

## DISEÑO DE ECO-ENVOLVENTES

### MODELO PARA LA EXPLORACIÓN, EL DISEÑO Y LA EVALUACIÓN DE ENVOLVENTES ARQUITECTÓNICAS PARA CLIMAS TROPICALES

#### RODRIGO VELASCO

Universidad Piloto de Colombia, Facultad de Arquitectura y Artes, Programa Arquitectura, Bogotá.  
Grupo de investigación práctica urbano-arquitectónica y teoría socioeducativa.

Velasco, R., y Robles, D. (2011). Diseño de eco-envolventes. Modelo para la exploración, el diseño y la evaluación de envolventes arquitectónicas para climas tropicales. *Revista de Arquitectura*, 13, 92-105.

Arquitecto, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Docente Investigador, Universidad Piloto de Colombia.

Publicaciones:

Eco-envolventes: A parametric design approach to generate and evaluate façade configurations for hot and humid climates, eCAADe 2011, Eslovenia (2011).

Sobre el uso de herramientas digitales dentro de la formación profesional en arquitectura. *Alarife. Revista de Arquitectura*, 1 (11): pp. 60-71 (2011).

Configuraciones estructurales sinérgicas: hacia una economía material. *Alarife. Revista de Arquitectura fasc. N/A*: p. 47. Universidad Piloto de Colombia (2008).

rodrigo-velasco@unipiloto.edu.co

#### DANIEL ROBLES

Estudiante de arquitectura en proyecto de grado, Universidad Piloto de Colombia.

drobles90@upc.edu.co

#### RESUMEN

Este artículo presenta una propuesta de modelo paramétrico para la exploración y evaluación de configuraciones de envolventes arquitectónicas adecuadas a climas tropicales de baja altitud. Con tal fin, se ha desarrollado una estructura relacional entre factores determinantes y parámetros variables, apoyada en análisis previos de desempeño estructural de confort térmico y energía embebida de soluciones genéricas. El modelo metodológico propuesto se presenta gráficamente, incluyendo una explicación de la programación gráfica realizada, y los tipos y valores dados a los parámetros utilizados. El potencial práctico del modelo es ilustrado por un caso particular de aplicación en el contexto general de Girardot, en Colombia, donde las soluciones propuestas demuestran mejoras notables en términos de control térmico respecto a tipologías existentes.

**PALABRAS CLAVE:** diseño paramétrico, herramientas digitales de simulación, clima y arquitectura, arquitectura sostenible, TIC en arquitectura.

#### DESIGN OF ECHO-ENVELOPES

#### MODEL FOR THE EXPLORATION, THE DESIGN AND THE EVALUATION OF ENCIRCLING ARCHITECTURAL FOR TROPICAL CLIMATES

#### ABSTRACT

This paper presents the current development of an in-progress academic research project where a particular design problem, that of building envelopes for tropical climates, is parametrically defined and its possible solutions assessed by means of data correlations and virtual simulations. In doing so, the authors have devised a parametric structure based on factorial definitions whereby environmental, structural and life cycle analyses are taken into consideration to determine the overall performance of design possibilities defined in terms of their physical configuration, constituent materials, construction processes and dynamic behavior. Particular emphasis is placed on the embedded energy and functional performance of the resulting designs. The proposed methodological model is graphically presented, and its practical potential illustrated by a particular case of application.

**KEYWORDS:** Parametric design, building envelopes, green envelopes, tropical architecture, information and communication technology in architecture.

Recibido: enero 30/2011

Evaluado: agosto 17/2011

Aceptado: agosto 30/2011

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo describe el proceso de concepción, formulación e implementación de una estructura paramétrica para el diseño de fachadas arquitectónicas, llevado a cabo en el marco del proyecto interdisciplinar de investigación Eco-envolventes<sup>1</sup>, y apoyado en trabajos anteriores<sup>2</sup> sobre el uso de herramientas digitales realizados dentro del grupo de investigación Práctica Urbano-arquitectónica y Teoría Socioeducativa del Programa de Arquitectura en la Universidad Piloto de Colombia, particularmente aquellos dentro del área definida como “apoyo lógico-metodológico y análisis a procesos de diseño e investigación” (Velasco, 2011).

El proyecto de investigación Eco-envolventes, marco del presente trabajo, inició en el año 2010 como proyecto interdisciplinar formulado por los programas de Arquitectura, Ingeniería Civil y Administración y Gestión Ambiental de la Universidad Piloto. La investigación busca aprovechar recursos naturales y tecnológicos disponibles en las áreas de intervención en términos de sostenibilidad para proponer, modelar y evaluar envolventes arquitectónicas de bajo impacto energético y ambiental, adecuadas a las condiciones colombianas haciendo énfasis, en una primera fase, en las condiciones relativas a zonas de baja altitud que caracterizan la mayor parte del territorio nacional. El proyecto está formulado como una propuesta R+D+I y, en este sentido, ha establecido vínculos de cooperación con empresas privadas relevantes para el proyecto, principalmente Voxel S.A.S. (distribuidores y capacitadores de *Rhinoceros* y plug-ins asociados), Jardineros S.A. (comercializadores de plantas y consultores en paisajismo), Induguadua (productores, procesadores y comercializadores de guadua) y Helios S.A. (productores de ladrillos y tabletas de cerámica).

## METODOLOGÍA

Dentro del trabajo que aquí se presenta se pueden definir tres etapas de desarrollo. La primera, dedicada a la *formulación del problema*, implicó un estudio del estado del arte del diseño de fachadas, donde se realizó una amplia revisión de la literatura existente y de diseños de fachada especiales,

1 Proyecto de investigación de la Universidad Piloto de Colombia, donde el autor principal de este artículo colabora con Claudio Varini (investigador principal), Tomás Bolaños (biólogo), Eduardo Rocha (arquitecto), Andrés Moscoso (arquitecto), Camilo Contreras (ingeniero estructural), Paulo Romero (diseñador industrial y experto en LCA) y Sara Luciani (investigadora junior).

2 Informe sobre “El uso de herramientas digitales en el programa de arquitectura de la Universidad Piloto de Colombia y su relación con el contexto mundial” (2009), proyecto realizado por Rodrigo Velasco y financiado por la Dirección de Investigaciones de la Universidad Piloto de Colombia.

poniendo énfasis en soluciones que respondieran a las condiciones climáticas de nuestro interés particular, es decir, climas cálidos y húmedos. Se recopilaron diseños que, en algunos casos, implicaron el desarrollo de modelos digitales tridimensionales, lo que permitió la producción de estudios de caso a manera de resumen. El análisis de esta información resultó en la formulación de tres tipos de factores como determinantes principales de la propuesta: funcionales, tecnológicos y ambientales. Cada una de estas categorías agrupa una serie de factores que se podrían asimilar como grupos de requerimientos del sistema, los cuales fueron desglosados en requerimientos específicos que tuvieron la posibilidad de ser evaluados, y de esa manera incorporados como tipos de análisis para retroalimentar las propuestas generadas.

En la segunda etapa se identificaron trece parámetros de configuración para conformar una primera estructura conceptual para el diseño de fachadas. Basándose en esta estructura conceptual, el siguiente paso implicó el *desarrollo de un modelo paramétrico* donde se escogieron siete parámetros de diseño con valores tridimensionales que se definieron en términos de sus posibilidades y rangos de variación, integrados dentro de un modelo digital geométrico (programación gráfica sobre herramientas de modelación tridimensional). Las definiciones de estos parámetros fueron guiadas por supuestos dados como resultado de la investigación general, con capacidad de generar un mundo de posibilidades de diseño que, en conjunción con algunas herramientas de análisis, contempla el desempeño particular de tales posibilidades en términos de los factores determinantes previamente definidos.

Después de haber definido y desarrollado la estructura del diseño paramétrico, la tercera etapa implicó el desarrollo de una *aplicación particular de este modelo*, donde se utilizó un edificio específico, la sede de la Universidad Piloto en Girardot, para explorar el comportamiento de diferentes sistemas de fachada generados desde el modelo paramétrico aquí expuesto, para ser evaluados en términos de su desempeño climático, estructural y medioambiental.

## FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La pregunta central del proyecto de investigación Eco-envolventes: ¿Cómo es posible desarrollar, de forma original, envolventes arquitectónicas capaces de garantizar a los espacios internos *condiciones de confort* en términos de *bajo impacto ambiental* en las condiciones específicas (*geo-climáticas, tecnológicas y económicas*) propias de entornos colombianos? señala tres grandes campos que orientan las soluciones de diseño; el primero tendría que ver con los requerimientos funcionales de la envolvente, i.e., la envolvente como proveedora de condiciones de confort al interior del edificio. El segundo campo fundamental condicionaría el cumplimiento de los requerimientos

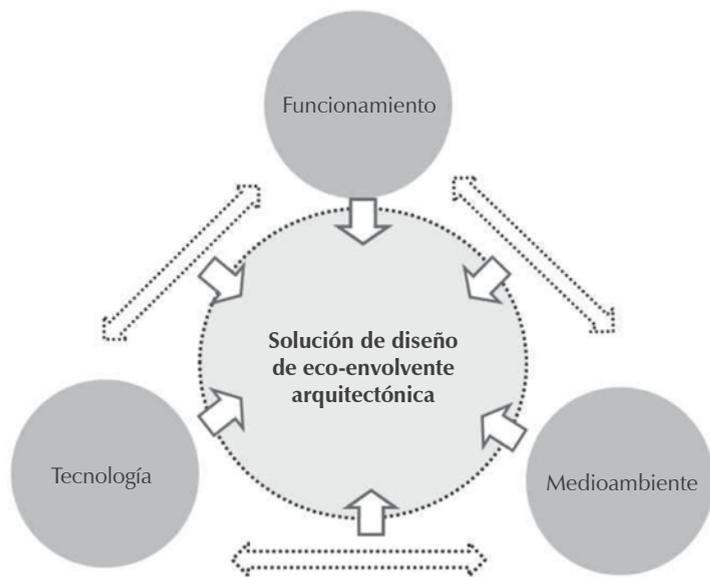


Figura 1. Factores determinantes para el diseño de eco-envolventes.

funcionales antes descritos a los recursos tecnológico-económicos disponibles en un entorno específico y, finalmente, estaría el aspecto medioambiental, que implicaría dos preconditionamientos ecológicos fundamentales para cualquier propuesta, su adecuación a unas condiciones geoclimáticas específicas y la demanda de un bajo impacto ambiental para cualquier solución propuesta y en las condiciones medioambientales particulares. De esa manera, al hablar del diseño de eco-envolventes, nos referiremos a la integración en mayor o menor grado de estos campos generales de factores, entendiendo el diseño como integrador y, en esta investigación de corte tecnológico, considerando los factores de comunicación como simple resultante (figura1).

**DEFINICIÓN DE LOS FACTORES DETERMINANTES DEL PROBLEMA**

Los tipos de factores determinantes del diseño para las eco-envolventes arquitectónicas son tres: los primeros implican lo relacionado con el funcionamiento de la fachada como proveedora de confort interno; el segundo tipo de factores implica el área tecnológica, directamente ligada a la materialidad y constructibilidad de las propuestas, mientras el tercer tipo de factores serían los medioambientales, más importantes aún cuando nuestro énfasis está en la sostenibilidad espacio-ambiental del sistema envolvente. Como los proponemos a continuación, los factores específicos de cada tipo no solo son determinantes de diseño, sino además se convierten en parámetros de evaluación para cualquier solución de diseño de eco-envolventes (figura 2).

**Factores funcionales**

Los factores funcionales están relacionados con la manera en que la envolvente arquitectónica se desempeña como barrera de protección y proveedora de zonas de confort humano en su interior. Estos factores definen el grado de confort que el sistema envolvente determina sobre los espacios que cubre. Hemos determinado cuatro requerimientos como factores principales:

**Control térmico**

La envolvente arquitectónica juega un papel importante como filtro regulador de las condiciones de temperatura del espacio interno. El control térmico, sin embargo, es resultado de la conjunción de múltiples subfactores, incluyendo la inercia térmica de los materiales y su configuración, su volumen de masa, grado de permeabilidad lumínica y de aire, insolación de la superficie, definiendo efectos de convección y radiación en un momento y contexto específico. En términos generales, es deseable que las temperaturas internas estén entre los 20 y 25 °C, lo cual será evaluado en las soluciones de diseño mediante simulaciones con programas especializados.

**Transmisión lumínica**

Teniendo en cuenta que el diseño de eco-envolventes pretende disminuir al máximo los requisitos de energía para su funcionamiento, el aprovechamiento de la iluminación natural es de gran importancia. El nivel de iluminación requerido al interior del espacio depende de las actividades que se deban realizar en él; este oscila entre los 300 y 1000 luxes, e implica una homogeneidad de niveles para evitar efectos de brillo excesivo o encandilamiento.

**Ventilación**

Además de ser un subfactor en el control térmico, un espacio funcional requiere cambio constante del volumen de aire contenido para ser habitable, normalmente alrededor de un cambio total de volumen por cada hora, equivalente a unos 50 metros cúbicos de aire por persona por hora. Los niveles de ventilación requeridos para ello deben ser controlados para evitar velocidades de aire muy altas que interfieran con las actividades humanas realizada en su interior.

**Aislamiento acústico**

Como filtro selectivo de las condiciones externas, la envolvente debe procurar también el control de ondas sonoras al interior del edificio, normalmente son admisibles niveles de hasta 50 db, la configuración física de la solución determinante directa de este desempeño.

**Factores tecnológicos**

Estos factores tienen que ver con los medios y las tecnologías empleados para materializar la propuesta de diseño de la envolvente, es decir, de qué y cómo está hecha. Hemos definido cuatro factores que determinan el grado de articulación de la propuesta en términos tecnológico-constructivos, y que definen la manera en que el desempeño de la propuesta de diseño pueda llegar a ser evaluada.

**Capacidad estructural**

Probablemente, uno de los requerimientos fundamentales de la construcción envolvente radica en su necesidad de mantenerse estable resistiendo fuerzas externas y de uso. En este caso, entenderemos el sistema en términos de su eficiencia como medio de transmisión de cargas, comparando en una relación inversa los niveles de resistencia con los de peso propio.

**Eficiencia constructiva**

Otro requerimiento de la envolvente, particularmente cuando se trata de un sistema que pretenda ser reproducible de manera industrial, radica en el tiempo y los recursos necesarios para su montaje en sitio.

**Durabilidad y seguridad**

Además de su estabilidad estructural ante cargas externas, una construcción debe tener la posibilidad de resistir una gran variedad de fenómenos físicos y químicos externos que pueden llegar a deteriorarla y poner en peligro la seguridad de los habitantes en el espacio interno. Particularmente, la configuración puede ser evaluada en términos de su resistencia al fuego y fenómenos ambientales comunes (*weathering*).

**Costo y mantenimiento**

La inversión económica requerida para la construcción y el mantenimiento del sistema envolvente es factor condicionante para el uso de unas u otras tecnologías. Una valoración de esta inversión permite comparar diferentes soluciones y verificar su viabilidad.

**Factores medioambientales**

Estos factores son los relativos al medio físico global dentro del cual se localiza la posible envolvente arquitectónica, incluyendo aspectos energéticos y de biodiversidad (especies vegetales nativas o apropiadas). Estos factores definen el impacto del sistema envolvente sobre el medioambiente natural a escalas local y global, que podrán ser evaluados de manera general en términos de los siguientes factores:

**Energía embebida**

El primer factor propuesto como determinante de comportamiento medioambiental de la envolvente es la cantidad de energía requerida para su construcción entendiéndola de manera total para los materiales, productos y procesos llevados a cabo dentro de los ciclos de vida de cada elemento que la compone.

**Energía térmica absorbida-emitida**

La manera y el grado en que la superficie envolvente refleja o absorbe la energía proveniente de

la radiación solar resulta en la energía que esta transmite al medio local, modificando su funcionamiento, y llegando a causar fenómenos como el de la isla de calor. Proponemos medir este factor de acuerdo con el grado de acercamiento del sistema artificial envolvente al medio natural en términos de su comportamiento energético.

**Soporte a biodiversidad local**

Previendo la inclusión de material vegetal o de soporte animal dentro de la configuración física del sistema envolvente, este factor califica la inclusión de ese material de acuerdo con su pertinencia y efectividad para soportar el sistema bio-diverso donde se sitúa.

**Producción de O<sup>2</sup>-Fitorremediación**

De la misma manera que el anterior, este factor califica el comportamiento del material vegetal incluido en el sistema envolvente, pero en este caso en términos de los beneficios directos que las estructuras vegetales puedan llegar a tener con respecto a la calidad del volumen de aire contiguo para uso humano.

Figura 2. Determinantes y tipos de evaluación.

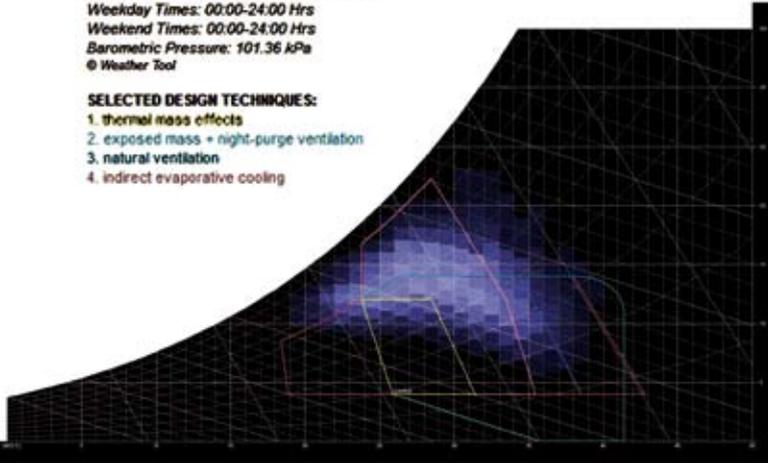
FACTORES DETERMINANTES	TIPOS DE ANÁLISIS
<p><b>FACTORES FUNCIONALES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Control térmico</li> <li>Transmisión lumínica</li> <li>Ventilación</li> <li>Aislamiento acústico</li> </ul>	<p><b>EVALUACIONES FUNCIONALES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nivel de iluminación interna</li> <li>Temperatura interna</li> </ul>
<p><b>FACTORES TECNOLÓGICOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Capacidad estructural</li> <li>Eficiencia constructiva</li> <li>Durabilidad y seguridad</li> <li>Costo y mantenimiento</li> </ul>	<p><b>EVALUACIONES TECNOLÓGICAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Capacidad estructural / Peso</li> <li>Costos</li> </ul>
<p><b>FACTORES MEDIOAMBIENTALES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energía embebida</li> <li>Energía térmica emitida</li> <li>Soporte a biodiversidad local</li> <li>Fitorremediación</li> </ul>	<p><b>EVALUACIONES MEDIOAMBIENTALES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>LCA</li> <li>Superficie total / Cobertura vegetal</li> </ul>

## Psychrometric Chart

Location: Girardot, Colombia  
 Frequency: 1st January to 31st December  
 Weekday Times: 00:00-24:00 Hrs  
 Weekend Times: 00:00-24:00 Hrs  
 Barometric Pressure: 101.36 kPa  
 © Weather Tool

### SELECTED DESIGN TECHNIQUES:

1. thermal mass effects
2. exposed mass + night-purge ventilation
3. natural ventilation
4. indirect evaporative cooling



## Comfort Percentages

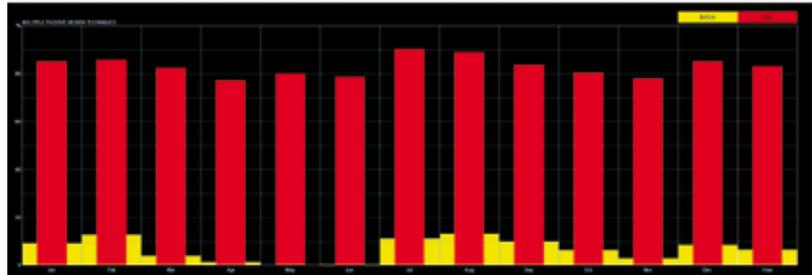
NAME: Girardot  
 LOCATION: Colombia  
 WEEKDAYS: 00:00 - 24:00 Hrs  
 WEEKENDS: 00:00 - 24:00 Hrs  
 POSITION: 4.2°, -74.5°  
 © Weather Tool

### CLIMATE: Af

Tropical moist climate where precipitation occurs all year long.  
 Monthly temperature variation is less than 3 degrees Celsius.  
 Intense heating and humidity cause afternoon clouds almost every day.  
 Daily highs about 32°C while night time temperatures average 22°C.

### SELECTED DESIGN TECHNIQUES:

1. thermal mass effects
2. exposed mass + night-purge ventilation
3. natural ventilation
4. indirect evaporative cooling



## FORMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA PARAMÉTRICA

### Figura 3.

Diagrama psicrométrico y previsión de porcentajes de confort con el uso de estrategias pasivas seleccionadas.

Cuando hablamos de una estructura paramétrica nos referimos a una organización interrelacional, donde las partes están conectadas dentro de un sistema coordinado, implicando de esa manera la posibilidad de variar partes y recrear de manera automática nuevas configuraciones (Woodbury, 2010, p. 11). Debemos entonces definir las partes de nuestro modelo, la manera, los rangos mediante los cuales estas cambian, y las reglas generales del sistema. A estas partes las hemos llamado parámetros de diseño, que de una manera general implican tipologías configurativas particulares (campos de variación), donde definiciones internas (variables) pueden llegar a tener valores diferenciales de rangos especificados (valores). A continuación expondremos las reglas generales y la definición de la estructura paramétrica que permitieron una programación haciendo uso de herramientas digitales.

### REGLAS GENERALES DEL SISTEMA

Las reglas generales de configuración están dadas por análisis previos realizados dentro de la investigación marco<sup>3</sup>, donde se exploraron estrategias pasivas en climas cálidos húmedos para alcanzar niveles razonables de confort dentro del edificio cubierto. Como lo demuestran preanálisis básicos, las estrategias más destacadas fueron la ventilación, la inercia térmica, la protección solar y el enfriamiento nocturno (figuras 3 y 4).

La propuesta de la investigación involucra la utilización de sistemas de doble capa que puedan permitir de manera selectiva ventilaciones internas y cruzadas. De esa manera, buscando la aplicación de tales estrategias prometedoras, y guiados por los requerimientos propuestos como factores determinantes, hemos considerado solo un nú-

mero limitado de parámetros de diseño. Estos parámetros generales de diseño son relativos a la definición general de la envolvente, su estructura y revestimiento: las configuraciones propuestas estarían constituidas por particulares combinaciones de doble revestimiento, utilizando el vacío intermedio para colocar la estructura, asumiendo al mismo tiempo que varias de las posibles resultantes ofrezcan la posibilidad de permeabilidad, del uso de la vegetación, y que todas ellas impliquen el uso de materiales reciclables o renovables, y sean construidas con elementos prefabricados de fácil y rápido montaje y desmontaje.

### PARÁMETROS DE DISEÑO

Una revisión bibliográfica previa al desarrollo de la presente investigación nos ha mostrado que la gran mayoría de publicaciones sobre el tema toman como parámetro único para la clasificación de sistemas de envolventes el tipo de material principalmente empleado en la solución, demostrando tal categorización mediante estudios de caso. Algunos pocos estudios involucran categorías basadas en la configuración de capas o en los sistemas integrados al sistema envolvente; no obstante, de estos pocos ejemplos de clasificación, la gran mayoría de los encontrados son específicos parasistemas especializados de doble capa en vidrio (Hausladen, 2008, pp. 94-118; Crack, 2007, pp. 14-34), propios de soluciones para climas de altas latitudes. Es claro, sin embargo, que cuando hablamos de diseño en este contexto, nos referimos necesariamente a la integración de factores tecnológicos y funcionales dentro de cualquier propuesta de configuración física, en este caso de doble capa permeable como se ha definido anteriormente. Aquí denominaremos parámetros de diseño a un número de tipologías de configuración física o material que representan soluciones

<sup>3</sup> Eco-envolventes, Universidad Piloto de Colombia.

integradas a algunos de los múltiples requerimientos establecidos como factores determinantes.

De acuerdo con las reglas generales de configuración anteriormente expuestas, los parámetros de diseño propuestos aquí se pueden dividir en tres grupos: el primero, correspondiente a la definición general de la envolvente; el segundo, relativo a la estructura portante, y el tercero, correspondiente al cerramiento. Hemos determinado trece parámetros que definen el diseño y la caracterización de envolventes arquitectónicas para climas tropicales: localización, posición relativa, morfología superficial, escala, configuración estructural, mallado, secciones de trabajo estructural, uniones y anclajes, materiales de estructura, tipología de cerramiento, grado de permeabilidad, materiales para cerramiento y soporte vegetal. En la figura 5 se muestra la relación entre los factores determinantes y los parámetros de diseño propuestos para esta investigación, definiéndolos dentro de tres categorías principales: generales, estructura y cerramiento.

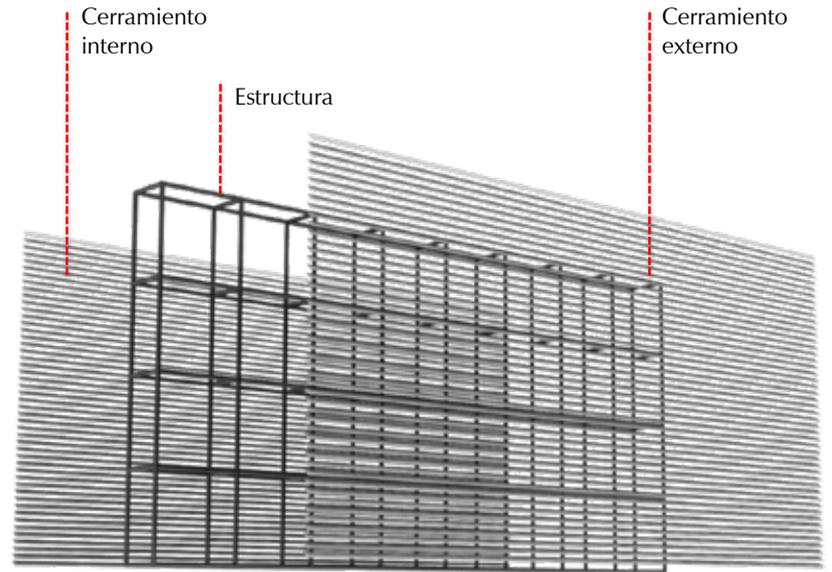
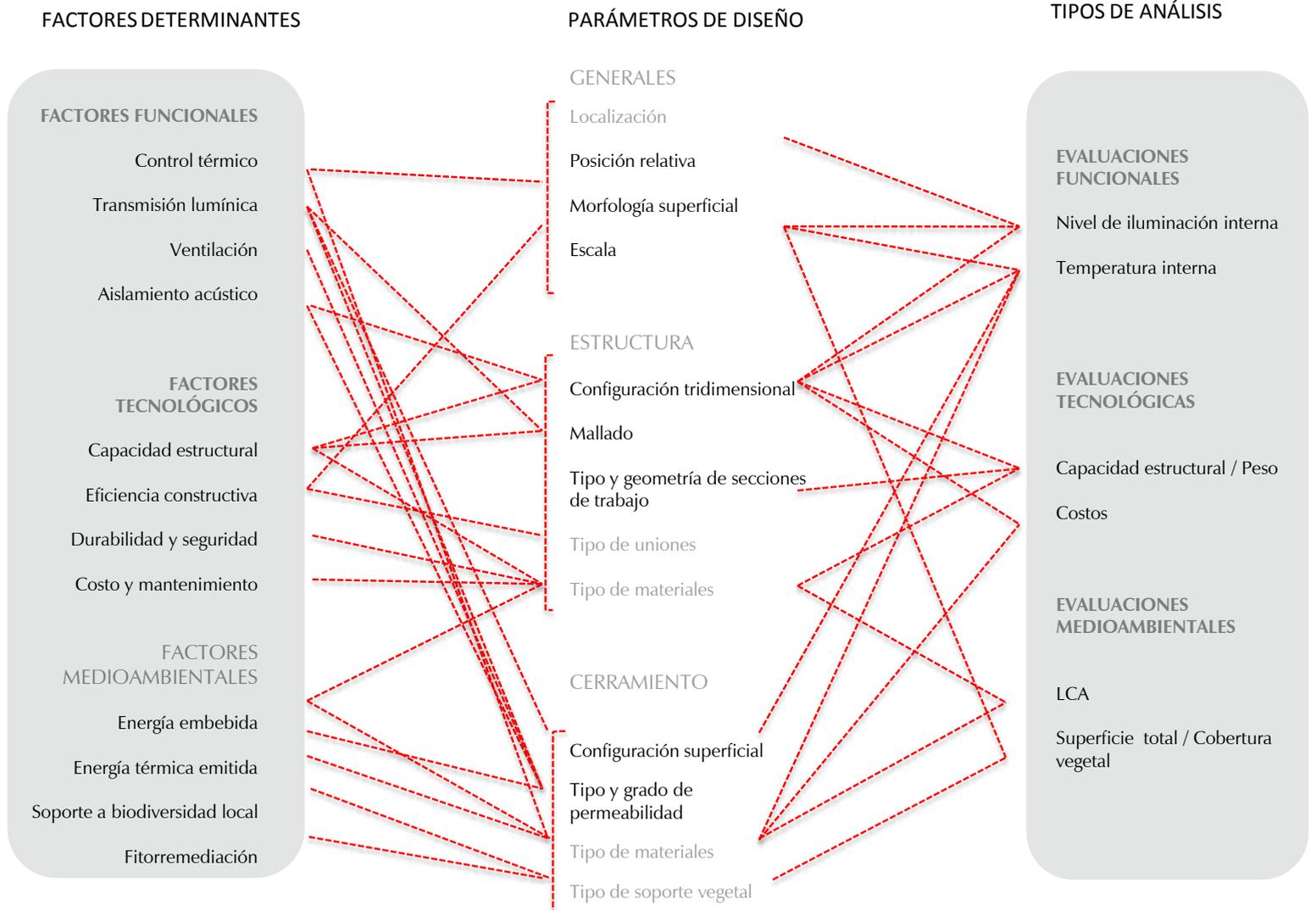


Figura 4. Configuración genérica escogida: una doble capa de revestimiento con estructura en el medio.

Figura 5. Relación de factores, parámetros y tipos de evaluación.



### Parámetros generales

Los parámetros generales definen la conformación y las condiciones generales de la construcción envolvente en términos de localización, morfología, posición y escala.

#### Localización

La localización está definida por las coordenadas geográficas donde el proyecto estará ubicado, contiene los datos climáticos (temperatura, radiación solar, nubosidad y humedad relativa) proporcionados por estaciones meteorológicas cercanas. Aunque este parámetro es de naturaleza externa a la configuración física de la envolvente, se ha incluido en la estructura porque proporciona información requerida para simulaciones de desempeño funcional ligadas al modelo paramétrico.

#### Morfología y escala

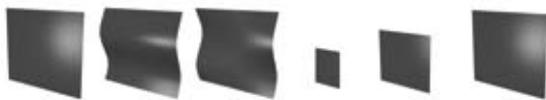


Figura 6. Categorías tipológicas de morfología y escala relativa.

La morfología y la escala de la superficie envolvente definen el área de la misma en relación directa con el entorno externo implicando, por ejemplo, mayores niveles de radiación solar,

exposición a vientos o lluvia. Como categorías, hemos definido tres posibles: *superficie plana*, de *curvatura simple*, y de *doble curvatura*. Las principales implicaciones que cada posibilidad conlleva son de tipo estructural y constructivo.

#### Posición relativa



Figura 7. Categorías tipológicas de posicionamiento relativo.

La posición relativa es probablemente el principal parámetro determinante de la relación de la superficie envolvente con el medio externo, encontramos tres posibles categorías de este

parámetro: posición vertical, es decir, funcionando estrictamente como *fachada*; posición horizontal, funcionando estrictamente como *cubierta* (hasta 45°), y *continua*, donde la envolvente se adapta a las dos condiciones anteriores.

### Parámetros de estructura

#### Mallado

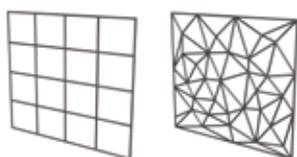


Figura 8. Categorías tipológicas de mallado.

La configuración del mallado tiene implicaciones directas sobre el trabajo estructural, el proceso constructivo y, particularmente, sobre la penalización y modulación de los elementos de cerramiento.

Hemos definido dos casos de configuración de mallado: *uniforme* y *no-uniforme*. El primero indica un caso de estandarización modular total, el segundo muestra una irregularidad del mallado estructural y, por tanto, de los elementos de cerramiento adheridos a la estructura.

#### Configuración 3D

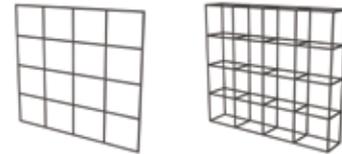


Figura 9. Categorías tipológicas de configuración 3D.

La configuración tridimensional se ha definido entendiéndola como una construcción de tipo “esqueletal”, definiendo dos grados de conectividad entre elementos, e implicando variaciones para las secciones de trabajo estructural de los mismos. Hemos definido dos categorías posibles para la configuración tridimensional de la estructura esqueletal, una en *dos direcciones* y otra en *tres direcciones*. El mayor grado de conectividad proporciona más estabilidad estructural al sistema, aunque normalmente implica mayor peso y mayor número de ensambles constructivos.

#### Sección estructural



Figura 10. Categorías tipológicas de sección estructural.

La sección o el perfil de los elementos que conforman la configuración esqueletal descrita tiene importante injerencia sobre el comportamiento estructural del sistema, su peso y construcción. Hemos definido tres tipologías de sección estructural: *maciza*, *hueca* y *aleteada*.

#### Tipo de materiales

Para la estructura prefabricada hemos definido tres tipos genéricos de materiales estructurales de acuerdo con sus características de composición físico-química y procesos de producción, así: materiales *metálicos*, *poliméricos* y *maderas*.

### Parámetros de cerramiento

Los parámetros de cerramiento definen la manera en que el sistema envolvente interactúa con el medioambiente circundante al nivel de superficie, determinando diversos tipos y niveles de intercambio energético.

#### Tipología de cerramiento



Figura 11. Categorías tipológicas de cerramiento con sistemas de verdeo.

La configuración física de los elementos modulares convencionales que conforman el cerramiento superficial del sistema envolvente define la materialidad del sistema en su nivel externo. Este parámetro tiene dos categorías generales: elementos de cerramiento como soporte de cobertura verde y elementos convencionales.

Assumiendo como conveniente la inclusión de material vegetal en las superficies que conforman el cerramiento del sistema envolvente, hemos definido tres configuraciones posibles para su posicionamiento, la primera estaría dada por una *mallado de cables* como soporte a una especie trepadora, la segunda implicaría receptáculos horizontales conformando *bolsillos rígidos*, y la tercera estaría dada por el uso de *paneles verticales*.



Figura 12. Categorías tipológicas de cerramiento con sistemas convencionales.

Con relación a los sistemas de cerramiento convencionales, hemos definido dos variaciones principales en este parámetro: configuraciones *no coplanares* y *superficiales*.

#### Tipo y grado de permeabilidad

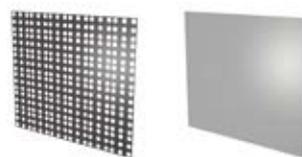


Figura 13. Categorías tipológicas de permeabilidad.

La permeabilidad de la superficie envolvente se define por la configuración modular o el tipo de material utilizado, implicando dos tipos, total o lumínica. El primer tipo de variación lo hemos denominado *superficie perforada*, y el segundo *superficie translúcida*.

#### Tipo de materiales

Hemos determinado siete tipos genéricos de materiales para el cerramiento, definidos de acuerdo con sus características de composición físico-química y procesos de producción, así: materiales *vítreos*, *pétreos*, *concretos*, *arcillosos*, *vegetales*, *metálicos* y *poliméricos*. El tipo de material es el parámetro de diseño ligado al mayor número de factores determinantes, pero no transferible a valores geométricos para su modelación.

## PROGRAMACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO

### PROGRAMACIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO

Habiendo definido reglas generales, parámetros de diseño, y teniendo clara una estructura interrelacional que los liga, el paso siguiente implicó el uso de herramientas digitales para automatizar la generación de propuestas de diseño producidas por la estructura. Es, sin embargo, importante anotar que esta programación tiene una naturaleza puramente instrumental para agilizar las labores exploratorias, pero no es en ningún caso fundamental para el desarrollo del problema.

La herramienta escogida para programar las relaciones dentro de un modelo digital tridimensional fue *Grasshopper*<sup>4</sup>, como aplicación que corre sobre el software *Rhino*<sup>5</sup>. *Grasshopper* es una interface gráfica que permite establecer relaciones internas entre datos numéricos y operaciones geométricas de manera intuitiva y con visualización en tiempo real, produciendo unas definiciones que, a diferencia de las basadas en *script*, no requieren conocimiento previo de lenguajes de programación. La capacidad de flexibilidad y robustez de esta herramienta es todavía bastante limitada comparada con la programación por código, pero fue escogida para este proyecto por sus importantes ventajas pedagógicas.

Los parámetros por programar fueron siete de los trece incluidos en la estructura propuesta, escogidos por estar directamente referidos a datos geométricos y espaciales, a saber: *Morfología superficial*, *Posición relativa*, *Mallado*, *Configuración 3D*, *Sección estructural*, *Tipología de cerramiento* y *Permeabilidad*. A continuación veremos la manera en que cada uno de estos parámetros, variables y valores se definen dentro de la programación visual sobre *Grasshopper* (figura 14):

4 www.grasshopper3d.com

5 www.rhino3d.com

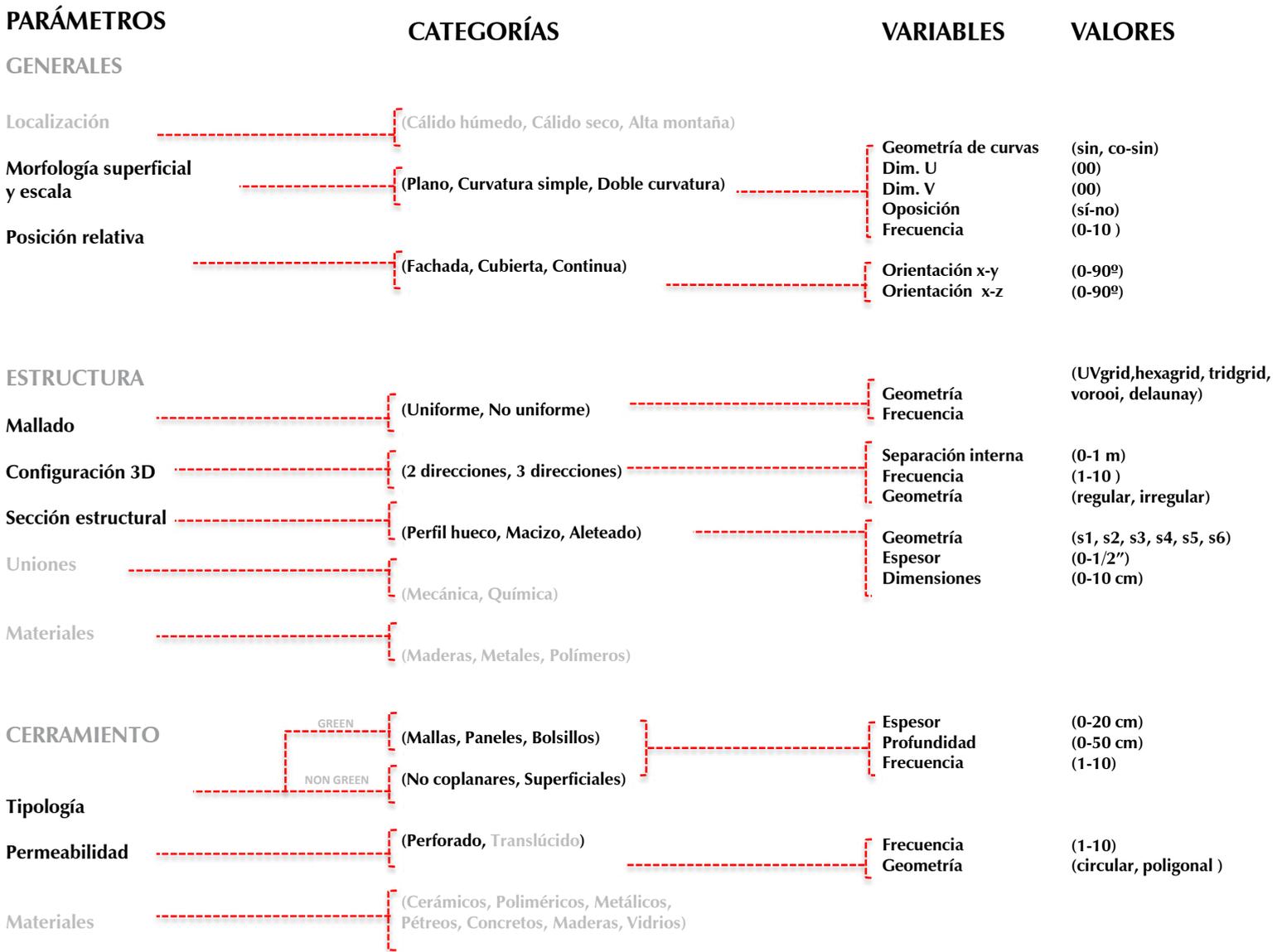


Figura 14. Cuadro relación entre parámetros, variables y valores (en negro los incluidos en la programación gráfica).

**Morfología superficial y escala**

El primer paso para la creación de una superficie base implica la elaboración de una curva inicial, para lo cual partimos de dos puntos colocados en el espacio, desde las coordenadas 0,0 del plano cartesiano, desplazando uno de los puntos en el eje z, para lo cual se cambia la distancia entre los rangos por medio de un deslizador numérico que determina la altura del mismo con la unión de los puntos. Se genera así una curva recta que puede variar su geometría por medio de funciones específicas (*seno* o *coseno*) para generar curvatura; las ondulaciones son controlables desde su frecuencia y su profundidad a las cuales están directamente ligadas. El tamaño relativo de la superficie generada podrá ser modificado en sus dos direcciones (UV) mediante el uso de deslizadores numéricos que controlan la longitud del perfil lateral (Dim U) y de la separación entre este mismo y su copia (DimV) que generan la superficie de transición.

La frecuencia se puede controlar de acuerdo con el número de series que tiene la curva; el número de ondulaciones cambia según sean los valores que se le den al deslizador numérico, y sus límites van de acuerdo con el valor mínimo (0) y máximo (10) del mismo deslizador numérico.

La profundidad está dada por un multiplicador de la función trigonométrica —un número entero—, lo que hace que las ondulaciones sean de más distancia según sea el valor dado en el deslizador numérico.

Se puede dar una oposición (*sí-no*) mediante la repetición en espejo del perfil lateral, lo que genera el inverso de las ondulaciones de la curva original implicando la posibilidad de crear superficies planas, de curvatura simple o de doble curvatura, esta última dada por el funcionamiento de la oposición con curvatura (figura 15).

**Posición relativa**

La superficie original o la réplica escalada (variación de tamaño) se pueden orientar en dirección vertical y horizontal, primero en el plano x-y (vertical) (0-90°), generando un duplicado que se puede visualizar en tiempo real para ver las variaciones con relación a la original; teniendo en cuenta este giro se puede hacer un segundo que va sobre el eje x-z (horizontal) (0-90°), es decir, está referenciado por la rotación anterior. Para determinar el ángulo de cada una de las rotaciones se referencia  $2(\pi)$  como 360° (figura 16).

**Mallado**

Teniendo la superficie creada es posible generar divisiones sobre la misma de forma reticular, esto se puede realizar por medio de un componente que divide de forma horizontal y vertical la superficie sin importar su curvatura, y que puede ser controlado de forma independiente o uniforme en los dos sentidos; esto permite tener subsuperficies independientes que, en conjunto, van a mantener la forma original.

La *frecuencia* de la subdivisión varía de igual forma para las subsuperficies y la configuración estructural ya que estas están ligadas al mismo controlador, la estructura parte de los vértices de cada una de las subsuperficies, es decir, siempre tendrán el mismo número de repeticiones, las cuales van de acuerdo con el número que se quiera en UV de la superficie original.

La *geometría* se divide en uniforme o no uniforme; la uniforme (malla UV, malla hexagonal, malla triangular) la constituyen grillas de geometrías que varían su tamaño y su *frecuencia*; la no uniforme está constituida por geometrías basadas en puntos aleatorios que al unirse con líneas crean formas irregulares, estas pueden variar su forma, frecuencia y tamaño de acuerdo con la ubicación de puntos guía sobre el espacio de la superficie (Voronoi, Delaunay) (figura 17).

**Configuración 3D**

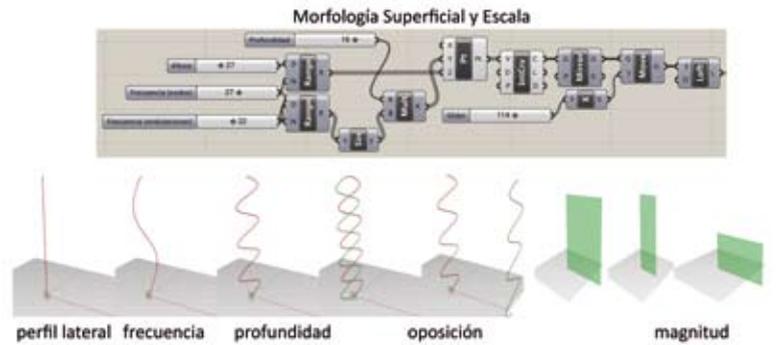
Teniendo las divisiones es posible formar un mallado tubular siguiendo las líneas que dividen la superficie, lo que da la primera opción de configuración estructural que sería en dos direcciones; para una tercera dirección —separación interna (0-1m)— se maneja como una distancia en paralelo de la configuración estructural, se da en un duplicado de la estructura original con un comando “mover” en el eje Y que es paralelo a las normales de la superficie original, la distancia es controlable en metros por un deslizador numérico.

El enlace entre capas se logra mediante una explosión de las curvas para obtener los puntos finales e iniciales de las de división, y sobre estos se trazan las líneas de unión. La *geometría* puede implicar uniones *directas* entre los puntos nodales que la conforman, o *cruzadas*, que se obtienen cambiando el punto final o inicial de las curvas (figura 18).

**Sección estructural**

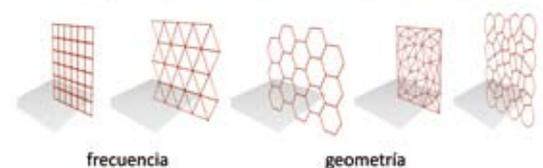
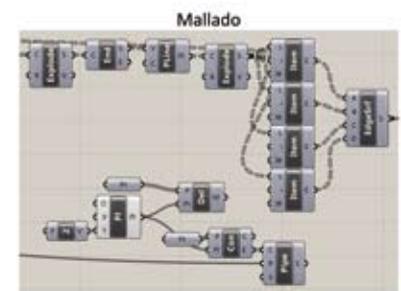
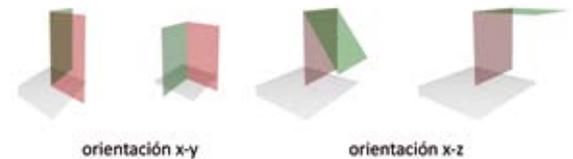
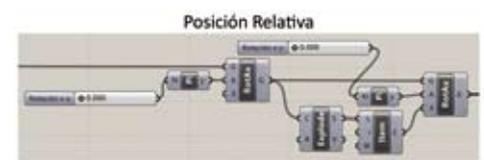
Las secciones varían su *geometría* (*s1, s2, s3, s4, s5*) utilizando perfiles convencionales prediseñados dentro de la aplicación Structural Drawing<sup>6</sup>, donde se pueden determinar las dimensiones de cada perfil de acuerdo con las opciones de cada componente; dentro de las variables por controlar en el perfil se puede cambiar su altura, ancho y el tamaño del vacío interior.

El *espesor* está determinado por una variable en el perfil que determina el ancho del mismo dentro de un rango específico (0-1/2”). Las *dimensiones* de cada sección están dadas de manera integrada con el componente, se utiliza un deslizador para cada uno que toma el valor en pulgadas de cada medida (0-10 cm) (figura 19).



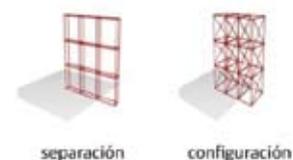
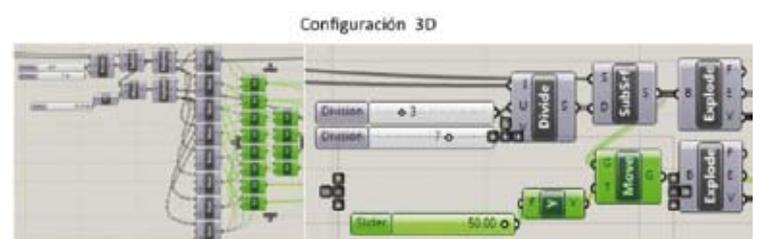
▲ Figura 15. Morfología superficial y escala.

▼ Figura 16. Posición relativa.



▲ Figura 17. Mallado.

▼ Figura 18. Configuración 3D.



6 <http://ssi.wikidot.com/summary>

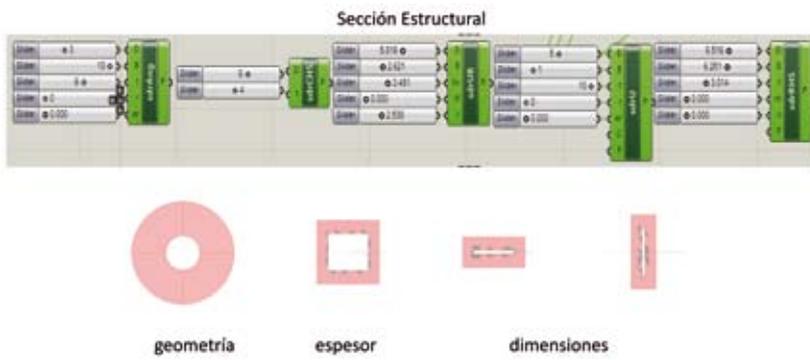


Figura 19. Sección Estructural.

### Tipología de cerramiento

En la configuración superficial se presentan dos opciones, una está dada por la superficie original, la segunda por un sistema no coplanar (persiana). Para la definición de este sistema se subdividió cada una de las subsuperficies con líneas que tienen una extrusión en el eje *y*, que dan al exterior de las superficies, estas tienen un *espesor* que es una extrusión en dirección a las normales de las mismas (0-20 cm), y una rotación para cerrar o abrir el sistema. En la definición del sistema la extrusión de la línea está directamente ligada con la *frecuencia* (1-10) de las superficies para que en caso de cerrarse no se superpongan una con otra ni queden espacios vacíos.

Dentro de las subsuperficies se genera una escala proporcional desde el centro del área para crear unos recuadros que tienen extrusión hacia el exterior —*profundidad* (0-50 cm)—, estos paneles son los que se utilizarán dentro de los sistemas de verdeo (paneles verdes); la extrusión es controlable con un deslizador numérico y la orientación depende del eje hacia donde van la extrusión y la dirección, i.e., valor numérico positivo o negativo.

El otro sistema de verdeo está dado por una definición de bolsillos, contenedores de material vegetal; en esta parte se determinaron las variables que tiene el sistema como el ancho del bolsillo, su rotación y las características del vano, además de su frecuencia (figura 20).

### Permeabilidad

La *frecuencia* en la permeabilidad está dada por el número de puntos que están en una escala de las subsuperficies —este número es controlable (0-10)—, en las curvas UV pueden ser igualmente independientes o uniformes.

La *geometría* está formada con base en los puntos con unas circunferencias, las cuales pueden ser reemplazadas por polígonos que varían su número de lados (figura 21).

## GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES DE FACHADA PARA GIRARDOT

El propósito primordial de las exploraciones propuestas es la producción de nueva información obtenida de su análisis y evaluación, donde el reto más importante está en definir los mecanismos para interpretar e integrar de manera objetiva los resultados de las valoraciones o pruebas de desempeño realizadas. Aunque el modelo se basó en preevaluaciones estructurales, térmicas y de ciclo de vida para la selección de reglas y parámetros generales, en esta primera fase de la investigación se realizaron exclusivamente simulaciones digitales de comportamiento térmico de las configuraciones de diseño generadas (figura 22).

De acuerdo con lo anterior, se generaron configuraciones doble capa utilizando tipologías de cerramiento con paneles y bolsillos verdes en el exterior, y configuraciones superficiales y no coplanares en cerramientos exteriores e interiores, estos últimos permitiendo apertura total para ventilación cruzada nocturna. Se realizaron 48 evaluaciones utilizando un módulo de prueba cúbico de tres metros de lado, con el ánimo de comparar resultados de estas simulaciones con

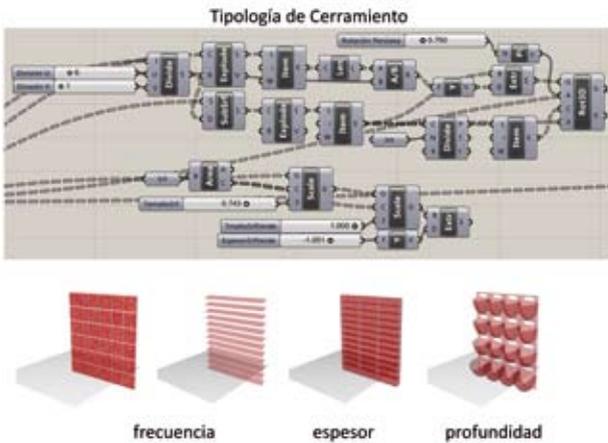
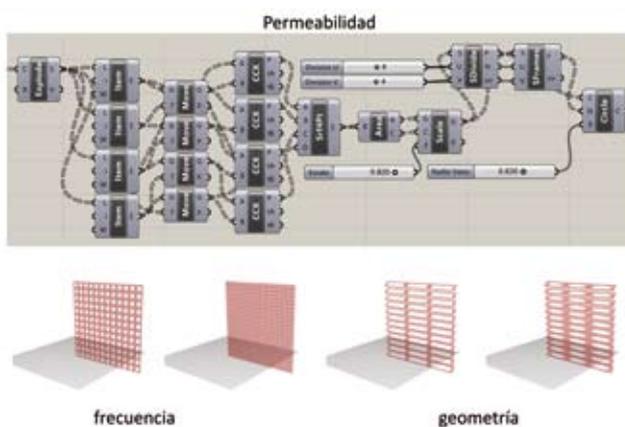
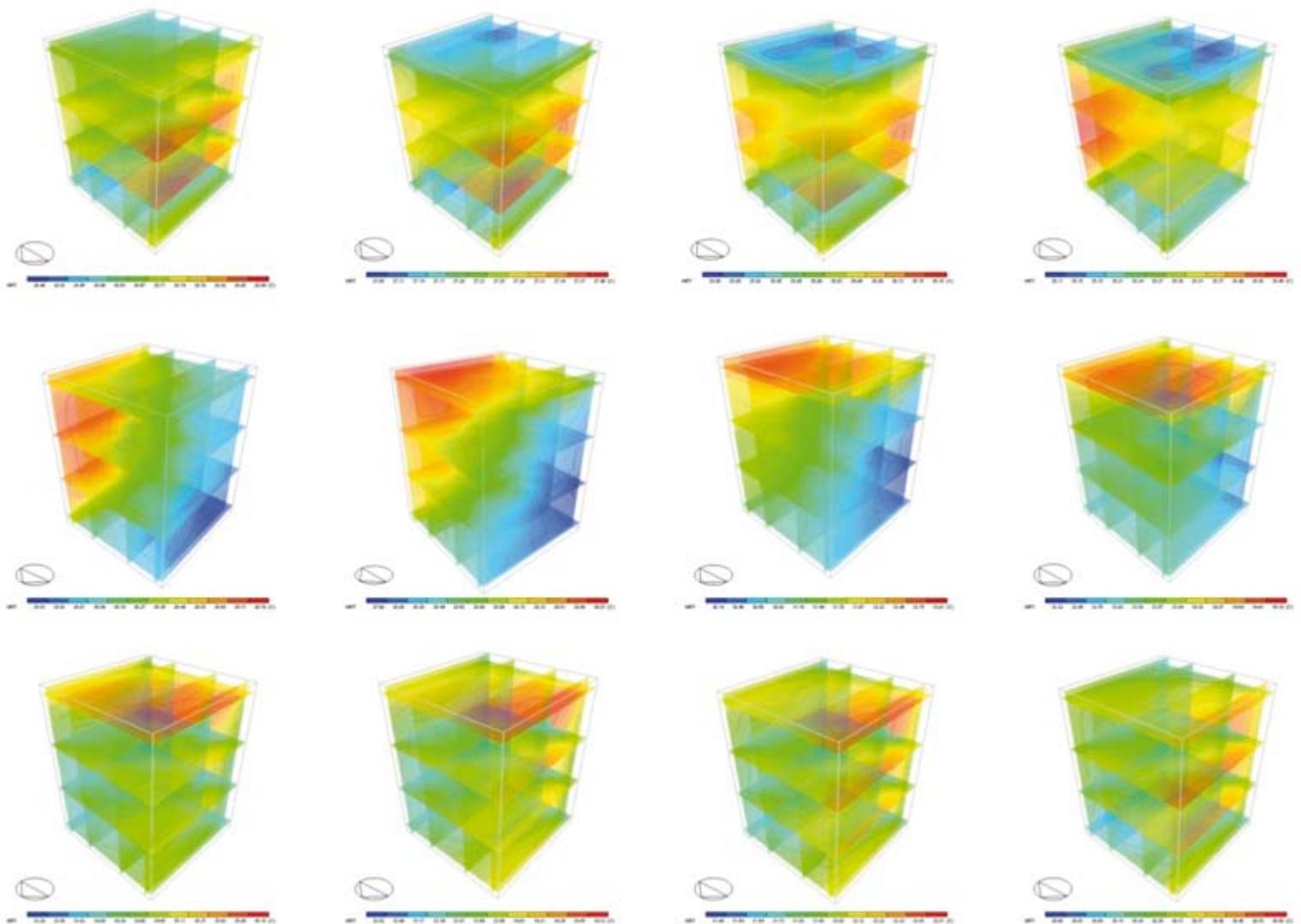


Figura 20. Tipología de Cerramiento.





resultados de una estructura real en construcción. Las evaluaciones fueron realizadas para el día más caliente del año (21 de julio), el menos caliente (21 de noviembre), y un día promedio, durante seis horas del día (9 a.m., 12 m., 3 p.m., 6 p.m., 9 p.m., 12 a.m.). Teniendo en cuenta que en estas evaluaciones el tipo de materiales empleados tiene tanta o mayor importancia que la configuración física escogida, los materiales seleccionados para las configuraciones en las pruebas se basaron en estudios previos para construcciones en Girardot con metodología LCA, donde materiales locales como fibrocemento, paneles plásticos con especies nativas, bloques ligeros de ladrillo y guadua laminada obtuvieron las mejores calificaciones. De estas evaluaciones realizadas sobre el módulo de prueba las configuraciones más prominentes fueron tres: cerramientos exteriores con elementos no coplanares en guadua laminada y cerramiento interior en elementos cerámicos (mejoramiento térmico de hasta 11,5 °C en Tmax, desfase de 9 horas y un promedio -5 °C en el día); cerramiento exterior en paneles plásticos con vegetación nativa y elementos interiores obteniendo los mismos resultados, y cerramientos exteriores en ladrillo con caolín, con coloración clara y el mismo cerramiento interior (mejoramiento térmico de hasta 11,5 °C en Tmax con desfase de 9 horas y un promedio de -5,1 °C en el día) (figura 23).

Como aplicación particular se escogió la fachada del edificio de la sede de la Universidad Piloto de Colombia en Girardot. En el momento la fachada existe como una construcción en bloque pañetado y grandes ventanales en vidrio, requiriendo el uso de sistemas activos de enfriamiento (aire acondicionado) para lograr condiciones mínimas de confort en su interior. Usando el modelo paramétrico anteriormente descrito, y guiados por los resultados de las evaluaciones realizadas, se generaron quince posibilidades de configuración, que fueron estudiadas en términos de su pertinencia y flexibilidad para correr simulaciones digitales de su desempeño como proveedoras de condiciones de confort al interior del edificio, siempre evitando el uso de sistemas activos. Los resultados fueron comparados con los de la configuración existente, demostrando significativas mejoras (figura 24).

## CONCLUSIONES

Este documento presentó un caso particular donde las definiciones paramétricas y simulaciones de desempeño se han utilizado como herramientas para el desarrollo de un proyecto de investigación que busca soluciones adecuadas para envolventes arquitectónicas en climas cálidos-húmedos. El trabajo implicó estudios bibliográficos previos y el desarrollo de un modelo

Figura 22.

Evaluaciones de comportamiento térmico para módulo de prueba en Girardot; en la imagen se observa el comportamiento cambiante durante el día 21 de julio para configuración de doble capa con paneles verdes exteriores y cerramiento superficial en ladrillo interior.

Los colores rojos representan las más altas temperaturas relativas, los azules las mínimas.

Es evidente el calentamiento de la superficie horizontal (cubierta) y los muros con incidencia solar directa (oriente y occidente), las simulaciones definieron cuáles sistemas implicaban menor transmisión térmica al interior del espacio.

PARÁMETROS GENERALES

Mallado uniforme

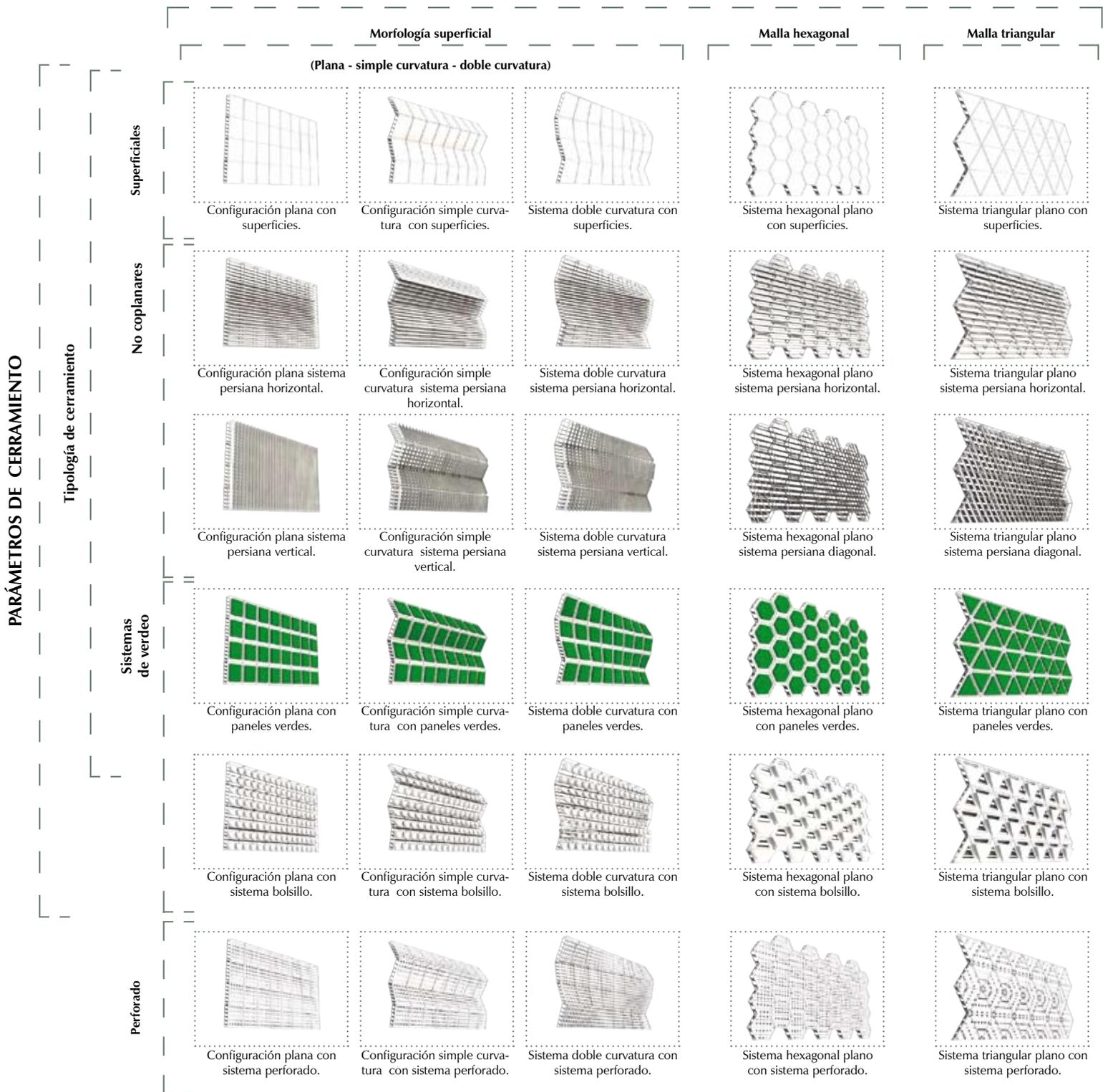
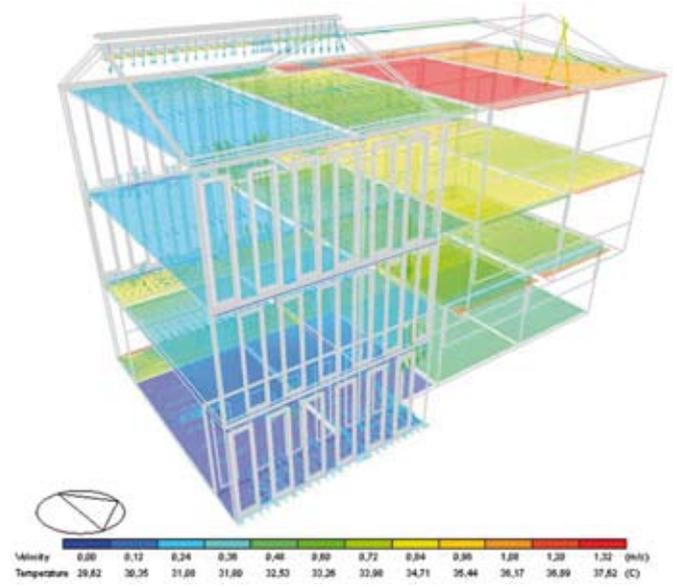


Figura 23. Configuraciones generadas de acuerdo con preevaluaciones para Girardot.

paramétrico que incluye la selección de parámetros de diseño directamente relacionados con datos geométricos, su traducción en categorías, la definición de instancias variables y sus rangos de valores. Los parámetros, las variables y los valores propuestos se basaron en revisiones de la literatura y en preevaluaciones de aspectos funcionales, tecnológicos y ambientales. En el proceso académico, la modelación digital tridimensional de proyectos arquitectónicos —llegando esta a la escala del detalle constructivo— demostró ser bastante útil como instrumento de conocimiento y análisis proyectual. Al mismo tiempo, el uso de herramientas de simulación generó nuevos cono-

cimientos y permitió la comprobación de supuestos basados en la literatura.

Como conclusiones específicas relativas al modelo paramétrico desarrollado podríamos decir que permite la generación de una gran variedad de configuraciones viables, evidenciando la utilidad de esta herramienta en el proceso de diseño. Por otro lado, las configuraciones generadas que fueron analizadas probaron superar a las tradicionales en su desempeño funcional, particularmente en términos de la provisión de confort al interior de los edificios cubiertos por ellas. Aun así, es claro que todavía existe un amplio margen para desarrollar la estructura y el modelo



propuesto para la generación y evaluación de los diseños realizados en el marco de la presente investigación, lo cual hace necesaria una segunda fase del proyecto donde se experimente un mayor número de posibilidades y se realicen prototipos físicos para confrontar resultados de simulaciones digitales con mediciones reales.

En términos generales, como aporte principal, el estudio presenta y valida una metodología que, entendida como parte de tantas propuestas similares del tipo “generación, evaluación, análisis” apoyadas en herramientas digitales, puede ayudar a la construcción de nuevos y más eficientes procesos de investigación y diseño en nuestro medio académico y profesional. El campo potencial para la aplicación de estas metodologías de diseño e investigación radica en la solución de problemas complejos pero con capacidad de ser descritos y evaluados por medio de estructuraciones de datos objetivos (información numérica), tales como problemas de configuraciones espacio-funcionales a nivel urbano, arquitectónico o técnico.

### CRÉDITOS Y AGRADECIMIENTOS

Las formulaciones aquí propuestas se desprenden del proyecto de investigación Eco-envolventes, soportado por los programas de Arquitectura, Ingeniería Civil y Administración y Gestión Ambiental de la Universidad Piloto de Colombia.

Este trabajo ha sido posible gracias a la asesoría técnica de la empresa Voxel S.A.S. bajo la dirección de Leonardo Velasco, distribuidores y entrenadores autorizados del software *Rhinoceros 3d* y Plug-ins asociados, actualmente en convenio interinstitucional con la Universidad Piloto de Colombia.

Figura 24.

Visualización y simulación de temperatura y fluido-dinámica de edificio de aulas en la Universidad Piloto sede Girardot.

La simulación muestra volumen en la parte izquierda con fachada propuesta (elementos modulares de cerámica y pared interior de ladrillo), y en la parte derecha con la fachada existente; la diferencia de temperaturas internas se aproxima a los 3 °C (en la imagen, 21 de julio a las 12 m).

### REFERENCIAS

- Hausladen, G. (2008). *Climate Skin: Building-skin Concepts that Can Do More with Less Energy*. Munich: Birkhäuser.
- Knaack, U. et al. (2007). *Facades, Principles of Construction*. Basel: Birkhauser.
- Velasco, R. (2011). Sobre el uso de herramientas digitales dentro de la formación profesional en arquitectura. *Alarife Revista de Arquitectura*, 1 (11), pp. 60-71.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. New York: Routledge.
- REFERENCIAS COMPLEMENTARIAS (APOYO A LA CONSTRUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN)
- Crawford, S. (2010). A breathing building skin. *Proceedings of the 30th annual conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture ACADIA*. New York, pp. 211-217.
- Gero (eds.). *CAAD Futures'07*, 237-250. Recuperado de Springer.
- Hensel, M. y Menges, A. (2006). *Morpho-ecologies*. London: Architectural Association.
- Herzog, T. et al. (2004). *Facade Construction Manual*. Basel: Birkhauser.
- Holzer, D., Hough, R. y Burry, M. (2007). Parametric Design and Structural Optimisation for Early Design Exploration. *International Journal of Architectural Computing*, 5 (4), 626-643.
- Knaack, U. et al. (2008). *The Future Envelope*. Amsterdam: IOS Press.
- Leighton, M. and Bader, S. (2010). Responsive shading - Intelligent façade systems. *Proceedings of the 30th annual conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture ACADIA*. New York, pp. 263-269.
- Menges, A. (2010). Material information: integrating material characteristics and behaviour in computational design for performative wood construction. *Proceedings of the 30th annual conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture ACADIA*. New York, pp. 151-157.
- Oxman, R. (2008). Performance-based Design: Current Practices and Research Issues. *International Journal of Architectural Computing*, 6 (1), 1-17.
- Schein, M. and Tessmann, O. (2008). Structural Analysis as Driver in Surface-Based Design Approaches. *International Journal of Architectural Computing*, 6 (1), 19-39.
- Schittich, C. (ed.) (2006). *Building Skins*. Munich: Birkhauser.
- Schnabel, M. A. (2007). *Parametric Designing in Architecture*. A. Dong, A. van de Moere.