

## **MÉTODO DE DISEÑO TEMPRANO PARA ELEVAR LA EFICIENCIA DE LOS DISPOSITIVOS DE SOMBRA: ÍNDICE DE ACOPLAMIENTO SOLAR**

**Jorge Hernán Salazar Trujillo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia.  
Facultad de Arquitectura, Calle 59 A N 63-20 Edificio 24. Medellín, Colombia.  
<sup>1</sup>e-mail: jhsalaza@unal.edu.co

### **RESUMEN**

Para reducir la carga solar se enmascaran regiones de la bóveda celeste por donde transcurrirán las trayectorias solares en los intervalos en que la sombra será deseable al interior de una edificación. Pero estas regiones enmascaradas por los dispositivos de sombra también podrían proporcionar iluminación difusa, reduciendo la necesidad de iluminación artificial diurna. Cuando un dispositivo de sombra está perfectamente diseñado no enmascara más cielo del necesario ni permite incursión solar indeseada. Durante las primeras etapas de diseño arquitectónico muchas decisiones que afectarán de eficiencia energética del proyecto aún no se toman porque no hay información suficiente para hacer simulaciones realistas de energía o iluminación natural. El objetivo fue definir un índice que, a partir de mínimos datos de entrada, permite calificar la efectividad con que un vano sombreado maximiza la visibilidad hacia el cielo a la vez que minimiza las trayectorias solares indeseables no sombreadas. Usando modelos tridimensionales básicos y un algoritmo escrito en AutoLISP que corre sobre la plataforma de AutoCAD, se pudieron calcular los enmascaramientos y computar el índice mencionado. Los resultados permitieron demostrar que dispositivos de sombra similares pueden presentar Índices de Acoplamiento Solar muy variables, lo que explica por qué el pre-diseño de un dispositivo de sombra eficiente es una tarea poco intuitiva. El método permite cuantificar la brecha entre el mejor rendimiento solar alcanzable y el rendimiento alcanzado por un dispositivo de control solar determinado, ayudando a elevar la eficiencia energética de las envolventes arquitectónicas desde las primeras etapas de diseño.

**PALABRAS CLAVES:** Control Solar, Dispositivo de sombra, Luz natural, Deseabilidad de sombra.

### **EARLY DESIGN METHOD TO IMPROVE SHADING DEVICE EFFICIENCY: THE SOLAR COUPLING INDEX**

#### **ABSTRACT**

To reduce solar gains, regions of the celestial vault are masked, where the solar trajectories will pass in the moments in which the shade will be desirable. But these regions masked by the shadow devices could also provide diffuse lighting, reducing the need for daytime artificial lighting. When a shadow device is perfectly designed it does not mask more sky than necessary avoiding unwanted solar income. During the early stages of architectural design many decisions that will affect the project's energy efficiency have not yet been taken and information is lacking to carry out realistic energy or daylighting simulations. The objective was to define an index to qualify from minimum input data, the effectiveness a shaded opening maximizes the visibility to the sky while minimizing undesirable unshaded solar trajectories. Using basic three-dimensional models and an AutoLISP algorithm running on AutoCAD, it was possible to calculate the masks and compute the aforementioned index. The results allowed to demonstrate that similar shadow devices present variable Solar Coupling Indices, explaining why the pre-design of an efficient shadow device is an unintuitive task. The method allows to quantify the gap between the best solar performance achievable and the performance achieved by a specific solar control device, helping to increase the energy efficiency of the architectural envelopes from the early design stages.

**KEY WORDS:** Shadow efficiency, Shading device, Solar control, Diffuse lighting, Shadow desirability.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La prevención de los aportes energéticos que ocasiona la incursión solar no deseada encabeza la lista de estrategias energéticas para edificaciones en el trópico y por ello las normativas de construcción



sostenible suelen destinar sus primeros capítulos a la reglamentación de asuntos relacionados con el correcto emplazamiento de las edificaciones y el apropiado control solar en sus vanos. Siendo la eficiencia en el control solar un pre-requisito para la calidad energética de las edificaciones, conviene atender el tema desde las fases tempranas del diseño, tarea que no siempre se emprende a tiempo con los posteriores desperdicios de tiempo y esfuerzo que esta mala práctica ocasiona.

Cuando las modalidades para lograr envolventes arquitectónicas de alta eficiencia energética se clasifican a partir del principio termodinámico que explica su efectividad se obtienen dos grandes grupos. En el primer caso elevar la eficiencia de la envolvente implica predominantemente balancear los fenómenos de transmisión/conducción, aminorando la superficie expuesta a la radiación solar y especificando materiales con mejor una relación entre sus coeficientes de transmisión lumínica y ganancia solar. Por su parte, cuando la solución se orienta a emplear materiales opacos, la eficiencia energética de la envolvente dependerá casi exclusivamente de la correspondencia entre la forma de los dispositivos de control solar y la deseabilidad de sombra. En esta segunda modalidad lo relevante será proyectar sombra oportuna en el lugar apropiado, algo que se puede garantizar exclusivamente con una forma correcta. Es de resaltar que en el primer caso la solución implicará modelaciones termodinámicas y en el segundo será preciso hacer una optimización geométrica para asegurar la correspondencia de formas entre un conjunto de objetos opacos y ciertas regiones de la bóveda celeste.

Ciertamente esta clasificación es precaria porque existen las sombras calientes, las penumbras, las fachadas dobles y las soluciones mixtas entre elementos opacos y superficies traslúcidas. Sin embargo, es útil para resaltar que la optimización energética de una edificación perteneciente al primer grupo siempre requerirá el concierto de especialistas que lleven adelante los cálculos necesarios para especificar las propiedades ópticas y térmicas de sus cerramientos traslúcidos. Es algo muy difícil de lograr en fases tempranas del diseño, porque se requiere un alto grado de realismo para modelar la iluminación natural a partir de información climática [1] [2] [3]. Por su parte las simulaciones energéticas requieren mucha información de partida: propiedades térmicas de materiales que aún no han sido elegidos, espesores de placas que aún no han sido objeto de cálculo estructural, colores y acabados aún sin definir [4] [5]. Lo malo es que cuando el equipo de diseño finalmente está preparado para compartir la información arquitectónica suficiente para hacer simulaciones dinámicas de desempeño energético e iluminación conjugada, la flexibilidad de diseño ya no es tan alta como lo había sido durante fases más tempranas del diseño [6].

En el caso de edificaciones donde la solución solar se atiende predominantemente con elementos opacos existe una ventaja que aprovechar: la eficiencia de un dispositivo de sombra es una propiedad derivada de su tamaño, forma y posición, por lo que requiere poca información de entrada. Elevar la eficiencia solar de una edificación perteneciente al segundo grupo significa mejorar la correspondencia entre la forma de sus vanos, la de sus dispositivos de sombra y los periodos en que la sombra será deseable, lo que ubica la tarea dentro del territorio del diseño de la forma arquitectónica. Decisiones tempranas tienen el mayor impacto sobre el futuro desempeño energético de una edificación; si los primeros insumos para comenzar los estudios detallados de eficiencia energética ya garantizan que la eficiencia solar de cada vano está cerca de su nivel óptimo, el punto de partida de los equipos técnicos estará mejor sintonizado y se podrá llegar al proyecto constructivo de una forma más breve y económica.

## 2. ACOPLAMIENTO SOLAR

El propósito de un dispositivo de control solar es simple: impedir la visibilidad hacia los sectores de la bóveda celeste por los cuales transcurrirán las trayectorias solares durante los periodos en los que la sombra será deseable. Si un dispositivo de control solar permite visibilidad hacia estos sectores, trayectorias solares que deberían estar enmascaradas no lo estarán, permitiendo incursión solar indeseada. En consecuencia, los ocupantes de la edificación comenzarán a cerrar cortinas y persianas con la intención de bloquear los rayos solares que generan recalentamiento e incomodidad visual [7], situación que evoluciona hacia una limitación de las posibilidades de aprovechamiento de la iluminación natural, un aminoramiento del contacto visual con el entorno, un aumento en los requerimientos de iluminación artificial diurna y unas mayores cargas de enfriamiento para finalmente, elevar las necesidades energéticas de la edificación. El resultado será una inversión inicial en equipos más elevada, un mayor uso del enfriamiento activo y a pesar de ello, una incursión solar que repercute en precarias condiciones de ergonomía visual.

Por otro lado, si el dispositivo de control solar enmascara una porción de bóveda celeste más amplia de lo necesario ocurrirá la situación contraria y se tendrá sombra en exceso. A pesar de que las personas no sentirán incomodidad térmica ni estarán expuestas a deslumbramientos de origen solar, el aprovechamiento de la iluminación natural será insuficiente porque el dispositivo de sombra enmascara regiones donde las posibilidades de sacar provecho de la iluminación difusa eran óptimas [8]. El resultado serán vanos muy grandes en relación con el beneficio lumínico que ofrecen. El exceso de sombra podrá hacer necesario un refuerzo con iluminación artificial diurna al interior de la edificación y el resultado será finalmente el mismo: un aumento en las necesidades energéticas de la edificación, Fig. 1.

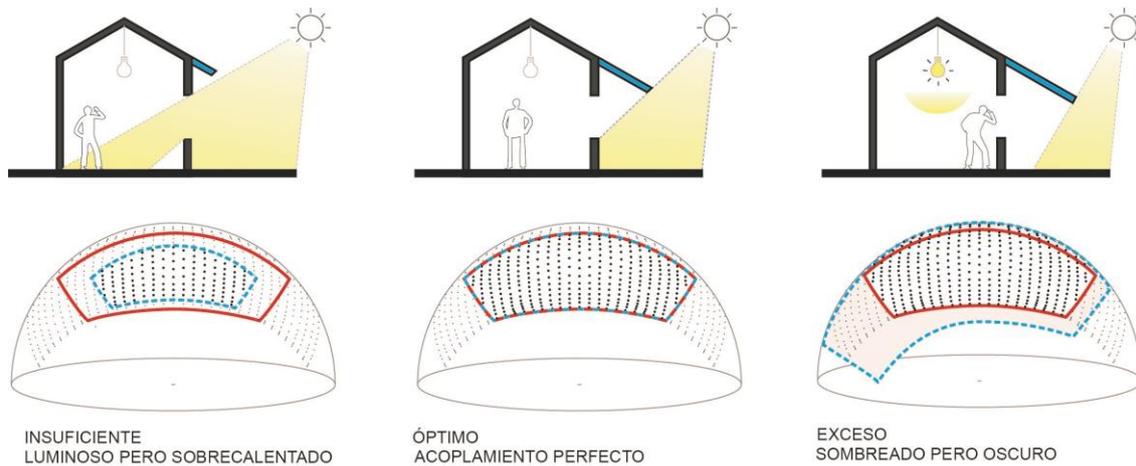


Figura 1: Relaciones que se pueden establecer entre los dispositivos de control solar y las posibilidades de aprovechamiento de la iluminación natural.

Exceso y déficit de sombra son situaciones a prevenir porque ambos extremos alejan los dispositivos de control solar de su punto de operación óptimo a costa de sacrificar la eficiencia energética y la calidad ambiental de la edificación [9]. Un punto entre los dos extremos ofrece la situación ideal, en la que el dispositivo de sombra no deja sin bloquear ninguna trayectoria solar no deseable a la vez que tampoco enmascara innecesariamente regiones de la bóveda celeste que podrán aportar contacto visual con el exterior, iluminación difusa benéfica y/o radiación solar deseable, como se expresa en la Fig. 2. La perfecta correspondencia entre la sombra requerida y la sombra proyectada se denomina Acoplamiento Solar y depende de las relaciones geométricas entre el vano, el dispositivo(s) de control solar y el conjunto de intervalos en que la presencia de sombra en el interior del recinto será deseable. En la práctica alcanzar un Acoplamiento Solar ideal es poco frecuente, pero disponer de una métrica que cuantifique el distanciamiento de un dispositivo de sombra con respecto a la condición ideal, facilitaría la toma de decisiones durante las primeras etapas de diseño arquitectónico.

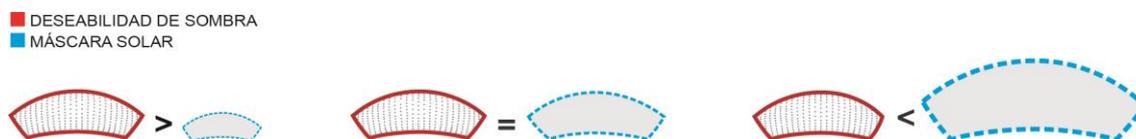


Figura 2: Valorar el grado de similitud entre la máscara solar que genera un elemento opaco y la máscara de deseabilidad de sombra requerida permite evaluar la eficiencia solar de un dispositivo de control solar. Izquierda: Sombra insuficiente. Centro: sombra óptima. Derecha: Sombra en exceso.

### 3. OBJETIVOS

Desarrollar un procedimiento de análisis que permita elevar la eficiencia de los dispositivos de control solar empleando como punto de partida mínimos datos de entrada y que cuantifique el margen de mejoramiento de un dispositivo de control solar con respecto a un Caso Base.

Definir una métrica denominada Índice de Acoplamiento Solar que califique el desempeño conjugado entre aprovechamiento de la iluminación natural y control solar ofrecido por un elemento opaco.

Diseñar recursos de representación que faciliten la implementación del procedimiento en equipos de diseño con escasa preparación en temas de eficiencia energética para: a) diferenciar alternativas arquitectónicas de control solar, b) descartar aquellas que no ofrezcan potencial de mejoramiento y c) ayudar a identificar pautas de mejoramiento para las alternativas valoradas como promisorias.

#### 4. METODOLOGÍA

El cálculo de las porciones de cielo enmascaradas por un dispositivo de control solar se puede hacer empleando máscaras de sombra, herramienta clásica de diseño solar que permite valorar la calidad con que un dispositivo de control solar cumple su tarea. Muchos autores [10, 11, 12, 13, 14] incluyen en sus libros máscaras de sombra para formas arquitectónicas básicas porque superponer una máscara de sombra sobre una carta solar y contar el número de posiciones solares bloqueadas es una manera sencilla de estimar su eficiencia. Por su parte, contar las posiciones solares no bloqueadas es la manera más simple de estimar el margen de optimización. Pero como cada forma posee una máscara propia, es preciso aplicar un procedimiento geométrico sencillo pero laborioso para valorar alternativas de diseño.

Las máscaras de sombra son proyecciones bidimensionales de polígonos esféricos obtenidos al contornear cualquier forma opaca desde un punto. Para prismas rectos con aristas horizontales o verticales la máscara de sombra es una combinación de segmentos de rectas, elipses y arcos que se suceden hasta delimitar una figura cerrada, sin embargo, en el caso de elementos curvos, planos inclinados y demás formas irregulares, es preciso trazar las máscaras punto a punto. Producir máscaras de sombra para formas complejas, incluir elementos del entorno que pueden restringir la accesibilidad solar e intentar medir áreas con el propósito de comparar el desempeño de dispositivos de control solar muy semejantes, son tareas tan laboriosas e imprecisas que sin el apoyo computacional no es equivocado calificarlas de inviables.

##### Enmascaramiento de la bóveda celeste

Cualquier objeto sólido sin importar su complejidad geométrica se puede emplear como punto de partida para el trazado de su máscara de sombra. Basta aplicar los cuatro pasos que se ilustran en la Fig. 3: a) Descomponer el sólido en polígonos planos, b) Insertar nodos entre los vértices que delimitan cada una de las aristas para transformar cada lado de cada polígono en segmentos tan cortos como exija el nivel de precisión requerido, c) Trasladar cada nodo desde sus coordenadas originales hasta una superficie esférica con un radio suficientemente grande como para que el efecto del paralaje se torne despreciable y d) Proyectar los nodos del polígono esférico obtenido sobre el plano base para definir un polígono bidimensional cerrado correspondiente a la máscara de sombra del objeto.

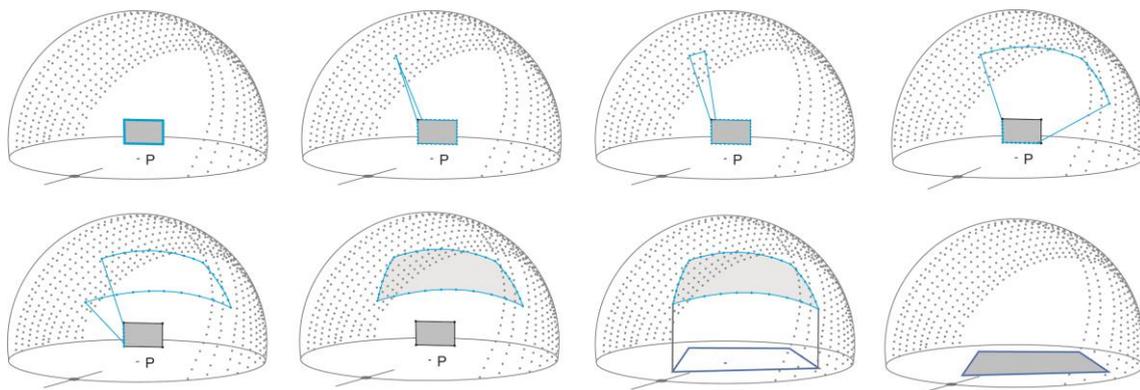


Figura 3: Proceso para la generación de una máscara de sombra a partir de un polígono tridimensional plano. Esta técnica permite transformar cualquier objeto opaco en su correspondiente polígono esférico de enmascaramiento y luego en la máscara de sombra requerida.

Aplicar transformaciones geométricas sobre puntos individuales en vez de derivar las funciones trigonométricas de formas complejas es lo que permite calcular la máscara de sombra de cualquier tipo de vano y dispositivo de control solar sin importar la complejidad geométrica que posean. En esta investigación se generaron los nodos intermedios mediante interpolación lineal, insertando cientos de nodos entre vértices, lo que permitió reemplazar cada arista de cada polígono en numerosos segmentos de

recta de máximo 0.2m de longitud. Luego se trasladó cada nodo hacia una superficie esférica de radio 10km y que representa la bóveda celeste. Para la traslación de nodos se usaron las leyes de semejanza de triángulos a partir de un punto que opera como origen del sistema de coordenadas polares. La unión booleana de la proyección de todos estos polígonos tridimensionales sobre el plano base horizontal es la máscara en cuestión.

### Deseabilidad de sombra

La deseabilidad de sombra comprende los intervalos durante los cuales la presencia de sombra será deseable y depende del horario/calendario de utilización del recinto, las características climáticas del sitio, la distribución del mobiliario y las características de los acabados, entre otros. Para hacer procesamientos geométricos con esta información es necesario traducir horarios y calendarios en un polígono esférico cerrado que permita delimitar las regiones de la bóveda celeste que conviene, o no, tener enmascaradas. Las máscaras de deseabilidad de sombra son la traslación esférica del calendario/horario de deseabilidad de sombra. Para delimitar estas regiones se emplearon las ecuaciones de mecánica solar de Spencer [15] para calcular los ángulos solares para la localidad en estudio, ubicando puntos sobre una esfera de radio 10 Km correspondientes a las posiciones aparentes del disco solar en cada fecha y hora del año. Luego se dibujaron segmentos tridimensionales que conectan algunos de estos puntos hasta configurar un polígono esférico cerrado que incluye los periodos en que la sombra será deseable. Los nodos de este polígono esférico se procesaron idénticamente al resto de máscaras de sombra para proyectarlos al plano base horizontal y transformarlos en polígonos planos cerrados como el que ilustra la Fig. 4.

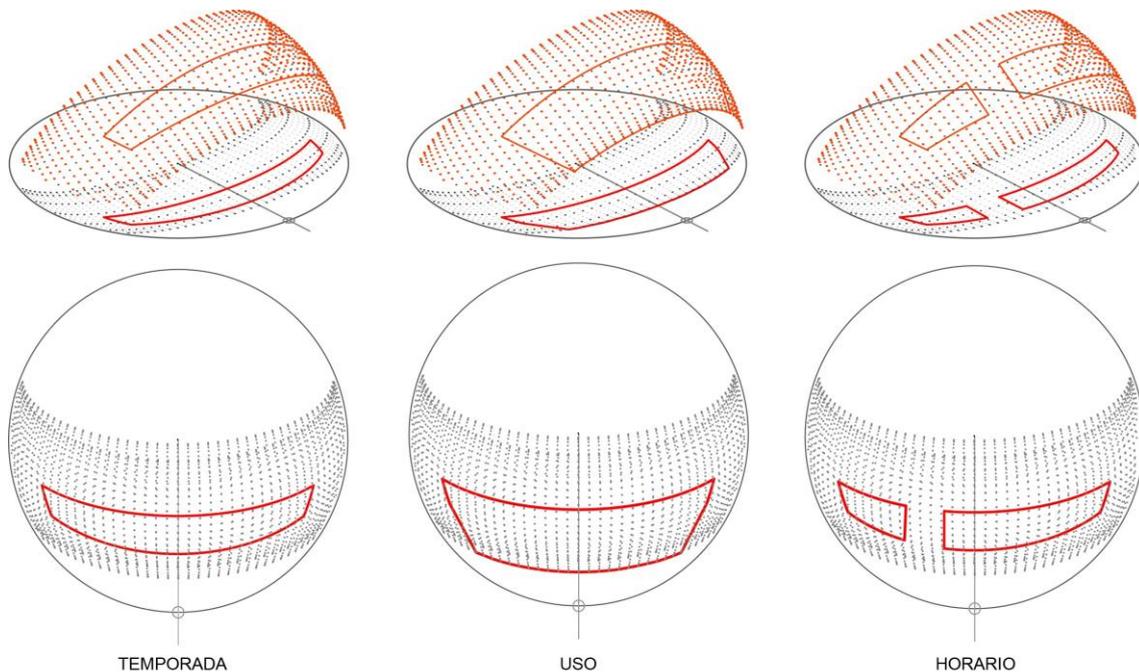


Figura 4: Máscaras de deseabilidad de sombra para diferentes condiciones de utilización de los espacios arquitectónicos en latitud 6.25°N y los polígonos esféricos de las cuales provienen.

### Clasificación de regiones y cálculo de sus áreas relativas

Una vez proyectadas, el conjunto de máscaras de sombra y máscaras de deseabilidad de sombra se unen y traslapan entre sí delimitando regiones que pertenecen a alguno de los siguientes cuatro grupos:

- A: La sombra no es deseable y la región resulta visible porque no fué enmascarada. Corresponde a regiones del cielo que podrán aportar iluminación natural difusa sin generar molestias por incursión solar indeseada. Debería ser tan grande como las necesidades de iluminación así lo indiquen.
- B: La sombra es deseable, pero la región resulta visible porque no fue enmascarada por ninguna máscara de sombra. Es el grupo que conviene minimizar para reducir la incursión solar indeseada.

C: La sombra no es deseable porque la región no fue incluida dentro de ningún polígono de deseabilidad de sombra, pero como la región está enmascarada, no podrá aportar iluminación natural a pesar de que tiene el potencial para hacerlo.

D: La sombra es deseable porque la región pertenece a algún polígono de deseabilidad de sombra, pero a la vez está incluida al menos en una máscara de sombra, por lo que no se presentarán condiciones de asoleamiento inconvenientes.

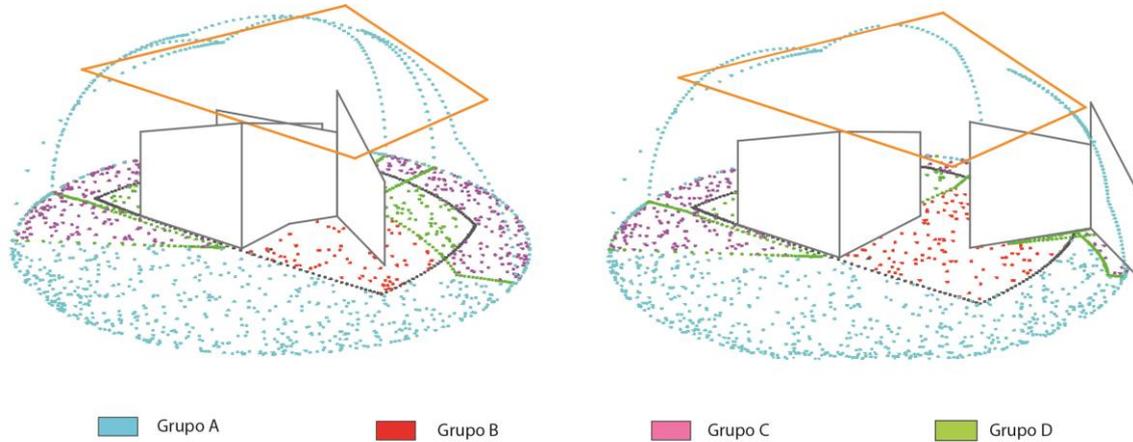


Figura 5: Las cuatro regiones en que se clasifica la bóveda celeste para los cálculos de Acoplamiento Solar. La sumatoria de los porcentajes siempre es igual a la unidad.

Para calcular el área relativa que poseen estos cuatro grupos se usó el conteo de puntos. Se distribuyeron aleatoriamente 100.000 puntos sobre la superficie de una esfera de radio 10 Km para luego proyectarlos sobre el plano horizontal y procesarlos uno a uno determinando su pertenencia o no pertenencia a uno o varios de los polígonos. Para determinar si un punto está incluido en un polígono cerrado se empleó un algoritmo clásico para la elaboración de gráficas computacionales [16] que previamente había sido adaptado para aplicaciones arquitectónicas [17]. Clasificar los puntos como pertenecientes a cada uno de los cuatro grupos, contarlos y transformar estas sumatorias en porcentajes es lo que permite conocer las proporciones en las que la bóveda celeste se distribuye entre la abertura en estudio, los planos opacos que la delimitan y los dispositivos de sombra que la sombran, tal como ilustra la Fig. 5.

### Cómputo del Índice de Acoplamiento Solar

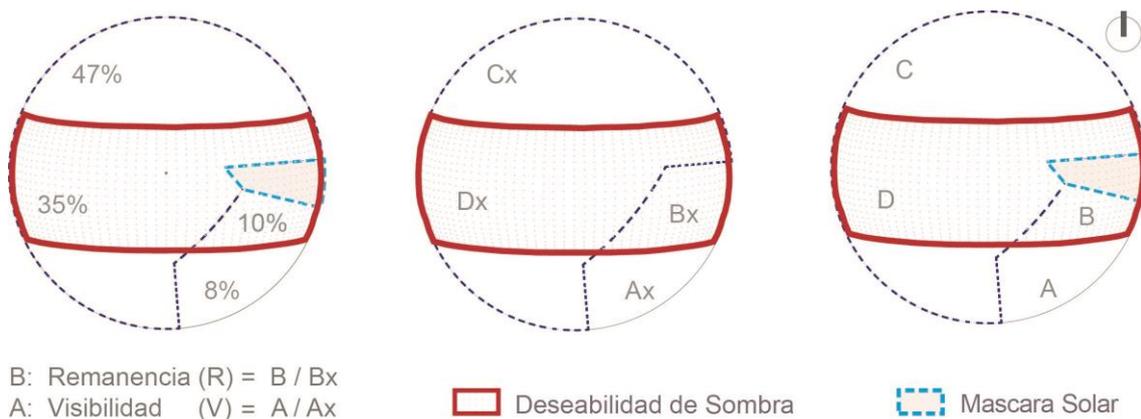


Figura 6: Derecha: Regiones en que el vano en estudio segmenta la bóveda celeste. Centro: Vano que se emplea como referencia de comparación y cuyos resultados Ax y Bx operan como divisores para transformar todos los resultados en porcentajes. Izquierda: Ecuaciones para el cálculo de los porcentajes que definen el Acoplamiento Solar.

El Acoplamiento Solar es una propiedad que depende del tamaño de las máscaras de sombra y de su correcto posicionamiento de manera que permitan que el Grupo B (sombra deseable en región no enmascarada) sea tan pequeño como sea posible. Un acoplamiento perfecto daría como resultado un valor

de B igual a 0%, condición inalcanzable para la mayor parte de los vanos, a no ser que las condiciones de deseabilidad de sombra sean muy bajas y la orientación del vano especialmente favorable. Como la manera más simple de obtener un valor de  $B=0$  es no hacer ventana alguna, la métrica para valorar la eficiencia de los dispositivos de control solar estará incompleta sin una segunda magnitud asociada a la visibilidad hacia la bóveda celeste. Esta segunda cifra corresponde al Grupo A (sombra no deseada en región no enmascarada), cuyo valor debe ser tan grande como las necesidades de iluminación natural del recinto lo requieran.

La combinación de los valores obtenidos para A y B permite valorar la efectividad en el control solar ofrecido por cualquier vano junto con sus dispositivos de control solar acompañantes, siendo  $B=0$  y  $A=(1-D)$  las condiciones límite del máximo nivel de Acoplamiento Solar posible de alcanzar. Son cifras teóricas útiles para espacios públicos semi-confinados en los que haya alguna cobertura y nulos cerramientos, pero inapropiados para cualquier recinto con cerramientos verticales en los que se practiquen vanos, por lo que es preciso emplear un vano de referencia que opere como punto de partida del proceso y que permita las comparaciones entre alternativas de control solar, como se ilustra en Fig. 6.

Siendo  $A_x$  y  $B_x$  los porcentajes obtenidos al evaluar un vano de referencia, se define la remanencia (R) como el porcentaje de posiciones solares que es deseable tener enmascaradas pero que permanecen aún desprotegidas de la radiación solar directa en comparación con el Caso Base. Alternativas con un valor de R superior a 100% presentarán una incursión solar indeseada superior al Caso Base, mientras que valores por debajo de 100% tendrán un mejor desempeño solar. Un valor de  $R=0\%$  corresponde al máximo nivel de control solar, cuando toda trayectoria solar no deseada es enmascarada.

Por su parte, el porcentaje de visibilidad (V) corresponde a la región de bóveda celeste libre de requerimientos de sombra y que resulta visible en comparación con los resultados obtenidos para el Caso Base. Valores superiores a 100% corresponden a dispositivos de control solar con mejor desempeño porque permiten mayor visibilidad hacia la bóveda celeste en comparación con el Caso Base. Valores por debajo del 100% corresponden a vanos que aminoran las posibilidades de aprovechamiento de luz natural. Minimizar la Remanencia (R) a la vez que se maximiza la Visibilidad (V) mejora la eficiencia del control solar de los dispositivos de sombra, de este modo el Índice de Acoplamiento Solar queda definido como un par ordenado de la forma (R, V).

### Recursos de representación

Para representar las relaciones entre ambas magnitudes se empleó un diagrama de dispersión en el que las abscisas corresponden a los valores de Remanencia: a medida que un punto se acerque al origen estará dejando sin enmascarar una menor parte del polígono de deseabilidad de sombra. Si el resultado se aleja del origen estará ofreciendo un nivel de sombra semejante al del Caso Base. En las ordenadas se ubican los valores de V: a medida que un punto se acerque al origen estará enmascarando una mayor parte de la bóveda celeste y a medida que se aleje del origen, estará permitiendo progresivamente una mayor visibilidad hacia la bóveda celeste. El Caso Base se localiza en la parte superior derecha del diagrama, con valores de R y V de 100%, como se ilustra en la Fig. 7. El origen corresponde a la ausencia de vano: cero radiación no deseada y nula visibilidad hacia la bóveda celeste, mientras que el extremo superior del eje vertical corresponde al mejor vano posible (cero radiación no deseada y máxima visibilidad hacia la bóveda celeste).

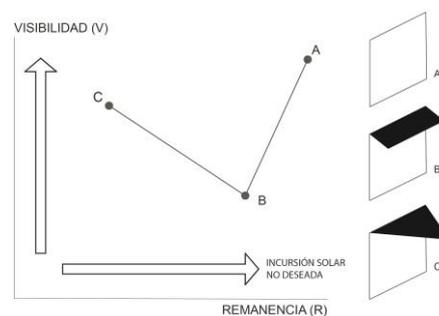


Figura 7: Relaciones entre Remanencia (R%) y Visibilidad (V%) de un Caso Base y dos alternativas de control solar para el mismo vano en estudio. El vano C ofrece menos sombra que el B y por este motivo está a su izquierda, pero como genera una menor obstrucción de la bóveda celeste, tiene una visibilidad mayor y por este motivo está más arriba que B.

En los diagramas de Acoplamiento Solar se presentan cuatro casos, tal como se esquematiza en la Fig. 8:

Caso 1 ( $R < R_x$ )  $\wedge$  ( $V < V_x$ ) y Caso 3 ( $R > R_x$ )  $\wedge$  ( $V > V_x$ ): Se ubican allí las alternativas en las que hay una relación de compromiso entre la radiación solar indeseada y el aprovechamiento lumínico obtenido. Puntos alineados verticalmente corresponden a alternativas que tienen el mismo enmascaramiento de la insolación no deseada, pero el que se encuentre más arriba tendrá mejor desempeño solar porque ofrecerá más aprovechamiento lumínico. Alternativas que aparezcan representadas como puntos alineados horizontalmente ofrecerán semejante nivel de aprovechamiento lumínico, pero la que esté a la izquierda será preferible porque tendrá una menor incursión solar indeseada.

Las alternativas clasificadas en el Caso 3 sólo serán convenientes si es preciso aportar un mayor nivel de iluminación que el Caso Base y entre puntos vecinos serán preferibles aquellos que al unirlos con el origen, definan un segmento con una pendiente mayor de manera que el aumento en la insolación indeseada venga acompañada de más aporte lumínico. En el Caso 1 serán preferibles las opciones de pendiente menor, en la medida en que la sombra adicional se estará obteniendo a costa de una menor reducción de los aportes lumínicos que permite el dispositivo de control solar.

Caso 2 ( $R < R_x$ )  $\wedge$  ( $V > V_x$ ): Dispositivos de sombra que reducen la incursión solar indeseada a la vez que elevan la visibilidad hacia la bóveda celeste. Es el cuadrante ideal, toda alternativa que pertenezca a esta zona será, desde el punto de vista de la eficiencia de control solar, preferible al Caso Base.

Caso 4 ( $R > R_x$ )  $\wedge$  ( $V < V_x$ ): Dispositivos de sombra que aumentan la incursión solar indeseada a la vez que reducen la visibilidad hacia la bóveda celeste. Es una condición doblemente desfavorable, son estas las alternativas totalmente descartables desde el punto de vista de la eficiencia de control solar.

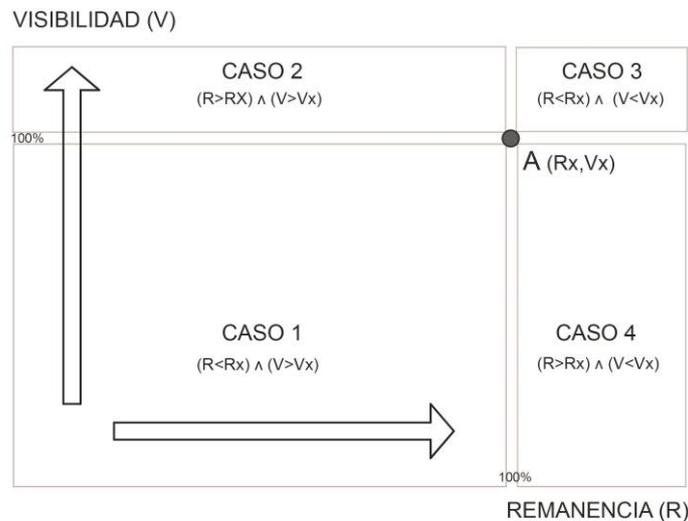


Figura 8: Los cuatro casos que se presentan en las relaciones entre Remanencia y Visibilidad a partir de los resultados de R y V obtenidos al evaluar un Caso Base.

### Criterios para la definición del punto de evaluación

El trazado de polígonos esféricos y su proyección para obtener las máscaras de sombra se realizan desde un solo origen y por ello los resultados obtenidos serán válidos para este único punto aunque se estimen representativos para el resto del vano. Esto da origen a dudas razonables acerca de la validez de los resultados y por ello la solución que habitualmente se aplica es elegir el punto de medio del vano (tanto en longitud como en altura) para repartir el error de manera equitativa. Esto implica calcular con un punto normalmente muy alto. Por ejemplo, para un vano con sillar a 1.0m y dintel a 2.20m el punto de evaluación estaría ubicado a 1.60m sobre el nivel del piso, que puede resultar siendo un punto poco representativo para la mayor parte de las tareas y disposiciones de mobiliario.

Una segunda opción más conservadora es elegir aquel punto que tenga la menor posibilidad de sombra, regularmente ubicado a nivel del piso si se evalúa una puerta vidriera, ó a la altura del sillar si se trata de una ventana. De esta manera el desempeño solar del vano en su conjunto será mejor que el del punto empleado para hacer el análisis. Se trata de una opción conveniente cuando el ahorro energético está en primera línea de prioridad, pero será una medida excesiva si la premisa es asegurar condiciones de ergonomía visual, en cuyo caso el punto de evaluación podría estar a nivel del plano de trabajo (si la distribución del mobiliario así lo sugiere) o ligeramente por debajo de los ojos en posición estándar de pie si lo que se está sombreando es un pasillo. Como queda claro, definir la posición del punto de análisis implica consultar las condiciones de uso del recinto y los Factores Humanos asociados, por lo que los criterios variarán según cada proyecto, aunque al realizar evaluaciones comparativas de varias alternativas de control solar será preciso mantener constantes la altura y posición del punto de análisis.

Para cuantificar el impacto de elegir una u otra altura del punto de evaluación, se hizo una prueba comparando dos dispositivos de sombra para un mismo vano. Se emplearon 24 puntos progresivamente más altos, comenzando en el nivel 0.0m y concluyendo a 2.40m de altura sobre el piso. Como se puede observar en la Fig. 9, no se presentan diferencias representativas por ubicar el punto de evaluación hasta los 170cm sobre el piso. Ambas series presentan relaciones lineales con un coeficiente de correlación de 0.98 y una misma pendiente, por lo que los resultados que se obtendrían al ubicar el punto de evaluación más arriba o más abajo en el intervalo comprendido entre los 0.0m y 1.7m. llevarán siempre a las mismas conclusiones y no sucederá que la alternativa mejor calificada a una altura, pase a ser valorada como no tan buena al usar otro punto a una altura diferente.



Figura 9: Diagrama de Acoplamiento Solar de dos vanos empleando 24 puntos de evaluación a diferentes alturas, comenzando a nivel del suelo y subiendo cada vez 0.1m hasta alcanzar los 2.40m sobre el piso.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método se aplicó al diseño de fachadas del Centro Empresarial Milla de Oro, torres de oficinas de 65.000m<sup>2</sup> localizada en Medellín, Colombia (6.25N, 75.6W, 1550 msnm), diseñada por AIA Arquitectos en 2012, Fig. 10. Desde las fases tempranas del diseño el equipo de arquitectos se propuso alcanzar una eficiencia energética suficientemente alta como para optar por un Sello Leed Oro “Core and Shell” empleando dispositivos de sombra y sin recurrir a superficies acristaladas con coeficientes de reflexión muy elevados, típico aspecto de un edificio de estas características en la ciudad. El punto de partida del proceso para dimensionar y posicionar los dispositivos de control solar fue alcanzar un desempeño solar semejante al que ofrecería un alero continuo de 1.10m de ancho instalado a 2.70m de altura sobre el nivel de cada piso. Por esta razón estas son las características del Caso Base.

El proyecto tiene dos fachadas occidentales y sus orientaciones (S50W y N69W) son suficientemente diferentes como para ameritar un diseño diferencial. Sin embargo, los dispositivos de sombra tienen un diseño único porque las torres tienen aristas redondeadas. Las fachadas al Noroccidente (N69W) presentan los niveles más elevados de exposición solar y la mayor área acristalada, motivo por el cual los dispositivos de control solar fueron diseñados y optimizados para esta orientación. Esto explica el motivo por el cual los resultados de Acoplamiento Solar de la otra orientación demuestran un desempeño solar muy superior al caso base porque está mejor protegida del sol, tal como se puede constatar en la Fig. 11.

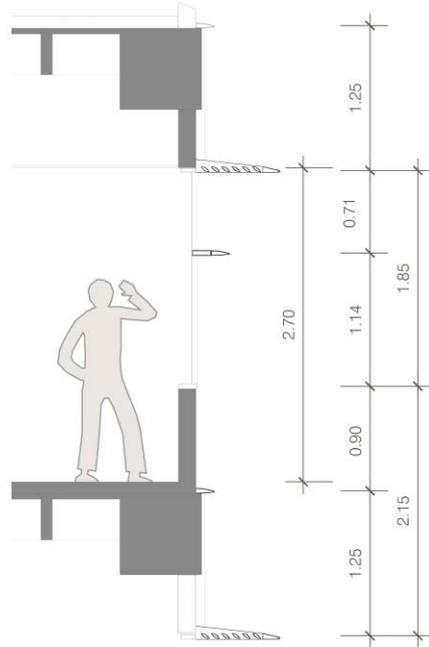


Figura 10: Centro Empresarial Milla de Oro, diseñado por AIA en 2012 y localizado en Medellín, Colombia. A la izquierda el edificio ya construido y a la derecha, sección por fachada correspondiente a la alternativa número 14 en la figura 11. Foto: Valentina Zuluaga (2017).

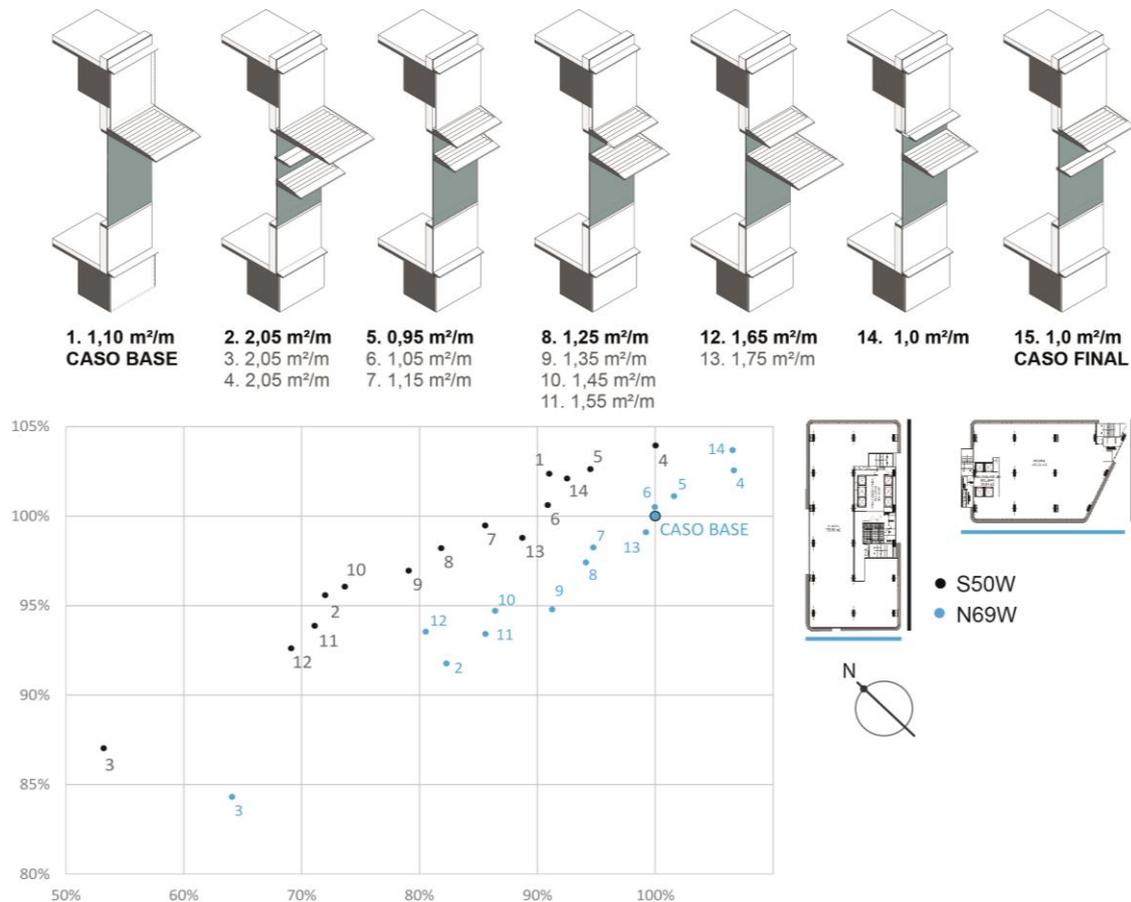


Figura 11: Alternativas evaluadas durante la fase de diseño y sus requerimientos de aluminio en m<sup>2</sup> de aluminio por cada metro lineal de fachada.

Los cálculos de Acoplamiento Solar fueron realizados para el punto más bajo de las ventanas, es decir a la altura del sillar, porque el propósito principal fue aminorar los requerimientos energéticos del equipo de climatización artificial. La deseabilidad de sombra se definió a partir del horario laboral y comprende el intervalo entre las 7:00 y las 17:00 horas durante todos los días del año. Por su parte, el modelo tridimensional empleado para realizar los cálculos del caso base está constituido por apenas 5 segmentos de plano (dos laterales, una cubierta, un fondo y un alero horizontal para un total de 12 coordenadas tridimensionales). Las alternativas siguientes requirieron entre 5 y 7 planos, dependiendo del número de aletas que tuviera la alternativa de control solar en proceso de evaluación.

Todas las alternativas de diseño, junto con sus correspondientes requerimientos de material expresados en m<sup>2</sup> de aluminio por cada metro lineal de fachada por planta, ilustran las exploraciones realizadas durante las fases tempranas del diseño arquitectónico. En el comienzo, (alternativas 2, 3 y 4) las necesidades de aluminio fueron muy elevadas porque se estuvo evaluando la posibilidad de emplear únicamente vidrio claro. Los resultados correspondientes del Índice de Acoplamiento Solar de la Fig. 11 permiten comparar el desempeño solar de tres alternativas de diseño con igual costo monetario.

Cuando la inversión económica necesaria para contrarrestar las cargas de viento se comenzó a involucrar como variable diseño, fue preciso reducir la cantidad de aluminio empleado. La alternativa 5 y las siguientes revelan esta reducción. A partir de este punto se evaluaron varias alternativas de control solar con dos bandejas horizontales que tienen ancho y separación variables (alternativas 6 a 11). Diferencias geométricas sutiles revelaron cambios sensibles en el desempeño solar alcanzado. Las alternativas 13 y 14 corresponden a las alternativas finales. A partir de este punto los ingenieros encargados del diseño del sistema de aire acondicionado comenzaron a hacer los cálculos detallados de cargas térmicas para finalmente especificar el tipo de cristal a ser empleado sin requerir cambios en los dispositivos de sombra ya diseñados.

## 6. CONCLUSIONES

El Índice de Acoplamiento Solar y los diagramas que lo representan son herramientas de fácil interpretación que ayudan a promover un alto desempeño solar desde las primeras etapas de diseño. El método permite, a partir de información geométrica básica, comparar cuantitativamente la efectividad de las decisiones orientadas a minimizar la incursión solar indeseada a la vez que se promueve el aprovechamiento de la iluminación natural.

El método para calcular el Acoplamiento Solar permite definir un umbral de desempeño como punto de partida del proceso para luego calcular su margen de optimización. El poder de resolución es suficiente para diferenciar la efectividad en el control solar de dispositivos de sombra prácticamente indistinguibles desde el punto de vista formal.

Los valores típicos de Acoplamiento Solar con frecuencia se alejarán del valor ideal, pero la posibilidad de cuantificar este distanciamiento con respecto a una situación teórica constituye un método imparcial para calificar el distanciamiento del rendimiento solar de cualquier dispositivo de sombra con respecto a la mejor condición posible.

## REFERENCIAS

1. MARDALJEVIC, J.; HESCHONG, L.; LEE, E. "Daylight metrics and energy savings". *Lighting Research & Technology*, 2009, 41(3), pp. 261 – 283
2. ROGERS, Z. "Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations in the Sensor Placement Optimization Tool". *Architectural Energy Corporation*, 2006, Boulder, Colorado, USA.
3. J.M., VILLALBA, A., PATTINI, A. (2012). Impacto de la utilización de bases climáticas regionales en la simulación de alta precisión de iluminación natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.16.
4. NIELSEN, M; SVEND, Svendsen; LOTTE BJERREGAARD, Jensen. "Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office building through integrated simulations of energy and daylight". *Solar Energy*, 2011, vol 85, pp. 757 - 768.
5. REINHART C., MARDALJEVIC J., ROGERS Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS*, v.3, n.1, p. 1-20.



6. SALAZAR, Jorge. "Solar control design by matching criteria between its shading mask and the shadow desirability Schedule to improve natural daylighting in an office building in the tropic". Passive and Low Energy Architecture Conference, PLEA Proceedings, Edimburg, 2017, pp. 740 - 747.
7. WILLIAM, O.; KONSTANTINOS, K.; ANDREAS K. "Manually-operated window shade patterns in office buildings: A critical review". *Building and Environment*, 2012, vol 60, pp. 319 - 338.
8. BODART, M. DE HERDE, A. "Global energy savings in office buildings by use of daylighting." *Energy and Buildings*, 2002 vol 34, n.5, pp. 421 - 429.
9. LEYLA, S.; MICHAEL, U. "The effect of window shading design on occupant use of blinds and electric lighting". *Building and Environment*, 2013, 6467-76. doi:10.1016/j.buildenv.2013.02.013
10. OLGAY, V. *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press, 1963.
11. LIPPSMEIER G. *Tropenbau, Building in the tropics*, Munich: Ed. Callwey Verlag, 1969.
12. BARUCH, G. *Man, Climate and Architecture*. London, Applied Science Publishers, 1976.
13. SZOKOLAY, S.V. *Solar Energy and Building*. London, Architectural Press, 1977.
14. YÁÑEZ, G. *Arquitectura Solar*. Madrid: MOPU, 1988.
15. KOLIVAND, H.; SHAHRIZAL SUNAR, M.A., "Survey of shadow volume algorithms in computer graphics". *IETE Technical Review*, 2013, vol. 30(1), Medknow Publications & Media Pvt. pp. 38 – 46.
16. NEWMAN, William; SPOULL, Robert. *Principles of interactive computer graphics*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1973. 607pp. ISBN 0-07-046337-9.
17. SALAZAR, Jorge. "Técnicas del paisaje." *Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construido*, Natal, 2009, pp. 1735-1744.

#### **Sobre el autor**

Arquitecto (1992) vinculado a la Universidad Nacional de Colombia desde 1994. Master en Energías Renovables (1998) y Master en Tecnologías Avanzadas en Construcción Arquitectónica (1996). Fundador del grupo de investigación en Energía, Medio Ambiente, Arquitectura y Tecnología, Grupo EMAT. Socio fundador de PVG Arquitectos y ya retirado, ha colaborado en numerosos proyectos de arquitectura, urbanismo y espacio público en temas relacionados con la calidad ambiental, el viento, el sol, la luz, la energía y sus implicaciones en los proyectos. Colaborador de la mayor parte de los cursos de posgrado en el tema en Colombia, es autor y par evaluador de libros, artículos y ponencias sobre la calidad del ambiente construido en varias revistas y congresos internacionales.

Fin del documento.