DESEMPEÑO TÉRMICO Y LUMÍNICO DE OFICINAS EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. CASO: CALI, COLOMBIA

Juan Sebastián Calle Medina (1); Manuela Murillo Galvis (2); (3) Olga Montoya; (4); Lucas Arango Díaz

(1) Arquitecto, juan.calle212@tau.usbmed.edu.co, Universidad de San Buenaventura Medellín, (+57) 604 514 5600 ext. 4402

(2) Arquitecta, manuela.murillo@tau.usbmed.edu.co, Universidad de San Buenaventura Medellín, (+57) 604 514 5600 ext. 4402

(3) Arquitecta, doctora en arquitectura y urbanismo, olmontoy@usbcali.edu.co , Universidad de San Buenaventura Cali (+57) 5 602 4882222 ext. 208

(4) Arquitecto, doctor en arquitectura y urbanismo, lucas.arango@usbmed.edu.co, Universidad de San Buenaventura Medellín, (+57) 604 514 5600 ext. 4402

RESUMEN

Uno de los desafíos más grandes es evitar el incremento de 1.5° al 2100. De acuerdo con esto, el diseño bioclimático permite considerar la demanda energética y el desempeño de edificios. Se presenta el desempeño térmico y lumínico de oficinas hipotéticas Cali, ciudad del trópico, en Colombia. Se utilizaron simulaciones paramétricas en el software Rhino 3D con Grasshopper y los plugins Ladybug, Honeybee y Colibri. Se evaluaron escenarios climáticos futuros A2 a mediano (2050) y largo plazo (2080), generados por el IPCC, adicionalmente, dichos archivos se le realizaron modificaciones del 10% tanto de aumento como de disminución en los datos de la radiación global y se realizaron 36 simulaciones con diferentes parámetros de estrategias pasivas para mejorar el desempeño. Los resultados muestran un aumento en la demanda energética y una disminución del confort térmico en los escenarios futuros, especialmente en las fachadas orientadas al oeste. Sin embargo, se observó un antagonismo en los resultados lumínicos, donde se obtuvo una mejor calidad lumínica con una mayor demanda energética. Por lo tanto, es necesario considerar todos los aspectos al seleccionar estrategias óptimas que garanticen el desempeño actual y futuro de las edificaciones.

Palabras chave: Arquitectura, Bioclimática, Cambio climático, Desempeño térmico, iluminación natural

ABSTRACT

One of greatest challenges is to avoid the increase of 1.5° by 2100. Accordingly, bioclimatic design allows consider energy demand and building performance. The thermal and lighting performance of hypothetical offices in Cali, a city of the tropics, in Colombia, is presented. Were studied using parametric simulations with Rhino 3D and Grasshopper software and plugins Ladybug, Honeybee, and Colibri. Future A2 climate scenarios were evaluated for mid-term (2050) and long-term (2080), generated by the IPCC, and these files were modified by 10% increases and decreases in global radiation data. Additionally, 36 simulations were performed with different passive strategies to improve performance. The results show an increase in energy demand and a decrease in thermal comfort in future scenarios, especially for west-facing facades. However, there was an antagonism in the lighting results, where better lighting quality was achieved with higher energy demand. Therefore, it is necessary to consider all aspects when selecting optimal strategies that guarantee the current and future performance of buildings.

Keywords: Architecture, Bioclimatic, Climate change, Thermal Performance, Daylighting.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los desafíos más importantes que enfrenta la humanidad en la actualidad. En relación con la necesidad de evitar que en el año 2100 la temperatura promedio del globo sea 1,5°C mayor a la registrada en la era preindustrial, tal como se llama la atención en el más reciente informe sobre cambio climático - AR6 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático - IPCC, es necesario disminuir drásticamente la emisión de gases efecto invernadero (IPCC AR6 WG III, 2022).

En este informe AR6 se describen posibles escenarios de cambio climático en función de las emisiones de gases efecto invernadero. La Tabla 1 describe los posibles escenarios con el aumento de temperatura estimado para el año 2100.

Tabla 1 - Categorías de escenarios de calentamiento global, según AR6.

				Cambio de la temperatura media global °C	
Escenario	**Descripción**	**Alineado con SRES**	**Alineado con SSP**	**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	B1	SSP1-1	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 empezando acciones al 2020		SSP1-2,6	1,7	1,6
C3b	Limitando el calentamiento cerca de 2°C 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%)	A2	SSP3-7		3,5
C8	Exceder el calentamiento de 4 °C (>50%)	A1	SSP5-8,5		4,2

Fuente: Adaptada de (ARANGO-DÍAZ et al., 2022a)

El IPCC ha desarrollado diferentes escenarios de cambio climático, incluyendo los SRES y los SSP. Estos escenarios son herramientas para comprender cómo pueden evolucionar el clima y las emisiones en el futuro, basados en diferentes hipótesis socioeconómicas y tecnológicas. Son utilizados por científicos y responsables políticos para planificar y tomar decisiones en relación con el cambio climático.
STRANDSBJERG TRISTAN PEDERSEN et al. (2021) han llevado a cabo una investigación que compara diferentes escenarios de cambio climático, incluyendo SA90, IS92, SRES y SSP. La investigación se centró en analizar narrativas de escenarios de familias agrupándolas en cinco categorías: "Sostenibilidad global", "Sostenibilidad regional", "Medio camino", "Competencia regional" y "Crecimiento rápido". Se encontró que la primera y la última categoría representan las vías de emisiones acumuladas más bajas y más altas, respectivamente.

En el área de la arquitectura y construcción, existe la necesidad de disminuir las emisiones de gases efecto invernadero de manera que se prevea un escenario no tan pesimista para 2100. Esta necesidad ha impulsado la búsqueda de estrategias como, entre otras, el uso de energías limpias, proyectos de arquitectura y construcción energéticamente eficientes, el uso de materiales de construcción de baja huella de carbono, la incorporación de plantas para absorber CO2 y, en general, la descarbonización del ambiente. Varias investigaciones e iniciativas han avanzado en esta línea de trabajo (CAMPOREALE, 2017; IPCC AR6 WG III, 2022b; OSPINA et al., 2022; ROMERO et al., 2023). La preocupación por el impacto ambiental de la actividad humana ha llevado a la realización de diversas investigaciones que buscan encontrar soluciones para reducir la huella de carbono de las ciudades y edificios. En este sentido, existen también investigaciones en las

que se sugieren medidas de mitigación a diferentes escalas, que van desde el contexto urbano hasta el diseño del edificio(ABDOLLAHZADEH; BILORIA, 2022), hasta componentes específicos de la arquitectónica.

Sin embargo, otros autores se han enfocado en estudiar, en escenarios futuros de cambio climático, el desempeño térmico y el consumo de energía de edificaciones ya construidas de modo que se pueda prever su habitabilidad o las estrategias que deberían aplicarse para garantizar un buen desempeño bioclimático de edificaciones. La adaptación se ha convertido en un elemento central de las políticas e investigaciones climáticas al cambio climático, estas deben ser un proceso multidisciplinar, que va más allá de las dimensiones biofísicas (BERRANG-FORD; PEARCE; FORD, 2015). Un estudio realizado por YAN; JI; YAN (2022) ha encontrado que las estrategias óptimas de diseño para edificios pueden variar significativamente bajo diferentes escenarios climáticos futuros. Esto se debe a que, al considerar los posibles cambios en el clima, se pueden observar diferencias en la energía consumida, la comodidad térmica y el rendimiento de la iluminación, de igual manera, otras investigaciones se enfocan en el diseño de edificios que sean eficientes desde el punto de vista térmico y capaces de resistir el aumento de temperatura, aunque esto pueda implicar un mayor consumo de energía (PAJEK; KOŠIR, 2021). Adicionalmente, otro enfoque en el que se han centrado las investigaciones es determinar el grado de incertidumbre que tienen los modelos utilizados para evaluar las consecuencias del cambio climático en el consumo energético de los edificios (FONSECA; NEVAT; PETERS, 2020)

Para evaluar el desempeño energético de una edificación, es necesario contar con datos climáticos a nivel local. Algunos programas computacionales que se utilizan para estimar las predicciones de escenarios de cambio climático son *CCWorldWeatherGen y Meteonorm.* El programa *CCWorldWeatherGen* utiliza el método *morphing* (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005), que genera datos climáticos futuros a partir de datos medios de temperatura mensual actual utilizando el modelo climático global *Hadley Center Coupled Model 3 HadCM3* con escenarios de emisiones A2. Por otro lado, *Meteonorm* utiliza una metodología estocástica para la reducción de escala a partir de tres escenarios del IPCC, A1B, B1 y A2 (P.TOOTKABONI et al., 2021).

En cuanto al desempeño visual, existe escaza evidencia de análisis de la luz natural en relación con el desempeño lumínico de edificios en escenarios de cambio climático. Joarder et al., (2019) llaman la atención sobre la necesidad de revisar la protección frente a la exposición excesiva de rayos ultravioleta que se verá en el futuro. Arango-Díaz et al. (2022) considerando la variabilidad de aproximadamente 10% en los datos de radiación solar observados por WILD (2009) y WILD, OHMURA, MAKOWSKI (2007), propusieron la modificación de datos de radiación directa normal y radiación difusa horizontal en archivos climáticos y estimaron diferencias, entre el estado actual y el futuro, superiores a 18% en la métrica *Spatial Daylight Autonomy* – SDA.

Con el aumento de temperatura al interior de los espacios como consecuencia futura, se prevé un aumento en la demanda de refrigeración, con el aumento no solo del consumo, sino de la concentración de contaminantes y acentuación de las islas de calor. En Colombia, en cuanto a la demanda energética de las edificaciones, la Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia establece medidas de implementación activas y pasivas para el ahorro en agua y energía a alcanzar en las nuevas edificaciones según el clima y el tipo de edificación. Para Cali al ser un clima cálido seco, en edificios de oficina tiene una línea base de consumo energético de 318.2 kWh/m2-año y exige un porcentaje de ahorro del 40% sobre dicha línea base.

La importancia de esta investigación radica en, frente a la escasez de investigaciones relacionadas con el desempeño bioclimático de edificaciones en el trópico andino en escenarios de cambio climático, la necesidad de estimar el desempeño termo-energético y lumínico de oficinas con diferentes estrategias bioclimáticas de manera que se revise la eficiencia de estas en escenarios de cambio climático.

2. OBJETIVO

El objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño térmico y lumínico de oficinas hipotéticas con diversas estrategias bioclimáticas localizadas en Cali, Colombia, a la luz de la variabilidad climática generada por el cambio climático.

3. METODO

Para la realización de la investigación fueron realizadas simulaciones térmicas, energéticas y lumínicas a partir de 2 modelos de oficina hipotéticos localizados en Cali, Colombia (3°27′00″N, 76°32′00″O, 990 M.S.N.M.) con diversas configuraciones de fachadas. Para las simulaciones termo energéticas fueron utilizados archivos climáticos generados en *Meteonorm* (REMUND JAN et al., 2014). ARANGO-DÍAZ et al. (2021) detectaron inconsistencias entre los datos de radiación solar global y los datos de radiación difusa y directa en los archivos climáticos disponibles para varias localidades latinoamericanas, lo que requirió ajustes manuales en el archivo

climático utilizado para la ciudad de Cali en el caso de las simulaciones lumínicas. Utilizando el archivo corregido de radiación, se generaron dos archivos climáticos con aumentos y disminuciones de radiación para el mediano y largo plazo. Estos ajustes se basaron en estudios previos que sugieren que ha habido variaciones en la radiación global en diferentes lugares del mundo, tanto al alza como a la baja (ANTUÑA et al., 2011; STANHILL, 2007; WILD; OHMURA; MAKOWSKI, 2007b). El software DeEPWaCSV se utilizó para realizar estas modificaciones en los datos.

3.1. Oficinas hipotéticas

Fueron construidas dos oficinas hipotéticas unilateralmente iluminadas, una de ellas con posibilidad de ventilar naturalmente y otra dependiente exclusivamente del uso del aire acondicionado. Para ambas fueron utilizadas dos orientaciones: Norte y Oeste. La Figura 1 ilustra las oficinas modeladas.

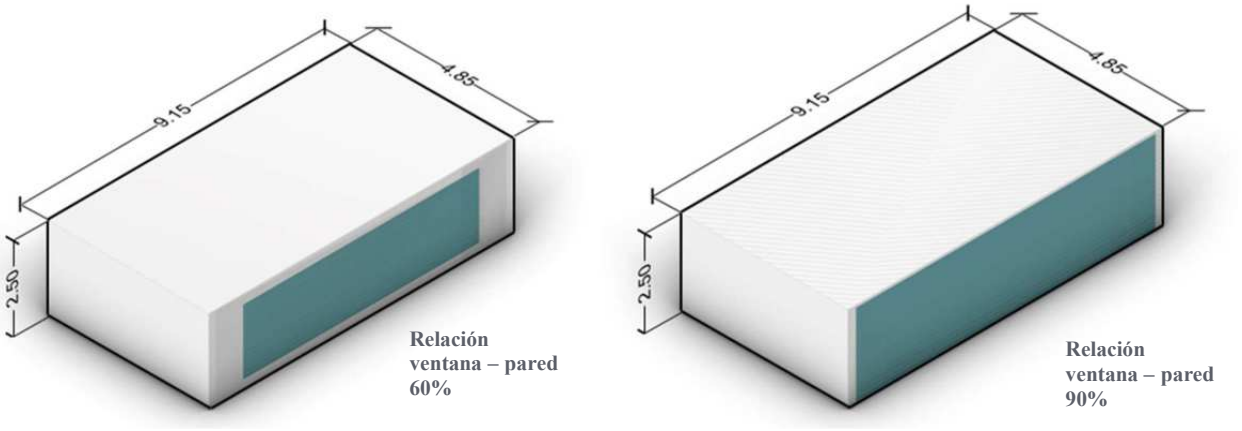


Figura 1 – Oficinas modeladas

Fuente: elaboración de los autores

3.2. Variaciones en la fachada

Se llevaron a cabo un total de 36 simulaciones de fachadas que implicaron modificaciones en la orientación norte y oeste. Se evaluaron dos porcentajes de relación entre ventana y pared, 60% y 90%, junto con tres tipos de vidrio: tipo 1, con un valor U de 5.6, un SHGC de 0.8 y un LT de 87%; tipo 2, con un valor U de 5.6, un SHGC de 0.5 y un LT de 60%; y tipo 3, con un valor U de 2.5, un SHGC de 0.5 y un LT de 30%. Además, se evaluaron tres ángulos de protección solar, 20°, 35° y 50°, como se observa en la Figura 2.

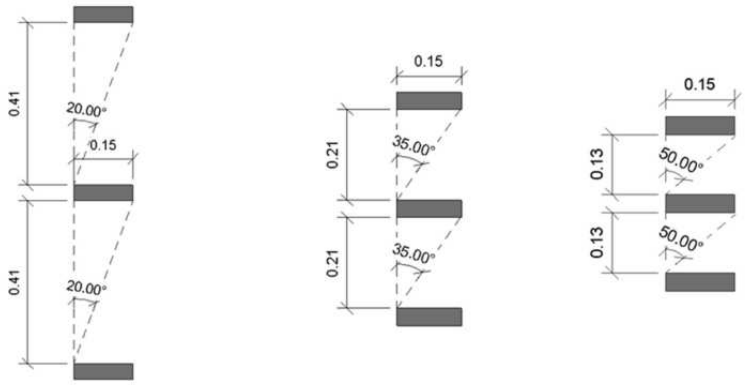


Figura 2 Esquema ángulos de protección solar

Fuente: elaboración de los autores

Para la identificación de las simulaciones, se generó un código basado en los parámetros de las estrategias, tal como se muestra en la Tabla 2. Estos parámetros incluyen la orientación, la relación entre ventana y pared, el tipo de vidrio y el ángulo de protección solar, lo que resulta en un total de 36 combinaciones posibles, al igual que el número de simulaciones realizadas.

Tabla 2 Códigos de los parámetros de simulación

Parámetros				Código
Orientación	**Relación ventana - pared**	**Tipo de vidrio**	**Ángulo de protección**	
N - Norte	**60%**	**V1** - Tipo 1	**20°**	**N_60%_V1_20°**
O - Oeste	**90%**	**V2** - Tipo 2	**35°**	
		V3 - Tipo 3	**60°**	

Fuente: elaboración de los autores

3.3. Software de simulación

Se llevó a cabo una modelación paramétrica utilizando el software Rhino 3d y su complemento Grasshopper, lo que permitió ajustar las características y propiedades de un modelo digital para evaluar las correlaciones entre los condicionantes ambientales de iluminación y desempeño termo-energético digital (MACKEY; SADEGHIPOUR ROUDSARI, 2018). Se realizaron simulaciones lumínicas de sDA y ASE, para ello, se utilizaron los *plugins Honeybee y Ladybug* con el motor de cálculo *Radiance*, la malla de análisis fue de 0.6m de distancia y 0.75m de altura. Además, se realizaron simulaciones térmicas considerando cargas internas de 0.5 personas/m2, 6 W/m2 por equipos y 3 W/m2 por iluminación artificial.

En el caso de la ventilación natural, se utilizó un coeficiente de descarga de 0.8 con una fracción de ventana operable de 0.5. La evaluación del desempeño térmico se realizó utilizando el rango de confort adaptativo con una aceptabilidad del 90% de la ASHRAE 55 de 2020, basado en la temperatura promedio exterior, donde se evidenciaron variaciones en los promedios de temperatura al evaluar distintos escenarios de cambio climático, por lo cual se tomaron diferentes en los rangos de confort como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Zona de confort adaptativa para Cali en escenarios A2 actual, mediano y largo plazo

	Cali		
Período de tiempo	**Promedio**	**Confort**	**Temp. °C**
Actual	23,44 °C	Confort 90%	27,57
		Confort	25,07
		Confort 90%	22,57
2050	25,32 °C	Confort 90%	28,15
		Confort	25,65
		Confort 90%	23,15
2080	26,40 °C	Confort 90%	28,48
		Confort	25,98
		Confort 90%	23,48

Fuente: elaboración de los autores

En cuanto a la simulación energética, se empleó la misma configuración que para la simulación de confort térmico, pero considerando ventanas fijas sin posibilidad de ventilación natural, estableciendo el *setpoint* en 22°C y un coeficiente de rendimiento (COP) de 3. Estas simulaciones se llevaron a cabo utilizando el motor de cálculo *EnergyPlus* del Departamento de Energía de Estados Unidos - DOE. En total, se realizaron 36 combinaciones posibles de estrategias para 5 archivos climáticos, lo que resultó en un total de 180 simulaciones. Las posibles iteraciones se realizaron con el *plugin Colibri* ya que permite automatizar procesos y realizar múltiples simulaciones en simultaneo.

3.4. Archivos climáticos

Los archivos climáticos disponibles actualmente no son adecuados para prever las posibles condiciones climáticas a las que se enfrentarán los edificios en el futuro. Por lo tanto, es importante modificarlos con las tendencias de cambio climático para evaluar las condiciones de consumo energético y habitabilidad en escenarios futuros (YASSAGHI; MOSTAFAVI; HOQUE, 2019). Inicialmente se obtuvo un período de línea

base, en el programa Meteonorm7 para el período de 1961-1990 para la ciudad de Cali. Con este se crearon dos archivos climáticos, uno a mediano plazo para el año 2050 y otro a largo plazo para el año 2080. Basados en el escenario A2 de los escenarios SRES del IPCC, en la Tabla 1 se pueden ver las equivalencias a los grupos de escenarios.

Dado que los archivos climáticos disponibles para los escenarios futuros no incorporan variaciones en la radiación solar, lo que podría afectar la disponibilidad y el desempeño lumínico de los edificios, se consideró un aumento y una disminución del 10% en la radiación global horizontal, siguiendo los criterios propuestos por Wild (2009). Se generaron así cuatro archivos climáticos modificados en total: 2050 A2, con un aumento del 10% de radiación solar global, 2050 A2, con una disminución del 10% de radiación solar global, 2080 A2, con un aumento del 10% de radiación solar global, 2080 A2, con una disminución del 10% de radiación solar global. Adicionalmente, para efectos de comparación se usó el archivo climático actual.

De acuerdo con los hallazgos de ARANGO-DÍAZ et al. (2022b) los criterios de aumento de la radiación solar global fueron los siguientes: se utilizaron dos criterios para modificar los archivos climáticos. En el primero, se aumentó en un 10% la radiación global mediante un aumento proporcional en la radiación difusa y directa. En el segundo criterio, se disminuyó en un 10% la radiación global a través de una disminución proporcional en la radiación difusa y directa. La Figura 3 compara la temperatura y radiación solar global de los diferentes archivos climáticos.

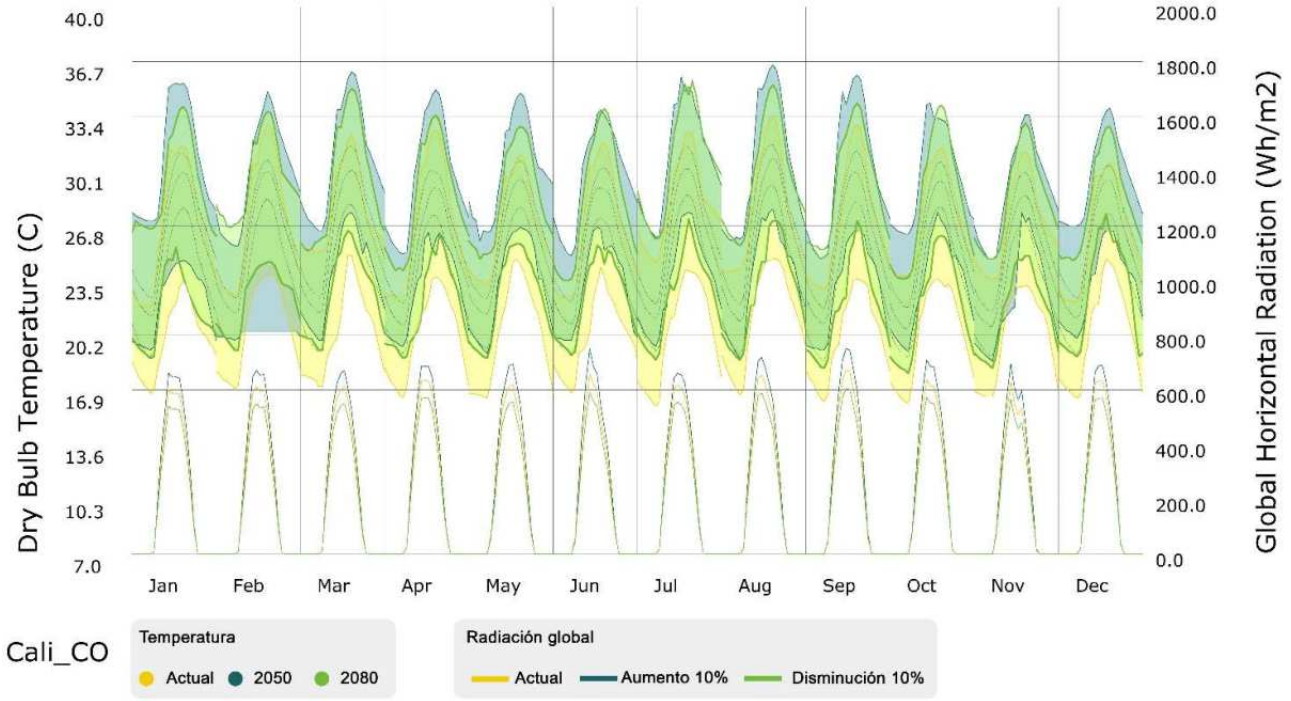


Figura 3 Gráfica comparativo temperatura y radiación Cali en escenarios A2 actual, mediano y largo plazo

Fuente: elaboración de los autores

4. RESULTADOS

En esta investigación se analizaron los resultados lumínicos, térmicos y energéticos de diversas simulaciones de edificios de oficinas. En primer lugar, se presentaron los resultados de manera independiente, detallando el código utilizado en cada simulación. Para las simulaciones lumínicas, se compararon el archivo climático actual con archivos modificados que presentan aumentos y disminuciones de radiación, ya que estos son los que muestran cambios en el desempeño y disponibilidad lumínica. En cuanto a las simulaciones térmicas y energéticas, se compararon los 5 archivos climáticos, debido a que todos presentan variaciones. Posteriormente, se relacionaron los resultados para identificar la correlación entre los diferentes aspectos en el contexto del cambio climático.

Tabla 4 Resultados simulaciones sDA y ASE oficinas Cali

		Resuldados sDA oficinas Cali			Resuldados ASE oficinas Cali		
Orientación	Código	Actual	Aumento radiación	Disminución radiación	Actual	Aumento radiación	Disminución radiación
N	N_60%_V1_20°	98%	98%	95%	0%	0%	0%
	N_90%_V1_20°	100%	100%	100%	0%	0%	0%
	N_60%_V1_35°	96%	98%	93%	0%	0%	0%
	N_90%_V1_35°	100%	100%	100%	0%	0%	0%
	N_60%_V1_50°	81%	84%	78%	0%	0%	0%
	N_90%_V1_50°	100%	100%	100%	0%	0%	0%
	N_60%_V2_20°	75%	79%	68%	0%	0%	0%
	N_90%_V2_20°	100%	100%	100%	0%	0%	0%
	N_60%_V2_35°	63%	70%	56%	0%	0%	0%
	N_90%_V2_35°	100%	100%	96%	0%	0%	0%
	N_60%_V2_50°	43%	48%	41%	0%	0%	0%
	N_90%_V2_50°	92%	96%	83%	0%	0%	0%
	N_60%_V3_20°	33%	35%	31%	0%	0%	0%
	N_90%_V3_20°	51%	58%	48%	0%	0%	0%
	N_60%_V3_35°	24%	29%	23%	0%	0%	0%
	N_90%_V3_35°	43%	46%	38%	0%	0%	0%
	N_60%_V3_50°	0%	1%	0%	0%	0%	0%
	N_90%_V3_50°	0%	1%	0%	0%	0%	0%
O	O_60%_V1_20°	98%	98%	98%	39%	39%	39%
	O_90%_V1_20°	100%	100%	100%	64%	64%	64%
	O_60%_V1_35°	98%	98%	98%	30%	29%	29%
	O_90%_V1_35°	100%	100%	100%	53%	53%	53%
	O_60%_V1_50°	90%	94%	87%	0%	0%	0%
	O_90%_V1_50°	100%	100%	100%	0%	0%	0%
	O_60%_V2_20°	83%	85%	79%	34%	34%	34%
	O_90%_V2_20°	100%	100%	100%	61%	61%	61%
	O_60%_V2_35°	73%	78%	70%	17%	17%	17%
	O_90%_V2_35°	100%	100%	100%	36%	29%	29%
	O_60%_V2_50°	54%	63%	48%	0%	0%	0%
	O_90%_V2_50°	95%	98%	93%	0%	0%	0%
	O_60%_V3_20°	37%	38%	37%	27%	27%	27%
	O_90%_V3_20°	58%	60%	58%	41%	42%	42%
	O_60%_V3_35°	33%	33%	29%	0%	0%	0%
	O_90%_V3_35°	53%	57%	47%	8%	8%	8%
	O_60%_V3_50°	3%	7%	0%	0%	0%	0%
	O_90%_V3_50°	2%	5%	0%	0%	0%	0%

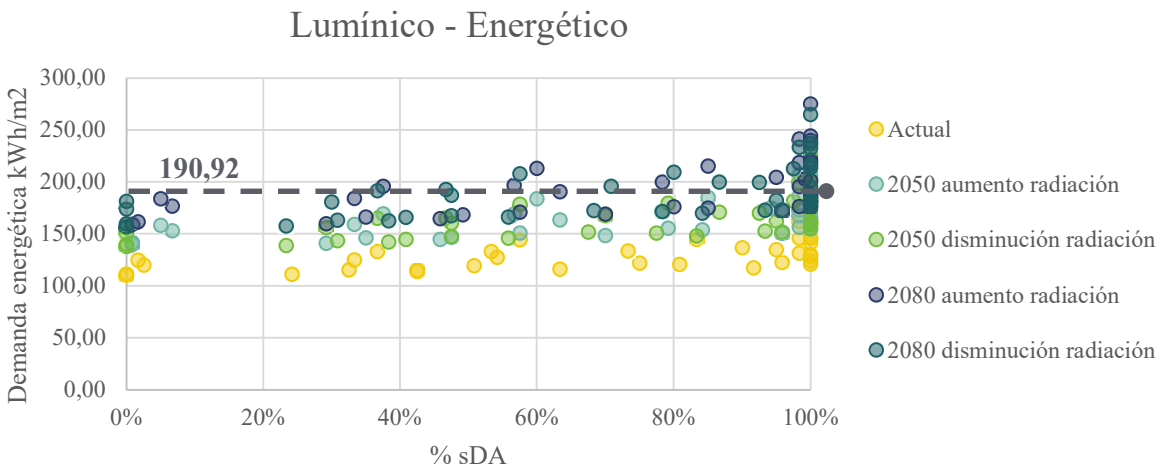
En los resultados de sDA se observa una variación significativa entre los diferentes escenarios de análisis, con una diferencia de hasta el 16% entre ellos. Se destaca la influencia que tienen el tipo de vidrio y los ángulos de protección en los resultados. Asimismo, se nota que las mayores variaciones entre escenarios se presentan en el tipo de vidrio 2 con una LT del 60%.

En la Tabla 4 se observa que los resultados de ASE presentados en amarillo, presenta mayores valores en la fachada oeste, especialmente con una relación ventana-pared del 90%. Además, se nota que al utilizar un ángulo de protección de 50° o una orientación norte, todos los valores son del 0%. Aunque las variaciones entre los escenarios de aumento y disminución de radiación son escasas, solo se presentan cambios en dos de ellos. Los valores máximos de ASE se encuentran en la configuración O_90%_V1_20°, con un valor de 64% en los tres escenarios evaluados

Tabla 5 Resultados simulaciones confort térmico y demanda energética oficinas Cali

		Resuldados confort oficinas Cali (%)					Resuldados demanda energética oficinas Cali (kWh/m2-año)				
		Con ventilación natural					Sin ventilación natural				
Orientación	Código	Actual	2050 aumento radiación	2050 disminución radiación	2080 aumento radiación	2080 disminución radiación	Actual	2050 aumento radiación	2050 disminución radiación	2080 aumento radiación	2080 disminución radiación
N	N_60%_V1_20°	67%	57%	61%	53%	56%	131,73	167,59	162,46	195,65	182,57
	N_90%_V1_20°	61%	55%	58%	51%	53%	141,92	179,66	173,35	201,51	194,96
	N_60%_V1_35°	72%	63%	66%	57%	60%	122,80	156,56	152,97	176,49	172,77
	N_90%_V1_35°	66%	60%	62%	55%	57%	130,26	165,87	161,46	187,21	182,67
	N_60%_V1_50°	73%	65%	68%	59%	61%	120,68	154,10	150,98	175,03	171,78
	N_90%_V1_50°	69%	63%	65%	58%	60%	124,52	159,08	155,72	180,50	177,01
	N_60%_V2_20°	72%	64%	67%	58%	61%	122,11	155,60	151,93	176,26	172,46
	N_90%_V2_20°	67%	61%	64%	56%	59%	128,63	163,79	159,39	185,33	180,76
	N_60%_V2_35°	75%	69%	71%	62%	64%	116,27	148,57	145,94	169,10	166,35
	N_90%_V2_35°	70%	65%	67%	60%	62%	121,19	154,89	151,79	176,43	173,22
	N_60%_V2_50°	76%	70%	72%	63%	65%	115,01	147,15	144,85	168,45	166,02
	N_90%_V2_50°	71%	68%	69%	62%	64%	117,59	150,64	148,25	172,48	170,01
	N_60%_V3_20°	76%	67%	70%	60%	62%	115,54	146,41	143,63	166,29	163,36
	N_90%_V3_20°	72%	64%	67%	58%	60%	119,53	150,89	147,68	171,09	167,76
	N_60%_V3_35°	78%	70%	73%	63%	65%	111,35	141,17	139,07	160,04	157,89
	N_90%_V3_35°	75%	68%	70%	61%	63%	114,21	144,75	142,48	164,96	162,58
	N_60%_V3_50°	79%	72%	73%	64%	66%	110,37	139,98	138,09	159,24	157,32
	N_90%_V3_50°	76%	70%	72%	63%	65%	111,56	141,81	140,07	161,84	160,02
O	O_60%_V1_20°	59%	51%	55%	48%	51%	162,40	207,83	200,04	241,65	233,44
	O_90%_V1_20°	55%	49%	53%	46%	49%	185,38	236,39	226,54	275,12	264,85
	O_60%_V1_35°	66%	57%	61%	53%	56%	146,10	187,34	181,89	218,67	212,89
	O_90%_V1_35°	62%	55%	58%	51%	54%	162,84	208,58	201,79	244,46	237,31
	O_60%_V1_50°	70%	61%	64%	55%	58%	136,77	175,33	171,05	204,59	199,99
	O_90%_V1_50°	66%	59%	62%	55%	57%	147,04	188,62	183,80	221,66	216,57
	O_60%_V2_20°	68%	59%	63%	54%	57%	144,72	185,18	179,72	215,31	209,48
	O_90%_V2_20°	62%	56%	59%	52%	55%	160,92	205,61	198,78	239,94	232,75
	O_60%_V2_35°	72%	64%	67%	58%	61%	133,82	171,64	167,74	200,09	195,89
	O_90%_V2_35°	67%	61%	64%	56%	59%	145,76	186,83	182,11	218,89	213,89
	O_60%_V2_50°	74%	67%	69%	60%	63%	127,59	163,71	160,55	190,76	187,37
	O_90%_V2_50°	70%	65%	67%	59%	62%	134,96	173,29	169,95	203,19	199,60
	O_60%_V3_20°	71%	61%	64%	55%	58%	133,17	169,56	165,28	196,09	191,52
	O_90%_V3_20°	67%	58%	61%	53%	56%	144,60	183,83	178,69	213,37	207,90
	O_60%_V3_35°	75%	65%	69%	59%	62%	125,10	159,32	156,21	184,35	180,97
	O_90%_V3_35°	71%	63%	66%	57%	59%	133,07	169,28	165,68	196,76	192,92
	O_60%_V3_50°	77%	68%	71%	61%	64%	120,29	153,15	150,58	176,93	174,18
	O_90%_V3_50°	74%	67%	69%	60%	63%	124,70	158,53	155,95	184,09	181,37

Los resultados del porcentaje de tiempo en la zona de confort, según los límites establecidos en la tabla 3, se presentan en la tabla 5 en color verde. Cabe destacar que estas simulaciones se hicieron únicamente con ventilación natural. Los resultados indican que, en oficinas de clima cálido, como el de Cali, se verá afectado negativamente en los escenarios de cambio climático, con una disminución de hasta el 17% en el porcentaje de tiempo en confort. Según las simulaciones realizadas, se encontró que la configuración N_60%_V3_50° obtuvo el mayor porcentaje de tiempo en confort en el escenario actual, con un 79%. Sin embargo, es importante mencionar que esta configuración presentó los porcentajes más bajos de sDA en términos lumínicos.



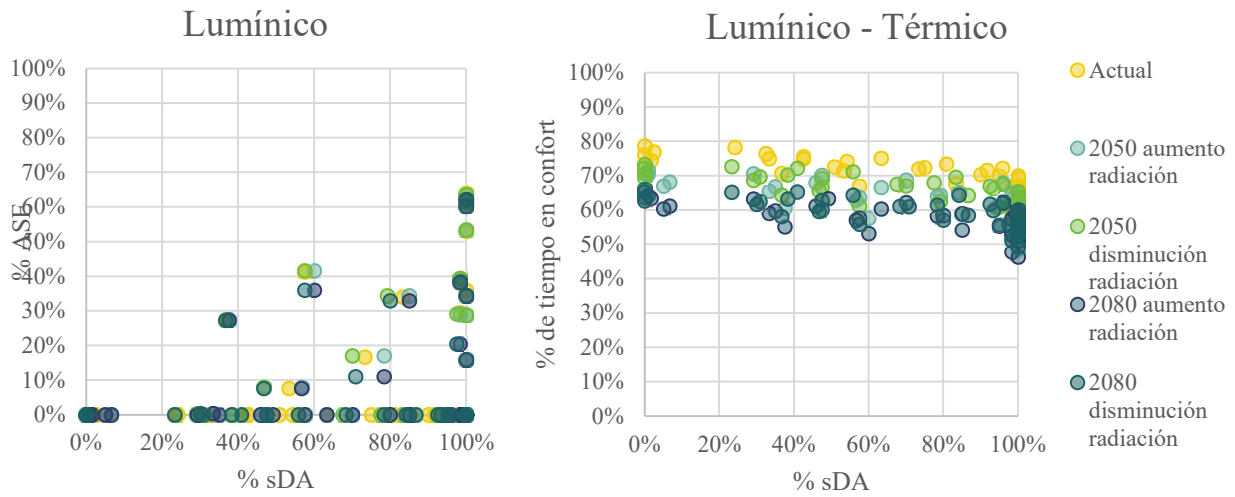


Figura 4 Gráficos de dispersión comparativo resultados simulaciones térmicas y lumínicas

Fuente: elaboración de los autores

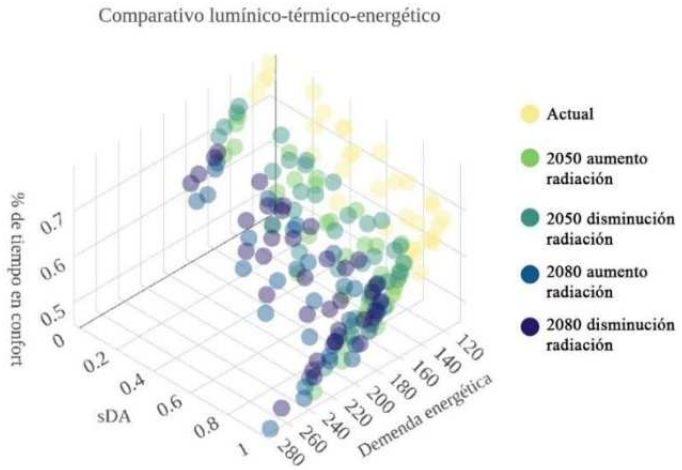


Figura 5 Gráficos de dispersión comparativo resultados simulaciones energéticas, térmicas y lumínicas

Fuente: elaboración de los autores

Entre los escenarios evaluados para la simulación de la demanda energética sin ventilación natural, se encontró que el 22% de las simulaciones exceden la demanda energética de 190.92 kW/m2 exigido por la Resolución 0549 de 2015. En su mayoría, estas simulaciones corresponden a fachadas con orientación oeste, las cuales ya exceden el límite de consumo en el escenario de cambio climático a mediano plazo A2 2050 y en el escenario A2 a largo plazo 2080, la mayoría de los resultados sobrepasan el consumo exigido. Por el contrario, en la orientación norte solo se encontraron tres de los noventa resultados que exceden el consumo en los escenarios a largo plazo 2080.

5. CONCLUSIONES

Se evaluó el desempeño térmico y lumínico de oficinas en Cali, y se analizaron las posibles variaciones en la demanda energética por refrigeración en escenarios de cambio climático. Los resultados de las simulaciones computacionales indican que las estrategias implementadas en los espacios son un factor determinante en diferentes aspectos, que pueden llegar a ser antagónicos entre sí. Por lo tanto, es crucial confrontarlos para lograr un desempeño óptimo que reduzca la demanda energética, el consumo de recursos y proporcione condiciones adecuadas para los usuarios tanto en el presente como en el futuro. Además, se destaca la importancia de considerar la variabilidad climática al diseñar edificios eficientes, teniendo en cuenta la incertidumbre relacionada con la disponibilidad de datos climáticos en el futuro.

Para alcanzar un desempeño óptimo en el diseño y operación de edificios eficientes es fundamental considerar la interacción entre el confort térmico y lumínico, así como la demanda energética para refrigeración, ya que estos aspectos están interrelacionados. Por ejemplo, la disminución de la carga térmica mediante estrategias de sombreamiento puede resultar en una disminución de la demanda energética de refrigeración, pero también puede disminuir la entrada de luz natural al interior del edificio, lo que a su vez puede aumentar la necesidad de iluminación artificial.

Es crucial que las normativas futuras tomen en cuenta que los edificios que actualmente dependen de la refrigeración mecánica aumentarán su consumo energético en los escenarios de cambio climático, mientras que aquellos que actualmente no requieren dicha refrigeración probablemente necesiten de estrategias activas en el futuro.

Estos hallazgos resaltan la necesidad de implementar estrategias pasivas que generen equilibrio en el desempeño de los aspectos bioclimáticos, especialmente en condiciones ambientales cambiantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABDOLLAHZADEH, N.; BILORIA, N. Urban microclimate and energy consumption: A multi-objective parametric urban design approach for dense subtropical cities. **Frontiers of Architectural Research**, v. 11, n. 3, p. 453–465, 1 jun. 2022.

ANTUÑA, J. et al. **Observed solar dimming in the Wider Caribbean**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259471879>.

ARANGO-DÍAZ, L. et al. **Discrepancies in dynamic daylight simulations in the tropic associated with the differences between measured and weather files solar radiation**. Building Simulation 2021. **Anais**...2021.

ARANGO-DÍAZ, L. et al. DAYLIGHT SUFFICIENCY OF INDOOR ENVIRONMENTS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS. **Habitat Sustentable**, v. 12, n. 2, p. 40–51, 1 dez. 2022a.

ARANGO-DÍAZ, L. et al. DAYLIGHT SUFFICIENCY OF INDOOR ENVIRONMENTS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS. **Habitat Sustentable**, v. 12, n. 2, p. 40–51, 1 dez. 2022b.

BELCHER, S. E.; HACKER, J. N.; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, n. 1, p. 49–61, 2005.

BERRANG-FORD, L.; PEARCE, T.; FORD, J. D. **Systematic review approaches for climate change adaptation research**. **Regional Environmental Change**Springer Verlag, , 1 jun. 2015.

CAMPOREALE, P. E. **EL USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AL DISEÑO BIOAMBIENTAL PARAMÉTRICO Tesis doctoral presentada por**. [s.l: s.n.].

FONSECA, J. A.; NEVAT, I.; PETERS, G. W. Quantifying the uncertain effects of climate change on building energy consumption across the United States. **Applied Energy**, v. 277, n. July, p. 115556, 2020.

IPCC AR6 WG III. **Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf.>.

IPCC AR6 WG III. **Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf.>.

JOARDER, M. A. R.; PRICE, A.; MOURSHED, M. The Changing Perspective of Daylight Design To Face the Challenge of Climate Change. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019.

MACKEY, C.; SADEGHIPOUR ROUDSARI, M. The Tool(s) Versus The Toolkit. Em: **Humanizing Digital Reality**. [s.l.] Springer Singapore, 2018. p. 93–101.

OSPINA, A. et al. **HOJA DE RUTA NACIONAL DE EDIFICACIONES NETO CERO CARBONO**. [s.l: s.n.].

PAJEK, L.; KOŠIR, M. Exploring climate-change impacts on energy efficiency and overheating vulnerability of bioclimatic residential buildings under central european climate. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 12, 2 jun. 2021.

P.TOOTKABONI, M. et al. A comparative analysis of different future weather data for building energy performance simulation. **Climate**, v. 9, n. 2, p. 1–16, 1 fev. 2021.

REMUND JAN et al. **Handbook Part I: Software**. BernMETEOTEST, , maio 2014. Disponível em: <www.meteonorm.com>

ROMERO, J. et al. **SYNTHESIS REPORTOF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)Diriba Korecha Dadi**. [s.l.] Panmao Zhai, 2023.

STANHILL, G. A perspective on global warming, dimming, and brightening. **Eos**, v. 88, n. 5, p. 58, 30 jan. 2007.

STRANDSBJERG TRISTAN PEDERSEN, J. et al. An assessment of the performance of scenarios against historical global emissions for IPCC reports. **Global Environmental Change**, v. 66, 1 jan. 2021.

WILD, M. **Global dimming and brightening: A review**. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**Blackwell Publishing Ltd, , 27 jun. 2009.

WILD, M.; OHMURA, A.; MAKOWSKI, K. Impact of global dimming and brightening on global warming. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 4, 28 fev. 2007a.

WILD, M.; OHMURA, A.; MAKOWSKI, K. Impact of global dimming and brightening on global warming. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 4, 28 fev. 2007b.

YAN, H.; JI, G.; YAN, K. Data-driven prediction and optimization of residential building performance in Singapore considering the impact of climate change. **Building and Environment**, v. 226, 1 dez. 2022.

YASSAGHI, H.; MOSTAFAVI, N.; HOQUE, S. Evaluation of current and future hourly weather data intended for building designs: A Philadelphia case study. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 491–511, 15 set. 2019.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de San Buenaventura Medellín, Colombia por posibilitar la realización de la investigación. Asimismo, agradecer a la Universidad de la República Montevideo, Uruguay, por su ayuda con la generación de los archivos climáticos, que fueron esenciales para el análisis.