



**XV ENCAC** Encuentro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

**XI ELACAC** Encuentro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

## **ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE CLARABOYAS EN EL TRÓPICO, CONSIDERANDO EL DESEMPEÑO INTEGRADO DE SUFICIENCIA LUMÍNICA, CONFORT VISUAL Y GANANCIA SOLAR**

**Juan Pablo Arango Plazas**

Estudiante del pregrado de Arquitectura, Facultad de Arquitectura,  
Universidad Nacional de Colombia, juparangopl@unal.edu.co.

### **RESUMEN**

Esta investigación presenta un análisis de sensibilidad local donde se analiza el desempeño lumínico y térmico de nueve variables del diseño de claraboyas con sombreado en un ámbito tropical, con un estudio de caso hipotético en diferentes ciudades de Colombia. Se utilizaron programas de simulación paramétricos implementando EnergyPlus como motor térmico y Radiance como motor de iluminación, ambos integrados en el plugin Honeybee para Grasshopper. Las alternativas de diseño se centraron en los ámbitos de: geometría y posición, materialidad, horario de uso, localización y sombreado. Las métricas de desempeño evaluadas con respecto al diseño del caso base, incluyeron la Iluminación de Luz Útil (UDI), la Exposición Solar Anual (ASE), el Ingreso Solar Acumulado (ISA) y la Ganancia Solar Anual (GSA). Se comparó el rendimiento de las alternativas frente a la línea base y se definió un porcentaje de sensibilidad por métrica y un valor integrado para cada variable. Fueron simulados 162 casos diferentes. Los resultados concluyen que, para el caso de estudio con claraboyas sombreadas, los parámetros más sensibles para el rendimiento lumínicos son, en orden ascendente: ángulo del dispositivo de sombreado, transmisión visible, orientación y altura del espacio. Y para el rendimiento térmico son: ángulo del dispositivo de sombreado, tamaño de la claraboya, coeficiente de ganancia solar y orientación.

Palabras clave: Análisis de Sensibilidad Paramétrico, Claraboyas, Dinámica de Iluminación, Ganancia Solar, Iluminación en el Trópico, Ladybug Tools, Simulación.

### **ABSTRACT**

This research presents a local sensitivity analysis of the daylight and thermal performance of nine design variables for skylights with shading in a tropical environment, with a hypothetical case study in different Colombian cities. Parametric simulation programs were used, implementing EnergyPlus as a thermal engine and Radiance as a daylighting engine, both integrated in the Honeybee plugin for Grasshopper. The design alternatives focused on the areas of: geometry and position, materiality, hours of use, location and shading. Performance metrics assessed with respect to base case design included Useful Daylight Illuminance (UDI), Annual Solar Exposure (ASE), Accumulated Solar Income (ISA), and Annual Solar Gain (GSA). The performance of the design alternatives was compared with the baseline and a percentage of sensitivity was defined by metric and with an integrated value of each variable. 162 different cases were simulated. The results conclude that for the study case with shaded skylights the most sensitive parameters for the daylight performance are, in ascending order: the angle of the shading device, the visible transmission, the orientation and the height of the space. And for the thermal performance are: the angle of the shading device, size of the skylight, solar gain coefficient and orientation.

Keywords: Parametric Sensitivity Analysis, Skylights, Daylight in Tropics, Dynamic Daylight Simulation, Solar Gain, Ladybug Tools.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de claraboyas en el techo es un dispositivo arquitectónico que permite que la luz natural pase a través de los techos o las superficies horizontales de los interiores de edificios con aberturas limitadas desde las paredes. Este sistema de construcción es una parte crítica de la envolvente de un edificio, que está en contacto con la mayoría de las condiciones ambientales externas en comparación con cualquier otro elemento de construcción, como ventanas, paredes y techos.

Muchos autores se han dedicado a mostrar cómo la iluminación diurna aumenta la calidad de vida a través de impactos positivos en la salud, el bienestar y el estado de humor, así como la reducción de la fatiga (BOYCE et al., 2006; CAMPBELL et al., [s.d.]; LAWRENCE; ROTH, 2008). Otros autores investigaron la influencia de las claraboyas en la iluminación natural (LAOUADI; ATIF; GALASIU, 2002; TREADO; GILLETTE; KUSUDA, 1984), estos concluyeron que la iluminación a través de claraboyas es más efectiva que a través de ventanas, por lo que tiene un gran efecto en la iluminación para espacios interiores. Sin embargo, estas pueden crear un deslumbramiento solar incómodo, altos niveles de contraste, reflejos de luminancia muy altos en las superficies, y condiciones de iluminación no uniformes, por lo tanto conflictiva con el confort visual (STEFFY, 2002).

El sistema de claraboyas en techo generalmente prevalece en climas templados y fríos para capturar el calor de la luz solar, en épocas del otoño e invierno, para reducir el consumo de energía del aire acondicionado (AL-OBAIDI; ISMAIL; ABDUL RAHMAN, 2014). En la arquitectura de las Zonas Templadas abundan magníficos ejemplos de iluminación cenital, pero que no tienen aplicabilidad en el trópico porque su forma responde a condicionantes de latitud y orientación más estrechamente que cualquier otro elemento de fachada. (SALAZAR, 2010). A la hora de diseñar claraboyas en un ámbito tropical existe un desconocimiento para reconocer las variables de mayor impacto en el rendimiento térmico y lumínico, lo que resulta en diseños guiados por fines estéticos, muchas veces influenciados por los diseños de Zonas Templadas, los cuales resultan en diseños de claraboyas: a) sobredimensionadas, generando graves problemas de confort, que terminan solucionados con el uso de aire acondicionado o el desuso del espacio; o b) sub-dimensionadas, donde hay que incurrir en el uso de iluminación artificial para cubrir el bajo rendimiento lumínico de la claraboya. Pero no hay razón para descartar esta importante alternativa arquitectónica, claraboyas y superficies luminosas correctamente diseñadas pueden asumir un rol protagónico en proyectos comprometidos con el aprovechamiento de la luz natural sin afectar negativamente ni su eficiencia energética ni su calidad térmica.

Esta investigación presenta un análisis de sensibilidad local donde se analiza el desempeño lumínico y térmico de 9 variables de diseño de claraboyas con sombreado en un ámbito tropical. Las alternativas de diseño se centraron en los ámbitos de: geometría y posición, materialidad, horario de uso, localización y sombreado. Se exploran las variables de diseño para claraboyas sombreadas, donde se implementan quebra-soles para disminuir el ingreso solar. Se utilizaron programas de simulación paramétricos implementando EnergyPlus como motor térmico y Radiance como motor de iluminación, ambos integrados en el plugin Honeybee para Grasshopper con plataforma gráfica en Rhinoceros3D.

Para evaluar el rendimiento lumínico, se aplicó la Iluminación Natural Útil (UDI), para el confort visual y probabilidad de deslumbramiento se aplicó Exposición Solar Anual (ASE) y el Ingreso Solar Acumulado (ISA); y para el rendimiento térmico se aplicó la Ganancia Solar Anual (GSA) de la superficie translúcida de la claraboya. Se comparó el rendimiento de cada métrica frente a la línea base y se definió un porcentaje de sensibilidad de cada variable. Se creó una función de evaluación integrada de las métricas propuestas para definir un porcentaje global de sensibilidad. El caso de estudio se determinó como una caja simple de 10x10x3m que representa un edificio hipotético de oficinas de una planta en la ciudad de Bogotá, Colombia.

El documento está organizado de la siguiente forma: se presentan los objetivos de la investigación en la siguiente sección. A continuación, se presenta la metodología, donde se detallan las herramientas de simulación aplicadas, las métricas de evaluación, la función de evaluación integral. Además, en esta sección se presenta el método de análisis de sensibilidad empleado en este estudio, con las características de la línea base y las variables a estudiar. Luego se muestran los resultados del caso de estudio hipotético para cada variable comparando el rendimiento lumínico, solar, térmico e integrado de las diferentes alternativas. Además, se muestra un resumen de la sensibilidad de todas las alternativas. Finalmente, se presentan las conclusiones.

## 2. OBJETIVO

El propósito de esta investigación fue determinar las variables de diseño críticas para claraboyas con y sin sombreado en términos de rendimiento lumínico, térmico e integrado; empleando una metodología de análisis de sensibilidad local. Se aplicó la metodología a un estudio de caso hipotético en la ciudad de Bogotá, Colombia.

### 3. MÉTODO

#### 3.1. Herramientas

Se utilizaron programas de simulación paramétricos implementando EnergyPlus como motor térmico y Radiance como motor de iluminación, ambos integrados en los plugins de Ladybug y Honeybee. EnergyPlus es una de las herramientas de simulación de edificios más robustas y confiables que es capaz de modelar consumos energéticos para calefacción, enfriamiento, ventilación, iluminación. EnergyPlus también es capaz de simular iluminación con motor incorporado, Radiosity. Esta no puede considerar diversos aspectos ópticos tales como reflexión, refracción, dispersión y transparencia; sin embargo, esto puede ser simulado por la herramienta, Radiance (REINHART, 2011; TREGENZA; WILSON, 2013). Radiance es una herramienta de simulación de iluminancia de vanguardia, que se utilizó en este estudio como un motor de iluminación. Se usó Radiance a través de Ladybug y Honeybee (ROUDSARI SADEGHIPOUR, [s.d.]). Estas herramientas hacen parte de una colección de plugins de análisis ambiental para Grasshopper que es un interfaz para la programación gráfica dentro de Rhino 3D. Los resultados fueron finalmente procesados y graficados empleando el lenguaje de programación Python, con las librerías de pandas y matplotlib.

#### 3.2. Métricas de evaluación

El rendimiento lumínico se evaluó empleando la Iluminación Natural Útil (UDI) (NABIL; MARDALJEVIC, 2006), esta es una métrica de disponibilidad de luz natural que corresponde al porcentaje del tiempo ocupado cuando la luz diurna cumple con un rango objetivo de iluminaciones en un punto de un espacio. Las iluminancias de luz diurna en el rango de 100 a 300 lux se consideran efectivas ya sea como la única fuente de iluminación o junto con la iluminación artificial. Las iluminaciones de luz diurna en el rango de 300 a alrededor de 2000 lux a menudo se perciben como deseables (MARDALJEVIC, 2006).

El discomfort visual y térmico se determinó con el Ingreso Solar Anual Acumulado (ISA), sumando las horas donde cada sensor recibe más de 1000 lux de iluminación solar directa. Esta métrica es de gran sensibilidad, lo que permite evaluar las pocas horas de sol que las claraboyas de sombreamiento dejan filtrar, pero no es comparable con otros estudios, ya que es altamente dependiente de la cantidad de sensores que se evalúen y la cantidad de días evaluados, por ello en paralelo se implementó la Exposición Solar Anual (ASE) (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY et al., 2013), que indica el porcentaje del plano de trabajo horizontal que excede un nivel de iluminancia directa de la luz solar con una intensidad mayor a 1000 lux más de un número específico de horas por año durante un horario de uso específico con todos los dispositivos de sombreado operables retraídos. El LEED v4 recomienda que menos del 10% del espacio tenga un ingreso mayor a 250 horas anuales. Para este estudio se definió como máximo deseable un ingreso solar directo de 1000 lux, con un rango no mayor a 100 horas, con un horario de uso de oficina.

El rendimiento térmico se evaluó empleando la Ganancia Solar Anual (GSA) de la superficie translúcida de la claraboya, empleando el análisis de ganancia solar para superficies translúcidas en el motor energético Energy Plus, los resultados se expresan en kWh/m<sup>2</sup>.

##### 3.2.1 Valor integrado

Se crea una función de optimización que involucra el UDI, el ISA y la GSA para determinar la sensibilidad global de las alternativas y determinar las mejores soluciones dentro de cada variable. Se realiza una normalización de las métricas, cambiando sus rangos a números entre 0 y 1, para poder ser comparados entre sí, para la normalización normalmente se emplea el máximo de las series, pero en esta investigación se implementa una medida de cuantil al 90%, para evitar valores atípicos y castigar valores extremos. La Ecuación 1 muestra el proceso de normalización donde:

$$A_n = ((x - \min A) / (\text{quantile}_{90} A - \min A)) \quad \text{Ecuación 1}$$

$A_n$  = Métrica normalizada [u];

$x$  = Valor a calificar [u];

$A$  = Métrica a calificar [u].

Una vez normalizado, se suman aquellas variables que se desean aumentar y se restan las que quieren minimizarse, como se expresa en la Ecuación 2:

$$\text{Integrado} = (\text{UDI}_n - \text{ISA}_n - \text{GSA}_n) \quad \text{Ecuación 2}$$

$\text{UDI}_n$  = Valor de Iluminación de Luz Día Útil [normalizado];

$\text{ISA}_n$  = Valor de Ingreso Solar Normalizado [normalizado];

$GSA_n$  = Valor de Ganancia Solar Anual [normalizado].

### 3.3. Análisis de sensibilidad local

Se emplea un análisis de sensibilidad local debido a sus beneficios de bajo costo computacional, fácil implementación e interpretación (TIAN, 2013). Esta involucra mover una variable de entrada, manteniendo otras variables en sus valores de referencia (nominal), a continuación, vuelve la variable evaluada a su valor nominal y luego repitiendo para cada una de las otras entradas de la misma manera. La sensibilidad puede medirse al monitorear los cambios en las métricas de salida (UDI, ASE, ISA y Ganancia Solar) con respecto a la línea base. La sensibilidad en este caso se medirá por el rango de variación absoluto de cada alternativa con respecto a la línea base como se observa en la Ecuación 3:

$$\text{Sensibilidad de Var a X} = (\text{VarX}_{\max} - \text{VarX}_{\min}) \quad \text{Ecuación 3}$$

Var = Variable de análisis;

X= Métrica a analizar;

#### 3.3.1 Variables de estudio

El primer paso para realizar un estudio de sensibilidad es la determinación de las variables a cambiar y su rango. Se definen los rangos acordes a una probabilidad uniforme para todas las variables. En la Tabla 1 se muestra la lista de variables de entrada, incluyendo la orientación del edificio, el tamaño de la claraboya, distribución, altura del espacio, coeficientes de los materiales, horarios de uso y ciudad; así como su valor inicial y su rango de variabilidad.

Tabla 1 Descripción y rango de las variables de diseño.

#### CLARABOYAS DISPOSITIVOS DE SOMBREAMIENTO

Variables	ID	Parámetro	Unidad	Valor Inicial	Rango	Step
Geometría y posición	1	Orientación edificio	grados	0	(0,315)	15
	2	Tamaño Claraboya	% área	10%	(0.01,0.15)	0.01
	3	Distribución	m	3.00	[1.5,1.9,3.0,5.0]	-
	4	Altura espacio	m	3.00	(2.5,6.0)	0.25
Materialidad	5	SHGF	-	0.70	(0.1,0.9)	0.10
	6	vT	-	0.70	(0.1,0.9)	0.10
Uso	7	Horario de Ocupación	-	Oficina Abierta	[Oficina, Almacén, Recepción Hotel, Supermercado, Bodega]	-
Localización	8	Ciudad		Bogotá	[Leticia (φ -4.2), Pasto (φ 1.2), Cali (φ 3.42), Bogotá (φ 4.59), Medellín (φ 6.23), Montería (φ 8.75), Valledupar (φ 10.46), Barranquilla (φ 10.9), Santa Marta (φ 11.24), San Andrés (φ 12.55)]	
Sombreamiento	9	Ángulo Lama	grados	60	(-85,85)	5

#### 3.3.2 Definiciones variables de diseño no convencionales

**Distribución:** La distancia de distribución se define como la distancia máxima entre claraboyas. Por lo tanto, para el espacio estudiado de dimensión 10x10x3m, una distancia de 1.5 metros generará un total de 4 claraboyas por cada eje, con un total de 16 claraboyas respetando el % de apertura establecido. Un valor de 5m generará entonces una única abertura.

**Horario de Ocupación:** Se consideran diferentes horarios de ocupación y su efecto en la medición de los evaluadores de desempeño, donde sólo se toma en cuenta horas con una ocupación mayor al 40% del espacio. Fueron empleados los horarios de ocupación por defecto para cada uso del software Energy Plus. Con estos se procedió a filtrar los resultados de las simulaciones anuales.

**Ángulo de Lama:** El ángulo de la lama se determina entre un rango de -85 grados (Mira al Sur), hasta 85 (Mira al Norte) grados, donde una posición de 0 grados indica una lama perpendicular al plano translúcido, como se ve en la Figura . El estudio determina un sistema comercial de sombreado con lamas de 15cm de altura y un espaciado de 10cm entre cada una (Figura ).

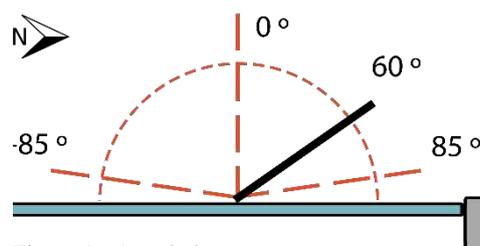


Figura 1 - Angulo lamas

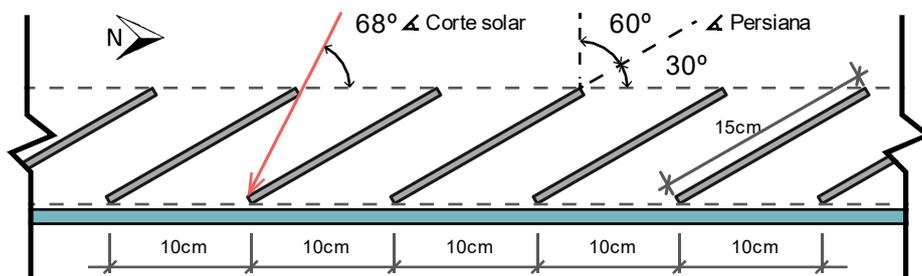


Figura 2- Sección dispositivo de sombra para claraboya línea base

### 3.4. Caso de Estudio

#### 3.4.1 Características del modelo

El modelo base es una caja simple de 10x10x3m que representa una oficina ubicada en la ciudad de Bogotá, Colombia. El Modelo base en esta investigación (Figura ) cuenta con una zona lumínica y térmica, con un techo plano sin paredes interiores para ser adecuado para el estudio de las claraboyas. Para las simulaciones de iluminación se ubicó un sensor cada 1m en un plano de trabajo de 0.7m con un total de 100 sensores en el espacio. Todos los parámetros lumínicos y térmicos de este modelo, como coeficientes de reflexión de las superficies opacas, y los coeficientes de Transmisión Visual, SHGC y Valor U de las superficies translúcidas se visualizan en la Tabla 2.

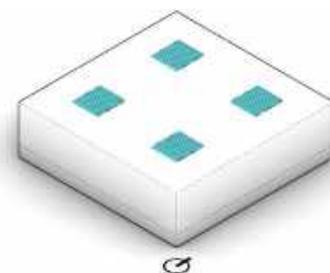


Figura 4 - Modelo línea base

Tabla 2 - Características del modelo base.

Descripción	Propiedades	Tipo Superficie	Propiedades	Valor
Prototipo	Oficina pequeña	Superficies opacas	Reflectividad Paredes	0.5
Clima	Bogotá, Colombia		Reflectividad Techo	0.7
Área Total	100 m <sup>2</sup>		Reflectividad Piso	0.3
Número de pisos	1		Reflectividad Lamas Sombra	0.7
Altura entre pisos	3m	Claraboyas	VT	0.7
Orientación	Norte		SGHC	0.7
Tamaño Cuadrícula	1m		U (W/m <sup>2</sup> C)	2.3

### 3.5. Clima

El estudio de caso se analiza en la ciudad de Bogotá, Colombia, que está ubicada en 4°35'56"N 74°04'51"O, a 2640 msnm. Además, se evalúan nueve diferentes emplazamientos para la claraboya de línea base, con latitudes entre -4.2 para Leticia, 4.6 para Bogotá y 12.55 para San Andrés. Se emplearon los archivos climáticos con información entre el año 2003 y 2017, disponibles para todo el público en la página web [climate.onebuilding.org](http://climate.onebuilding.org).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Línea Base

En la Tabla 3 se muestran los resultados del caso base, contando con un desempeño lumínico moderado, como lo evidencian valores de UDI del 45% del tiempo en el rango de iluminación deseada. Además, cuenta con un valor UDI+ menor al 1% del tiempo donde la iluminación excedió los 2000lux, evitando así deslumbramiento. El Ingreso Solar Acumulado por todos los sensores es de 390 horas, y la Exposición Solar Anual en ningún

caso sobrepasa las 100 horas de exposición. La ganancia solar es de 6.53 kWh/m<sup>2</sup> siendo una de las más bajas de todo el estudio.

En la Figura , en el resultado del rendimiento lumínico se puede notar una direccionalidad de la iluminación hacia la parte sur del espacio, lo que amerita en próximos estudios compensar la posición de claraboyas con sombreamiento para incrementar su beneficio lumínico en el plano de estudio y evitar iluminación innecesaria de planos verticales.

Tabla 3 - Resultados línea base.

	Ingreso Solar [Horas]	ASE [% Área]	UDI [% Tiempo]	UDI+ [% Tiempo]	GSA [kWh/m <sup>2</sup> ]
Línea Base	390	0	45.05 %	0.15 %	6.53

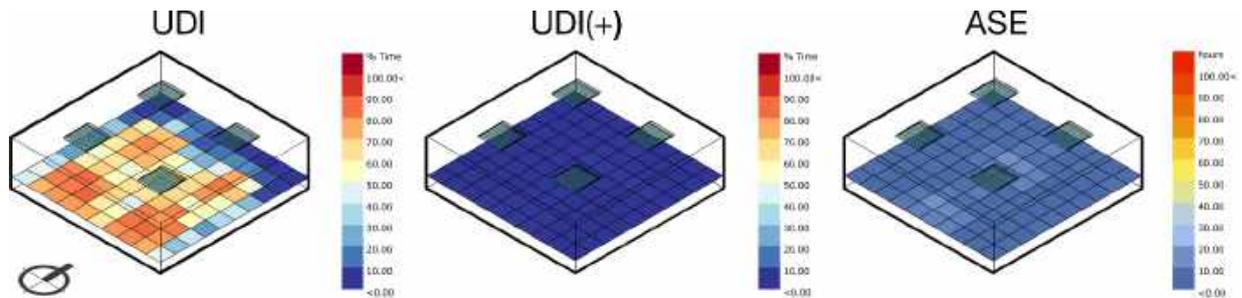


Figura 5 - Resultados línea base para claraboyas con sombreamiento. (izquierda) UDI. (centro) UDI+. Porcentaje del tiempo donde los sensores recibieron luz por encima del rango antes determinado. (derecha) ASE.

#### 4.2. Efecto de la orientación del edificio

Como se ve en la Figura , se puede notar que la intensidad de luz natural es de rendimiento moderado en todas las orientaciones, lo que se evidencia en un valor UDI entre 44% y 53%, éste último se logra en una orientación de 240 grados (Sur Oeste) gracias a un ingreso solar mayor a la línea base. El ingreso y ganancia solar tienen un alto rendimiento en orientaciones norte y sur, donde la primera logra ganar 30% menos de energía que la segunda. El comportamiento entre 30 grados y 330 grados es cercano a ser simétrico donde los valores más altos se dan cuando se alinea el sombreamiento con los ejes cardinales de oriente y occidente, lo que se evidencia con un GSA de más de 13 kWh/m<sup>2</sup>. No tener en cuenta la dirección del dispositivo de sombra puede conllevar a ingresos y ganancias solares de más del doble de intensidad, generando problemas visuales y de confort térmico, con ganancias lumínicas no mayores al 10%.

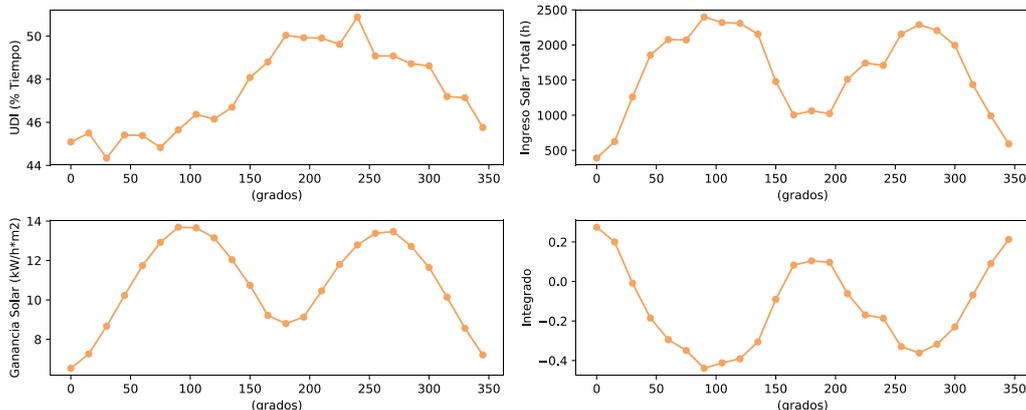


Figura 6 - Efectos orientación edificio para claraboyas sombreadas.

#### 4.3. Efecto del tamaño

Como se ve en la Figura , en claraboyas entre 5% y 15% de apertura se puede notar un comportamiento lumínico y térmico cercano a ser lineal y con una correlación de más del 90%. En un primer rango entre 5 % y 9% la intensidad de la luz natural es insuficiente, lo que se evidencia en un valor de UDI menor al 40% del tiempo. En un segundo rango, entre el 10% y el 17% de apertura, se logra una intensidad de luz natural moderada con un UDI entre el 40% y el 80% del tiempo, con un incremento en ganancia energética proporcional al mejoramiento en UDI. En un tercer rango a partir del 18%, el incremento en rendimiento lumínico disminuye frente a su relación de ganancia térmica, dónde la iluminación extra de las claraboyas se sale del rango deseable y genera problemas de deslumbramiento y confort, como lo evidencia un UDI entre el 68% y el 83% y una Ganancia solar de entre 10 y 18 kWh/m<sup>2</sup>. El ingreso solar tiene un rango de variación bajo de 1000 horas, para los rangos entre 5% y 23%, como se evidencia en valores de ASE menores al 1% del

espacio con una afectación mayor a 100 horas, lo que indica un espacio con muy buenas condiciones de confort visual.

En la Figura , el apartado del valor integrado permite evidenciar claramente que, tener claraboyas de más del 17%, genera compromisos frente a la eficiencia entre ingreso de luz y energía, creando posiblemente problemas lumínicos y térmicos en el espacio.

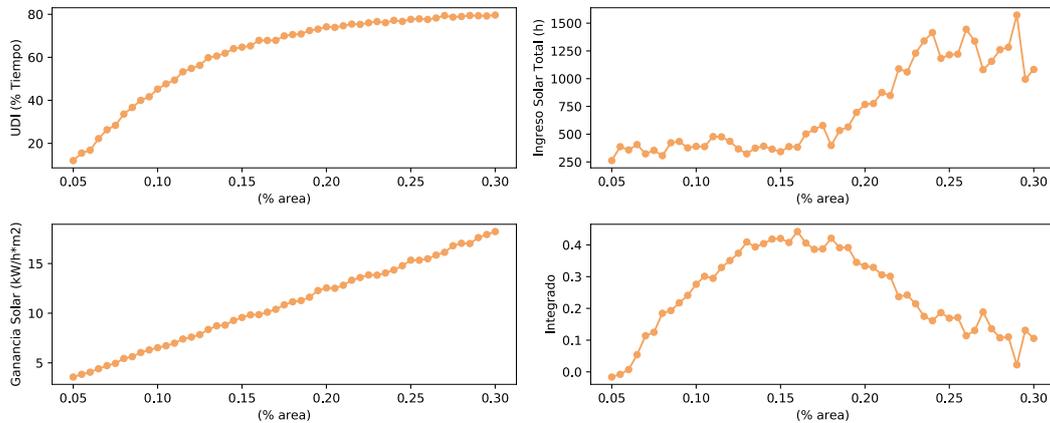


Figura 7 - Efectos del tamaño claraboya, para claraboyas sombreadas.

#### 4.4. Efecto de la distancia de distribución

Como se ve en la Figura , en un primer rango de claraboyas, que tienen entre 1.1 y 2.7 metros de separación entre claraboyas se puede notar que la intensidad de la luz natural es moderada, lo que se evidencia en un valor de UDI entre 45% y 50%. En distribuciones muy cercanas, con una mayor cantidad de claraboyas, el ingreso solar se multiplica exponencialmente, como se evidencia en valores de 6.5 hasta 8.5 kWh/m<sup>2</sup>. Esto se debe a que el dispositivo de sombreadamiento se diseña para cubrir la hora más crítica del año, pero no para cubrir absolutamente el sol. Cuando el número de claraboyas incrementa, este margen de sol no cubierto se incrementa exponencialmente.

Para el caso de estudio, una claraboya de 5m de distancia de distribución tiene como resultado una única claraboya del tamaño total de apertura, lo que genera que sólo una reducida porción del espacio sea iluminada. De igual forma, esta porción será la que reciba radiación solar directa, por lo que a distribuciones muy lejanas tendrán menor iluminación e ingreso solar, como lo evidencia en la distancia de 5m con un valor de UDI del 35% y un Ingreso Solar de 400 horas.

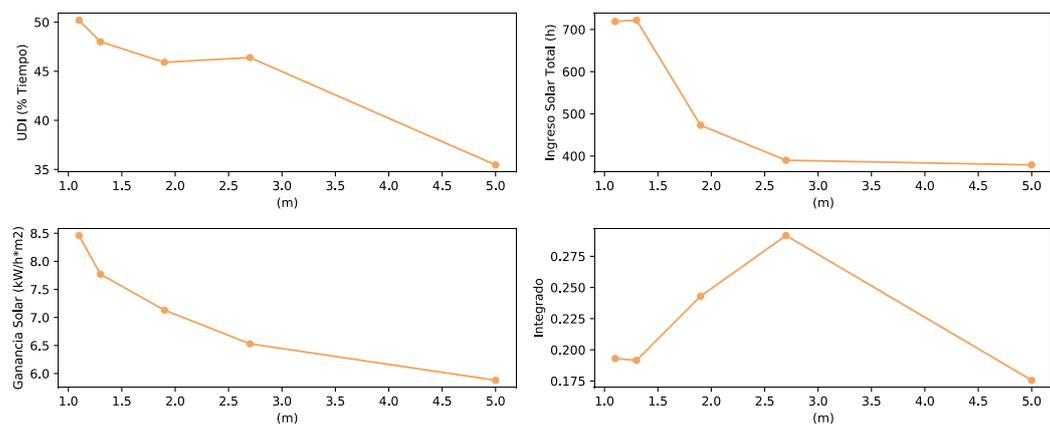


Figura 8 - Efectos distancia de distribución, para claraboyas sombreadas.

#### 4.5. Efecto de la altura del espacio

Como se ve en la Figura , el rendimiento lumínico es cercano a ser lineal favoreciendo alturas bajas, como se evidencia en el mejor caso de 2.75 m de altura con valores de UDI de un 45%. El desempeño solar es de alta complejidad y es no lineal en un rango menor a 3.5m, donde los valores fluctúan en un rango de 200 a 600 horas acumuladas. A pesar de esto, en el rango completo de estudio entre 2.5 y 6 m de altura, la fluctuación de 400 horas es baja, como se evidencia en valores de ASE del 0% del espacio con una afectación mayor a 100 horas, lo que indica un espacio con muy buenas condiciones de confort visual.

Para valores más altos, en un rango entre 3 y 6 m de altura, el rendimiento lumínico disminuye linealmente, como lo demuestran valores de UDI entre 43% y 12%. Esto se debe a que las claraboyas con sombreadamiento tienen direccionalidad lumínica por lo que, en alturas mayores, la iluminación decrece al

terminar incidiendo en los planos verticales y no en el plano horizontal de trabajo. Esto lleva a cambios de estrategias de diseño para espacios altos, ya sea cambiando la posición de la claraboya en el techo, para direccionar la iluminación al centro del espacio; el ángulo del sombreado, dirigiendo la iluminación hasta el plano horizontal a costa de mayor ingreso y ganancia solar; ó aumentando el tamaño de la claraboya.

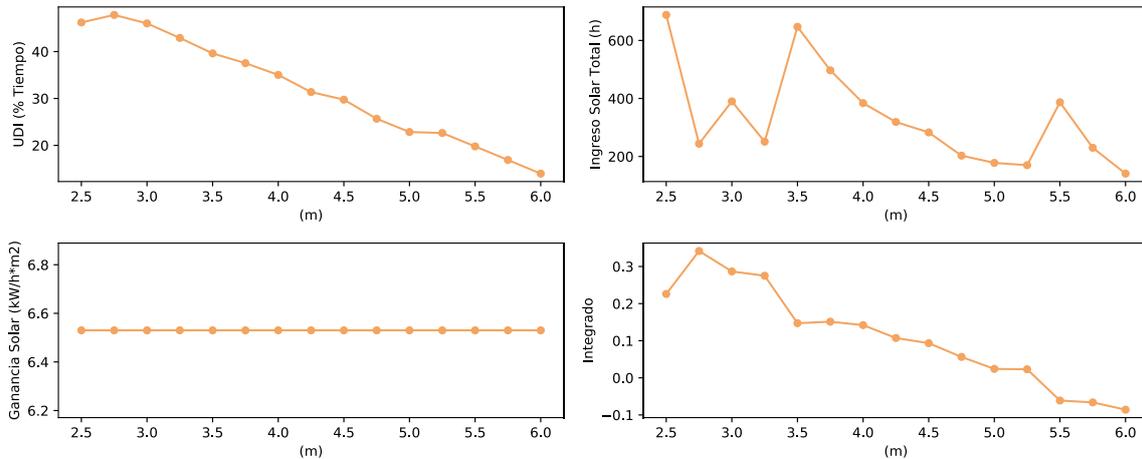


Figura 9 - Efectos altura del espacio, para claraboyas sombreadas.

#### 4.6. Efecto del Coeficiente de Ganancia Solar (SHGC)

El efecto del cambio del coeficiente de ganancia solar de los elementos translúcidos es de un comportamiento constante para el rendimiento lumínico y solar, como es de esperarse ya que es una propiedad meramente térmica. La ganancia térmica tiene un comportamiento lineal y directamente proporcional, con un mínimo de 1.3 kWh/m<sup>2</sup> para un coeficiente de 0.2 y un máximo de 8.3 kWh/m<sup>2</sup> para un coeficiente de 0.9.

Utilizar superficies translúcidas de alto rendimiento en claraboyas con elementos de sombreado es poco aconsejable, ya que la ganancia solar se da predominantemente en forma de radiación difusa, caso contrario a claraboyas sin sombreado que se beneficiarían de mejores materiales.

#### 4.7. Efecto del Coeficiente de Transmisión Visible (vT)

El efecto de cambio de coeficiente de transmisión visible para superficies translúcidas presenta un comportamiento lumínico lineal proporcional, que se evidencia con un valor de UDI mínimo del 5% para un coeficiente de 0.2 y un máximo del 68% para un coeficiente de 0.9. El ingreso solar tiene una variación mínima con un rango de 30 horas acumuladas, que se considera margen de error para este tipo de simulaciones. El rendimiento térmico es de comportamiento constante.

Para claraboyas con sombreado se aconsejan superficies con un alto coeficiente de transmisión visible, ya que en ningún caso se crean problemas de confort lumínico. Utilizar superficies de alto rendimiento en claraboyas sombreadas podría llevar a tener claraboyas de dimensiones exageradas para cumplir los requerimientos lumínicos.

#### 4.8. Efecto del Horario de Uso

Cambiar el horario de uso con el que se calculan los evaluadores de desempeño, lleva a cambios de hasta un 10% en el rendimiento lumínico, como lo evidencian valores UDI entre 42.5% para locales comerciales y 52.5% para bodegas. El ingreso solar tiene una variación baja, con un rango de 250 horas acumuladas, esta se considera de bajo impacto como se evidencia en valores de ASE del 0% del espacio afectado.

El dispositivo de sombreado de la línea base fue diseñado con un funcionamiento equilibrado, que funciona para todo el año, evitando la incursión solar en las fechas críticas. Tener en cuenta el horario de uso puede llevar a cambios en la estrategia de diseño, donde se puede optimizar el rendimiento de la claraboya sólo para los periodos de alta ocupación, “descuidando” periodos de desuso, como se vería en un periodo vacacional de estudiantes.

#### 4.9. Efecto de la ubicación geográfica

Se evaluaron 10 ciudades de Colombia con latitudes entre -4.2 para Leticia y 12.55 para San Andrés. Se puede notar que la intensidad de la luz natural es moderada para todas ciudades, como lo evidencia valores de UDI entre 38%, para Valledupar y de 45%, para Pasto. Existe una correlación cercana al 90% entre la Latitud y el valor UDI, donde ciudades más al sur que la línea base obtienen valores muy similares, como lo evidencia una

variación menor al 2% del UDI, pero descuidando las horas críticas de incursión solar, lo que evidencia valores de ganancia solar hasta un 23% más altos para la ciudad de Leticia, contando esta con una radiación global promedio del 15% menor a la línea base. Para ciudades más al norte del caso base, el dispositivo de sombreamiento bloquea más iluminación de la necesaria, no sólo bloqueando radiación directa, si no también valiosa iluminación difusa, lo que se evidencia en valores hasta un 18% menores con valores UDI del 38.13% para San Andrés.

#### 4.10. Efecto del Ángulo del dispositivo de sombreamiento

Como se ve en la Figura , el rendimiento solar, lumínico y térmico tiene un comportamiento de campana, con un rendimiento casi simétrico en el rango entre -85 y 85 grados, como lo evidencian valores UDI cercanos al 60% para ángulos de -45 y 45 grados. En un rango entre -40 y 40 grados, el rendimiento lumínico tiene un comportamiento constante, lo que se evidencia en valores UDI con variación menor al 4%. En este rango ingresa iluminación por encima del rango útil, por lo que ya no es aprovechable y puede ser causante de deslumbramiento y molestias térmicas.

La gráfica de resultado integrado nos permite entender los rangos óptimos del ángulo de las lamas para el caso de estudio que están comprendidos entre -70 a -60 grados y 55 a 65 grados, evidenciado con valores UDI mayores al 60%, ganancias térmicas menores a 20kWh/m2 y un ingreso solar menor a 5000 horas acumuladas, con menos del 1% del espacio afectado en términos del ASE. Cambiar el ángulo de corte 10 grados más abierto (50°) con respecto a la línea base (60°), conlleva a ganancias en el UDI de un 41%, un ingreso solar del 420% y una ganancia térmica del 200%. Mirar la bóveda celeste sur (-60°), conlleva a ganancias en el UDI de un 10%, un ingreso solar del 275% y una ganancia térmica del 32%.

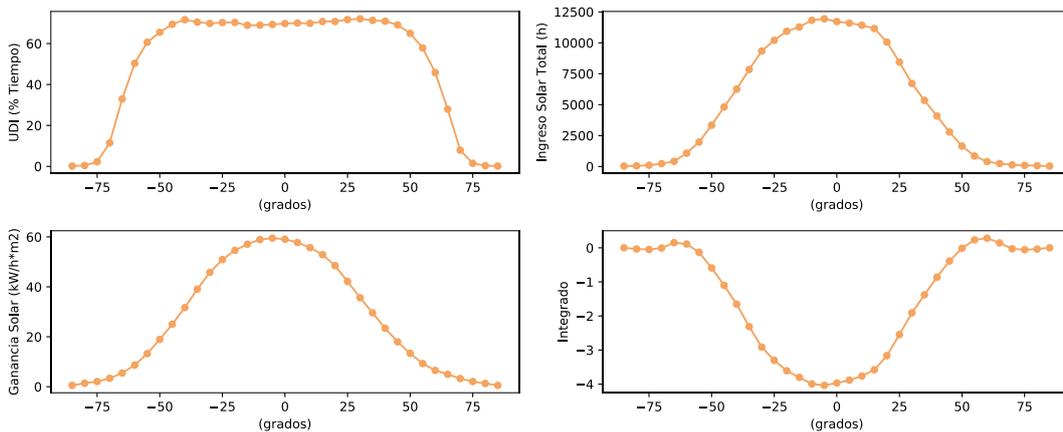


Figura 10 - Efectos ángulo de corte dispositivo de sombreamiento para claraboyas sombreadas.

#### 4.11. Resumen resultados

En la Figura se muestran los resultados de UDI y Ganancia Solar agrupados para todas las variables de diseño de claraboyas sombreadas. Se puede notar que las alternativas de mayor importancia difieren según la métrica, las alternativas con variación mayor al 30% en términos de UDI son, en orden ascendente: el ángulo del dispositivo de sombreamiento, tamaño de la claraboya, transmisión visible y altura. En términos térmicos, las alternativas con variación mayor a 5 kWh/m2 son: ángulo del dispositivo de sombreamiento, tamaño de la claraboya, coeficiente de ganancia solar y la orientación. En ambos casos, las variables más importantes son el ángulo y tamaño seguido por las propiedades físicas de la superficie translúcida, sea su ganancia solar (shgc) o la transmisión visible (vt).

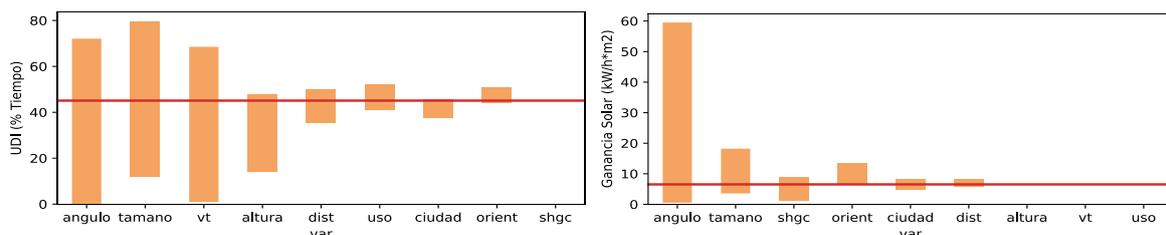


Figura 11 - Resumen Resultados sorteados en orden ascendente según rango de variación (izquierda) UDI. (derecha) Ganancia Solar.

## 5. CONCLUSIONES

Un cambio en la orientación de la edificación tendría un efecto entre 8 a 10 veces menor sobre el desempeño lumínico y térmico de la claraboya que un cambio en la inclinación de las lamas o en el tamaño de la claraboya. En términos del desempeño integrado, se evidencia la importancia del ángulo de sombreamiento con una importancia 6 veces mayor que la segunda más importante, por este motivo, no tener en cuenta el ángulo del sombreamiento, que está atado a la orientación y ciudad, creará graves problemas lumínicos, solares y térmicos.

Los resultados permiten definir las variables de mayor importancia para el estudio de caso y descartar aquellas con poca sensibilidad para ser evaluadas en un próximo estudio empleando un análisis de sensibilidad global. Además, permite delimitar los rangos de variación de cada alternativa, evitando la necesidad de simular casos extremos en un futuro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AL-OBAIDI, K. M.; ISMAIL, M.; ABDUL RAHMAN, A. M. A study of the impact of environmental loads that penetrate a passive skylight roofing system in Malaysian buildings. **Frontiers of Architectural Research**, v. 3, n. 2, p. 178–191, 1 jun. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263514000193?via%3Dihub>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- BOYCE, P. R. et al. Lighting quality and office work: two field simulation experiments. **Lighting Research & Technology**, v. 38, n. 3, p. 191–223, 18 set. 2006. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1191/1365782806lrt161oa>>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- CAMPBELL, J. H.-I. et al. Biophilia, health, and well-being. **fs.usda.gov**, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/15132>>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY, L. (Chair) et al. **IES spatial daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE)**. [S.l.]: IES, 2013. Disponível em: <<https://infoscience.epfl.ch/record/196436>>. Acesso em: 23 jan. 2019.
- LAOUADI, A.; ATIF, M. R.; GALASIU, A. **Towards developing skylight design tools for thermal and energy performance of atriums in cold climates. Building and Environment**. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/buildenv](http://www.elsevier.com/locate/buildenv)>.
- LAWRENCE, T.; ROTH, K. W. **Commercial Building Toplighting: Energy Saving Potential and Potential Paths Forward, US Department of Energy Report. US Department of Energy Report**. [S.l.: s.n.], 2008. Disponível em: <[https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/commercial\\_initiative/toplighting\\_final\\_report.pdf](https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/commercial_initiative/toplighting_final_report.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- MARDALJEVIC, J. **Engineering the Future 21-22. Oval Cricket Ground**. [S.l.: s.n.], 2006. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.573.3232&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905–913, 1 jul. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0378778806000636>>. Acesso em: 23 jan. 2019.
- REINHART, C. Simulation-based Daylight Performance Predictions. Book chapter in: *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2011. Disponível em: <[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Simulation-based daylight performance predictions&author=C. Reinhart&publication\\_year=2011](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Simulation-based+daylight+performance+predictions&author=C.+Reinhart&publication_year=2011)>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- ROUDSARI SADEGHIPOUR, M. M. C. **Ladybug Tools**. Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/about.html#team>>. Acesso em: 3 ago. 2018.
- SALAZAR, J. H. **Cómo diseñar lucernarios en el Trópico. Cómo diseñar lucernarios en el Trópico**. Medellín, Colombia: Exiplast, 2010.
- STEFFY, G. **Architectural lighting design**. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <[https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=pbz5b9O2sYAC&oi=fnd&pg=PT10&ots=3EBD20RToe&sig=ubDL1VIGFKXjwYRFNtb0i0uk\\_HM](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=pbz5b9O2sYAC&oi=fnd&pg=PT10&ots=3EBD20RToe&sig=ubDL1VIGFKXjwYRFNtb0i0uk_HM)>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 411–419, 1 abr. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S1364032112007101>>. Acesso em: 23 jan. 2019.
- TREADO, S.; GILLETTE, G.; KUSUDA, T. Daylighting with windows, skylights, and clerestories. **Energy and Buildings**, v. 6, n. 4, p. 319–330, 1 jan. 1984. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/037877888490015X>>. Acesso em: 22 jan. 2019.
- TREGENZA, P.; WILSON, M. **Daylighting: architecture and lighting design**. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <<https://content.taylorfrancis.com/books/download?dac=C2009-0-24505-4&isbn=9781135882969&format=googlePreviewPdf>>. Acesso em: 25 jan. 2019.