %

Tabla 7. Resultados de tipo de cielo para Bogotá.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC



	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	11,2 %	9,6 %	16,3 %	18,1 %	28,7 %	14,1 %	2,0 %	0,0 %
Clima-colombia.org (% tiempo)	22,8 %	13,3 %	24,0 %	27,1 %	11,6 %	1,2 %	0,0 %	0,0 %

Tabla 8. Resultados de tipo de cielo para Bucaramanga.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC



	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	10,8 %	6,8 %	16,4 %	19,6 %	31,6 %	12,7 %	2,0 %	0,2 %
Clima-colombia.org (% tiempo)	21,8 %	12,4 %	20,6 %	30,3 %	13,9 %	1,0 %	0,0 %	0,0 %

Tabla 9. Resultados de tipo de cielo para Cali.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC

Ciudad de Bogotá

En el caso de la ciudad de Bogotá, como se ve en la tabla 7, OneBuilding muestra una tendencia de cielos nublados (tipos 3-5), donde destaca el tipo 5 (parcialmente nublado), con el 33,7% del tiempo, mientras Clima-Colombia da resultados que tienden a muy nublado (tipos 1-3), donde destaca el tipo 2, con el 34,4% del tiempo. Las diferencias se acentúan durante algunas épocas del año; por ejemplo, marzo, abril y noviembre. En caso de que los análisis lumínicos se centraran en estas épocas del año, los resultados podrían ser notablemente distintos.

Ciudad de Bucaramanga

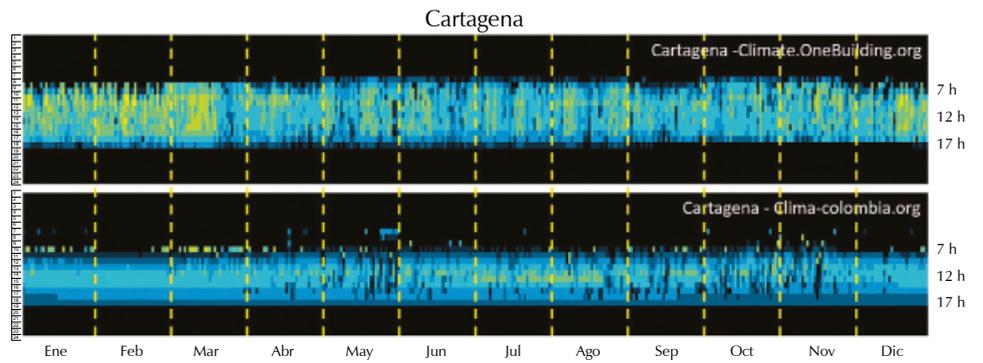
La ciudad de Bucaramanga, como se muestra en la tabla 8, denota una tendencia al cielo parcialmente nublado (tipo 5) en el resultado de OneBuilding. Por el contrario, Clima-Colombia da un resultado variable de cielos tipos 1, 3 y 4, siempre con tendencia a cielos nublados. A pesar de esto, se destacan en ambos archivos aparentes coincidencias de cielos más oscuros entre abril y julio, aunque con diferencias más marcadas en diciembre y enero.

Ciudad de Cali

Los resultados de la ciudad de Cali, como se observa en la tabla 9, muestran en el archivo de OneBuilding que predominan los cielos tipo 5 (parcialmente claros). Según Clima-Colombia, predomina parcialmente nublado (tipo 4), lo que da un resultado bastante semejante en número; sin embargo, la distribución de estas condiciones es más homogénea a lo largo del año en el archivo Clima-Colombia, con tendencia a cielos más claros en las mañanas y más nublados en las tardes. Por el contrario, el resultado de OneBuilding muestra cielos más claros a finales y principio de año, desde diciembre hasta marzo. A pesar de esto, se destaca una extraña distribución de cielos —probablemente, como producto del procesamiento estadístico de los datos— en marzo y diciembre del archivo climático de OneBuilding. En estos meses, a diferencia del resto del año, predominan cielos claros al final de la tarde.

Ciudad de Cartagena

Para la ciudad de Cartagena, como se muestra en la tabla 10, el resultado de OneBuilding denota un tipo de cielo parcialmente claro (tipo 5) la mayor parte del tiempo, contrario a Clima-Colombia, que lo muestra principalmente muy nublado (tipo1) y con un comportamiento constante a lo largo del año. A simple vista, la distribución de tipos de cielo que se presenta con el archivo climático de Clima-Colombia parece poco confiable.



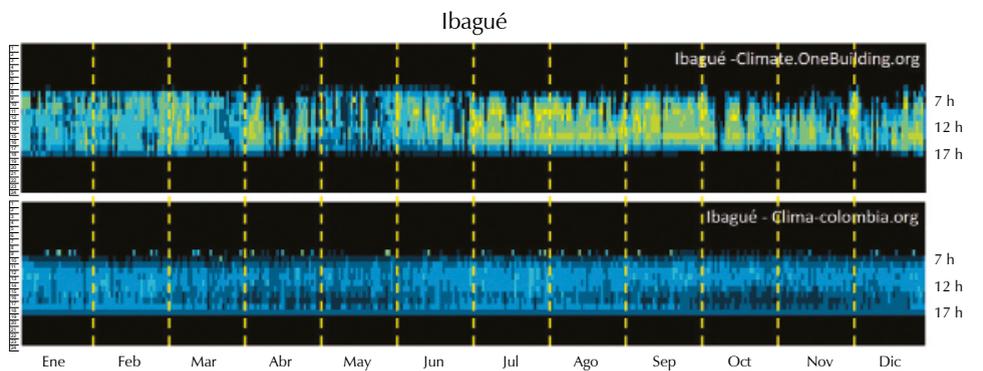
	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	7,6%	4,8%	9,7%	17,9%	35,3%	20,7%	3,5%	0,4%
Clima-colombia.org (% tiempo)	32,3%	9,4%	11,3%	20,9%	21,7%	4,1%	0,3%	0,0%

Tabla 10. Resultados de tipo de cielo para la ciudad de Cartagena.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC

Ciudad de Ibagué

En cuanto a la ciudad de Ibagué, como se observa en la tabla 11, los resultados muestran un cielo más hacia parcialmente nublado (tipo 5 y 6) para el archivo OneBuilding. Para el caso de Clima-Colombia, más bien se muestra parcialmente nublado (tipo 3 y 4). En ambos casos hay aparentes coincidencias en periodos del año con cielos más oscuros: abril-mayo y octubre-diciembre.



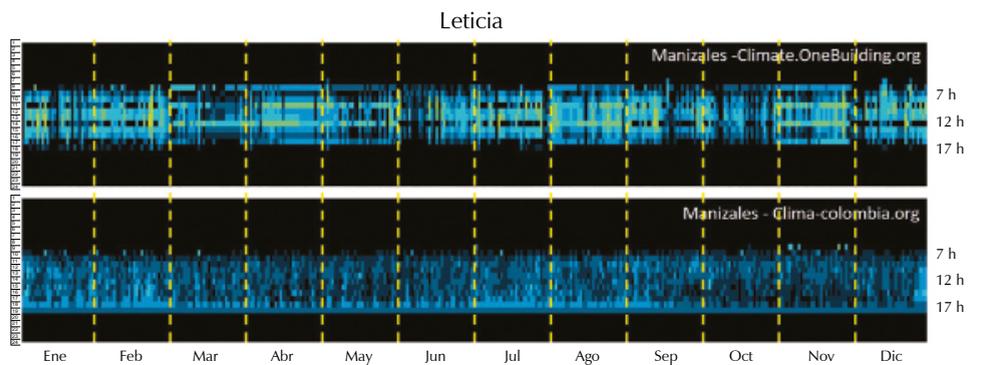
	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	16,4%	7,2%	9,8%	15,6%	22,6%	21,2%	6,4%	0,8%
Clima-colombia.org (% tiempo)	25,8%	13,3%	27,9%	30,2%	2,5%	0,3%	0,0%	0,0%

Tabla 11. Resultados de tipo de cielo para ciudad de Ibagué.

Fuente: elaboración propia(2019). CC BY-NC

Ciudad de Leticia

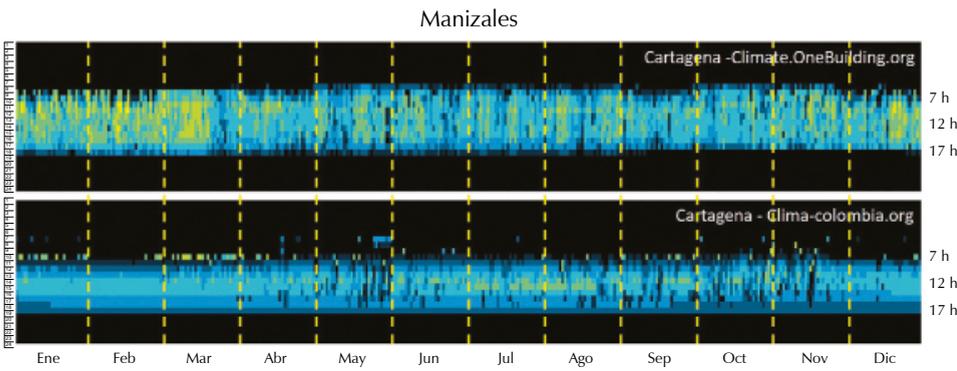
En la ciudad de Leticia, como se muestra en la tabla 12, el resultado para OneBuilding es, en su mayoría, un cielo nublado (tipos 2 y 3); mientras tanto, Clima-Colombia muestra los extremos de los cielos nublados (tipo 1 y 4) la mayor parte del tiempo. A pesar de esto, aparentemente es la ciudad que posee menos discrepancia en la distribución de los tipos de cielo.



	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	12,2%	21,9%	26,6%	18,4%	17,6%	3,1%	0,1%	0,0%
Clima-colombia.org (% tiempo)	26,3%	13,9%	15,7%	21,1%	18,4%	4,5%	0,0%	0,0%

Tabla 12. Resultados de tipo de cielo para la ciudad de Leticia.

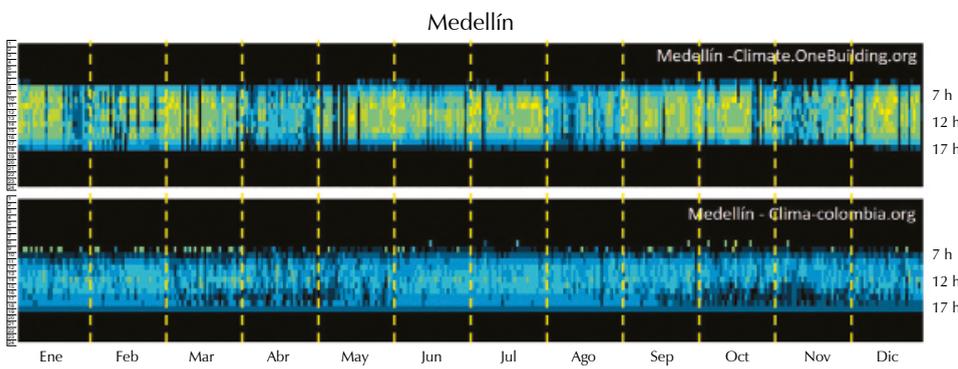
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC



	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	27,5%	11,2%	15,9%	20,2%	17,3%	7,2%	0,7%	0,0%
Clima-colombia.org (% tiempo)	24,1%	37,4%	30,6%	7,0%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabla 13. Resultados de tipo de cielo para la ciudad de Manizales.

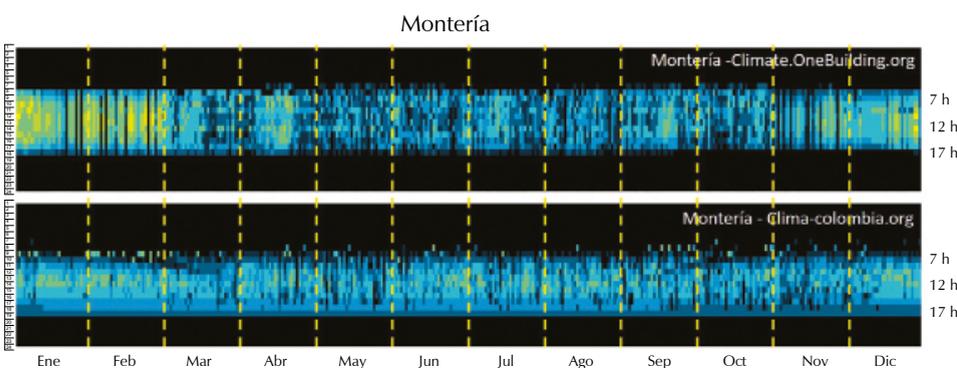
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC



	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	8,8%	5,4%	10,3%	13,8%	20,9%	28,5%	10,9%	1,3%
Clima-colombia.org (% tiempo)	23,9%	10,8%	15,9%	27,1%	19,8%	2,4%	0,1%	0,0%

Tabla 14. Resultados de tipo de cielo para ciudad de Medellín.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC



	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	13,1%	13,6%	19,2%	18,8%	21,6%	10,4%	2,8%	0,5%
Clima-colombia.org (% tiempo)	24,3%	10,4%	15,3%	23,2%	21,5%	5,4%	0,0%	0,0%

Tabla 15. Resultados de tipo de cielo para la ciudad de Montería.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC

Ciudad de Manizales

En el archivo de OneBuilding, como se muestra en la tabla 13, los resultados para la ciudad de Manizales son cielos de tipo 1 y 4 y tendencia generalizada a cielos nublados. Clima-Colombia tiene la misma tendencia, pero a cielos mayoritariamente nublados (tipos 2 y 3). A simple vista, el archivo de OneBuilding presenta franjas negras, cielos muy nublados, durante casi todo el año, a las 10:00 a. m. y a las 2:00 p. m., lo que podría interpretarse como un error en el procesamiento de datos para la generación de los tipos de cielo.

Ciudad de Medellín

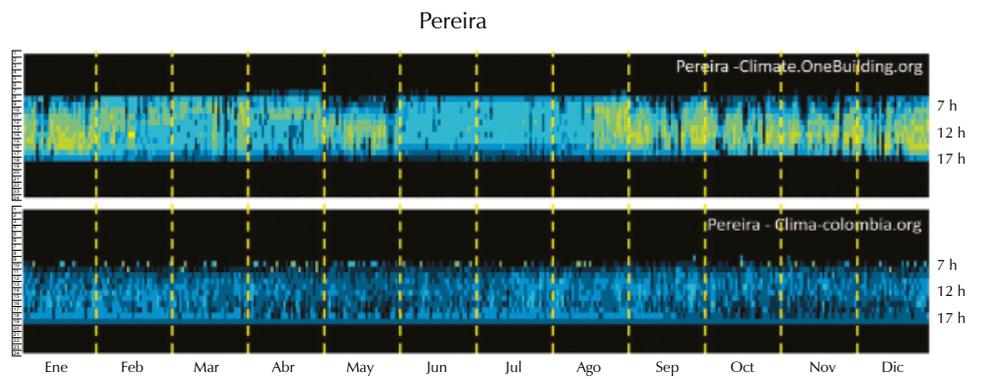
En el caso de la ciudad de Medellín, como se muestra en la tabla 14, se encuentran resultados de cielos parcialmente claros en su mayoría (tipos 5 y 6) para OneBuilding. Para Clima-Colombia hay una diferencia importante, ya que ubica los cielos en los extremos de nublados (tipos 1 y 4), muy dispar con respecto al otro archivo. Adicionalmente, y en concordancia con la tabla 2, OneBuilding presenta a Medellín como una de las ciudades con cielos más claros de Colombia, con datos de radiación mayores que los de otras ciudades como Cali, Cartagena o Barranquilla, lo que podría ser un error de procesamiento de datos para la generación de los archivos climáticos.

Ciudad de Montería

La ciudad de Montería, como se puede ver en la tabla 15, muestra cielos homogéneos en los tipos; destaca levemente el tipo 5 (parcialmente claro), y con dos comportamientos marcados a lo largo del año: de diciembre a febrero, con tendencia a más claros, y el resto del año, tendencia a más nublados, para OneBuilding. Para Clima-Colombia, se muestran, en su mayoría, cielos nublados de tipos 1, 4 y 5.

Ciudad de Pereira

Para la ciudad de Pereira, como se puede ver en la tabla 16, los resultados de OneBuilding muestran cielos mayoritariamente claros (tipos 5 y 6) a lo largo de todo el año. Por el contrario, Clima-Colombia da cuenta de cielos más nublados: en mayor medida, de tipos 3, 1 y 4. Una variación importante entre ambos archivos climáticos.

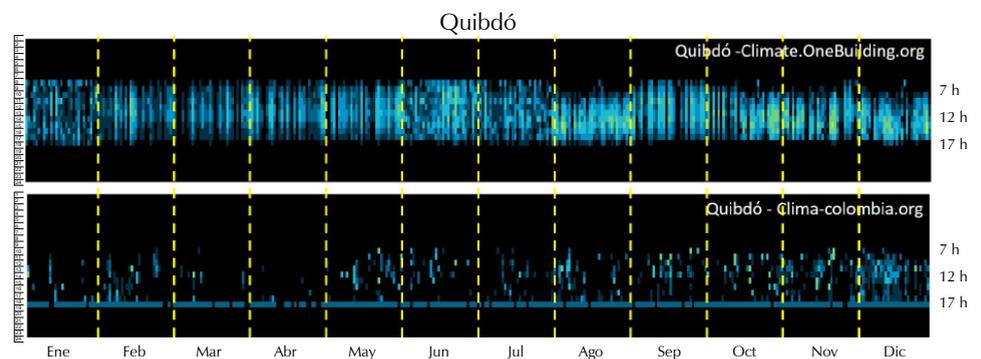


	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	10,9%	5,1%	10,6%	15,4%	32,5%	20,1%	5,3%	0,1%
Clima-colombia.org (% tiempo)	23,4%	19,2%	33,9%	20,0%	2,7%	0,8%	0,0%	0,0%

Tabla 16. Resultados de tipo de cielo para la ciudad de Pereira. Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC

Ciudad de Quibdó

Los resultados para la ciudad de Quibdó, como se muestra en la tabla 17, son de cielos mayoritariamente nublados. Para OneBuilding, predominan los tipos 1 y 2. En el caso de Clima-Colombia, muestra amplia tendencia a cielos muy nublados (tipo 1) para gran parte del año. Si bien se reconoce que esta región del país es altamente lluviosa, y que, por tanto, los cielos, desde el punto de vista de la iluminación, tienden a ser más nublados, el archivo de Clima-Colombia aparentemente subestima de manera notable la disponibilidad lumínica en esta región.



	Muy nublado							Muy claro
	1	2	3	4	5	6	7	8
Climate.OneBuilding.org (% tiempo)	31,2%	22,1%	16,7%	14,4%	13,0%	2,5%	0,1%	0,0%
Clima-colombia.org (% tiempo)	85,4%	7,4%	3,4%	1,7%	1,3%	0,8%	0,0%	0,0%

Tabla 17. Resultados de tipo de cielo para la ciudad de Quibdó. Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC

Conclusiones preliminares de la etapa 1

Tras la caracterización de los tipos de cielo con ambos archivos climáticos, en términos generales se evidencian grandes diferencias entre los resultados que se encuentran para cada ciudad. Aparentemente, los archivos climáticos de Clima-Colombia subestiman la radiación solar global, principalmente, en las horas del mediodía, mientras que los archivos climáticos de OneBuilding la sobrestiman. Esta afirmación coincide con los hallazgos de Arango-Díaz (2021), con los que se demostraron las diferencias que se tienen entre los datos de radiación de los archivos climáticos y los datos medidos por las entidades oficiales del país.

Adicionalmente, como se esperaba, los resultados en ciudades como Quibdó, Manizales y Bogotá muestran cielos nublados durante una

mayor proporción de tiempo al año; sin embargo, Armenia, Ibagué y Medellín presentaron los cielos más despejados (categorías 6, 7 y 8); incluso, por encima de Barranquilla y Cartagena. Estos resultados llaman la atención, puesto que podría ser incoherente con los datos de radiación de cada ciudad.

Etapa 2

Cálculo del desempeño lumínico de ambientes interiores

Los resultados de las simulaciones computacionales fueron agrupados en tablas. La tabla 18 muestra los resultados de las simulaciones con el modelo 1, mientras que la tabla 19 muestra los resultados con el modelo 2. En ambas tablas son resaltados los casos con diferencias mayores que

el 5% en naranja, y con diferencias aproximadamente mayores que el 10%, en verde.

Se evidencian grandes diferencias en los resultados de la simulación según el archivo climático seleccionado. En algunos casos, las diferencias son menores que el 5%, pero en otros, como es el caso de la métrica ASE hacia el este, las diferencias son altísimas. Esto se debe a las diferencias entre los datos de radiación contenida en los archivos climáticos: principalmente, entre los datos de radiación directa; es decir, sol directo.

En general, de 84 pares de simulaciones, trece poseen diferencias mayores al 10% —es decir, el 15,4% de las simulaciones—, mientras que 37 pares de simulaciones —el 44%— tienen diferencias mayores que el 5%. Estas diferencias podrían ser un indicador de la bajísima precisión y de la incertidumbre con la que se cuenta en este tipo de cálculos.

La figura 3 muestra un ejemplo de la comparación de los resultados de las simulaciones DA 500 lux para el modelo 2 con orientación al

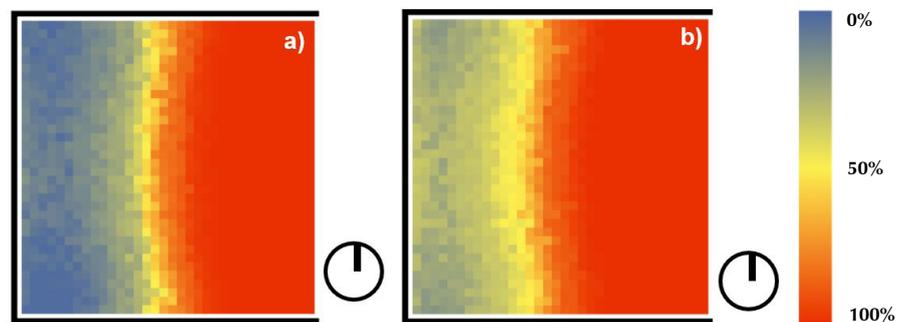
► Tabla 18. Resultados simulación computacional para el modelo 1.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC

Orient.	Ciudad	Fuente	UDI %			DA %		sDA % 300 lux-50%	ASE % 250 h
			100-300	300-3000	>3000	300 lux	500 lux		
Sur	Bogotá	Clima-Col	35,5	61,8	2,1	63,8	44,5	58,9	0,0
		Climate.OneB	25,7	69,2	5,1	74,3	51,0	66,8	3,8
	Cali	Clima-Col	34,4	61,9	2,4	64,3	44,8	59,2	0,0
		Climate.OneB	28,0	68,4	3,7	72,0	49,5	63,8	2,4
Medellín	Clima-Col	32,3	63,3	3,9	67,2	46,9	58,9	2,8	
	Climate.OneB	27,2	68,2	4,6	72,8	50,0	61,9	6,7	
Este	Bogotá	Clima-Col	36,3	60,7	2,2	63,0	43,5	55,3	2,9
		Climate.OneB	25,3	67,4	7,3	74,6	53,9	58,0	22,6
	Cali	Clima-Col	35,0	61,1	2,8	63,1	44,1	56,7	2,9
		Climate.OneB	26,6	66,7	6,8	73,4	52,9	58,4	19,6
	Medellín	Clima-Col	33,4	62,1	4,1	66,1	45,9	56,6	2,9
		Climate.OneB	26,9	66,2	6,9	73,1	52,8	57,1	22,8

► Tabla 19. Resultados simulación computacional para el modelo 2.
Fuente: elaboración propia, 2019. CC BY-NC

Orient.	Ciudad	Fuente	UDI %			DA %		sDA % 300 lux-50%	ASE % 250 h
			100-300	300-3000	>3000	300 lux	500 lux		
Sur	Bogotá	Clima-Col	40,3	49,8	8,4	58,2	43,0	46,6	8,8
		Climate.OneB	32,5	55,5	11,9	67,4	48,5	47,5	13,8
	Cali	Clima-Col	14,7	66,8	18,4	85,2	61,0	52,7	11,3
		Climate.OneB	7,1	72,3	20,6	92,9	68,2	63,9	14,5
Medellín	Clima-Col	12,9	67,6	19,5	82,2	63,9	55,4	11,5	
	Climate.OneB	6,9	73,0	20,1	93,1	69,7	64,4	15,2	
Este	Bogotá	Clima-Col	17,9	65,5	16,5	82,0	59,5	52,8	17,2
		Climate.OneB	9,7	68,7	21,6	90,3	70,7	61,6	31,9
	Cali	Clima-Col	17,7	65,5	16,7	87,1	60,5	59,1	17,6
		Climate.OneB	10,1	69,5	20,5	89,9	69,3	61,7	31,7
	Medellín	Clima-Col	16,1	66,5	17,4	83,9	62,4	59,7	17,5
		Climate.OneB	10,1	70,8	19,1	89,9	69,4	62,2	34,3

► Figura 3. Comparación gráfica resultados DA 500 lux, Bogotá, modelo 2, orientación Este. a) Archivo climático Clima-Colombia. b) Archivo climático OneBuilding.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY-NC



Este en la ciudad de Bogotá. En esta comparación se evidencian grandes diferencias; principalmente, en la zona profunda del ambiente hipotético, en la que con el archivo de Clima-Colombia evidencia que prácticamente en ningún momento del año se puede obtener más de 500 lux en la zona profunda, mientras que con el otro archivo climático sí se obtienen más de 500 lux entre el 30% y el 50% de tiempo al año.

Discusión

En la investigación se evidenció que, tal como lo reportaron Bellia et al. (2015a) y Bellia et al. (2015b), los resultados de tipos de cielo muestran una marcada diferencia en cuanto a la caracterización de cada ciudad dependiendo del archivo climático utilizado. Debido a que el objetivo de la investigación no es identificar cuál de las dos fuentes es más confiable, sino caracterizar tipos de cielo de acuerdo con las fuentes disponibles y detectar diferencias entre las fuentes, no es posible determinar o recomendar cuál de los dos archivos se debe usar. Será necesario ampliar el estudio de investigación para construir archivos climáticos acordes con la realidad climática de cada ciudad, o bien, escoger cuál de los archivos climáticos es más confiable para cálculos de luz natural. En esta investigación se pudo evidenciar que en la construcción de los archivos climáticos usados para cada ciudad hay diferencias en la ponderación de las variables, como, por ejemplo, la radiación, que hace que en el caso de los archivos climáticos Clima-Colombia (Hudson et al., 2019) tiendan a considerar mayor frecuencia de cielos nublados que los archivos de One-Building (Crawley & Lawrie, 2019). A pesar de esto, sí fue caracterizado el tipo de cielo según los archivos climáticos disponibles.

Los datos de un archivo u otro determinan que el cielo se defina en categorías diferentes, de acuerdo con la clasificación escogida para este ejercicio. Esto resalta la importancia de escoger un archivo climático y su influencia en los resultados de metodologías aplicadas a estos. Como se muestra en los resultados, la comparación de tipos de cielo, de manera tanto gráfica como porcentual en tiempo dentro de cada categoría de la clasificación, evidencia cielos muy distintos en cada una de las ciudades. Cada ciudad marca tendencias diferentes a la hora de comparar los archivos climáticos de distintas fuentes. Ello puede ser resultado de la metodología utilizada por los autores a la hora de crear cada archivo climático y de la importancia que le asigne a cada variable climática en la construcción de la información final, como lo resaltan varios estudios (González Cáceres & Díaz Cisternas 2013; Wang et al., 2019).

Los tipos de cielo construidos a partir de los datos de radiación de los archivos climáticos permiten determinar la cantidad de iluminación disponible en el exterior, para, con esta informa-

ción, estimar el desempeño lumínico del entorno y tomar decisiones de diseño en la iluminación natural de los espacios. Las diferencias encontradas tanto en la caracterización del cielo como en las simulaciones computacionales de desempeño lumínico entre ambos archivos evidencian que esta es el efecto directo en los resultados del uso de un archivo climático u otro y, por ende, un efecto directo en la toma de decisiones de diseño lumínico. Adicionalmente a las comparaciones que se puedan hacer entre ciudades, llaman la atención las diferencias entre ciudades catalogadas con la misma zona climática dentro del territorio colombiano: por ejemplo, Barranquilla y Quibdó, ambas clasificados con clima cálido húmedo, tienen tipos de cielo significativamente diferentes; sin embargo, las estrategias bioclimáticas recomendadas para una u otra son las mismas. Este hallazgo es altamente significativo, y debería considerarse al momento de generar recomendaciones sobre políticas públicas y normativas locales para optimizar el desempeño lumínico de ambientes interiores, pues se evidencia que pertenecer a la misma clasificación térmica no necesariamente implica similar disponibilidad lumínica exterior.

Este estudio es altamente dependiente de la información disponible en los archivos climáticos. Al no haber una fuente oficial de estos, se depende enteramente de otras organizaciones que recopilan y procesan la información de estaciones meteorológicas para compilar los archivos climáticos. IDEAM (2019), que es la fuente oficial para la medición de estos datos, cuenta con información de radiación global imprecisa e incompleta; además, no cuenta con datos de radiación directa y difusa. De esta manera, no se puede tener certeza absoluta sobre la fidelidad de estas predicciones a la realidad que se vive; por lo tanto, se diseña bajo parámetros que podrían no estar apegados al contexto real del diseño y a predicciones de desempeño inexactas. Al encontrar variaciones tan grandes en los resultados de las distintas fuentes, se corre el riesgo de proyectar diseños lumínicos que no cumplan con las necesidades de los usuarios, y así incurrir en exceso o en falta de iluminación natural. Esta dificultad implicará imprecisiones en la caracterización presentada y, en la práctica, mayor consumo de luz artificial o mayor exposición a la radiación que lo que se prevería. Adicionalmente, el exceso o la falta de iluminación natural tienen efectos en las personas, que pueden experimentar fatiga visual y reducción del rendimiento en sus labores diarias a partir de una iluminación deficiente.

Conclusiones

Esta investigación partió de la hipótesis de que para cada ciudad colombiana existen discrepancias en los tipos de cielo predominantes según el archivo climático utilizado, y que, por tanto, esas

diferencias podrían generar valoraciones diferentes del desempeño lumínico de un espacio interior en la misma ciudad. Para ello, además de caracterizar los tipos de cielo según los archivos climáticos disponibles, se realizaron simulaciones dinámicas de luz natural usando diferentes archivos climáticos para revisar las diferencias en los resultados para cada ciudad. Se aclara que el objetivo de esta investigación no fue establecer cuál de los archivos climáticos es más confiable: ya Arango-Díaz (2021) identificó debilidades en ambos tipos de archivos climáticos para varias ciudades colombianas. La motivación de esta investigación está asociada a verificar las diferencias en la valoración del desempeño lumínico de un espacio interior según el archivo climático que se utilice, y a llamar la atención acerca de la necesidad de revisar la confiabilidad de los archivos climáticos para cálculos lumínicos.

Los resultados de la caracterización de los tipos de cielo con los archivos climáticos mostraron diferencias muy marcadas en cuanto a los tipos de cada una de las ciudades colombianas estudiadas. En todas las ciudades, las diferencias en las frecuencias de los tipos de cielo a lo largo del año son muy notorias: en el archivo climático de ClimaColombia predominan cielos más oscuros que en el de Onebuilding. Estas discrepancias permiten prever las diferencias que se podrían tener en simulaciones dinámicas de luz natural según el archivo climático utilizado.

Si bien estas diferencias en la caracterización resaltan la importancia en la selección del archivo climático para las ciudades evaluadas, la incertidumbre acerca de cuál de los archivos climáticos es más confiable se mantiene, debido a las diferencias entre la radiación global media anual de cada ciudad, mostradas en la tabla 2, y la radiación global media anual en fuentes oficiales del IDEAM (2019). A pesar de que esta entidad actualmente no ofrece información completa multianual de radiación global para todas las ciudades estudiadas, por lo que no es posible caracterizar los cielos con esta fuente, sí publica datos de radiación global media anual, los cuales difieren notablemente de los datos mostrados en la tabla 2. Estas diferencias no son suficientes para invalidar los resultados de la caracterización de los archivos climáticos, pero sí llaman la atención sobre la necesidad de tener archivos más confiables para cálculos de luz natural.

Frente a la comparación del desempeño lumínico en un ambiente hipotético haciendo uso de los archivos climáticos seleccionados, se evidenciaron diferencias potencialmente significativas entre la valoración de un ambiente según el archivo climático utilizado. En la métrica ASE, las diferencias son más amplias en la orientación Este, en tanto que dicha métrica trabaja a partir de la radiación solar directa y, aparentemente, el archivo de ClimaColombia la subestima. A

pesar de ello, las diferencias en la métrica SDA son las menores, sin que esto implique que sean bajas —principalmente, para el modelo 2—, sin elementos de control solar en la fachada. Para las métricas restantes podría concluirse que la diferencia se amplía cuando se evalúan niveles lumínicos de 300 lux: en la métrica DA existen más casos de diferencias superiores al 10% y del 5% cuando la iluminancia objetivo es de 300 lux que cuando es de 500 lux.

Todas estas discrepancias podrían generar dificultades u obstáculos en la valoración del desempeño lumínico de un ambiente interior, desde el punto de vista de la eficiencia energética y de la comodidad ambiental, pues las simulaciones computacionales son la herramienta para prever el comportamiento de las edificaciones. La falta de confianza en los archivos climáticos genera incertidumbre en el desempeño ambiental de proyectos; incluso, en la obtención de puntos en certificaciones energéticas, como LEED, o de bienestar, como WELL. Por esta razón, resulta de carácter urgente generar datos oficiales y confiables para la realización de cálculos lumínicos vía simulación computacional. Para ello, será necesario contar con datos de radiación global, radiación directa y radiación difusa confiables para todo el territorio colombiano.

Los datos confiables de radiación solar en los archivos climáticos podrían ayudar a identificar la disponibilidad lumínica de cada ciudad y, con base en esto, proponer estrategias para optimizar el desempeño lumínico de edificaciones en concordancia con las necesidades térmicas. Estas estrategias optimizadas favorecerían la comodidad visual y la eficiencia energética de las edificaciones. De igual manera, esta investigación puede servir como base para modificar la normativa actual a escenarios más reales, no solamente basados en caracterizaciones de temperatura, sino incluyendo la disponibilidad real de iluminación como variable de definición del territorio y las estrategias bioclimáticas de adaptación recomendadas.

Contribuciones y agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Bío-Bío, en Chile, por el soporte financiero para el desarrollo del doctorado del primer autor, y a la Universidad de San Buenaventura, en Medellín, por permitir el desarrollo de la investigación. Además, agradecen al grupo de investigación Confort Ambiental y Pobreza Energética (+CO-PE), de la Universidad del Bío-Bío.

Referencias

- De Almeida, M. A. M., & Nogueira De Vasconcellos, V. M. (2019). Desenvolvimento do ano meteorológico típico para a estação meteorológica do inmet de copacabana na cidade do rio de janeiro. En *XV ENCAC - XI ELACAC*, Joao Pessoa, 538-546.
- Alrubaih, M. S., Zain, M., Alghoul, M. A., Ibrahim, N. L., Shameri, M. A., Omkalthum, E. (2013). Research and development on aspects of daylighting fundamentals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21.
- Arango-Díaz, L. (2021). *Nueva métrica dinámica de luz natural: Relación entre la percepción de suficiencia lumínica y la disponibilidad lumínica exterior*. Universidad del Bío-Bío.
- Bellia, L., Pedace, A., & Fragiasso, F. (2015a). Dynamic daylight simulations: Impact of weather file's choice. *Solar Energy* 117, 224-235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.002>
- Bellia, L., Pedace, A., & Fragiasso, F. (2015b). The role of weather data files in climate-based daylight modeling. *Solar Energy* 112, 163-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.033>
- Comission Internationale de L'Eclairage (CIE). (2003). *CIE DS 011.2/E:2002 Spatial distribution of daylight-CIE standard general sky*. VIENNA. <https://cie.co.at/publications/spatial-distribution-daylight-cie-standard-general-sky>
- Crawley, D., & Lawrie, L. (2019). *Climate.One-Building.Org*. http://climate.onebuilding.org/WMO_Regions/South_America/COL_Colombia/index.html
- Gago, E. J., Muneer, T., Knez, M., & Köster, H. (2015). Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.002>
- González Cáceres, A., & Díaz Cisternas, M. (2013). Función e impacto del archivo climático sobre las simulaciones de demanda energética. *Hábitat Sustentable* 3(2), 75-85.
- Al Horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A., Elsarrag, E. (2016a). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment* 5(1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006>
- Al Horr, Y., Arif, M., Kaushik, A., Mazroei, A., Elsarrag, E., Mishra, S. (2016b). Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. *Building and Environment* 105, 369-389. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.001>
- Al Horr, Y. (2017). Occupant productivity and indoor environment quality: A case of CSAS. *International Journal of Sustainable Built Environment* 6(2), 476-490. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.11.001>
- Hudson, R., Sharma, S., Shepherd, P. & Velasco, R. (2019). *Clima-Colombia*. <http://lacunae.io/Clima-Colombia/climaColombiaOrg/datos.html>
- IDEAM. (2019). *Datos climáticos para Colombia*. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IESNA-The Daylight Metric Committee. (2012). *IES LM_83_12. Aproved method: IES Spatial Daylight Authonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*. Illuminati.
- Igawa, N., & Nakamura, I. (2001). All sky model as a standard sky for the simulation of daylight environment. *Building and Environment* 36(6), 763-770.
- Igawa, N., Nakamura, H., & Matsuura, K. (1997). Sky luminance distribution model for simulation of daylight environment. En *IBPSA International Building Performance Simulation Conf. Prague*, 1-7.
- Inanici, M., & Hashemloo, A. (2017). An investigation of the daylighting simulation techniques and sky modeling practices for occupant centric evaluations. *Building and Environment* 113, 220-231. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132316303626>
- Iversen, A., Svendsen, D., & 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), 305-116.
- Kittler, R., Pérez, R., & Darula, S. (1997). A new generation of sky standards. *Proc. Conf. Lux Europa*, 359-373.
- Kittler, R., Pérez, R., & Darula, S. (1998). *A set of standard skies characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design*. Issue Technical Report-April 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4798.7048>
- Kleindienst, S., Bodart, M., & Andersen, M. (2008). Graphical representation of climate-based daylight performance to support architectural design. *Leukos* 5(1), 1-28. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15502724.2008.10747628>
- Li, D. H. W., & Lou, S. (2018). Review of solar irradiance and daylight illuminance modeling and sky classification. *Renewable Energy* 126, 445-453.
- Mardaljevic, J., Andersen, M., Roy, N., & Christoffersen, J. (2012). Daylighting Metrics: Is There a Relation Between Useful Daylight Illuminance and Daylight Glare Probability? *Ibpsa-England Bso12*, 189-196.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology* 37(1), 41-59.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings* 38(7), 905-913.
- NOAA. (2019). Integrated Surface Dataset (Global). *Integrated Surface Dataset (Global)*. <https://www.ncdc.noaa.gov/isd>
- Pellegrino, A., Cammarano, S., Lo Verso, C. R. M., & Corrado, V. (2017). Impact of daylighting on total energy use in offices of varying architectural features in Italy: Results from a parametric study. *Building and Environment* 113, 151-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.012>
- Pérez, R., Ineichen, P., & Seals, R. (1990). Modeling Daylight Availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44, 271-289.
- Pérez, R., Seals, R., & Michalsky, J. (1993). All-Weather model for sky luminance distribution. Preliminary configuration and validation. *Solar Energy* 50(3), 235-245.
- Piderit, M.B., Cauwerts, C., & Díaz, M. (2014). Definition of the CIE standard skies and application of high dynamic range imaging technique to characterize the spatial distribution of daylight in Chile. *Revista de la Construcción* 13(2), 22-30.
- Reinhart, C.F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America* 3(1).
- Reinhart, C. F., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings* 33(7), 683-697.
- Reinhart, C. F., & Wienold, J. (2011). The daylighting dashboard - A simulation-based design analysis for daylight spaces. *Building and Environment* 46, 386-396.
- Salazar, J. H. (1995). Sunlight evaluation in buildings. *Building Research & Information* 23(3), 182-187.
- U.S. Department of Energy's, y Building Technologies Office. (2019). *Energy plus weather data*. <https://energyplus.net/weather>.
- Yu, X., & Su, Y. (2015). Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation.-A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, 494-503.
- Wang, J., Wei, M., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.029>

