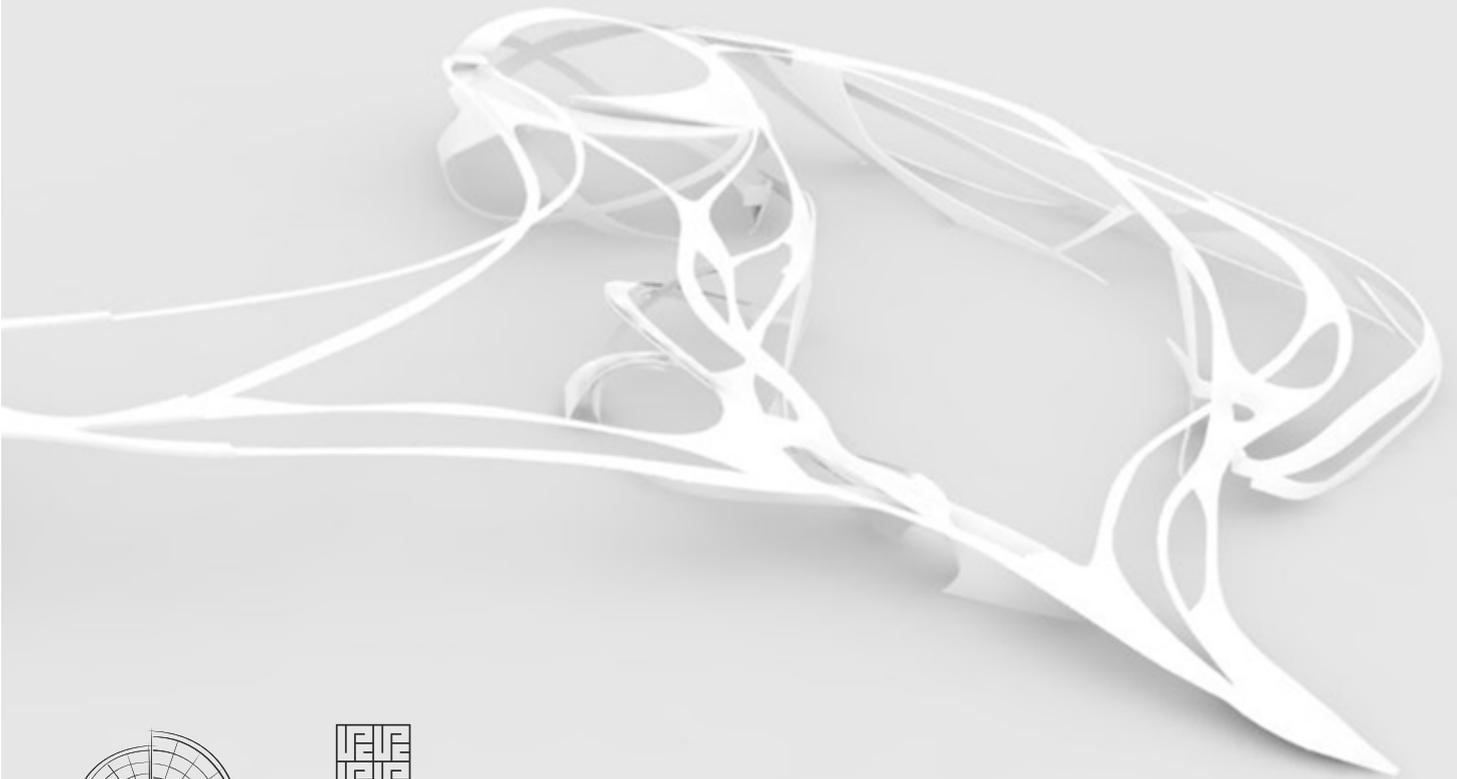


# Diseño *Digital*

USO INTERACTIVO E INTEGRADO DE LAS *HERRAMIENTAS DIGITALES* EN LA ARQUITECTURA

*Rodrigo Velasco Gómez*  
*Diego Chavarro Ayala*  
*Aaron Paul Brakke*



# Diseño *Digital*

USO INTERACTIVO E INTEGRADO DE LAS *HERRAMIENTAS DIGITALES* EN LA ARQUITECTURA

 *Rodrigo Velasco Gómez*  
*Diego Chavarro Ayala*  
*Aaron Paul Brakke*



José María Cifuentes Páez

**Presidente**

Patricia Piedrahíta Castillo

**Rectora**

Patricia Farfán Sopó

**Decana Administrativa Programa de Arquitectura**

Edgar José Camacho Camacho

**Decano Facultad de Arquitectura y Artes**

Rodrigo Lobo-Guerrero Sarmiento

**Director de Publicaciones y Comunicación Gráfica**

Diego Ramírez Bernal

**Coord. General de Publicaciones**

Gabriel Acero Rincón

**Coord. de Publicaciones Programa de Arquitectura**

**Diseño digital:**

**Uso de las herramientas digitales en la arquitectura**

Universidad Piloto de Colombia

**ISBN: 978-958-8957-32-6**

**Noviembre, 2015**

**Autores**

Rodrigo Velasco Gómez, Diego Chavarro Ayala

Aaron Paul Brakke

**Diseño de portada y diagramación editorial**

Daniela Sánchez Hernández, Diseñadora gráfica

Coordinación de publicaciones Programa de Arquitectura,

Universidad Piloto de Colombia

La obra literaria publicada expresa exclusivamente la opinión de sus respectivos autores, de manera que no representan el pensamiento de la Universidad Piloto de Colombia. Cada uno de los autores, suscribió con la Universidad una autorización o contrato de cesión de derechos y una carta de originalidad sobre su aporte, por tanto, los autores asumen la responsabilidad sobre el contenido de esta publicación.

**FICHA CATALOGRÁFICA:**

Velasco Gómez, Rodrigo

Diseño digital: uso interactivo e integrado de las herramientas digitales en la arquitectura / Rodrigo Velasco Gómez, Diego Chavarro Ayala, Aaron Paul Brakke.—Bogotá : Universidad Piloto de Colombia, 2015. 1101 páginas : ilustraciones, planos.

**ISBN: 978-958-8957-32-6**

1. Diseño arquitectónico- Procesamiento de datos
2. Diseño con ayuda de computador
3. Arquitectura- Innovaciones tecnológicas. I. Chavarro Ayala, Diego II. Brakke, Aaron Paul. CDD 721.0285



# Autores

## ***Aaron Paul Brakke,***

Arquitecto y diseñador de Los Estados Unidos, es fundador y gerente de Whiteknee y Directrix Architecture S.A.S.. Estudió arquitectura en Ball State University donde se graduó con el M. Arch II. Actualmente está cursando en el programa doctoral del European Graduate School. Vivió en Arcosanti, el proyecto utópico del visionario Paolo Soleri y estudió arquitectura sostenible en el Ecosa Institute. Ha trabajado con varias firmas de arquitectura vanguardistas en Nueva York como; Joseph Giovannini y Winka Dubbedam - Archi-tectonics. Actualmente trabaja y vive en la ciudad de Bogotá, Colombia. Está vinculado con la Universidad Piloto de Colombia como docente, investigador y director del Centro de Innovación/FabLAB. Su énfasis tanto en la práctica como en la investigación es en la manera como se están transformando los procesos de diseño, visualización y fabricación con las herramientas digitales. Los avances de este trabajo han sido publicados y presentados en varios países de Sur América, Norte América y Europa.

## ***Rodrigo Velasco,***

Arq. M.Eng.. Jefe del Laboratorio de Tecnología, UPC Cuenta con más de diez años de experiencia en el uso de nuevas tecnologías en construcción, su recorrido profesional incluye trabajos de investigación en las universidades de Nottingham en el Reino Unido, Hong-Kong, OWL en Alemania y Nacional de Colombia, labores de docencia en otras universidades, y varias publicaciones a nivel internacional. Actualmente y de manera paralela a su trabajo como docente investigador y Jefe del Laboratorio de Tecnología en la Universidad Piloto de Colombia, es gerente en FRONTIS3D ([www.frontis3d.co](http://www.frontis3d.co)).

## ***Diego Chavarro,***

Arquitecto de la Universidad de los Andes. Master in Science in Advanced Architectural Design, Pratt Institute NY. Certificación Leed Ap. Ha colaborado en diferentes estudios en New York entre los que se encuentran Work AC, Situ Studio y Andrew MacNair entre otros. Ha sido profesor en las facultades de Arquitectura de Pratt Institute, Universidad Javeriana y Universidad Piloto. Ha participado como jurado de proyectos finales en Columbia University y Parsons School of Design. Actualmente es director de proyectos de grado en la Universidad Piloto, así como investigador enfocado en el uso de herramientas digitales para la optimización de procesos arquitectónicos.

# Prólogo

***(Brakke, Chavarro, Velasco)***

Esta cartilla forma parte de los productos del año 2013 del proyecto de investigación Herramientas Digitales - Realidad Aumentada, en la Universidad Piloto de Colombia, el cual tiene como principal propósito divulgar el uso de herramientas digitales dentro de los procesos y metodologías de diseño.

El interés por utilizar la computación como instrumento de diseño se ha vuelto cada vez más evidente dentro de la práctica arquitectónica. Si bien en un principio se pensó en estas tecnologías como herramientas para lograr que los procesos tradicionales de diseño fueran más eficientes, ahora se reconoce, además, que la computación permite un nuevo enfoque en los procesos de diseño.

En la Universidad Piloto de Colombia, la iniciativa de involucrar la computación dentro de la arquitectura se ha venido gestando en la última década. En la facultad de arquitectura, profesores con diferentes especialidades han coincidido en la importancia de investigar en el medio académico con el apoyo de las nuevas tecnologías, concluyendo que la computación permite ejercer procesos iterativos de análisis y diseño que ayudan a que las formas arquitectónicas evolucionen hasta tener niveles de desempeño considerablemente más altos comparados con resultados tradicionales. Los casos de estudio que se expondrán a continuación son producto de estas experimentaciones, que se han venido realizando durante los últimos años en los salones de clase de la universidad.

# Introducción

**(Brakke, Chavarro, Velasco)**

Desde principios de los años sesenta del siglo xx, antes de la popularización del uso de herramientas digitales en arquitectura, ha habido un gran interés por parte de diseñadores y arquitectos por teorizar las metodologías de diseño desde una perspectiva del procesamiento racional de datos. Por ejemplo, John Christopher Jones, pionero en la teorización de metodologías de diseño, enfocó su trabajo en el desarrollo de una metodología que incorporara la racionalidad y la intuición durante el procesamiento de datos, elementos que de alguna manera se excluían uno al otro, antes de su propuesta (Jones,1970). En los cuarenta años que han pasado desde el planteamiento de estas metodologías, la complejidad del diseño arquitectónico ha aumentado, nuevas variables de sostenibilidad, materialidad, estructura o fabricación, entre otras, se han establecido con gran importancia en la práctica arquitectónica.

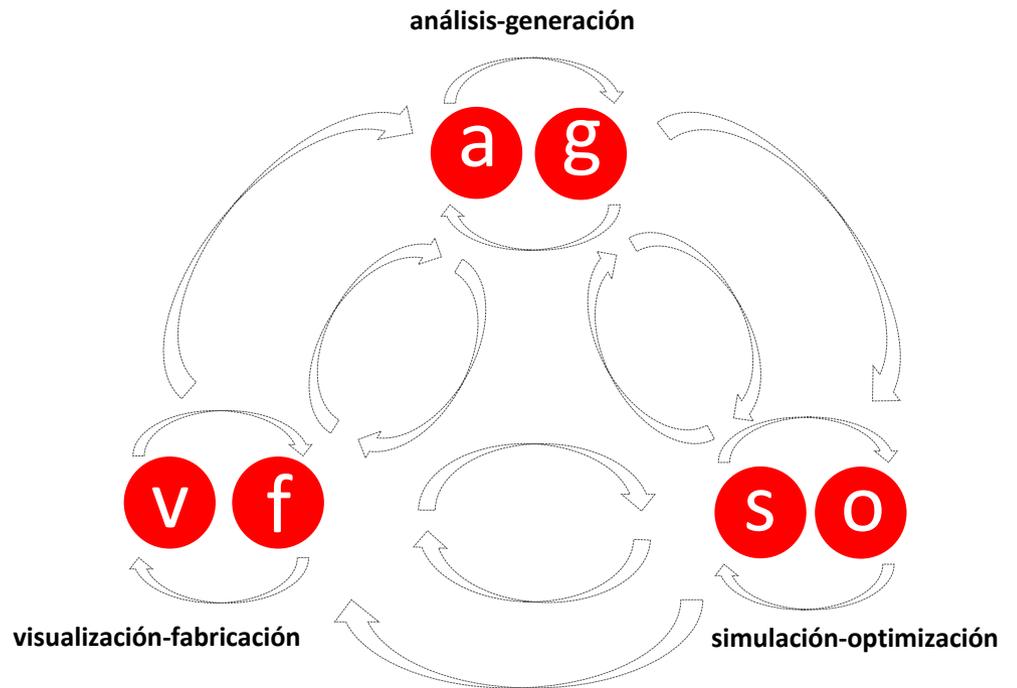
El aumento de variables y nuevas tecnologías hace indispensable que se desarrollen metodologías que tengan la capacidad de procesar la complejidad del diseño contemporáneo. Paralelamente a estas teorizaciones sobre metodologías de diseño, la computación, como una herramienta eficaz para el procesamiento de datos, ha tenido un desarrollo revolucionario. Esto explica cómo en las últimas décadas ha habido un esfuerzo por teorizar estas herramientas para su uso dentro del proceso de diseño en la arquitectura.

Si bien en un principio el uso de computación fue limitado a la eficacia de los procesos tradicionales de diseño, la investigación académica ha llevado a entender la computación como plataforma que permite el desarrollo de nuevos procesos y metodologías, que reconocen el procesamiento de un mayor número de variables y por lo tanto, permiten el desarrollo de diseños de mejor desempeño.

En la Universidad Piloto de Colombia, en simultáneo con prácticas académicas que se están dando en otros lugares del mundo, se ha venido explorando sobre los usos de la computación en el diseño arquitectónico desde diferentes perspectivas. Al emplear estas tecnologías durante la última década en la Universidad, hemos observado el surgimiento de un proceso de diseño iterativo donde se diferencian claramente tres etapas bipartitas: análisis - generación, simulación - optimización y visualización - fabricación.

Si bien estos procesos no son nuevos, es interesante la conformación espontánea de dichos tres grupos, los cuales se han evidenciado en los procesos de diseño de la gran mayoría de proyectos donde se implementan herramientas digitales de manera significativa. En esta cartilla proponemos la asociación de estos tres procesos como una particular metodología de diseño que, haciendo uso del potencial de análisis de múltiples posibilidades que permite la computación, puede conducir a resultados de diseño con niveles de desempeño y creatividad más altos que los comúnmente producidos mediante procesos análogos.

**Fig. 0** Diagrama del proceso iterativo propuesto. (Gráfico y concepto: Rodrigo Velasco)



La primera etapa bipartita dentro de nuestra metodología corresponde al análisis y generación. Tradicionalmente, el método analítico ha sido usado en los procesos de diseño arquitectónico, y consiste en descomponer un problema en múltiples partes con el fin de obtener un mejor entendimiento de este. Cuando utilizamos la computación como herramienta de diseño, el análisis y la generación son fusionados dentro del mismo proceso, de tal manera que las variables que decidimos incluir en nuestros análisis, de acuerdo a la manera en que las relacionemos con procesos de generación tridimensional (incluyendo diversos grados de complejidad), pueden llegar a generar automáticamente respuestas de diseño. De esa manera, la computación nos abre un mundo virtual en donde podemos explorar una infinidad de variables y determinantes que crean diferentes realidades arquitectónicas. Los resultados de estas

exploraciones son evaluados, por un lado, por la perspectiva de visualización y fabricación, y por otro, son optimizados con determinantes tales como las estructurales y ambientales, en el proceso de simulación y optimización. La repetición iterativa de estos procesos, para cada determinante que como diseñadores decidimos incluir en el proyecto, configura la metodología de diseño que estamos proponiendo. Nuestra intención, al proponer la metodología que repite tres procesos de manera iterativa, es la de, con fundamento en las posibilidades que descubrimos en el mundo virtual y su optimización, obtener un mejor desempeño en el diseño arquitectónico.

A través de los procesos simulación - optimización y visualización - fabricación no solo se pueden optimizar propósitos específicos surgidos del proceso de análisis y generación hasta llegar a unos resultados del mejor desempeño, sino que se examinan con diferentes perspectivas y a diferentes escalas varias de las posibilidades del proyecto, aportando creativamente nuevas determinantes. Los resultados que se generan en cada uno de estos procesos, son revisados posteriormente por los otros dos procesos, lo cual se repite de manera iterativa hasta lograr resultados que se consideren aceptables por el diseñador. Esta metodología iterativa de los tres ciclos bipartitos de diseño, ayudada por la capacidad de la computación para procesar grandes cantidades de datos en poco tiempo, puede optimizar las posibilidades arquitectónicas que nos arroja el mundo virtual de la computación, y también permite incrementar la cantidad y complejidad de las determinantes que intervienen en un proyecto, incrementando de la misma manera la exploración y creatividad de la disciplina.

# Capítulo 2

## ANÁLISIS Y GENERACIÓN

*Diego Chavarro*

El primer paso de la metodología de diseño propuesta en esta cartilla es el de análisis y generación. Este está enfocado a la exploración y al descubrimiento de nuevas formas y posibilidades arquitectónicas en un mundo virtual, creado con la ayuda del computador. El proceso parte de descomponer un problema arquitectónico en múltiples determinantes (análisis) para, por medio de la computación, explorar y descubrir las posibilidades que generan las respuestas a estas determinantes en el mundo virtual.

## 2.1 ANÁLISIS

El análisis es un método de investigación que consiste en descomponer un objeto de estudio en múltiples partes con el propósito de obtener un mejor entendimiento de este a partir del estudio de sus partes. El arquitecto, durante el proceso de diseño, resuelve determinantes de diseño con la ayuda del método analítico que le permite establecer un diagnóstico de problemas y posibilidades arquitectónicas. Así, para el diseño de un proyecto se desarrolla una primera fase de observación del lugar de donde se extraen unas determinantes que afectan al proyecto, las cuales, a su vez, informan las estrategias de diseño. La utilización de la computación dentro de este proceso propicia la oportunidad de integrar una gran magnitud de variables dentro de una misma plataforma, manipular sus intensidades y evaluar los resultados de una manera más eficiente. Si bien desde los primeros semestres de la carrera, en los talleres de tecnología, diseño y urbanismo se les enseña a los estudiantes el uso de herramientas de análisis (normativa, ambiental, urbana, regional, etc.), los datos y observaciones que estos arrojan no se integran suficientemente al proceso de diseño.

Nuestro propósito al introducir la computación en el proceso de diseño consiste no solamente en incrementar la cantidad de determinantes, sino también en establecer una plataforma en donde el diseño emerge a partir de procesos iterativos de análisis. De esta manera, análisis y diseño son fusionados como una misma acción y cualquier cambio en intensidades de alguna variable, produce inmediatamente cambios en el diseño.

La computación nos abre un mundo virtual en donde podemos explorar el performance o desempeño de nuestros diseños con respecto a las variables e intensidades que decidamos incluir en estos. Al incrementar el número de variables y explorar las diferentes posibilidades de un proyecto, no solo estamos desarrollando respuestas arquitectónicas más inteligentes, sino también situando el diseño arquitectónico como una práctica investigativa con un infinito mundo virtual de posibilidades por explorar.

## 2.2 GENERACIÓN

En los últimos años, la Universidad Piloto de Colombia ha utilizado como fuente de inspiración sistemas generativos naturales para el desarrollo de sus proyectos y clases. En vez de entender los procesos de diseño como procesos lineales, se busca entender cuáles son los principios básicos y reglas evolutivas que rigen estos sistemas, que generan organizaciones de gran complejidad, eficiencia y belleza.

El tratar de entender y desarrollar modelos computacionales que simulen casos particulares de comportamientos, ha servido conceptualmente para aplicar este tipo de procesos a la creación arquitectónica con base en sistemas evolutivos. Y el hacernos preguntas como las que Gary William Flake se hace en su libro *The Computational Beauty of Nature*, nos ayudan a establecer nuevas relaciones con la naturaleza, que antes no habían sido desarrolladas:

[inicio de cita] ¿Por qué encontramos estructuras auto-similares en la biología, tales como árboles, hojas de helechos o ramas? ¿Cómo esto está relacionado con las estructuras auto-similares encontradas en objetos inanimados como cristales de nieve, montañas o nubes? ¿Hay alguna manera de generalizar la noción de auto-similitud para dar cuenta de estos dos tipos de fenómeno?

¿Existe alguna razón en común, del porqué es difícil predecir el mercado de valores y el clima? ¿La imprevisibilidad se origina a causa del conocimiento limitado o está de alguna manera implícito dentro del sistema?

¿Cómo diferentes colectivos como las colonias de hormigas, el cerebro humano y bolsas de valores se auto-organizan para crear unos sistemas con comportamientos de enormes complejidades, con mucha más riqueza que el comportamiento de componentes individuales?

¿Cuáles son las relaciones entre evolución, aprendizaje y adaptación, encontradas en sistemas sociales? ¿La adaptación es exclusiva de sistemas biológicos? ¿Cuál es la relación de un sistema adaptable y el medio ambiente? Flake (1998) p 3 (traducción del autor). [fin de cita]

Hasta ahora, la manera de relacionarnos con la naturaleza se ha materializado en imitaciones metafóricas de formas naturales o en tratar de establecer relaciones armoniosas con la naturaleza, pretendiendo tener un entendimiento total de lo “natural”.

En contraste, el interés de este grupo de investigación, no se encuentra en las formas que se presentan en la naturaleza o en establecer relaciones armoniosas con la idea que tenemos de lo “natural”, sino en los procesos evolutivos por los cuales se llega a dichas formas, territorios y ecologías. En nuestra investigación utilizamos el mundo virtual que provee la computación como plataforma de diseño. Un mundo donde determinantes sociales y naturales interactúan y transforman nuestros diseños a partir de procesos iterativos de análisis.

El papel del diseñador enfatiza el componente investigativo de su actividad, en donde a través de la computación explora diferentes posibilidades de interacción del objeto arquitectónico, con variables sociales y naturales, para desarrollar solo los objetos de mejor desempeño.

Así lo propone Manuel de Landa en su artículo “Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture”, refiriéndose al papel que ahora tienen los diseñadores en el mundo de la computación:

[inicio de cita] [...] él o ella, proponen el uso de la evolución virtual como una herramienta de diseño, donde la única función que debe desarrollar el ser humano, es la de curador de la aptitud estética en cada generación (es decir, que los edificios que no se ven estéticamente prometedores mueran y los que sí, vivan y se reproduzcan)... El papel del diseñador se ha convertido en el equivalente de un criador de perros o un criador de caballos. (DeLanda, 2002). “Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture” AD 72 Ali Rahim (Eds.), Contemporary techniques in Architecture. p 11 (traducción del autor). [fin de cita]

En efecto, De Landa afirma el uso del algoritmo genético como principal herramienta de diseño. Este, simulando la evolución biológica, nos permite realizar procesos de análisis iterativos para solucionar problemas arquitectónicos.

Para efectos de las reflexiones que se proponen en esta cartilla, la generación formal computacional será presentada conforme a los desarrollos teóricos de las últimas décadas que la dividen en dos tipos: morfo-genética y morfo-dinámica. Si bien se podría argumentar

que cualquier simulación computacional está hecha a partir de algoritmos y que, por lo tanto, solo existiría un tipo de generación, la morfo-genética, encontramos adecuado dividirla en dos tipos, tal como lo hace Chu, quien sostiene que “dentro del panorama arquitectónico contemporáneo, hay dos tendencias con diferentes motivaciones teóricas: la morfo-dinámica y la morfo-genética para el diseño y construcción de edificios” (Chu, 2006) *Metaphysics of Genetic Architecture and Computation*. AD, 76 (4). Mike Silver. (Eds.), *Programming cultures: Art and Architecture in the age of software*. p. 42. (Traducción del autor).

## A. MORFO-GENÉTICA

Entendemos como morfo-genética el proceso de desarrollo formal computacional que se realiza a través de eventos iterativos de reacción de reglas internas de un objeto, frente a un contexto. Esta metodología se inspira en los procesos de evolución natural, y podría decirse que tiene sus raíces en 1917, cuando D.Arcy Thompson publicó su libro *On Growth and Form*, en el cual explicó la gran variedad de formas encontradas en la naturaleza, a través de la geometría analítica y la evolución de las formas. Esta idea fue tomada por Steven Wolfram, quien con ayuda de la computación desarrolló una investigación en celular autómatas que consiste en una grilla vacía que se va llenando a través de una serie de pasos iterativos en el tiempo, por medio de unas reglas de reacción a los estados de las células vecinas. Explorando la celular autómatas, Steven Wolfram descubrió patrones de gran complejidad similares a los encontrados en la naturaleza, los cuales fueron desarrollados a partir de procesos evolutivos que seguían simples reglas (Wolfram, 2002). Esta investigación lo llevó a concluir que la diversidad encontrada en la naturaleza era producto de la reacción de simples reglas “genéticas” a un contexto. Para ponerlo en sus palabras citamos este párrafo de su libro *A New Kind of Science*:

[inicio de cita] Cuando el diseñador usa reglas, que corresponden a programas simples, en vez de, por ejemplo, ecuaciones matemáticas tradicionales, es muy común encontrar que estas reglas producen muy diferentes -usualmente bastantes complejos- patrones de comportamiento. Y es este fenómeno básico, el cual creo, es el responsable de la gran diversidad y complejidad de las formas de las plantas y animales. (Wolfram, 2002) *A new Kind of Science*. P 422. [fin de cita]

Este principio evolutivo de programas simples que responden a un contexto ha sido incorporado dentro de la arquitectura como una nueva metodología de diseño (Button-up) que entiende el proyecto desde las partes individuales que se relacionan entre sí y responden a parámetros establecidos por un contexto, hasta que el proyecto emerge de una forma inteligente. Contrasta con la metodología tradicional, en donde el arquitecto parte de una visión global de un proyecto y posteriormente va refinando los detalles más pequeños (Top-down).

## B. MORFO-DINÁMICA

Entendemos como morfo-dinámica el proceso de desarrollo formal computacional que se realiza a través de la interacción y adaptación de la forma con las fuerzas externas de las determinantes que afectan el proyecto. Greg Lynn (1999), pionero en teorizar la morfo-dinámica en la arquitectura, lo explica en su libro *Animated form* en los siguientes términos: “Animación, implica la evolución de la forma y las fuerzas que la definieron” (p. 9. Traducción del autor).

Lynn defiende la necesidad de cambiar la disciplina de la arquitectura de un paradigma rígido y estático a uno flexible y fluido. El autor desarrolla esta idea explicando cómo en otras disciplinas las formas se desarrollan a partir de una interacción con fuerzas externas al objeto, como por ejemplo en el diseño naval, en donde los flujos y corrientes del agua, a los cuales el barco estará expuesto, son los generadores formales del casco del barco. Otro ejemplo utilizado por Lynn es el de la forma de las montañas, la cual depende de una interacción y adaptación con los flujos de viento que la erosionan.

Estos ejemplos tienen como objeto entender la forma arquitectónica como un proceso evolutivo a partir de eventos iterativos de interacción entre el objeto y las determinantes externas a este, de los cuales emerge el proyecto arquitectónico.

## 2.2.1 TIPOS, PROCESOS Y HERRAMIENTAS

En este documento incorporamos una categorización de los instrumentos que se han venido utilizando con mayor frecuencia en el campo de la arquitectura. Entre las opciones disponibles se encuentran desde las plataformas pre-programadas, más intuitivas pero menos flexibles, hasta las que requieren de un conocimiento en programación computacional, menos intuitivas pero que permiten mayor flexibilidad, ya que en estas el diseñador crea sus propios algoritmos.

A partir de la oferta de plataformas existente, las categorizamos en: a) plataformas pre-programadas, b) plataformas de programación gráfica y c) plataformas de programación.

## A. PLATAFORMAS PRE-PROGRAMADAS

Son plataformas cuya utilización no requiere conocimientos de programación, por lo tanto, son más intuitivas para los diseñadores. Sin embargo, limitan la experimentación, toda vez que el diseñador está restringido al algoritmo propio del software.

Los softwares desarrollados por la industria de la animación digital tales como Autodesk Maya, 3D Max y Real Flow han gozado de gran popularidad en el campo del diseño y han permitido a los arquitectos desarrollar experimentos en la generación de objetos arquitectónicos. Por ejemplo, a través de la base teórica de la mutación biológica o la topología, los arquitectos han buscado que el objeto arquitectónico se transforme gradualmente a partir de influencias externas. De la misma manera se han simulado flujos peatonales y se utilizan las trayectorias que los agentes dejan al esquivar objetos o reaccionar a una fuerza atractora para generar la forma arquitectónica.

- *Maya:* <http://www.autodesk.com/products/autodesk-maya/overview>
- *3D Max:* <http://www.autodesk.com/products/autodesk-3ds-max/overview>
- *Real Flow 4:* <http://www.realflow.com/>

## B. PLATAFORMAS DE PROGRAMACIÓN GRÁFICA

Las plataformas de programación gráfica ofrecen al diseñador la posibilidad de crear algoritmos usando una interface gráfica, es decir, el diseñador construye sus programas a partir de la conexión de componentes pre-programados. Por lo general, estas plataformas se desarrollan dentro de paquetes de software en 3D, de manera que permiten visualizar el desarrollo de los programas a medida que se van creando.

Los software que nos facilitan esta aproximación de diseño y que gozan de mayor popularidad dentro del campo del diseño son Grasshopper, Dynamo, y Generative Components.

Grasshopper es un editor gráfico de algoritmos desarrollado por David Rutten en Robert McNeel & Associates. Grasshopper es un plug-in que trabaja bajo la plataforma de Rhinoceros. El diseñador crea programas a partir de la conexión de componentes que se encuentran dentro de Grasshopper (DLL's-Dynamic Linked Library).

Dynamo es un editor gráfico de algoritmos desarrollado por Autodesk para Vasari y Revit. Además de contar con el control geométrico brindado por las plataformas de Vasari o Revit, el diseñador tiene la capacidad de manipular data y crear diferentes estructuras de relación en una interface similar a la de Grasshopper.

Generative Components es un editor gráfico de algoritmos desarrollado por Bentley. A diferencia de las anteriores plataformas, trabaja como una plataforma de programación gráfica independiente y no necesita un paquete de software 3D para su funcionamiento ni trabaja exclusivamente con librerías pre-programadas de componentes, sino que permite al diseñador editar y crear sus propios componentes.

- *Grasshopper: <http://www.grasshopper3d.com/>*
- *Dynamo: <http://dynamobim.org/download/>*
- *Generativecomponents:*
- *<http://www.bentley.com/en-US/Promo/Generative%20Components/default.htm>*

## C. PLATAFORMAS DE PROGRAMACIÓN

Existe una gran cantidad de lenguajes de programación, tales como Java, Python, C++, etc., con los cuales se puede desarrollar cualquier programa computacional; sin embargo, es necesario ser un experto en alguno de estos lenguajes para poder desarrollar algoritmos que puedan ser útiles para el proceso de diseño. Por esta razón se han desarrollado plataformas que facilitan la creación de algoritmos para diseñadores, como por ejemplo Processing, una plataforma de programación computacional *open-source*, basada en el lenguaje de programación Java, la cual está integrada a un entorno visual. Esta plataforma fue desarrollada por Casey Reas y Benjamin Fry, ambos graduados del MIT - Media Lab, del grupo Aesthetics and Computation. Esta plataforma de programación se diferencia de las demás en que se obtiene una respuesta visual instantánea de lo que se está programando, lo cual es de gran ayuda para diseñadores y artistas visuales.

Los paquetes de software 3D que utilizamos (3D Max, Maya, Rhino, etc.) cuentan con editores de programación que permiten desarrollar y editar programas computacionales, pero no disponen de ninguna facilidad especial para que el diseñador los pueda utilizar.

## 2.3 CASOS DE ESTUDIO

En esta sección mostraremos cuatro trabajos realizados por los estudiantes que desarrollaron su proyecto de grado durante el año 2013 en la Universidad Piloto de Colombia con el profesor Diego Chavarro Ayala. Estos proyectos estuvieron planteados con la finalidad de entender e investigar el potencial de los sistemas computacionales evolutivos como herramienta de diseño en el contexto de nuestro país.

Dichos sistemas se caracterizan por que, en su primera etapa, se inspiraron en procesos evolutivos naturales para después desarrollar algoritmos que simulasen estos procesos y aplicarlos como herramienta de diseño para la solución de problemas arquitectónicos.

Los algoritmos computacionales permiten realizar, por parte del diseñador, múltiples cambios en variables e intensidades de las determinantes arquitectónicas que afectan un proyecto, y comparar los resultados.

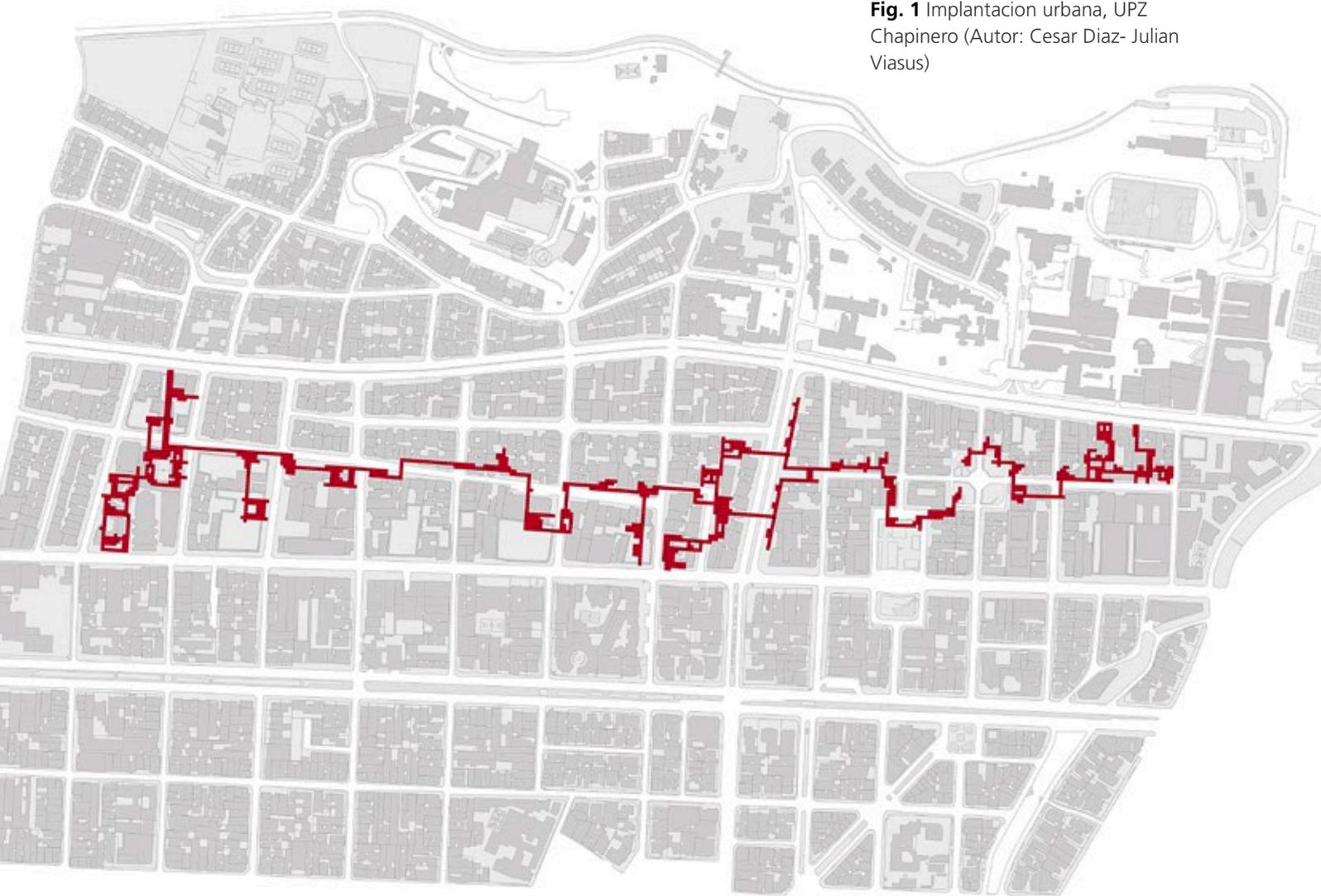
El trabajo del estudiante, tras diseñar su propio algoritmo, se enfocó en la selección del mejor resultado que emergiera de estos procesos, para luego ponerlo a responder a otras determinantes del proyecto, las cuales, a su vez, serán respondidas por este mismo algoritmo o por otro que el diseñador cree, lo cual se repite iterativamente hasta que la solución a la que se llegue responda al mayor número de variables (estéticas, ambientales, normativas, etc.) y sea la más inteligente.

## MORFO-GENÉTICA [MG]

En esta sección mostraremos dos proyectos ubicados en la ciudad de Bogotá. El primero es una propuesta de espacio público en altura como eje conector entre las universidades del sector de Chapinero. Y el segundo, es un proyecto de espacio público en la estación central de Transmilenio, sobre la Avenida Carracas con Calle 26.

[MG-1.]  
**PARASITEARCH**

*Diaz, Viasus, bajo la dirección de Chavarro*



**Fig. 1** Implantación urbana, UPZ Chapinero (Autor: Cesar Diaz- Julian Viasus)



**Fig. 2** Perspectiva Universidad Piloto  
(Autor: César Díaz- Julián Viasus)

El primer proyecto es titulado Parasitearch, sistema de espacio público alternativo en el entorno urbano de Bogotá. Fue realizado por los estudiantes Julián Felipe Viasús y Cesar Mario Díaz Murgas, quienes, tras haber realizado un análisis del espacio público en el sector de Chapinero, diagnosticaron la insuficiencia de espacio público con respecto a la población del sector.

La concentración de un uso educativo, principalmente de universidades, aporta una gran cantidad de población flotante al sector que colapsa el espacio público



**Fig. 3** Perspectiva Carrera 13 calle 45  
(Autor: Cesar Diaz- Julian Viasus)

**Fig. 4** Perspectiva Calle 45  
(Autor: Cesar Diaz- Julian Viasus)



existente. Los estudiantes proponen un eje de espacio público en altura, que conecte todas las universidades del sector aprovechando el espacio disponible entre los edificios existentes y la máxima altura permitida en cada lote por la normativa del lugar. Los estudiantes crearon un algoritmo que despliega una serie de módulos en estos espacios que no se han desarrollado. A través de un proceso iterativo que evalúa las determinantes arquitectónicas que le permiten al proyecto funcionar, tales como flujos de circulación, variables ambientales, fabricación de los módulos etc., emerge la propuesta. De esa manera, cada una de dichas variables propone o suprime opciones de configuración de módulos, espacios, flujos de circulación, etc., permitiendo llegar a las soluciones con mejor desempeño.

La aplicación de este algoritmo, dentro del sector de Chapinero, permitió crear un eje de espacio público en altura que a través de la implementación de espacios comunales, tales como gimnasios, parques, teatros, complementa y conecta a las universidades del sector.



**Fig. 5A** Catálogo "Swarm Behavior"  
(Autor: Ivanna Díaz)

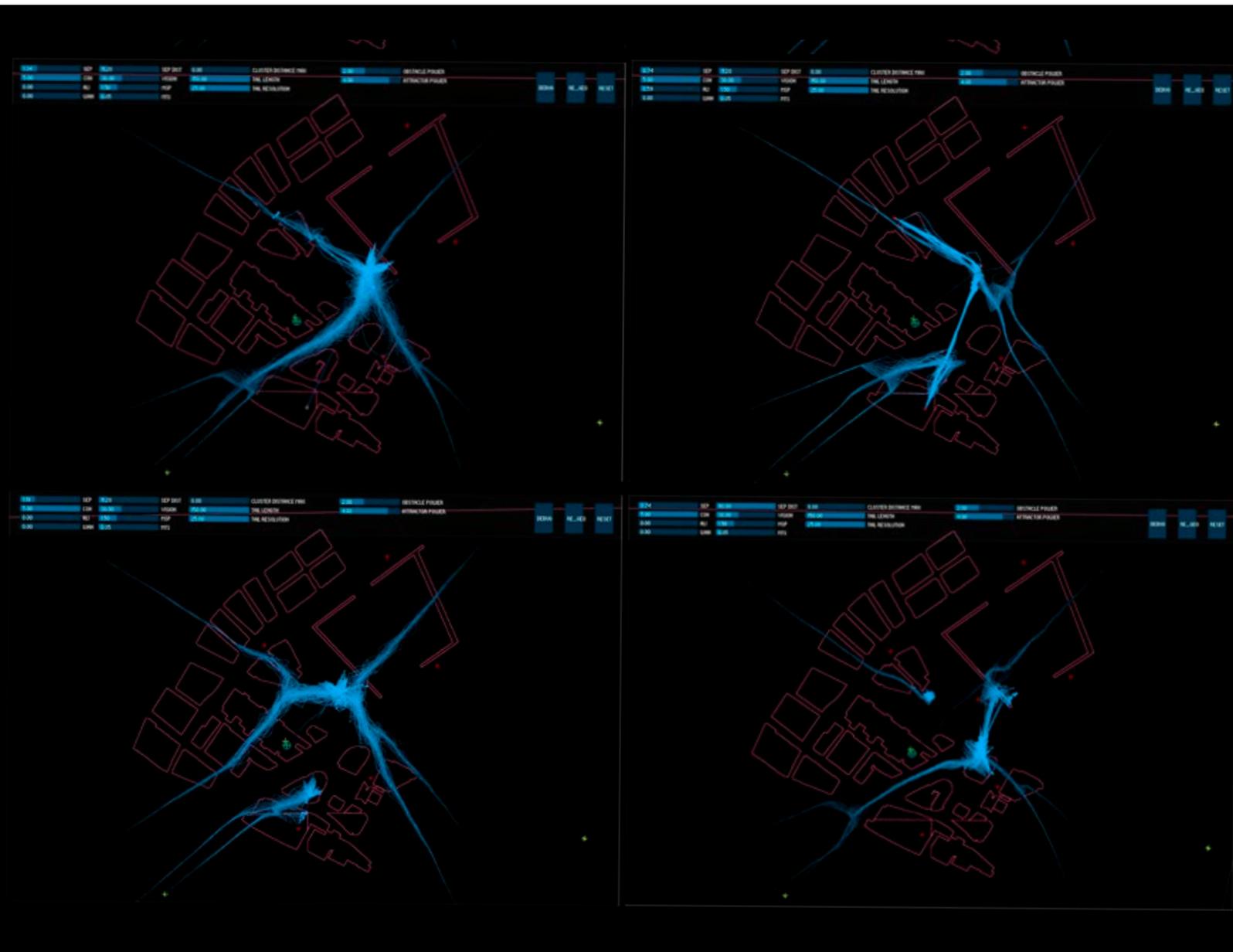
## [MG-2.]

### INTELIGENCIA DE ENJAMBRE / REVITALIZACIÓN DE ESPACIO PÚBLICO

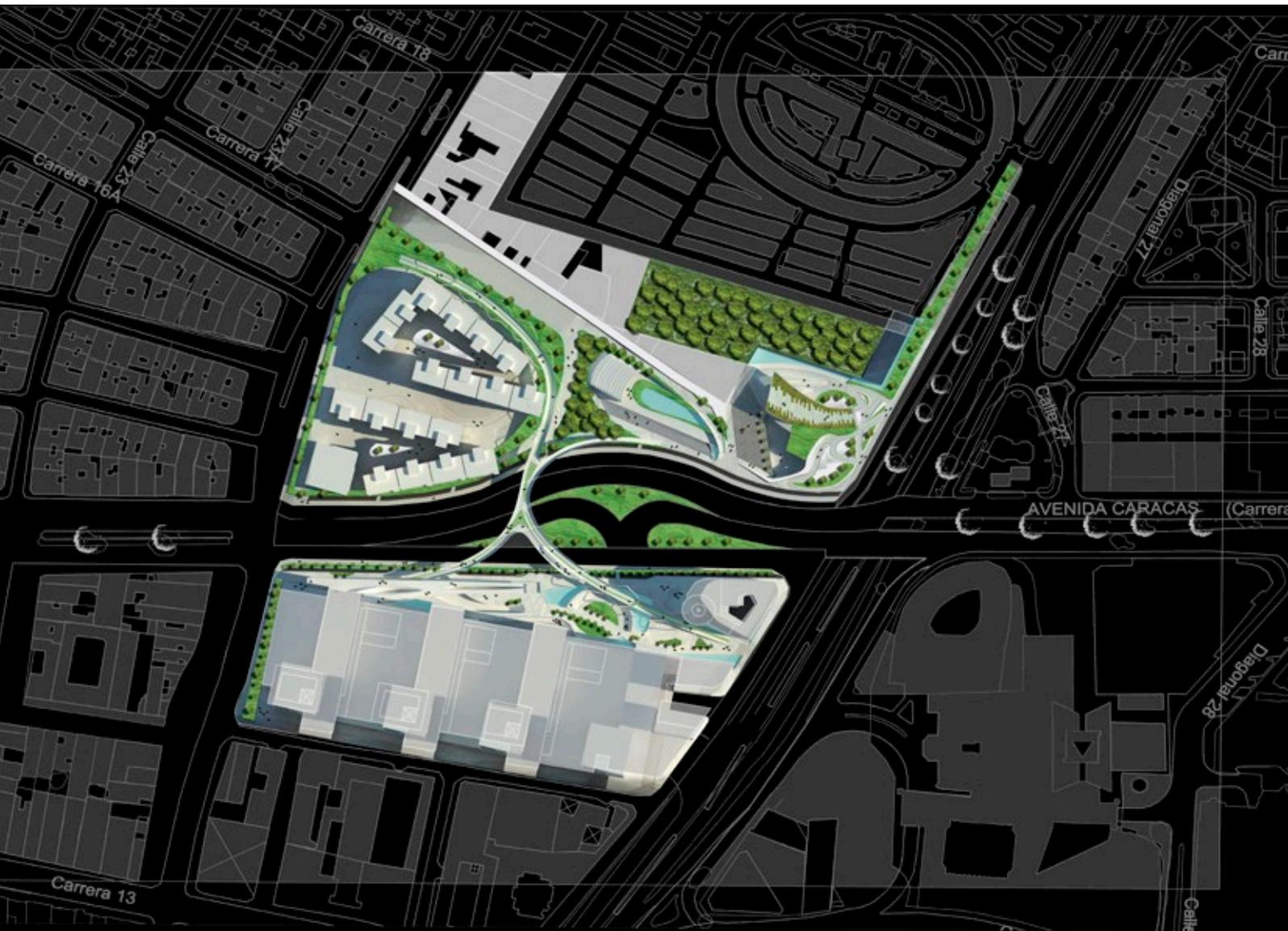
*Díaz bajo la dirección de Chavarro.*

Este proyecto fue realizado por la estudiante Ivanna Díaz, quien tomó los espacios públicos resultantes de la intervención de la estación central de Transmilenio en la Avenida Carracas con Calle 26, como su área de intervención. La estudiante creó un algoritmo que simula el comportamiento de enjambre, un comportamiento natural observado en diferentes poblaciones de animales, tales como los bancos de sardinas,

o las bandadas de pájaros. Este algoritmo poblaba de puntos el sector, agentes que se desplazan, evitan obstáculos, y responden a atractores que la estudiante ponía en el sector. Las trayectorias que los agentes dejaban al evitar obstáculos o al ir detrás de un elemento atractor, eran usadas para el diseño de diferentes elementos de espacio público tales como anfiteatros, puentes o patrones de suelo.



**Fig. 5B** Catálogo "Swarm Behavior"  
(Autor: Ivanna Diaz)



**Fig. 6** Planta de Implantación  
(Autor: Ivanna Díaz)

**Fig. 7** Perspectiva Auditorio  
(Autor: Ivanna Diaz)



**Fig. 8** Perspectiva puente peatonal  
(Autor: Ivanna Diaz)



## MORFO-DINÁMICA [MD]

Dentro de esta sección de morfo-dinámica vamos a exponer dos proyectos, el primero ubicado en la ciudad de Bogotá y el segundo en la ciudad de Cartagena. En ambos proyectos se utilizó el software Real Flow 4 como un simulador de partículas. Los estudiantes exploraron las reacciones de partículas con respecto a fuerzas y obstáculos, y extrajeron las trayectorias de las partículas como geometrías bases de sus proyectos.



**Fig. 9** Planta de implantación  
(Autor: Mauricio Mora)

## [MD-1.] FORMA EN MOVIMIENTO, APLICADA EN CONTEXTOS URBANOS

*Mora bajo la dirección de Chavarro*

El primer proyecto fue realizado por el estudiante Mauricio Mora, quien estuvo experimentando con un simulador de fluidos Real Flow 4, en la articulación de dos espacios: la manzana en donde está ubicado el Estadio Nemesio Camacho El Campín y el Parque Metropolitano Simón Bolívar. El estudiante introduce con la ayuda de un simulador de fluidos las determinantes de movimiento y fuerza en el momento de la concepción formal.

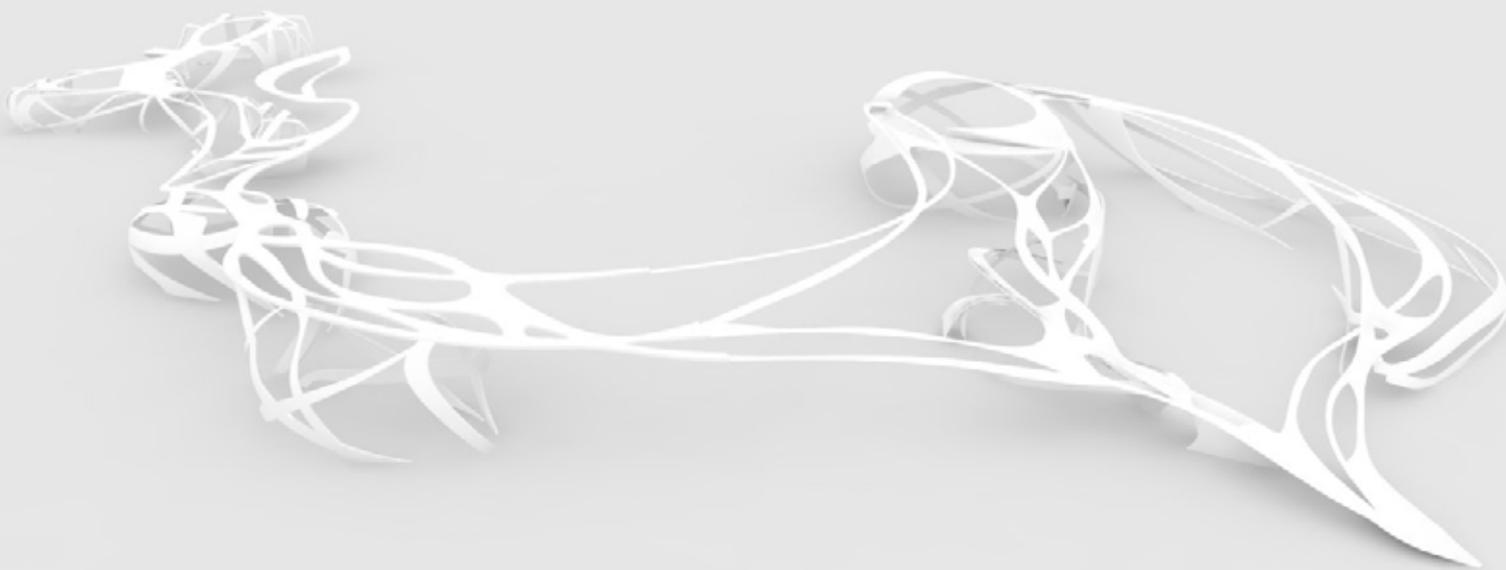
A partir de la observación y diagnóstico de flujos peatonales, evalúa todas las determinantes que pueden afectar su proyecto. Por medio del simulador de partículas, exploró diferentes posibilidades arquitectónicas para cada una de las determinantes que él, como diseñador, encontró importantes (estética, normativa, programática, etc.).



**Fig. 10** Perspectiva Museo El Campín  
(Autor: Mauricio Mora)

**Fig. 11** Perspectiva pasaje comercial  
(Autor: Mauricio Mora)





**Fig. 14** Estudio geometría Centro Oceanográfico (Autor: Cristian Pinzón, Jenny Mora, Laura Guevara)

## [MD-2.] COMPLEJO OCEANOGRÁFICO

*Pinzón-Mora-Guevara,  
bajo la dirección de Chavarro*

El segundo proyecto está ubicado en la ciudad de Cartagena, en la intersección entre Boca Grande y la Ciudad Colonial, en el lote donde está ubicada la Base Naval de Cartagena. Este proyecto fue realizado por los estudiantes Laura Guevara, Cristian Pinzón y Jenny Mora, quienes al hacer el diagnóstico del lugar observaron una gran cantidad de contaminación y la extinción del manglar nativo en la bahía de Cartagena.

Estas determinantes los llevaron a enfocar su propuesta en la recuperación del manglar y la neutralización de la contaminación. Así, con el simulador de fluidos Real Flow 4, elaboraron fórmulas de erosionar la península y crear canales de agua que permitan el paso de mar abierto a la bahía. El agua que entra de mar abierto pasa por una serie de filtros que están dentro de los canales con el fin de introducir agua

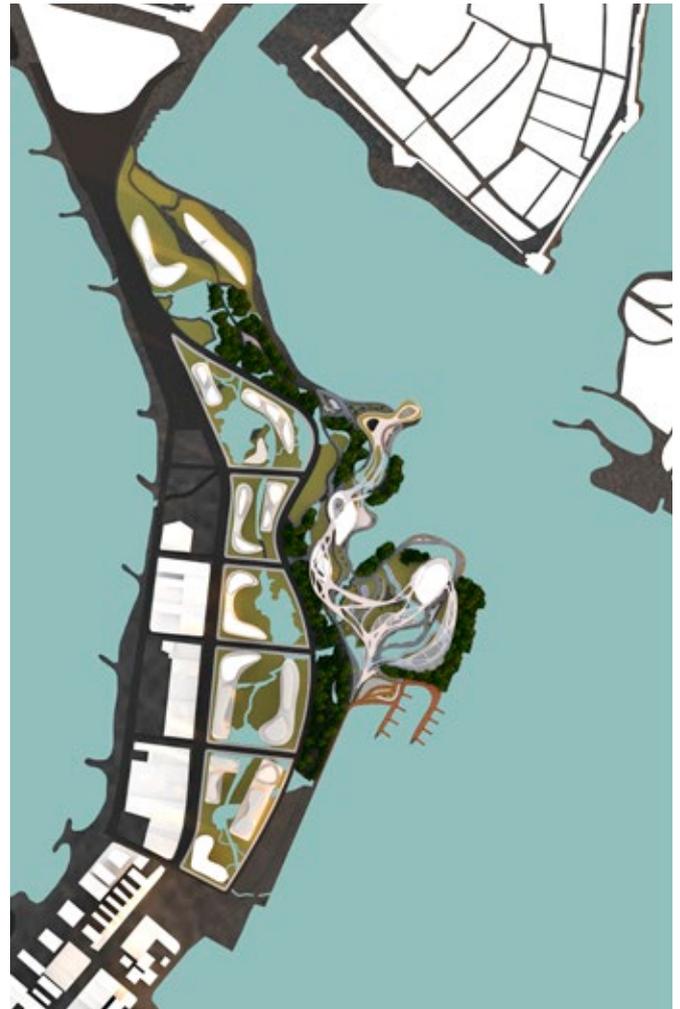


**Fig. 12** Planta de implantación  
(Autor: Cristian Pinzón, Jenny Mora,  
Laura Guevara)

**Fig. 13** Perspectiva espacio público  
(Autor: Cristian Pinzón, Jenny Mora,  
Laura Guevara)

limpia dentro de la bahía. Esto, acompañado de la introducción de manglares que poseen propiedades de purificación del agua, constituyó la propuesta urbanística básica de los estudiantes.

Su propuesta urbanística imponía la creación de un lenguaje estético compatible con el parque de manglares que se estaba creando, por lo que, para el diseño de un centro oceanográfico que se encuentra dentro del parque, proponen una cubierta que recubre los tres edificios que integran el centro oceanográfico (acuario, centro de investigaciones y museo) que toma la forma de un manglar, desarrollado con el mismo software de simulación de partículas.



# Capítulo 3

## SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

*Rodrigo Velasco*

El segundo paso en el proceso iterativo aquí propuesto corresponde al ciclo generado por la ejecución de procedimientos de simulación y de optimización aplicados a una primera definición de diseño. Estos dos procedimientos son probablemente aquellos en los que la aplicación de procesos computacionales ha tenido mayor impacto, siendo así que ni siquiera existían como tales en épocas anteriores a la popularización de estas herramientas, cuando lo más cercano a ellos era la realización de pruebas análogas sobre modelos físicos, las cuales en arquitectura estaban limitadas a los pocos casos en que fuese factible modelar prototipos parciales.

## 3.1 SIMULACIÓN

Con el término de simulación nos referimos aquí a procesos computacionales que en términos muy generales, imitan procesos reales mediante la ejecución de procedimientos equivalentes basados en reglas representadas dentro de un entorno virtual. De esta manera, es posible representar el comportamiento real de un diseño sin necesidad de construirlo, lo que implica importantes ahorros en tiempo y costos.

Las aplicaciones más conocidas de este tipo de simulaciones para el público común son aquellas con fines de visualización utilizadas en video juegos y animaciones digitales, donde los datos en tres dimensiones que corresponden a las superficies en el espacio, junto con los atributos materiales y las condiciones de iluminación específicas, son computados para producir imágenes aparentemente reales.

Este proceso involucra algoritmos que usan reglas relativas a la transmisión, la reflexión y la refracción de la luz con respecto al medio ambiente descrito (espacial y medio-ambiental), al ser observados desde un punto

de vista o cámara en particular. Así mismo, el proceso puede producir imágenes que no serían posibles de definir de otra manera que construyendo físicamente el medio ambiente y edificio, o haciendo un modelo a escala detallada del mismo.

En esta sección, sin embargo, nos centraremos en simulaciones relacionadas con el desempeño funcional del edificio, dejando las simulaciones de visualización para el siguiente capítulo en conjunto con aspectos relativos a la fabricación.

Entre esas simulaciones basadas en el desempeño, hemos encontrado al menos tres grupos diferentes que se utilizan actualmente en la industria de la construcción como herramientas de apoyo al diseño arquitectónico: el primer grupo tiene que ver con la predicción del comportamiento de un edificio en términos *ambientales* (aspectos térmicos, acústicos y de iluminación), el segundo tiene que ver con el *comportamiento estructural* del edificio, y el tercero como *predicción de uso* en términos de circulación.

## 3.1.1 TIPOS, PROCESOS Y HERRAMIENTAS

En la mayoría de los métodos de simulación computacional, los problemas complejos son normalmente abordados mediante el uso de diferentes técnicas, tales como la división de la geometría en partes discretas a las que se aplican los algoritmos de cálculo para limitar el espacio de cómputo a su mínimo tamaño relevante, así como procedimientos no deterministas, por ejemplo, el método de Monte Carlo<sup>1</sup>, que en términos generales implica el uso de valores aleatorios que al ser evaluados ante particulares circunstancias del problema, permite ir poco a poco acercándose al valor real mediante reducciones del espacio de búsqueda basados en nuevas distribuciones de probabilidades.

Los tres tipos de simulación aquí enunciados (ambientales, estructurales y de uso) no son en ningún caso las únicas posibles aplicaciones de la simulación computacional dentro del proceso de diseño en arquitectura, pero son los más utilizados y para los cuales existen actualmente varios paquetes de software especializados. De esa manera, dados los límites de esta publicación, estos tres tipos de simulación son los únicos que discutiremos.

---

1. [http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_Montecarlo](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Montecarlo)

## A. AMBIENTALES [AMB]

Las simulaciones ambientales implican el uso de varios procesos para predecir las condiciones de confort de un espacio arquitectónico dado dentro de un entorno específico. La definición de tal espacio arquitectónico implica descripción de características tales como la geometría, dimensiones, materiales, propiedades de cada superficie y sus componentes constitutivos. Podrían también existir varios tipos posibles de simulaciones ambientales, pero en este caso nos centraremos en tres que se utilizan comúnmente en la arquitectura y para los que existen herramientas desarrolladas. Estas simulaciones son las *lumínicas*, *térmicas* y *acústicas*.

## [AMB-1.]

### Simulaciones lumínicas

Habiendo definido una configuración geométrica en tres dimensiones e incorporado información sobre los índices de reflexión y refracción de cada una de sus superficies, se requiere entonces conocer la dirección y magnitud de los rayos de luz emitidos por diferentes fuentes (solar y artificial), para que mediante procesos geométricos se puedan llegar a predecir los niveles de iluminación real en puntos discretos definidos dentro del espacio original. Estos procesos normalmente utilizan algoritmos basados en las trayectorias de rayos, tales como Radiosity y Ray-tracing, donde probablemente la herramienta de software más utilizada es *Radiance*, un paquete de software internacionalmente validado, pero no particularmente amigable para el usuario (controlado por medio de scripts).

*Radiance* se utiliza comúnmente dentro de motores de renderizado, pero también existen interfaces para la simulación dentro de herramientas de modelación 3D como Rhinoceros y Sketch Up. A continuación sugerimos algunos de los paquetes que consideramos más convenientes por su fácil uso para ser empleados en este tipo de simulaciones:

- *Radiance*: <http://www.radiance-online.org/>
- *Daysim for Sketch-up and Rhino*: <http://daysim.ning.com> (interface para *Radiance*)
- *Diva for Rhino*: <http://diva4rhino.com> (interface para *Radiance*)
- *Ladybug and Honeybee for GH*: <http://www.grasshopper3d.com/group/ladybug> (nterface para *Radiance*)
- Otros: *Photopia*, *Light -Tools*, *Flucs-DL*, *Light Pro*, *Lumen-Designer*, *Adeline (R)*, *Relux*, *Dialux*, *Sky-vision*.

## [AMB-2.]

### Simulaciones térmicas

Un siguiente paso en el proceso de simulación lumínica descrito implica el uso de los datos de iluminación solar incidente anteriormente encontrados (que se transforma en calor), pero ahora teniendo en cuenta las temperaturas medias de aire, el comportamiento térmico de los objetos en el espacio estudiado (determinando su masa y densidad), las direcciones del viento y las aperturas, para de esa manera simular la forma en que el calor se mueve a través del aire dentro de dicho espacio. Este proceso se basa normalmente en el uso de Dinámica de Fluidos (Computational Fluid Dynamics, CFD), donde se entiende el aire como un fluido a partir de componentes discretos, para de esa manera, por medio de la aplicación de funciones a cada componente volumétrico de aire (teniendo en cuenta las densidades diferenciales y por lo tanto las presiones y los movimientos creados), cuantificar los efectos térmicos encontrados en un espacio a lo largo de un tiempo determinado.

Este tipo de simulaciones normalmente también tiene en cuenta las fuentes artificiales de intercambio de calor y se utiliza para determinar los requerimientos de energía de los sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), por lo cual también son llamadas simulaciones energéticas. De los paquetes de software existentes para la simulación térmica de edificios, probablemente el más común, no sólo

por ser altamente validado sino por estar disponible mediante licencias de código libre y abierto, es EnergyPlus. Como ocurre con Radiance, este no es un software particularmente intuitivo; sin embargo, existen también varias interfaces que hacen fácil su uso dentro de paquetes 3D, algunas de las cuales citaremos a continuación:

- *EnergyPlus*
- *Design Builder*: <http://www.designbuilder.co.uk> (Interface para EnergyPlus).
- *Diva for Rhino*: <http://diva4rhino.com> (Interface para EnergyPlus).
- *Otros (no integrados en Rhino o scripting visual)*: *TRNSYS (Transient System Simulation Tool)* <http://www.trnsys.com/>, *TAS* <http://www.ifes-koeln.de/en/services-20-years-project-experience/simulation-analysis/tas-software-hotline.html>

**[AMB-3.]****Simulaciones acústicas**

Los métodos más comunes para la ejecución de simulaciones acústicas son basados en definiciones geométricas siguiendo la misma lógica de las simulaciones de iluminación antes descritas, pero entendiendo las trayectorias de rayos no como lumínicos, sino como rayos de sonido, para de esa manera obtener resultados a partir del estudio de reflexiones y refracciones causadas por objetos y paredes de acuerdo con su geometría y propiedades de superficie. A continuación se presentan algunos de los paquetes disponibles para simulación acústica:

- *Odeon*: <http://www.odeon.dk>
- *EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers)*: <http://ease.afmg.eu>
- *Ecotect*: <http://www.autodesk.it/adsk/servlet/pc/index?id=15078641&siteID=457036>

## B .ESTRUCTURALES [EST]

Las simulaciones estructurales basadas en métodos computacionales utilizan modelos geométricos que implican la definición de los elementos en el espacio tridimensional (incluyendo nodos y conexiones de cada elemento, apoyos y el tipo de restricciones para cada uno de ellos), la definición de fuerzas aplicadas (determinando ubicación de acuerdo con los nodos del elemento en que se aplican, dirección y magnitud de cada una de ellas), así como las propiedades mecánicas de cada elemento (sección y materiales), para de esa manera evaluar el comportamiento de la estructura en su conjunto (deformación, tensiones y momentos locales). El método más común para llevar a cabo estas simulaciones computacionales para el análisis estructural es el análisis de elementos finitos (Finite Element Analyses, FEA), pero existen también otros métodos de simulación estructural más centrados en la exploración de posibilidades geométricas con cualidades estructurales que en el análisis, como brevemente explicaremos a continuación:

**[EST-1.]****Análisis estructural  
por análisis de elementos finitos**

El análisis estructural mediante el método de elementos finitos implica la división de la geometría en un conjunto discreto de partes simples (normalmente, una malla con densidades mayores de caras en áreas de donde se concentran esfuerzos), donde cada cara es evaluada teniendo en cuenta sus características y esfuerzos, interrelacionándolas de forma iterativa mediante matrices matemáticas para aproximar el comportamiento de toda la estructura. Algunas herramientas disponibles son:

- *Karamba*: <http://www.karamba3d.com>
- *Donkey*: <http://donkey.igend.cz/en/installation>
- *Otros*: (no integrados en Rhinoceros o GH) SAP 2000  
<http://www.csiamerica.com/products/sap2000>

**[EST-2.]****Exploración geométrico-estructural a partir del uso de sistemas de resorte y análisis geométricos**

Los procesos de exploración de formas estructurales (Form finding processes) usando el método de resortes se basan en una red de nodos en el espacio, interrelacionados por medio de segmentos (resortes) donde a cada uno de ellos se le asignan niveles de rigidez específicos, para de esa manera poder predecir el movimiento de toda la red al aplicarle restricciones y cargas particulares.

Aunque estrictamente hablando, esta es una aplicación de análisis, los resultados de las operaciones normalmente tienen relevancia como procesos de búsqueda para encontrar configuraciones geométricas estructuralmente estables, haciendo uso de geometrías deformadas bajo tensión para predecir formas que se comportan mejor en la compresión. Este proceso es similar a los métodos analógicos utilizados por Antoni Gaudí y Frei Otto, pero en este caso se realizan predicciones virtuales en lugar de físicas.

De una manera similar, pero utilizando diagramas de vectores en lugar de los sistemas de partículas, es posible utilizar las gráficas de estática donde diagramas de fuerza y forma están relacionados entre sí llegando a resultados comparables. Este segundo enfoque, aunque limitado al análisis de estructuras funiculares sencillas, es bastante eficiente gracias al aprovechamiento de procesos computacionales, siendo viable llegar a resultados tri-dimensionales mediante la superposición de resultados bi-dimensionales (plantas y alzados). Este método de base geométrica (originalmente denominado Trust Network Analysis, TNA), como se ha discutido anteriormente, tiene relevancia principal como método de exploración.

## C. USO

Otro posible empleo de las simulaciones computacionales en arquitectura y diseño urbano consiste en predecir el comportamiento de peatones dentro de un espacio dado, en lugar de predecir el comportamiento del edificio mismo. Para este tipo de simulaciones lo más común es usar aplicaciones basadas en el uso de sistemas de partículas (Particle systems), donde cada partícula o elemento correspondería a un individuo, y su movimiento estaría dado por las interrelaciones entre estos (individuos-partículas entre sí) y un espacio dado. Un ejemplo básico de la programación de estos sistemas implicaría la predisposición de movimiento de cada partícula (individuo) hacia un destino fijo o variable mediante la definición de atractores (vistas, objetivos parciales) en un entorno tri-dimensional, involucrando un movimiento donde existen obstáculos (el contexto edificado entendido como barreras, y las colisiones con otras partículas) y maneras de reaccionar ante cada uno de ellos, para de esa manera simular en tiempo real el comportamiento del sistema. Las siguientes aplicaciones demuestran el uso de este tipo de simulación:

- *DepthMap*: <http://www.spacesyntax.net/software/>
- *Smart Move VIZ*: <http://www.smart-solutions-network.com/page/smart-move-viz-introduction>

## 3.1 OPTIMIZACIÓN

### 3.2.1 DEFINICIÓN

Habiendo discutido el potencial de las simulaciones computacionales en el diseño arquitectónico y urbano, un siguiente paso también basado en el uso de procesos computacionales implicaría aplicar estas simulaciones a cada una de las diferentes posibilidades de configuración de diseño (implicando el cambio de valores a cada parámetro de diseño empleado) para encontrar aquellas configuraciones con mejor desempeño dentro del tipo de evaluación realizada. En términos generales, una optimización matemática consiste en seleccionar el mejor elemento de un grupo (elegido numéricamente por tener el valor máximo para las características positivas o el mínimo para una donde los valores óptimos son negativos) siguiendo una función que define esos valores. Para nuestro propósito en la arquitectura y la ingeniería, podemos hacer referencia a la optimización computacional (Computer Aided Optimization, CAO), donde en muchos casos, simulaciones como las descritas en el numeral anterior se utilizan como las funciones para evaluar los elementos (variaciones de diseño) en el grupo.

En el nivel más básico, para encontrar la mejor solución dentro de un grupo, se puede simplemente analizar cada uno de los elementos (utilizando simulaciones u otras funciones particulares) y ordenar los resultados de acuerdo a los valores producidos; a esto también se le llama búsqueda de fuerza bruta, y puede ser fácil de implementar, pero a un alto costo computacional, haciendo su uso inviable para problemas complejos, es decir, aquellos en los que hay un número importante de elementos para evaluar o formas de evaluación de las mismas. Por otro lado, cuando la cantidad de elementos posibles es elevada y/o los procesos de simulación son complejos, en otras palabras, cuando el tiempo para evaluar todas las alternativas utilizando la capacidad computacional de las herramientas disponibles (nótese que este es un concepto relativo, a medida que aumenta la potencia de cálculo continuamente) es muy alto para los requerimientos específicos, entonces es necesario el uso de estrategias para simplificar el problema, pero unas donde aún sea posible obtener una mejor solución aproximada.

Estas estrategias son normalmente heurísticas, es decir, reducen el espacio de búsqueda, ya sea mediante el uso de procedimientos que son completamente pre-definidos, o incluyendo aspectos de aleatoriedad (deterministas o no deterministas), que desde un punto de vista estadístico pueden producir resultados aceptables, pero implicando una reducción importante en los requerimientos computacionales de la búsqueda. Estos procesos son normalmente estándar cuando se requieren optimizaciones de objetivos múltiples, en cuyo caso es necesario diseñar los pesos relativos dados a cada uno de los objetivos en la función, o si todos son igualmente relevantes, buscando el estado de Pareto.

## 3.2.2 TIPOS DE PROCESOS Y HERRAMIENTAS

### A. MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

Teniendo una definición de diseño paramétrico y la posibilidad de evaluarla (ya sea mediante el uso de mediciones directas a la geometría o mediante la aplicación de procedimientos especializados de simulación), para encontrar la mejor solución posible dentro de los criterios de evaluación aplicados, sería necesario evaluar no una configuración espacial (un estado), sino todos los estados posibles incluidos en la definición, y que forman el espacio de búsqueda, es decir, todas las posibles variaciones de diseño que resultan al cambiar los valores de los parámetros incluidos en la definición. La manera de hacer la evaluación de cada una de ellas en términos computacionales sería mediante la iteración del proceso de simulación a cada una de las variaciones. Aunque el concepto de iteración es básico en computación, normalmente está disponible dentro de interfaces gráficas como Grasshopper, requiriendo plug-ins adicionales como Grasshopper con Hoopsnake y Grasshopper con Anemone.

## B. MÉTODOS HEURÍSTICOS [T4]

Recorrer de manera iterativa todas las posibles configuraciones de diseño para evaluar una definición paramétrica, es decir, llevar a cabo un examen exhaustivo del espacio de búsqueda (como se ha descrito anteriormente), garantizaría encontrar la mejor solución existente. Sin embargo, teniendo en cuenta que la adición de parámetros de diseño aumenta exponencialmente el tamaño del espacio de búsqueda, es comúnmente imposible seguir ese procedimiento en casos relativamente complejos.

Los métodos heurísticos son atajos para encontrar “las mejores” soluciones de una manera aproximada, sin necesidad de evaluar todo el espacio de búsqueda de posibles soluciones. De esa manera, en un procedimiento heurístico se intercambia exactitud por velocidad, siendo en muchos casos no solamente la única alternativa viable a seguir, sino además la más práctica, pues los rangos de diferencia de los resultados encontrados pueden ser insignificantes comparados con los ahorros en tiempo de procesamiento de datos.

Hay diferentes maneras para llevar a cabo la optimización heurística, pero a modo de ejemplo, aquí presentamos una descripción bastante simplificada de los tres métodos que se encuentran embebidos dentro de herramientas computacionales de optimización ya disponibles para el público general:

## Algoritmos genéticos (GA)

Estos algoritmos imitan el proceso de la evolución natural de una manera simplificada y dentro de entornos artificiales, normalmente incorporando de diferentes maneras analogías a procedimientos de herencia, selección natural e hibridación dada por entre-cruzamiento. Los requisitos básicos para este tipo de algoritmos son dos, una representación de la definición genética del dominio de la solución -que normalmente serían los valores dados a cada parámetro que define la solución- y una función de aptitud biológica (*fitness*) para evaluarlas, en nuestro caso, comúnmente embebida dentro simulaciones particulares como se explicó anteriormente.

El proceso iterativo implica una primera etapa de generación, normalmente seleccionando al azar un grupo de soluciones (dando valores aleatorios a cada parámetro que las define), para a continuación, evaluarlas en términos de aptitud biológica (basándose en los resultados de la simulación), y de esa manera escoger los mejores evaluados. El siguiente implica una nueva búsqueda al azar, donde las soluciones mejor evaluadas son “hibridizadas” con las mejores evaluadas de la búsqueda anterior, produciendo entonces una nueva generación de soluciones. El proceso se repite a través de todo el espacio de búsqueda hasta que se alcanza un resultado aceptable, o cuando se alcanzan las limitaciones de tiempo previamente asignado.

## Algoritmos de enfriamiento simulado

*(Simulated Annealing - SA)*

Este método recibe su nombre del proceso análogo en la metalurgia, donde aprovechando el cambio de energía termodinámica, el enfriamiento lento es aprovechado para modificar los procesos de re-configuración molecular del metal y de esa manera aumentar el tamaño de los cristales, evitando además defectos en el material. El algoritmo utiliza una lógica booleana tipo Monte Carlo, es decir, implementa una búsqueda mediante la evaluación de una solución dada (aleatoriamente) y sus vecinas (soluciones con valores paramétricos cercanos) para seleccionar una nueva posición de acuerdo a los resultados de la evaluación -en nuestro caso, normalmente dada por el mejor resultado después de llevar a cabo por procesos de simulación-, aunque aceptando una pequeña y decreciente cantidad de soluciones peores para así explorar de manera amplia el espacio de búsqueda. Esto permite evitar quedar atrapado en mínimos locales.

## Algoritmos de Enjambre

(*Particle Swarm Optimization*) PSO

Una vez más, una adaptación de procesos naturales existentes. Este método toma el movimiento enjambre como se ve en las bandadas de pájaros o bancos de peces para explorar un espacio de búsqueda hacia una solución óptima. En la implementación del algoritmo, el movimiento en el espacio de búsqueda se da por las variaciones en los parámetros que definen las soluciones adoptadas (aquí entendidos como partículas), siendo que el movimiento dentro del espacio de búsqueda se guía en cada iteración hacia la posición de las partículas que han obtenido los mejores resultados después de una evaluación de desempeño (de nuevo, por lo general realizado por procedimientos de simulación) y repetido de manera iterativa hasta alcanzar una posición óptima, o al menos una que se considere cerca de ese objetivo. Algunas herramientas disponibles son:

- *Galapagos*: <http://www.grasshopper3d.com/group/galapagos>
- *Octopus*: <http://www.grasshopper3d.com/group/octopus>
- *Goat*: <http://www.rechenraum.com/en/goat/overview.html>
- *Millipede*: <http://www.sawapan.eu>
- *Evolute*: <http://www.evolute.at/software/evolute-tools-for-rhino.html>

## 3.3 CASOS DE ESTUDIO

### CASO DE ESTUDIO 1.

#### **Diseño de dispositivos dinámicos en fachada como solución bioclimática al clima cálido-húmedo de la sede de Girardot de la Universidad Piloto de Colombia<sup>2</sup>**

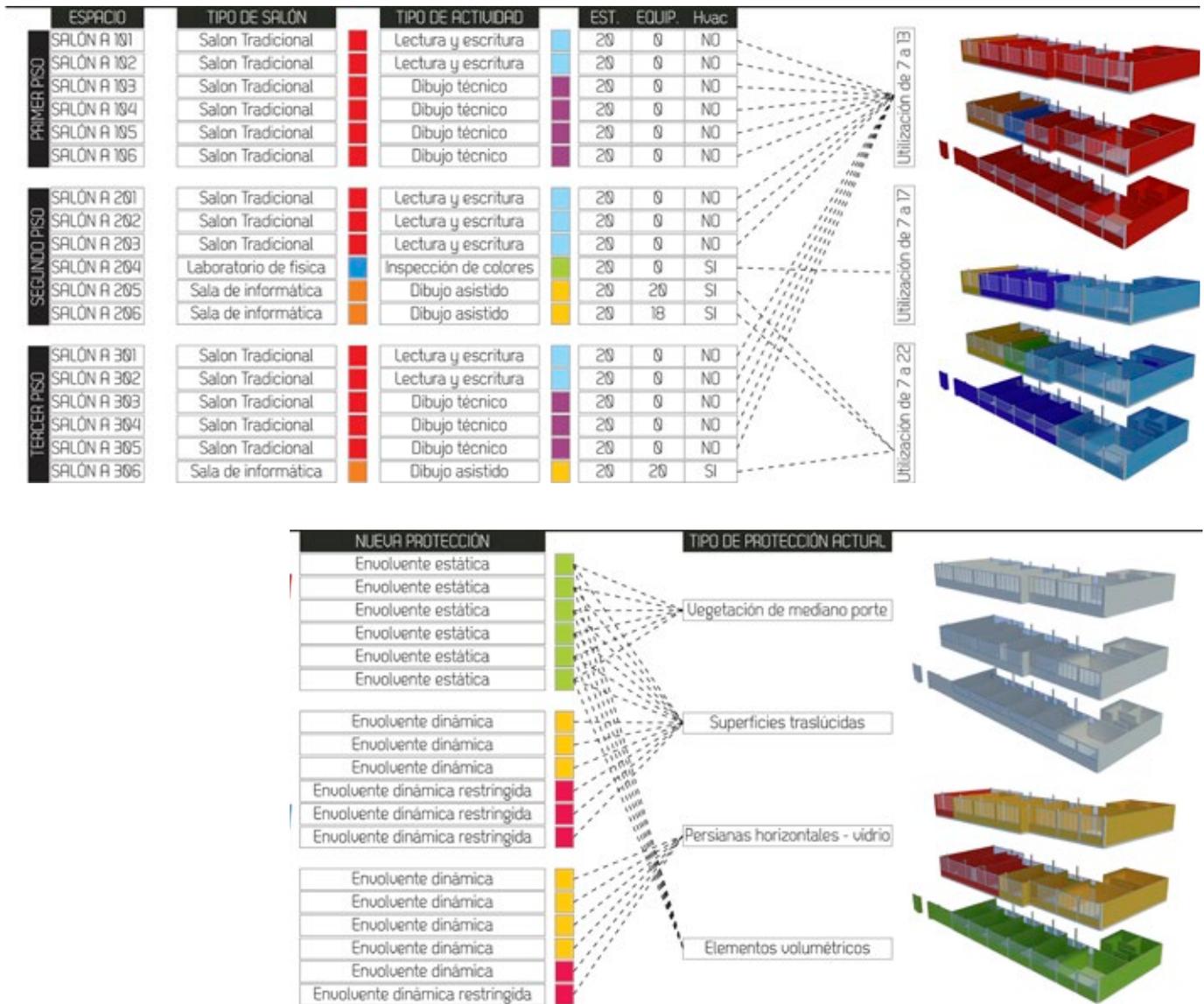
Este proyecto de grado desarrollado dentro del programa de Arquitectura de la Universidad Piloto se puede entender como una prolongación al proyecto de investigación Eco- envolventes<sup>3</sup> desarrollado previamente en la misma escuela, donde se plantearon sus bases conceptuales. El proyecto utiliza simulaciones ambientales para iluminación y temperatura para evaluar diferentes posibilidades de configuración de los elementos de protección solar para el edificio de la Universidad en Girardot (figuras 15 y 16).

---

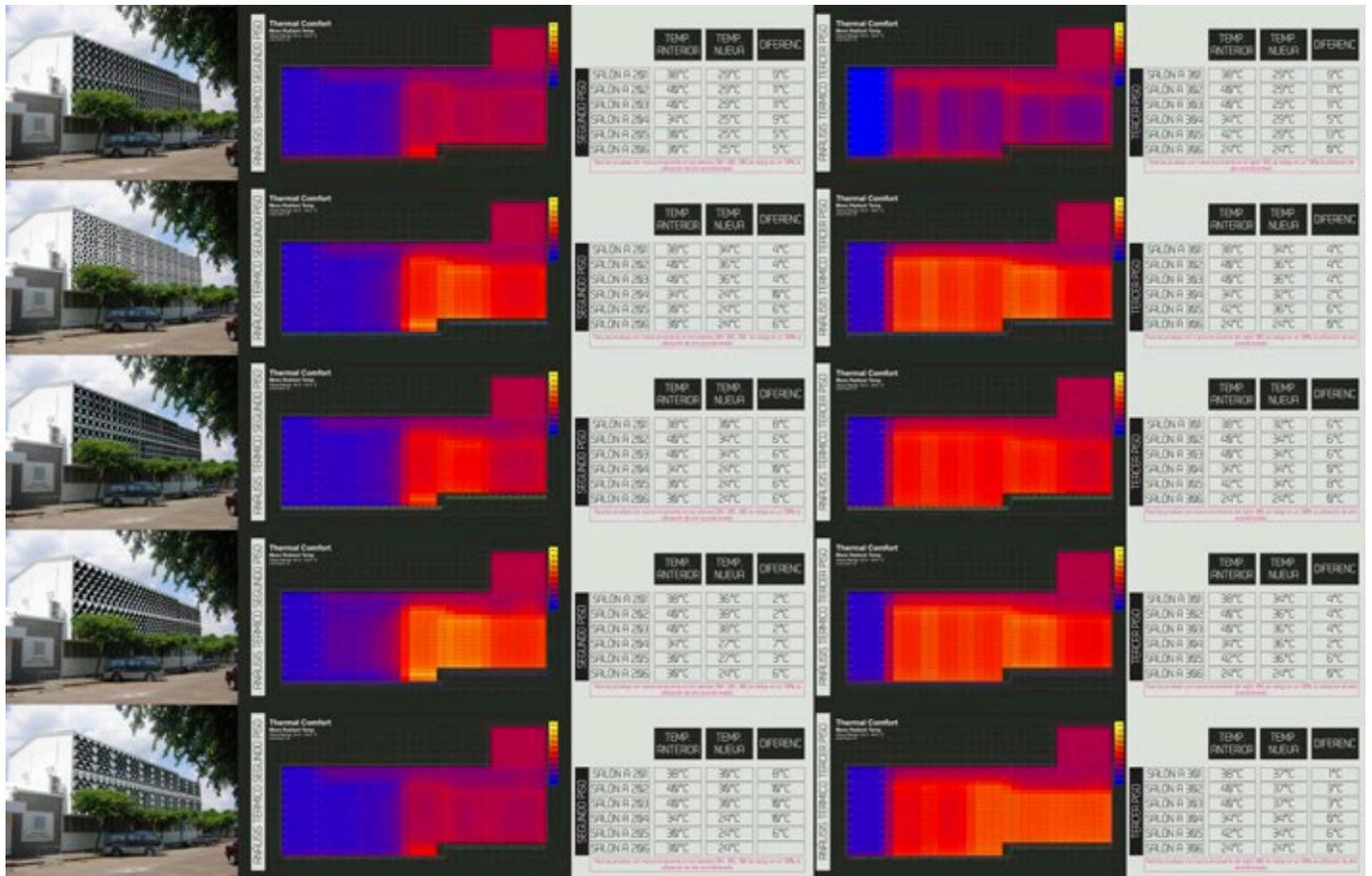
**2.** Proyecto de grado desarrollado por Daniel Robles y Fabián Tocancipá, bajo tutoría de Rodrigo Velasco.

---

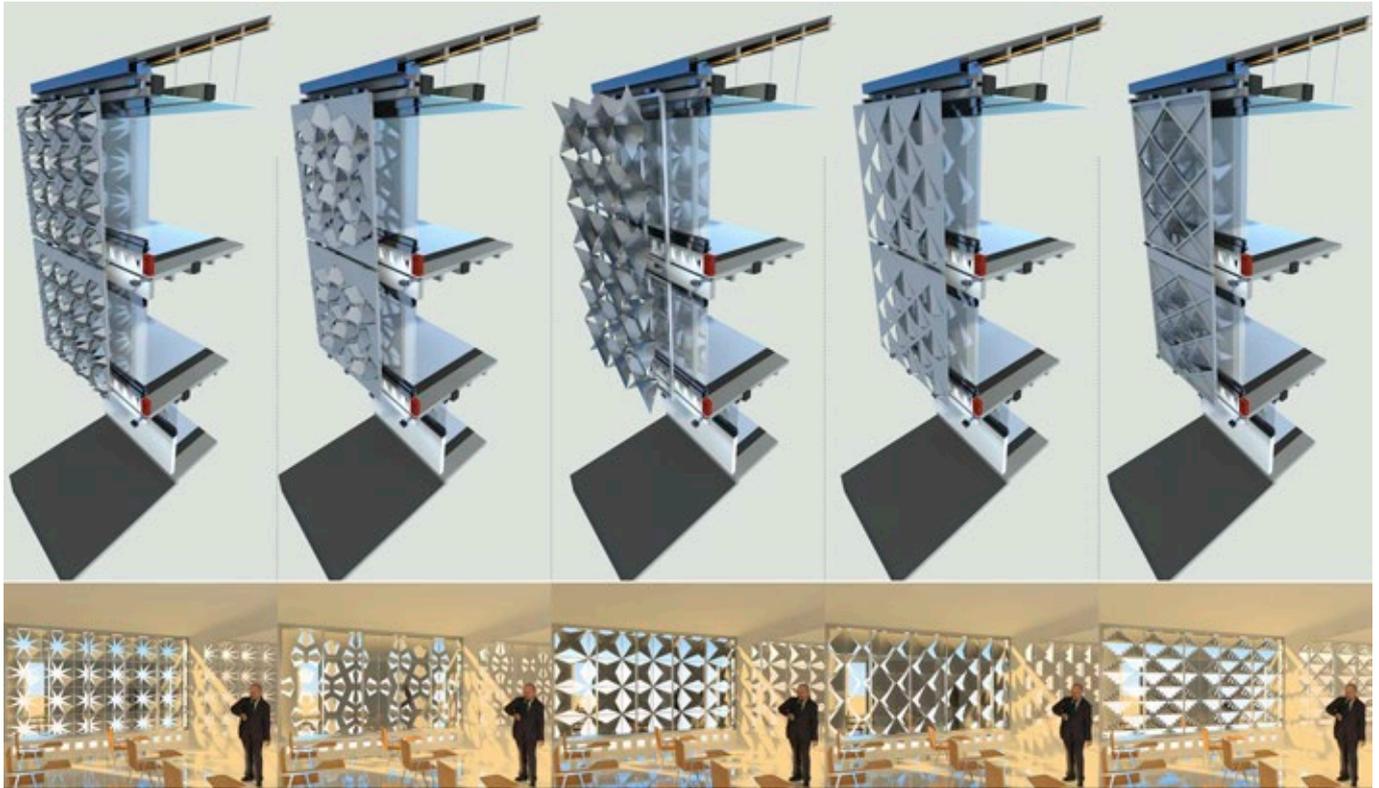
**3.** Eco-envolventes: Proyecto de investigación 2010-12, Universidad Piloto de Colombia. Investigador principal: Claudio Varini.



**Fig. 15** Discriminación de espacios y requerimientos lumínicos y térmicos para edificio U.P.C. sede Girardot (Autor: Fabián Tocancipá)



**Fig. 16** Simulaciones térmicas usando diferentes configuraciones de fachada para edificio U.P.C. sede Girardot (Autor: Fabián Tocancipá)



**Fig. 17** Visualizaciones de diferentes configuraciones de fachada para edificio U.P.C. sede Girardot (Imágenes: Fabián Tocancipá)

Basándose en los conceptos de diseño para climas cálido-húmedos sugeridos por la investigación precedente, la tesis exploró diversas configuraciones de sistemas *brise-soleil*, comparándolas en términos de desempeño entre sí y tomando como caso base el edificio existente. Todas las evaluaciones implicaron modelos 3D utilizando diferentes paquetes de software, y simulaciones con el software Ecotect (figura 17).

La primera etapa implicó la adaptación de conceptos propuestos dentro del proyecto de investigación Eco-envolventes a partir de una definición de diseño paramétrico utilizando la herramienta Grasshopper. Esto permitió a los estudiantes explorar fácilmente las

posibilidades de diseño que podía generar el sistema, y simular su comportamiento en términos de iluminación y control térmico.

La segunda parte del proyecto se centró en el desarrollo de sistemas dinámicos para de esa manera permitir flexibilidad para afrontar requerimientos cambiantes y así facilitar la adaptación continua entre las condiciones externas y los requisitos internos. En esta etapa se evaluaron los diseños seleccionados en base a las mismas simulaciones de luz y térmicos, y en todos los casos se demostró que los nuevos diseños superaron en gran medida el desempeño de la configuración de la fachada existente.

## CASO DE ESTUDIO 2:

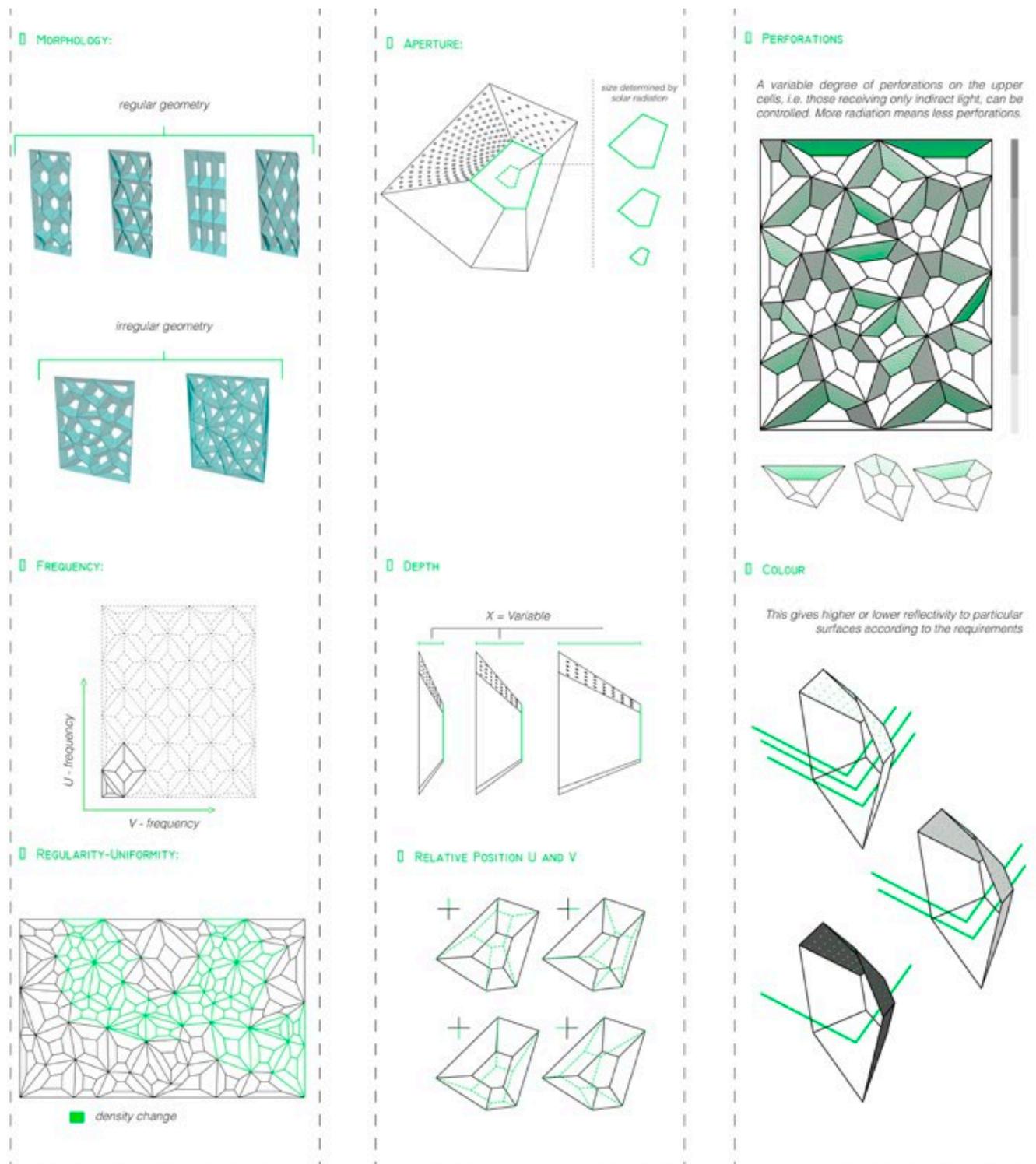
### **Sistema de protección solar basado en el uso de láminas planas en configuraciones celulares<sup>4</sup>**

*Investigación por Rodrigo Velasco con Frontis3D*

Este proyecto, que se podría considerar como una continuación del caso de estudio anterior, también está enfocado en el uso de parasoles arquitectónicos, pero implica además procesos de optimización. En este caso, la definición de los parámetros variables del sistema de protección solar implicó tres categorías principales: la primera tenía que ver con la generación de la malla 2d (UV) base, la segunda con las variables volumétricas locales con respecto a cada célula 3d en la malla, y la tercera con las características del material de la superficie de los componentes planares, como se muestra en las figuras 18 (materialización) y 19 (parámetros).

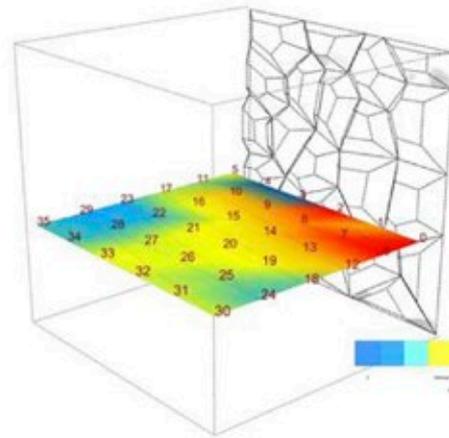
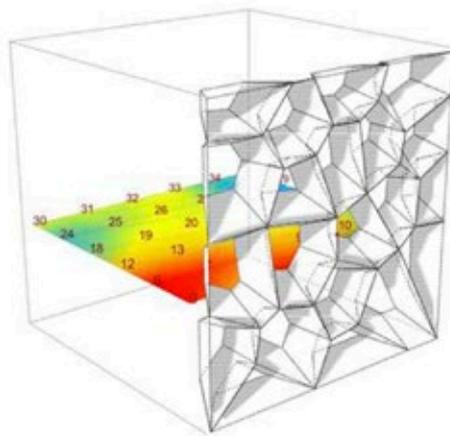
---

**4.** Investigación realizada por Rodrigo Velasco con Frontis3D.



**Fig. 18** Parámetros del Sistema  
(Definición R. Velasco, Imagen César Diaz)





- {0,0}
- 0. 43.0
- 1. 30.0
- 2. 48.0
- 3. 5.0
- 4. 3.0
- 5. 17.0
- 6. 45.0
- 7. 40.0
- 8. 33.0
- 9. 30.0
- 10. 28.0
- 11. 14.0
- 12. 28.0
- 13. 28.0
- 14. 26.0
- 15. 22.0
- 16. 18.0
- 17. 15.0
- 18. 13.0
- 19. 20.0
- 20. 20.0
- 21. 18.0
- 22. 11.0
- 23. 10.0
- 24. 12.0
- 25. 14.0
- 26. 17.0
- 27. 16.0
- 28. 11.0
- 29. 9.0
- 30. 16.0
- 31. 16.0
- 32. 16.0
- 33. 18.0
- 34. 12.0
- 35. 12.0

**Surface\_Area to Covered\_Area Ratio**  
1.445016

**GWP Coeficient/m2 (kg CO2eq/kg)**  
 HDPE (6mm)18.984038  
 Steel (Gauge 16)31.761444  
 PVC (3mm)50.969749  
 Aluminium (Gauge 20)81.730086

**PE Coeficient/m2 (MJ/kg)**  
 Steel (Gauge 16)427.599788  
 HDPE (6mm)678.798999  
 PVC (3mm)991.078445  
 Aluminium (Gauge 20)1051.971405

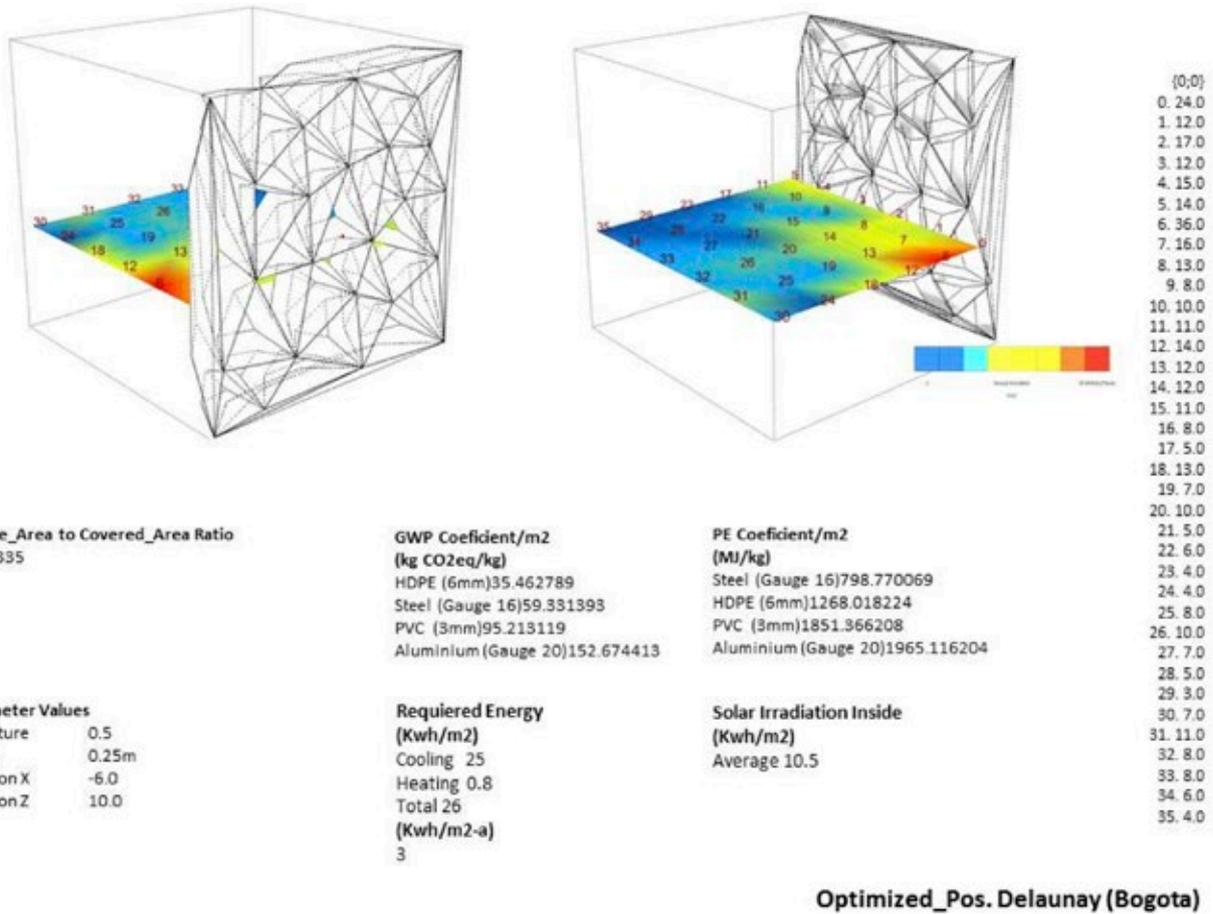
**Parameter Values**  
 Apperture 0.5  
 Depth 0.25m  
 Position X -6.0  
 Position Z 10.0

**Required Energy (Kwh/m2)**  
 Cooling 35  
 Heating 0.6  
 Total 36  
**(Kwh/m2-a)**  
 4

**Solar Irradiation inside (Kwh/m2)**  
 Average 20.3

**Optimized\_Pos. Voronoi (Bogota)**

**Fig. 20A.** Configuraciones optimizadas en términos de apertura y posicionamiento relativo para una fachada sur en Bogotá (Autor: Rodrigo Velasco)



**Fig. 20B.** Configuraciones optimizadas en términos de apertura y posicionamiento relativo para una fachada sur en Bogotá (Autor: Rodrigo Velasco)

## MALLA 2D

La definición de la malla inicial en dos dimensiones implicó tres variables:

- **Morfología:** define la geometría 2D de las celdas de la retícula. Sería posible incluir una cantidad innumerable de posibles teselaciones geométricas incluyendo tipos mixtos, pero para empezar a estudiar el problema sólo 4 retículas básicas fueron escogidas (triangulares, cuadradas, rómbicas, hexagonales) y 2 irregulares (Voronoi y Delaunay).
- **Frecuencia:** define el número de particiones en las direcciones U y V de la superficie seleccionada, o en el caso de retículas irregulares, el número de centros (puntos) total.
- **Uniformidad:** define la manera en que la frecuencia o cantidad de células existentes se define en la superficie particular. Esta es una variable opcional, y se aplica en el modelo por medio del uso de atractores implicando geometrías (puntos o curvas) y grados de atracción.

## CÉLULAS 3D

Las celdas del sistema son extrusiones de la retícula bidimensional explicada arriba. En la definición de estas 4 variables limitan las posibles operaciones dentro de cada célula:

- **Apertura:** asumiendo la extrusión de la retícula original como un *loft* entre el perímetro externo de cada celda de la retícula bidimensional dada y un desplazamiento de tal perímetro en dirección perpendicular a la superficie, la apertura variable indica el radio de cada curva proyectada, especificada en el modelo paramétrico como un *offset* a la curva de la retícula, en donde 0 representa la curva original y 1 una curva hipotética de longitud cero inscrito en el centroide de la celda.
- **Profundidad:** considerando de nuevo las 2 curvas, la profundidad representa la distancia a la que están separadas en la dirección normal a la superficie.
- **Posición relativa U y V:** define el grado de descentramiento de la segunda curva en relación al centroide de la célula en las direcciones U y V, que para una fachada vertical, equivaldría a la posición relativa horizontal y vertical.
- **Dirección de extrusión (simple - doble):** indica la dirección del *loft* para las curvas en la célula. Es una variable opcional, normalmente solo aplicada a configuraciones rómbicas y hexagonales.

## MATERIAL

Este parámetro adicional (no geométrico) mejora el control sobre los efectos de iluminación deseados del sistema, incluyendo dos variables:

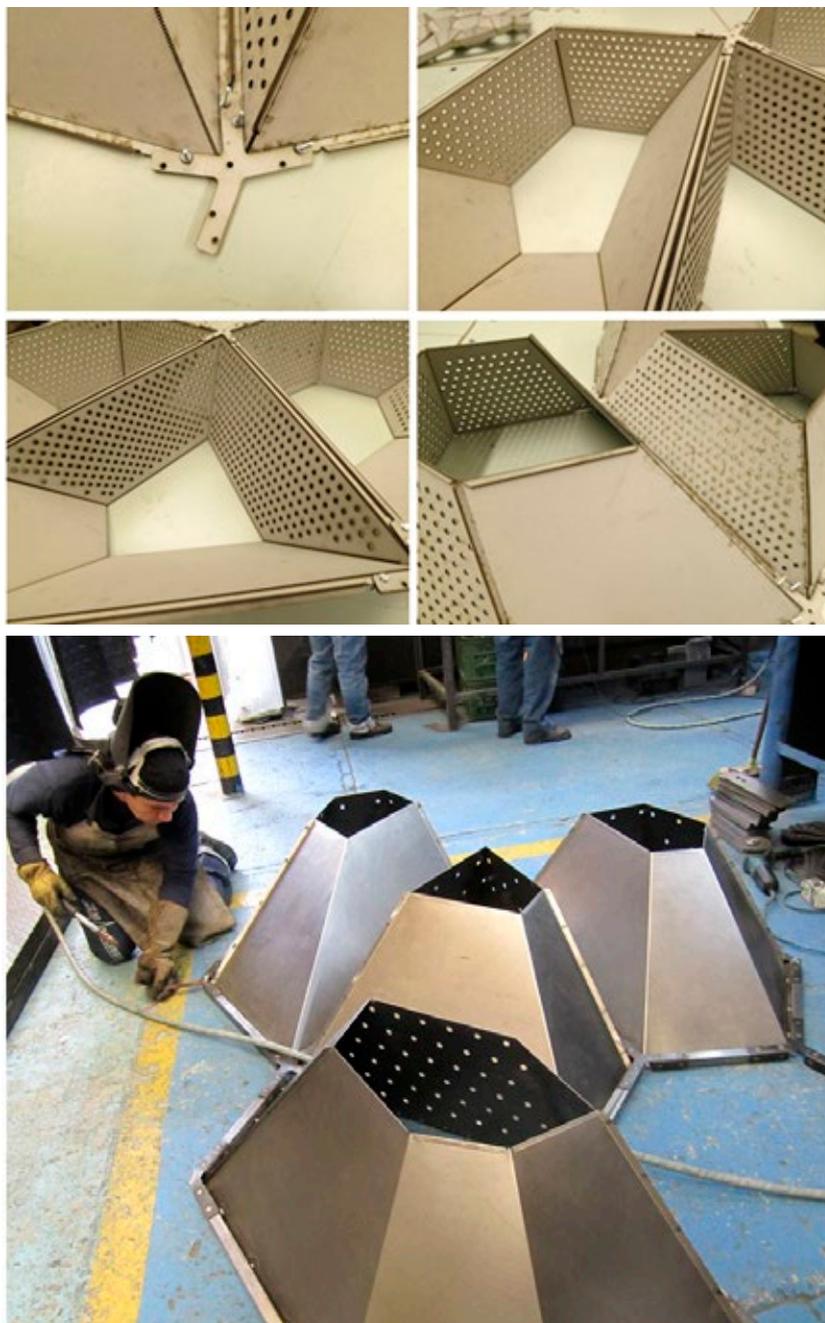
- Perforaciones: define el grado variable de perforaciones en las células superiores (que reciben sólo la luz indirecta). Se puede controlar relacionando la frecuencia y apertura de las perforaciones con niveles de iluminación existentes y requeridos.
- Color: define el grado de reflectancia de cada superficie en la célula.

Finalmente, para el proceso de optimización, se escogieron 3 variables para explorar de manera simultánea: apertura, y posicionamientos relativos en U y V. El espacio de búsqueda se exploró usando un algoritmo genético integrado en el software paramétrico (Galapagos en GH), sobre la base de evaluaciones de energía térmica anuales obtenidas mediante Energy Plus a través de DIVA para Rhino (figura 20).

Hay que decir, sin embargo, que este ejercicio no intenta llegar a un proceso estándar para la optimización del sistema, sino que propone una serie de aspectos

que pueden ser evaluados en diferentes instancias, y que solo puede tener sentido en las condiciones particulares de un sitio y su posición relativa (por ejemplo, Bogotá, orientado al sur), en términos de requerimientos particulares del espacio cubierto por la fachada (en este caso, un espacio de oficina con 500 a 1000 lux distribuidos uniformemente) (figuras 21 y 22).

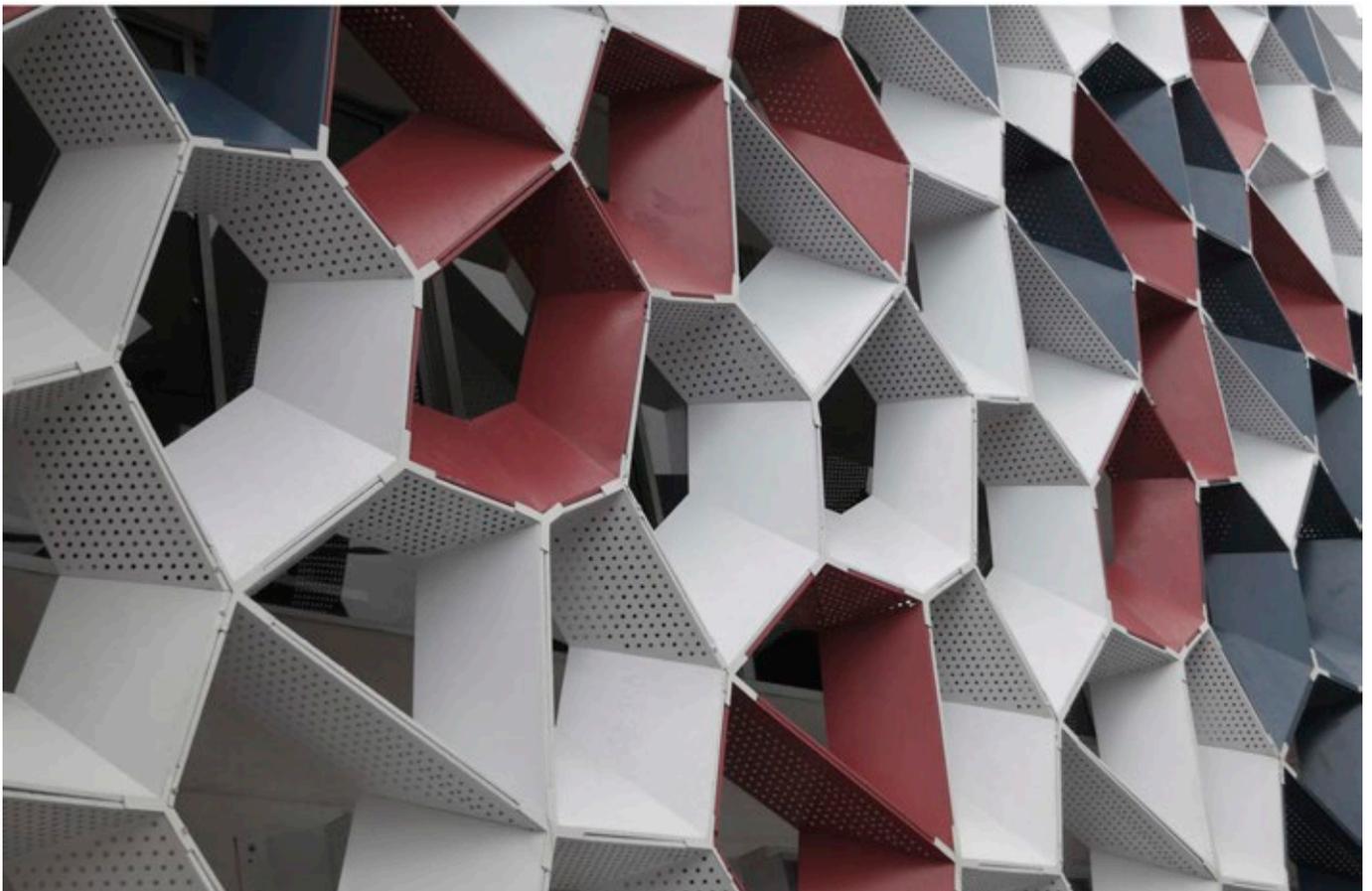
Como conclusiones preliminares de las optimizaciones realizadas, se encontró que el factor más importante en la optimización fue el posicionamiento relativo de la extrusión respecto a la retícula original en U y V, siendo que para todos los casos de la fachada estudiada la optimización implicó un movimiento hacia los extremos superior e izquierdo, es decir, cuando los planos resultantes evitaban la incidencia solar directa en el interior del espacio interior en las horas de la tarde, cuando es inminente la posibilidad de sobrecalentamiento. Por otro lado, después de analizar sus resultados se puede decir que en términos de morfología, las configuraciones de polígonos con mayor número de lados (Voronoi - Hexagonal) implicaron un menor uso de material, y por lo tanto los valores más bajos con respecto a GWP (potencial de calentamiento global).



**Fig. 21.** Modelo físico constructivo de Versión 2 y Prototipo de versión 1 (Modelo y fotografía: Rodrigo Velasco)



**Fig. 22.** Fachada contruída  
(Fotografía: Rodrigo Velasco)



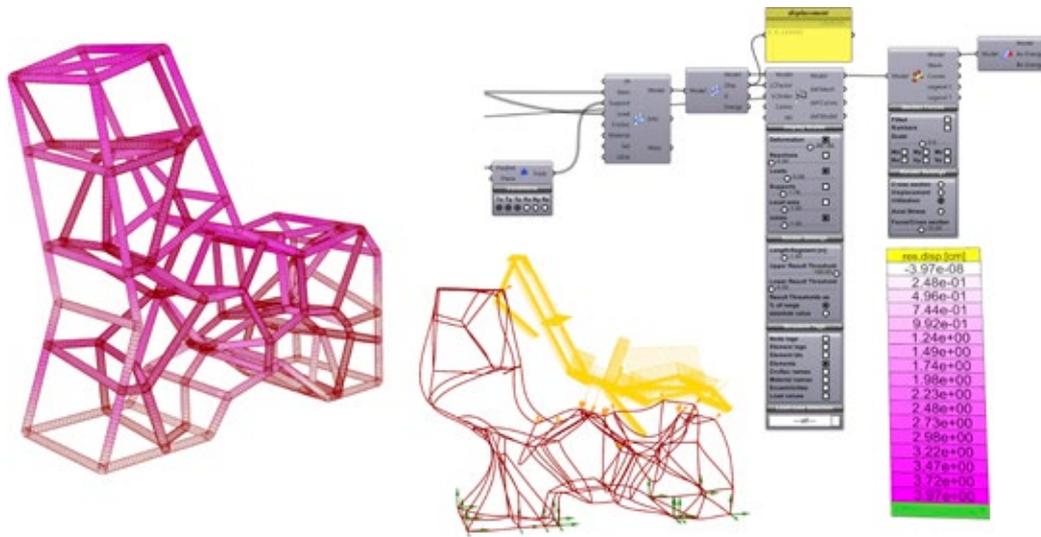
## CASO DE ESTUDIO 3:

### Silla ligera basada en células Voronoi tri-dimensionales<sup>5</sup>

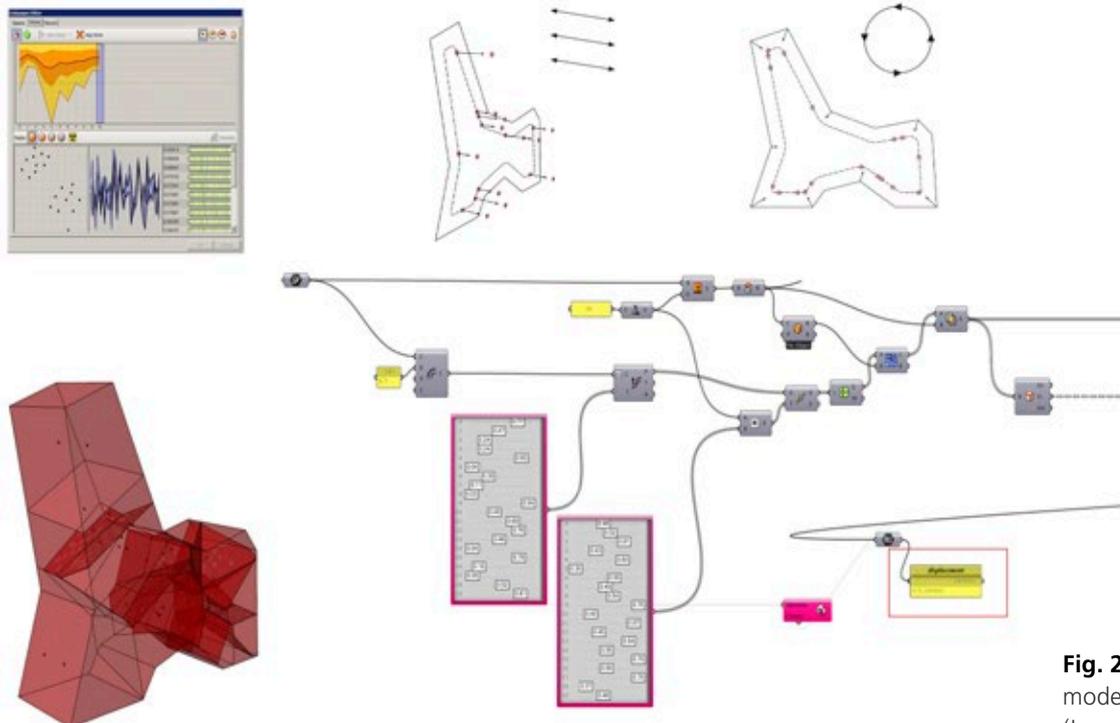
Este último ejemplo también implementa un proceso de optimización con GA utilizando el plug-in Galapagos desde GH, pero esta vez basándose en los resultados de evaluaciones estructurales para minimizar la deformación de la estructura. La herramienta de simulación utilizada fue Karamba, que implementa procesos de análisis de elementos finitos dentro de la interfaz de GH. El proyecto pretendía crear una silla ligera usando una estructura de células Voronoi en tres dimensiones con desarrollos para fabricación usando procesos CNC de corte láser, dentro de un proceso preparado y guiado por el creador de la herramienta de simulación, Clemens Pressinger (figuras 23 y 24).

---

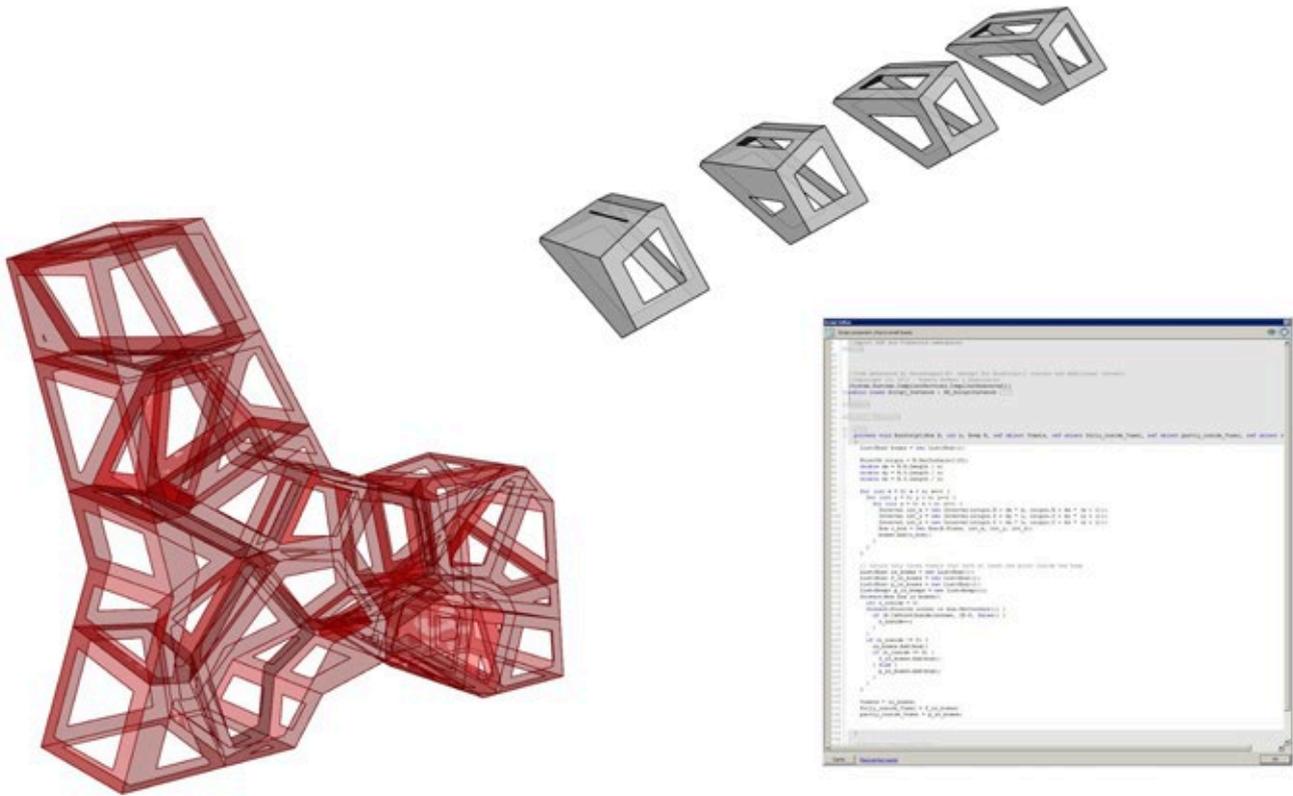
**5.** Proyecto realizado por Rodrigo Velasco y Patric Günther, bajo asesoría de Clemens Pressinger.



**Fig. 23** Definición de modelo para simulación (Imágenes: Patric Günther)



**Fig. 24** Definición de modelo para optimización (Imágenes: Patric Günther)



**Fig. 25** Definición de modelo para segunda fase de optimización y fabricación (Imágenes: Patric Günther)

El objetivo del proyecto era encontrar una configuración para transmitir a los soportes las cargas aplicadas, minimizando las deformaciones y el material utilizado (peso). El proceso involucró dos fases dentro de la optimización, la primera fue puramente geométrica, en busca de diferentes configuraciones de células usando celdas de Voronoi, a partir de un procedimiento semi-aleatorio para diferentes posibles configuraciones de centroides, cuyas configuraciones fueron simuladas estructuralmente, y la segunda fase consistió en la adaptación de las secciones de cada elemento para cumplir con sus requisitos de carga

específicos, y así evitar áreas sobre-estresadas. Este último procedimiento se llevó a cabo a través de script utilizando Python dentro de la herramienta de simulación FEA (figura 25).

Probablemente una de las particularidades de este ejemplo es que la definición geométrica fue concebida desde un principio para la fabricación utilizando máquinas CNC, lo cual facilita la integración del proceso iterativo aquí propuesto (análisis-generación/simulación-optimización/visualización-fabricación).

# CAPÍTULO 4 //

## VISUALIZACIÓN Y FABRICACIÓN

*Aaron Brakke*

El presente texto es resultado de una investigación en curso en la que hemos identificado varias fases críticas:

1. Análisis y generación, 2. Simulación y optimización, y 3. Visualización y fabricación de un proceso de diseño iterativo que trata las complejidades del problema de diseño contemporáneo. A continuación nos ocuparemos de la fase de visualización y fabricación. Estos dos procedimientos son importantes para el diseñador para reunir información más detallada que contextualice las decisiones de diseño en términos de materiales, performance (desempeño medio ambiental, estructural, etc.) y asociaciones espaciales. Además de influir el proceso de diseño, la visualización y fabricación son herramientas cruciales en la comunicación del diseño.

## 4.1 VISUALIZACIÓN

### 4.1.1 COMUNICACIÓN GRÁFICA

La intención de esta sección es ofrecer comentarios sobre la importancia de la visualización en el proceso de diseño arquitectónico aumentado digitalmente. Al igual que Frank Ching abrió su tercera edición de gráficos de arquitectura al afirmar que el objetivo era “dar a conocer al estudiante que comienza la gama de herramientas gráficas que están disponibles”, esto mismo sucede con este documento. Ching continúa transmitiendo:

[inicio de cita] La premisa básica detrás de su formación es que los gráficos son una parte inseparable del proceso de diseño, una importante herramienta que proporciona al diseñador no sólo los medios para presentar un diseño, sino también para comunicarse consigo mismo y con los demás en el estudio de diseño... Es importante señalar aquí que la comunicación gráfica requiere de habilidades mentales, así como de destreza manual. Debemos reconocer que los gráficos, el producto final físico que siempre nos preocupa, son en sí mismos el

resultado de un proceso de diseño, un análisis cuidadoso de qué, cuándo y dónde se emplea una técnica gráfica, así como la ejecución de la técnica (Ching, 1996, p. VII, traducción del autor). [fin de cita]

Esto fue escrito a finales del siglo xx, en momentos en que las mesas de dibujo se estaban eliminando de las oficinas de arquitectura para ser remplazadas por software CAD, tal como Microstation y AutoCAD. En los veinte años que han pasado, el poder de la informática se ha incrementado exponencialmente mientras que los precios de la tecnología han disminuido drásticamente, lo que da espacio a un proceso activo de experimentación y adaptación. Esto ha llevado a una relación fundamental en la que CAD esta dejando de ser *dibujo asistido por computador* para convertirse en lo que el acrónimo inicialmente estaba destinado a significar: *diseño asistido por computador*. Esto ha comenzado a alterar el proceso de diseño tanto como para requerir una articulación de tendencias y un mayor potencial.

## 4.1.2 CONTEXTUALIZACIÓN DEL TÉRMINO “VISUALIZACIÓN”

¿Por qué llamar a esta sección de “visualización”, en contraposición a “imagen”, “dibujo” o “representación”? El término “visualización” se utiliza para describir el proceso de evocar pensamientos positivos con el fin de alcanzar un objetivo. Esta definición no se limita a las artes creativas, sin embargo, esto parece describir muy bien los primeros pasos en el proceso de diseño arquitectónico. Visualizar significa evocar ideas creativas, hacerlas perceptibles y formular activamente imágenes mentales. Además “visualización” significa hacer visible, lo cual puede implicar una imagen, dibujo, diagramación y modelado para representar y comunicarse de manera tangible.

La visualización en la disciplina de la arquitectura se ha referido tradicionalmente a proyecciones ortográficas y dibujos en perspectiva para comunicar las intenciones de diseño; es el legado del Renacimiento. Dibujos a diversas escalas, desde lo micro (detalles) a la macro (contexto urbano), los fragmentos presentes que se combinan para entender el “todo objetivo”. La capacidad predictiva de la parte con relación al conjunto, se articula a fondo por primera vez hace más de

200 años en el texto *Précis des Leçons d'Architecture* de Jean Nicolas Louis Durand.

Estas representaciones proyectivas se basan en las conexiones sintácticas reductivas”, afirma Alberto Pérez-Gómez, y continúa explicando que se espera que estos dibujos sean “absolutamente inequívocos para evitar posibles malas interpretaciones, así como que tengan la función de ser eficientes instrumentos neutros, sin otro valor inherente que su capacidad para la transcripción exacta (Pérez-Gómez, 1997, p. 3, traducción del autor).

Este sistema de representación ha demostrado ser menos que ideal para la situación contemporánea. Por un lado, el objeto arquitectónico ha evolucionado para ser más ‘inteligente’ (edificios contemporáneos dependen de sistemas de sensores y controles para manejar el HVAC, etc. con el fin de obtener niveles más altos de performance del edificio) y se ha vuelto más complejo geométricamente (a menudo definida por geometrías no euclidianas). Por otro lado, la

expectativa del sujeto condicionado a la cultura visual contemporánea (era de la pos-información) es mucho mayor en términos de la articulación de las imágenes utilizadas para comunicar la propuesta de diseño y la inmediatez de la disponibilidad de información.

El sujeto contemporáneo está inmerso en imágenes: desde fotos y películas hasta gráficos computarizados del espacio de los videojuegos. Esta realidad mediada ha afectado profundamente la experiencia vivida y la forma como se entiende su experiencia en el mundo. Es importante subrayar que las posibilidades brindadas por la computación están haciendo posible interactuar con las complejidades contemporáneas, lo cual, en práctica, no es posible con las herramientas análogas. La evolución de la pasada década nos ha llevado de condiciones de “virtual” hacia condiciones “híbridas”, las cuales conectan los bits y átomos. Las herramientas de visualización digitales que se ejemplifican en esta sección se refieren a la posibilidad de abordar esta última condición.

## 4.1.3 TIPOS DE PROCESOS Y HERRAMIENTAS

Los tipos de visualización presentados incluyen representaciones digitales, realidad aumentada y entornos interactivos. Al igual que en las otras secciones, el material presentado es una pequeña muestra de un gran cuerpo de investigación y desarrollo. La intención es abrir la discusión a las posibilidades que desafían la homogeneidad estática de las normas establecidas hace 2 siglos.

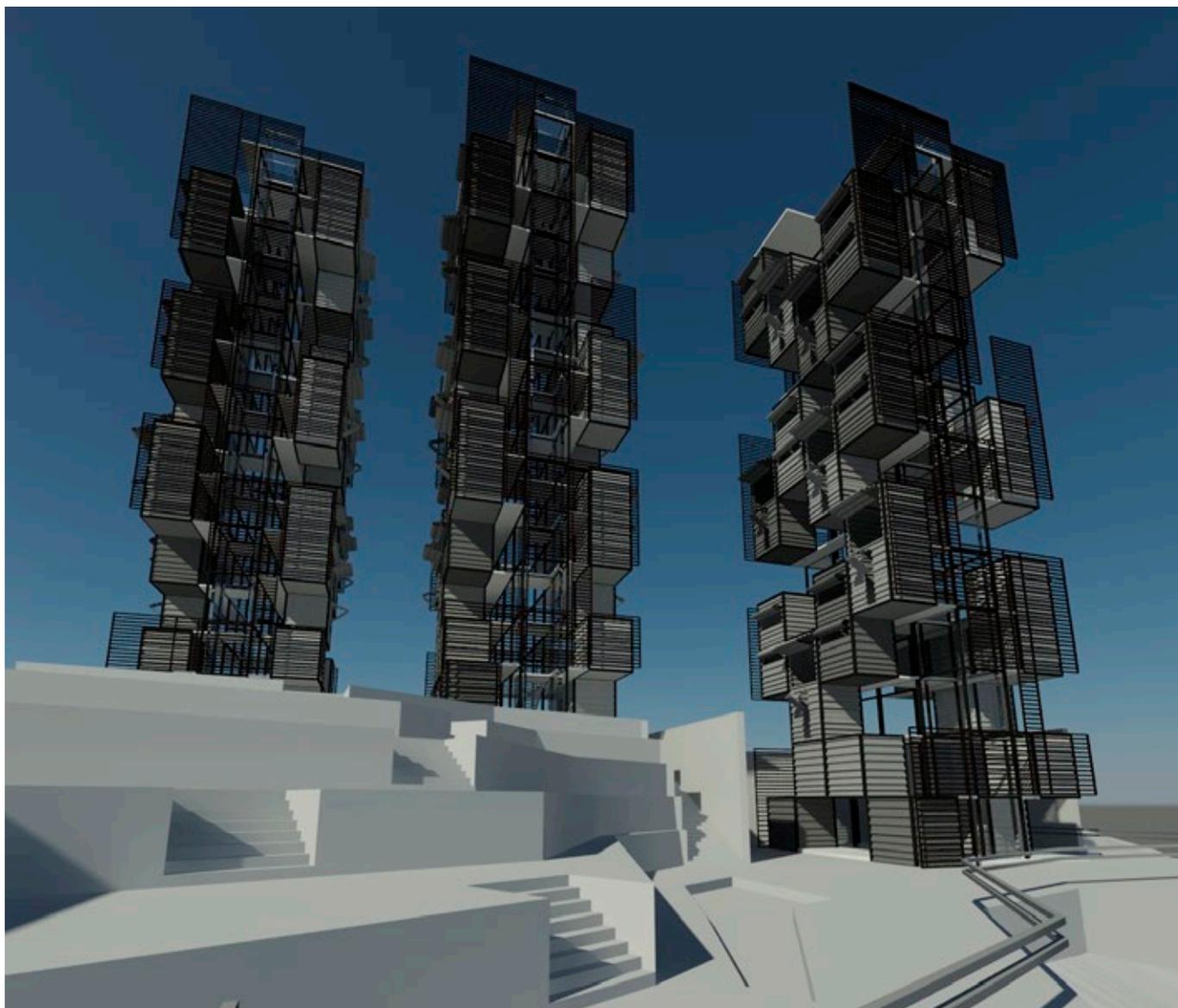
## A. REPRESENTACIÓN DIGITAL

*Uno de los aspectos curiosos de la tecnología digital es la valorización de un nuevo realismo. Desde efectos especiales de Hollywood a la representación arquitectónica, el éxito de la nueva tecnología se mide por la capacidad de representar a la perfección lo auténtico (Allen, 1998, p. 246, traducción del autor).*

Como se señala en la cita de apertura, el interés en la simulación de lo real ha crecido significativamente en la última década. Varios módulos adicionales tales como V-ray del Chaos Group, Lumion, Mentalray o Maxwell Render, han sido creados como complementos para el software de modelado, tales como Autodesk's 3ds Max, Maya y Softimage, Cinema 4D y Google Sketch-Up, que permiten al usuario simular materiales, texturas, ray-trace, reflejos, refracción, iluminación (directa e indirecta) y efectos de cámara. Estos motores de renderizado son tan poderosos que no solo se han utilizado en la visualización arquitectónica, sino también en las películas de Hollywood. Además del desarrollo del software Mentalray, Nvidia ha

introducido CUDA tecnología que es un parallel computing platform (plataforma de computación paralela) que extiende las capacidades del hardware. Varios críticos se han referido al poco deseable efecto adormecedor que estas imágenes de "simulacro y simulación" pueden tener en el espectador, sin embargo, la crítica no parece basarse en los hechos. A partir de nuestros estudios, los espectadores no se han centrado en las cuestiones vanas, por el contrario, parece que se han identificado más rápidamente con las escenas y han sido capaz de habitarlas.

- *V-Ray:* <http://www.chaosgroup.com>
- *Lumion:* <http://lumion3d.com>
- *Mentalray:* <http://www.nvidia.com/object/nvidia-mental-ray.html>
- *Maxwell Render:* <http://www.maxwellrender.com>
- <http://www.bentley.com/en-US/Promo/Generative%20Components/default.htm>
- *Nvidia CUDA:* [http://www.nvidia.com/object/cuda\\_home\\_new.html](http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html)



**Fig. 26:** El imagen es un proyecto que sirve como ejemplo de un proyecto modelado digitalmente en 3d. (Autor: WHITEKNEE/Aaron Brakke & Manuel Peralta)



**Fig. 27:** El imagen muestra como el modelo puede estar renderizado con Mentalray, un plug-in incluido con Autodesk 3ds Max. (Autor: WHITEKNEE/Aaron Brakke & Manuel Peralta)

## B. REALIDAD AUMENTADA

Realidad aumentada se refiere a la mezcla de la realidad digital y háptica. Esta es una nueva tecnología que permite a las capas digitales de información ser visualizadas sobre el mundo físico. Hay varios tipos de aplicación, entre los que se encuentran soluciones basadas en marcadores, en la imagen y en sensores. Cada uno puede ser utilizado en la arquitectura en diversas escalas. Es posible visualizar soluciones de diseño al instante impuestas sobre una mesa, usar Google Glasses para ver el funcionamiento de un edificio existente, sostener un iPad frente a un terreno vacío y al instante ver aparecer una construcción futura o mágicamente traer de vuelta estructuras históricas. Realidad virtual se refiere a la experiencia mediática inmersiva cual tiene la capacidad de simular la realidad física. El desarrollo de software como Unity brinda posibilidades de crear mundos interactivos. El desarrollo de hardware como Oculus Rift tiene la

capacidad de simular la visión normal a través de sensores de movimiento de posición y rotación. Todas estas experiencias presentan un potencial enorme al mezclarse perfectamente lo físico con lo digital.

Development Platforms and Software:

- *Vuforia*: <http://www.qualcomm.com/products/vuforia>
- *ARToolKit*: <http://artoolkit.org>
- *InfinityAR*: <http://www.infinityar.com>
- *Mixare*: <http://www.mixare.org/>
- *AR-media*: <http://www.armedia.it/>
- *Layar*: <https://www.layar.com>
- *Unity*: <http://unity3d.com>

Hardware:

- *Google Glass*: <https://www.google.com/glass/start>
- *Oculus Rift*: <https://www.oculus.com>
- *Gear VR*: <http://www.samsung.com/global/microsite/gearvr/index.html>

## C. VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

El diseño de información ha sido un área importante dentro de la disciplina del diseño gráfico por bastantes años, pero en las últimas décadas, ha surgido otra área llamada visualización de la información. Ambas áreas presentan datos cuantificados con vocabulario interno similar (puntos, líneas, planos, curvas, formas geométricas básicas –2D y 3D–) para crear imágenes visuales. El diseño de información presenta la información en forma de tablas de líneas, gráficas de barras, gráficas circulares, etc.

Todas estas técnicas fueron desarrolladas antes del computador. Generalmente estas imágenes se limitan a una o dos dimensiones de información. La visualización de información se extiende más allá de estos límites, mostrando más niveles de relación dentro de una imagen. También, por naturaleza, permite el tratamiento de conjuntos de datos mucho más grandes, generalmente basados en las conexiones de red. La estética de las imágenes producidas generalmente es compleja y representa el interés en matemáticas y conceptos científicos, tales como teoría de la complejidad, fractales, bio-mimetismo, la emergencia, la teoría del caos, etc. Esta forma de arte del siglo xxi busca revelar las verdades invisibles de nuestra sociedad de la información.

En la arquitectura, se puede utilizar una variedad de escalas para entender la huella de carbono, de dónde provienen los componentes, cómo se realiza un edificio, los flujos de personas a medida que se mueven por una ciudad, etc. Otro aspecto interesante es que la visualización de la información puede utilizar los medios locativos, realizar un seguimiento y presentar los resultados en tiempo real en un dispositivo móvil en cualquier parte del mundo.

Software:

- *Processing*: <https://processing.org>
- *Lumira*: <http://getlumira.sapstore.com>
- *WolframAlpha*: <http://www.wolframalpha.com/>
- *Visual.ly*: <http://create.visual.ly/>
- *D3.js*: <http://d3js.org/>
- *Tableau*: <http://www.tableau.com/products/desktop>

## 4.2 FABRICACIÓN DIGITAL

Los edificios fueron alguna vez dibujos materializados, pero ahora, cada vez más, son la materialización de la información digital - diseñados con la ayuda de sistemas de diseño asistido por computador, fabricados por medio de máquinas de control digital, ensamblados en sitio con la ayuda de dispositivos de distribución y posicionamiento digitales, y generalmente inseparables de flujos de información a través de redes informáticas mundiales. (Mitchell, 2005, p. 80-89, traducción del autor)

## 4.2.1 “TECHNE” DIGITAL

Así como la elaboración y el diseño se han convertido en “asistidos por computador”, también lo ha hecho la fabricación (CAD/CAM). Esto implica la transferencia de modelos digitales 3D a la realidad física 3D. Hay muchas formas y tecnologías disponibles, pero antes de explicar estos detalles, es importante comprender la importancia histórica del *fabricar*.

Remitiéndonos a los escritos de Heidegger sobre el origen de una obra de arte, vamos a examinar la etimología de la palabra “técnica”. Técnica es una palabra francesa que se refiere a los detalles formales aplicados en la manifestación artística y que parece provenir de la palabra griega *tekhnikos*. En *El origen de una obra de arte*, Heidegger explica que “techne”

fue utilizado por los griegos tanto para “arte” como para “artesanía”, pero supera nuestra comprensión técnica contemporánea, ya que no se refiere a la práctica y al hacer, sino a un modo de conocer: “Techne, como conocimiento experimentado de la manera griega, es un engendrar de los seres” (Heidegger, 1997, p. 121).

A pesar de que la disciplina arquitectónica abandonó el acto de la construcción hace más de 500 años, la fabricación digital le permite ahora al arquitecto contemporáneo cerrar la brecha entre el diseño y la construcción. A nivel académico, estas tecnologías permiten posibilidades más fluidas de conexión de las realidades digitales y materiales a través de modelos

a escala o incluso prototipos 1:1. A través de este acto de hacer, se es capaz de engendrar la dimensión material de la *techne*, como se describe en la teoría de Vitrubio.

Esta condición se manifiesta además por una nueva tendencia de los entornos de trabajo en grupo en la que personas de diferentes disciplinas se unen para formar equipos interdisciplinarios para analizar, diseñar y desarrollar soluciones. Uno de estos espacios físicos que ha implementado en todo el mundo es la fabLAB. Esta idea fue fundada por Neil Gershenfield, que trabaja en el MIT con el Centro de Bits y Átomos. El objetivo de Gershenfield era crear un entorno de herramientas digitales donde las ideas se podrían probar, mejorar de modo que cualquier persona puede crear casi cualquier cosa. Estos centros han empezado a aparecer en todo el mundo como una red solo posible a través de la computación y las herramientas digitales.

Con los desarrollos en lo “digital”, estamos empezando entender que “arquitectura digital” significa más que geometrías complejas y visualizaciones abstractas. Entendemos que “digital” también significa implicaciones en los campos de fabricación (*art and craft of making*) y de materialidad.

## 4.2.2 TIPOS DE PROCESOS Y HERRAMIENTAS

La fabricación digital se entiende como un proceso computacional capaz de alterar y transformar la realidad material. La tecnología actual se clasifica generalmente dependiendo de si es aditivo o sustractivo, pero también hay técnicas de transformación material. Las posibilidades brindadas a los estudiantes y a los profesores en los escenarios académicos han empezado a estimular un cambio en la manera de pensar y hacer la arquitectura a través de la habilidad de hacer prototipos rápidos e instalaciones a escala 1:1.

## A. TECNOLOGÍA ADITIVA

Las técnicas aditivas incluyen el área de impresión 3D, la cual ha tenido una evolución significativa. El modo tradicional es conocido como estereolitografía (STL), que utiliza rayos láser y luz ultravioleta para solidificar un líquido. El costo involucrado es bastante alto (por lo general, más de \$ 100.000 USD), mientras que la revolución de la impresión 3D personal ha creado una variedad de máquinas de bajo costo que utilizan plásticos como el ABS o PLA.

La estereolitografía (STL) fue desarrollada a principios del 1980 (patentado en 1984) y fue seguida por tecnologías como modelado de polímero fundido (patentada en 1991). El modelado de polímero fundido difiere de la estereolitografía en que el polímero se calienta para cambiar de estado de sólido a líquido y es dispersado por un brazo robótico en los ejes "X"

y "Y" para establecer cada capa del eje "Z". Ahora hay nuevas versiones de estas invenciones que pueden costar menos de \$3.000 USD, que hacen mucho más posible que antes su obtención y utilización para la fabricación de modelos, prototipos y partes. Además de estos desarrollos de formatos pequeños, hay máquinas inventadas que están imprimiendo mezclas de concreto y/o arcilla a la escala de edificios.

Una tendencia creciente es el uso de brazos robóticos para generar nuevas formas, tanto de fabricación aditiva como de fabricación sustractiva. Los brazos facilitan el proceso de construir a través de la comunicación directa con la computadora. Han sido utilizados en procesos tradicionales como hacer muros en ladrillo y también en procesos novedosos como estructuras de tejidos de fibra.

## B. TECNOLOGÍA SUSTRACTIVA

Al otro lado de la ecuación están los métodos sustractivos que utilizan CNC (máquinas controladas numéricamente para extraer el material). Estas máquinas incluyen fresadores, plotter de corte, cortadoras láser, plasma y routers.

- *MIT FabCentral: <http://fab.cba.mit.edu/>*

## 4.3 ESTUDIOS DE CASO

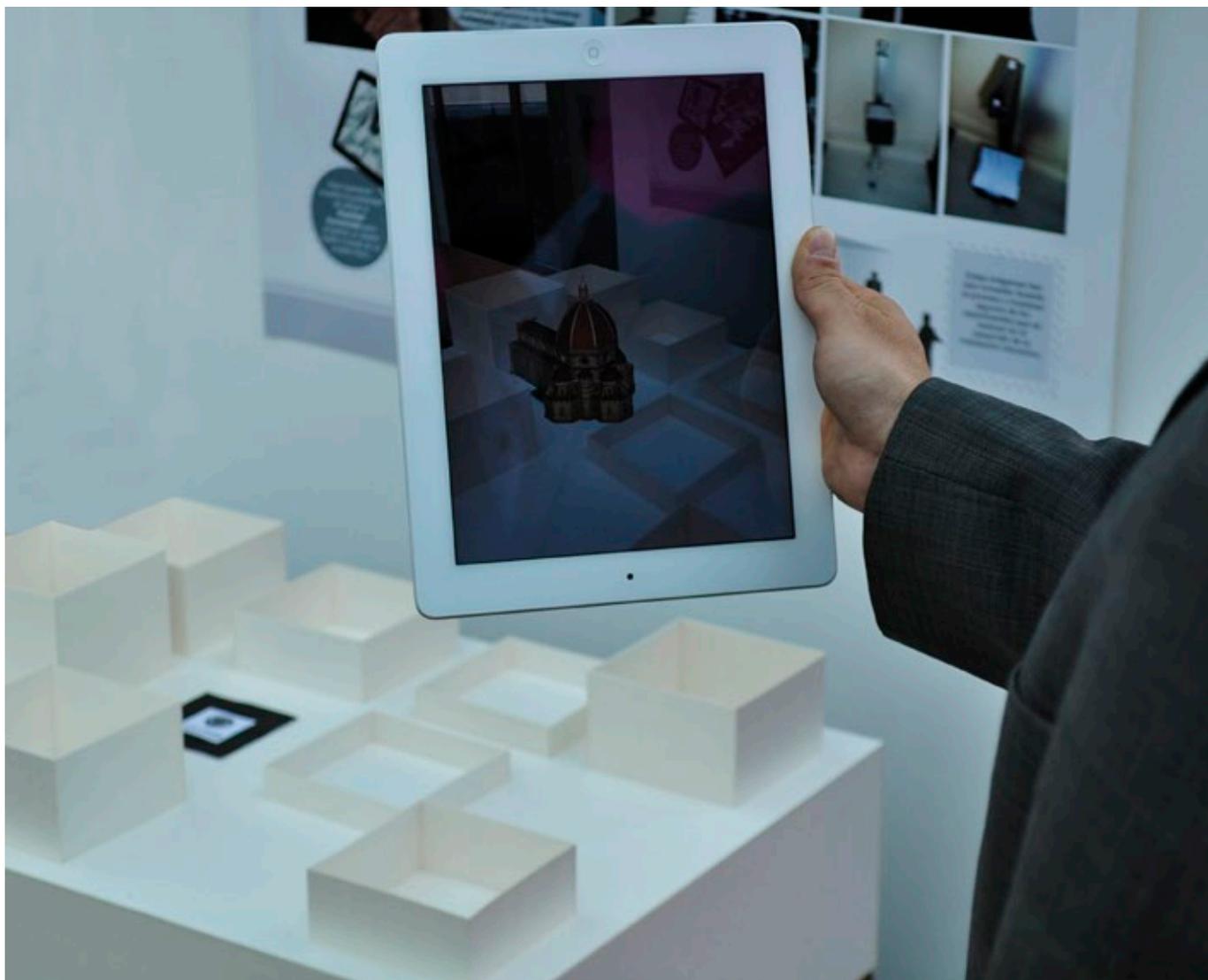
Los siguientes dos casos de estudio ilustran parte de la investigación que se llevó a cabo con un equipo multidisciplinario compuesto por Aaron Brakke (arquitecto), Oscar Herrera (ingeniero de sistemas) y Hernando León (ingeniero mecatrónico - robótico). La intención de la investigación es explorar el umbral entre lo físico y lo digital. En particular, hay un interés por encontrar formas que empiecen a disuadir la interacción digital de ser relegada a una pantalla de 2 dimensiones para llevarla a entornos inmersivos. Se ha explorado una variedad de escenarios (estudiados y diversos prototipos construidos), tales como pantallas holográficas, pantallas volumétricas, pantallas led en 3D, proyección de imagen estereográfica, entornos interactivos, sensores (IR y Kinect), realidad aumentada, etc.

Por otra parte, se han realizado varios experimentos. El ejemplo que se muestra aquí utiliza un plug-in de AR Medios para el software Autodesk 3ds Max (Fig. 28-30). Este les permite a los modelos 3D animados ser convertidos en modelos AR.

Se utiliza la tecnología de base de marcador (el cuadrado blanco y negro se encuentra en el modelo físico). Este ejemplo es de una aplicación de realidad aumentada en la Universidad Piloto de Colombia. La instalación fue parte de un evento llamado Innovarq que mostró la investigación actual del departamento de arquitectura. En esta instalación se creó un modelo físico, se llevaron a cabo demostraciones de realidad aumentada, y se realizó una encuesta para recoger opiniones sobre la experiencia. Un porcentaje muy alto nunca había interactuado con esta tecnología, otros ni siquiera habían oído hablar de ella. "Wow", "fluido", "emocionante", fueron algunos de los adjetivos utilizados para describirlo. Los profesores que participaron ven esto como una solución muy viable para el estudio de diseño de las fases conceptuales tempranas para la presentación final. (Fig.28, 29, 30)



**Fig. 28:** Render del prototipo de AR desarrollado por el grupo de investigación. (Autor: Aaron Brakke)



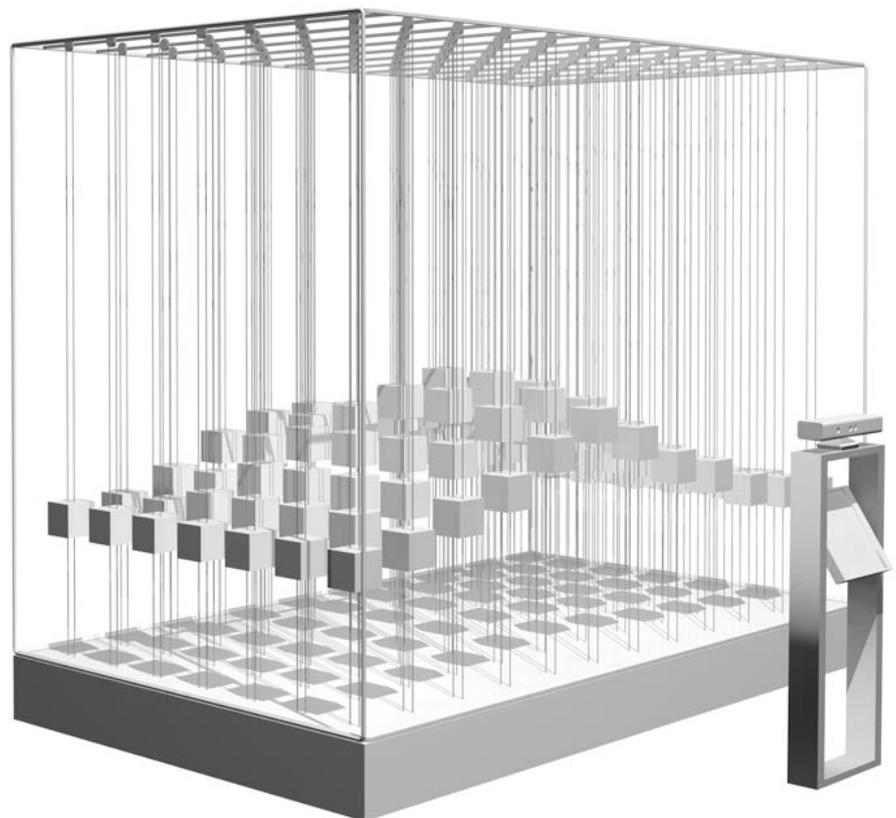
**Fig. 29:** Foto del prototipo de AR desarrollado por el grupo de investigación. (Autor: Aaron Brakke)



**Fig. 30:** Foto del prototipo de AR desarrollado por el grupo de investigación. (Autor: Aaron Brakke)

El segundo estudio de caso de este proyecto consiste en el diseño y desarrollo de un sistema de modelado 3D que detecta movimientos corporales, procesa la información y la convierte en coordenadas cartesianas que se manifiestan en un modelo físico dinámico de manera instantánea. El sensor utilizado es la primera versión de la Kinect lanzado para Microsoft Windows. Los datos recogidos por el sensor se transmiten a un

software desarrollado en el entorno Eclipse de Java, que al ser procesados se envían al dispositivo robótico físico que utiliza 48 servos y 48 sensores infrarrojos. Este prototipo es un pequeño paso en el desarrollo de Human-Computer Interaction (HCI) que pretende crear plataformas intuitivas de interacción entre lo físico y lo digital. (Fig. 31, 32, 33)



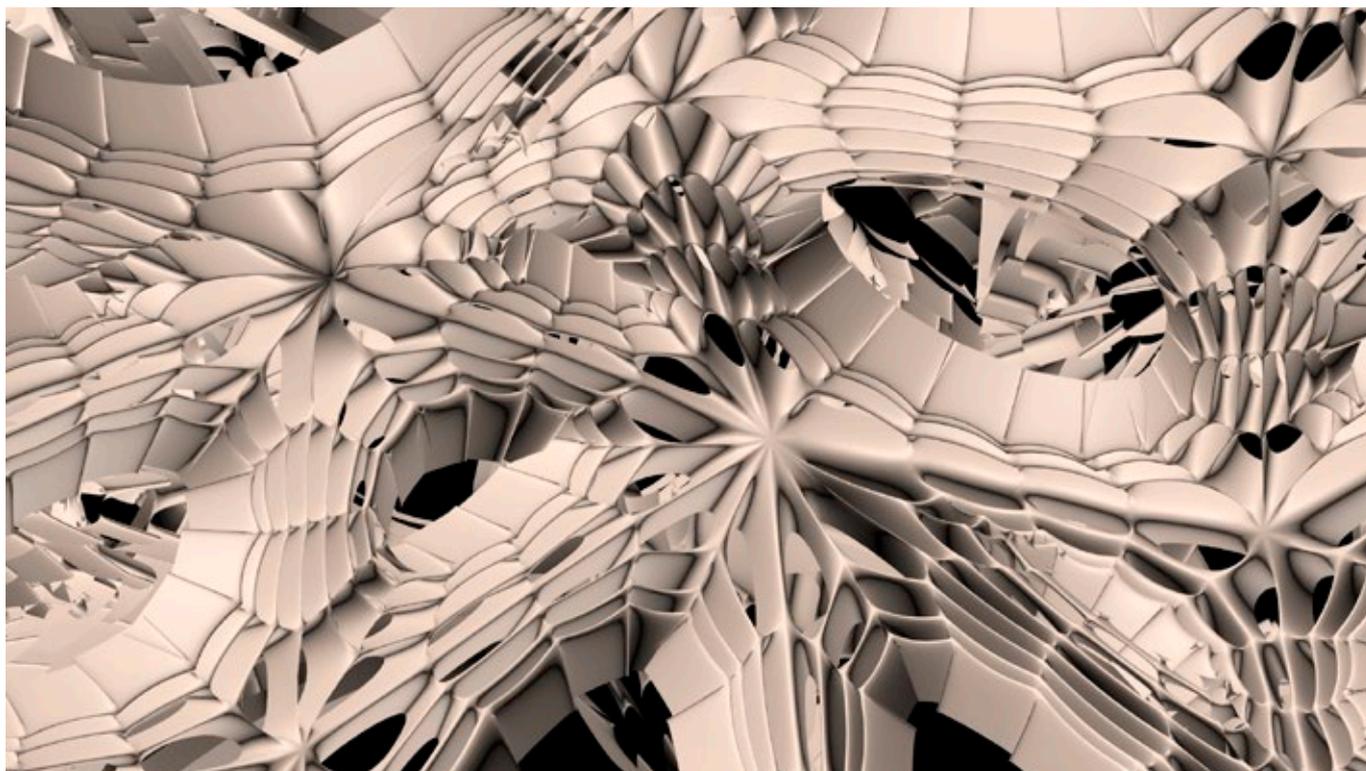
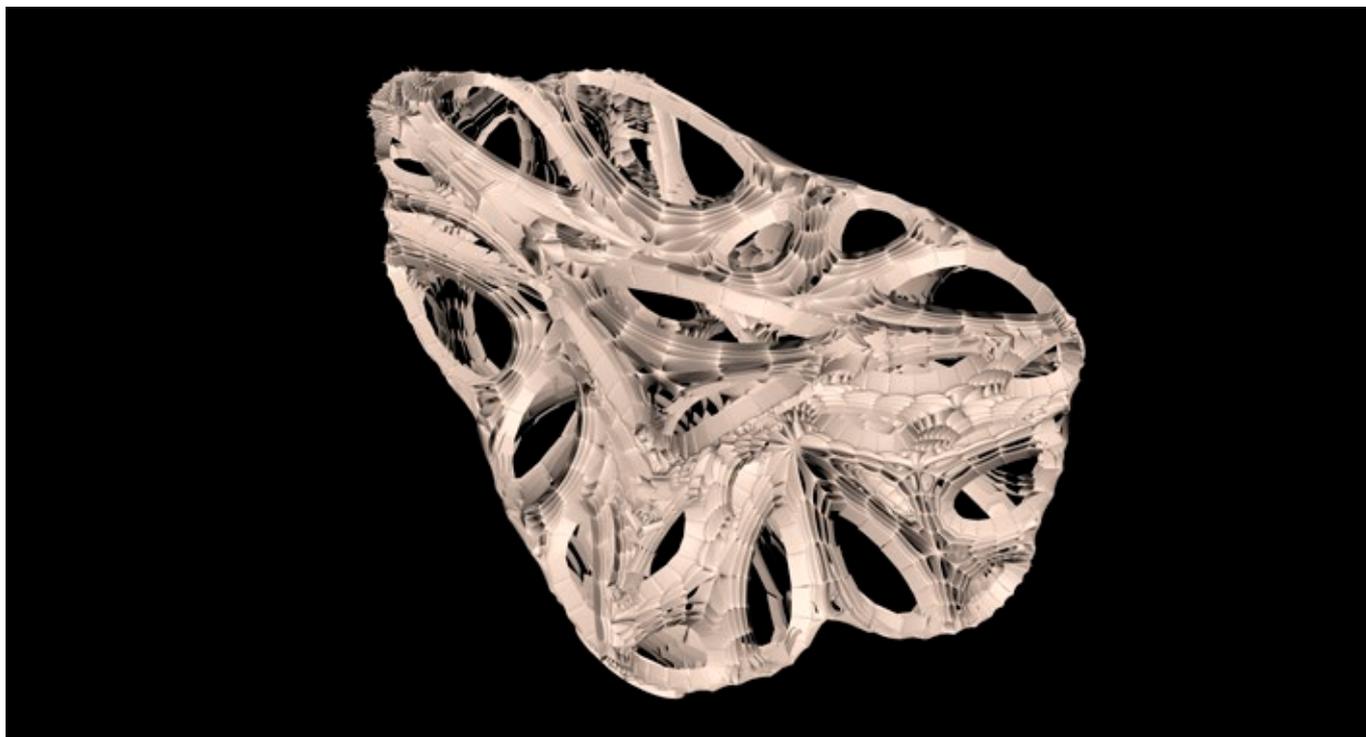
**Fig. 31, 32 y 33:** Fotos y render del prototipo de AR desarrollado por el grupo de investigación mencionado en el segundo estudio de caso. (Autor: Aaron Brakke)



El tercer estudio de caso es un ejemplo de los estudios que se están realizando y que se relacionan tanto con la visualización como con la fabricación digital. El proyecto tiene como primer objetivo estudiar la articulación de la forma geométrica de un cuadro deformado. Se llevaron a cabo una variedad de operaciones en el entorno de modelado de 3ds Max, en donde se exploró un aplanamiento continuo (tanto poli como spline) y una extrusión de estas estructuras de celosía para revelar una composición compleja. Subsecuentemente se utilizó un Makerbot Replicator

2 para imprimir la estructura. Los resultados fueron menores a lo esperado, debido al alto nivel de definición (articulación geométrica) del objeto y la baja resolución de la impresora. Sin embargo, esto se utiliza para ilustrar una obra en progreso que demuestra la idea de la fabricación digital-archivo a fábrica y un movimiento global de impresión personal en 3D.

*Fig. 34, 35, 36 y 37: Las imágenes son del tercer estudio de caso - un proyecto de WHITEKNEE. (Autor: WHITEKNEE/Aaron Brakke)*



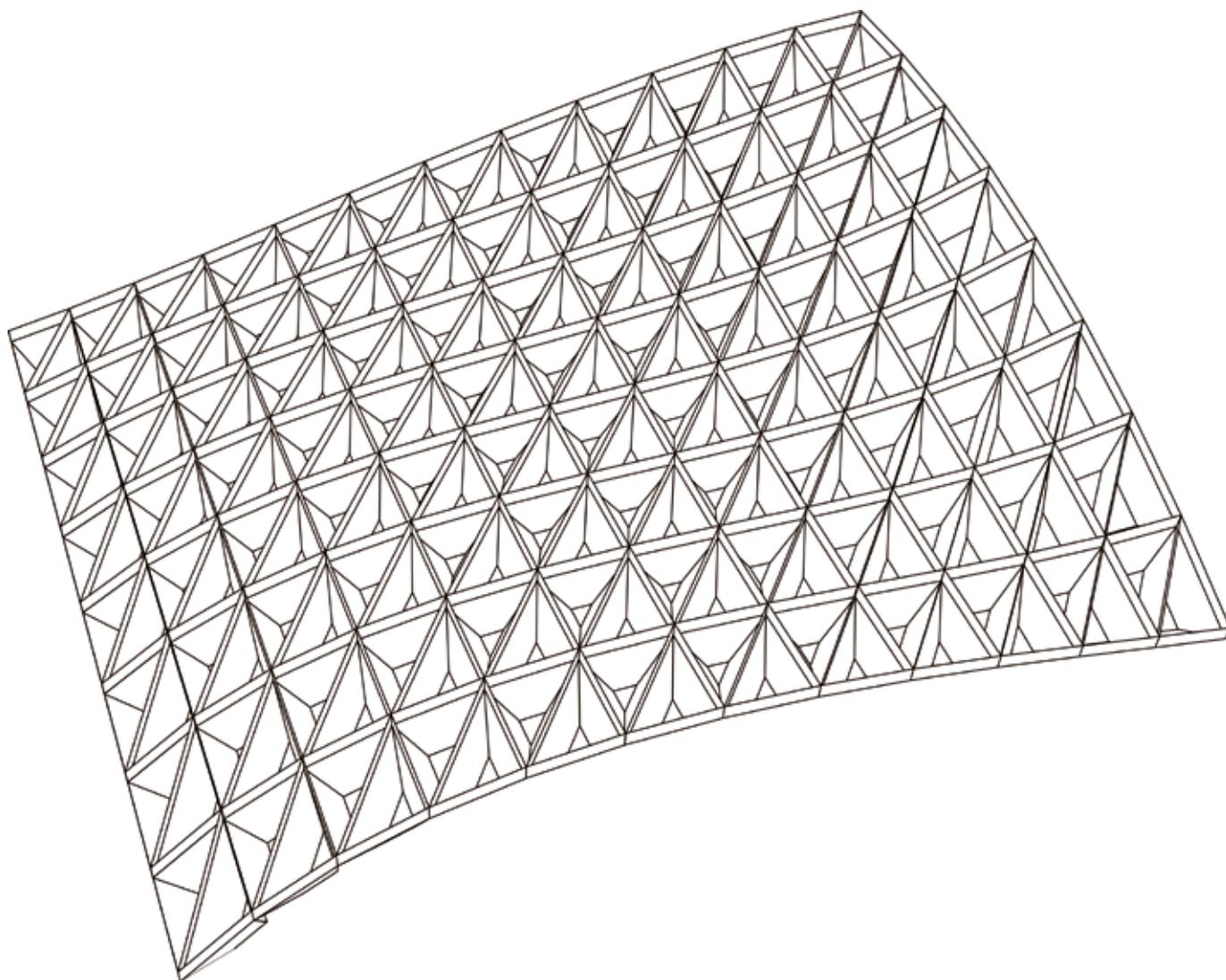




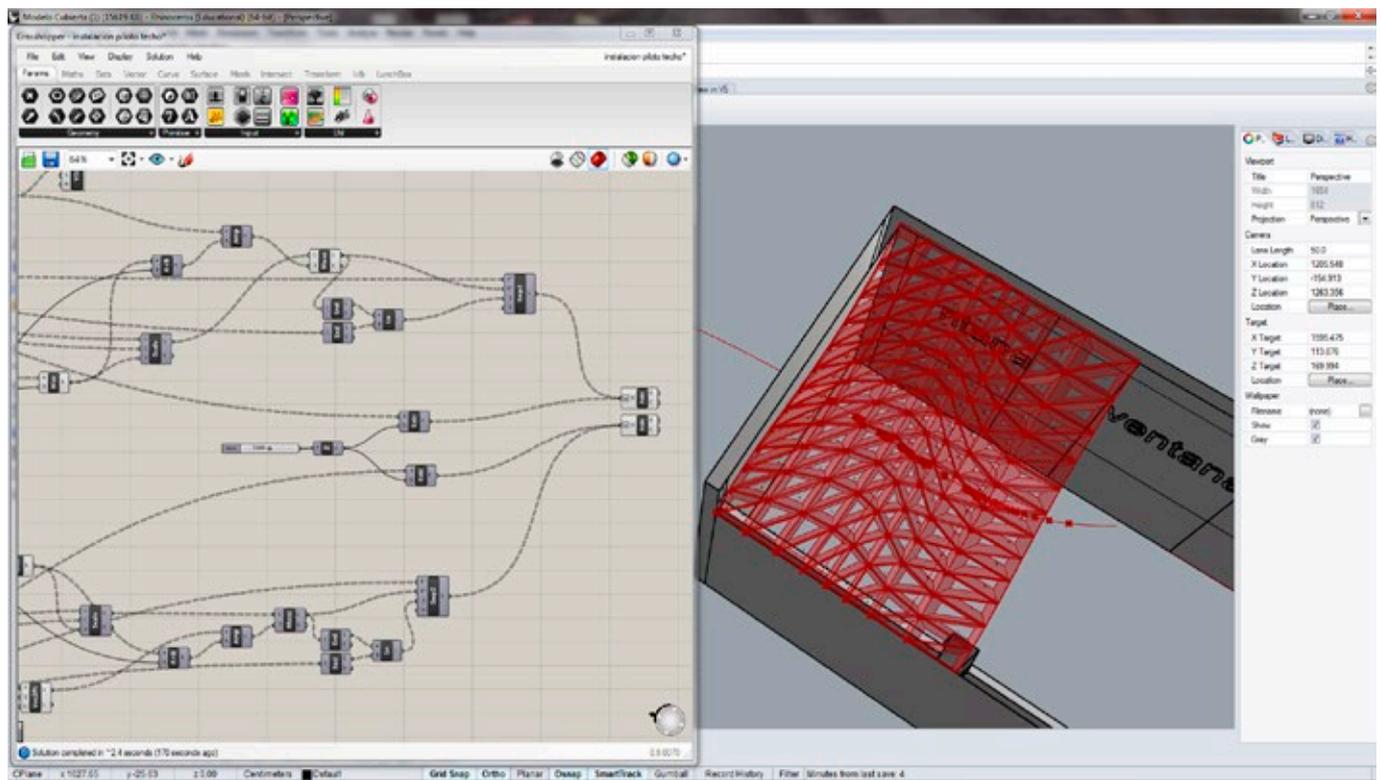
**Fig. 38,39,40:** Las imágenes son del cuarto estudio de caso - un proyecto semillero dirigido por Diego Chavarro. (Diego Chavarro)

El cuarto ejemplo es un proyecto estudiantil; un pabellón que fue diseñado, detallado por César Díaz, Ivanna Díaz y Julian Viasus y fabricado por todo el grupo de Diseñar Fabricar (profesor Diego Chavarro). Esta construcción fue diseñada para un área de la universidad en donde no existe una transición entre el interior y el exterior y esto se entiende como una simple intervención para remediar esta condición. Los parámetros de diseño para la forma se vieron influenciados por el

recorrido del sol con el fin de proporcionar una mezcla siempre cambiante entre la entrada de los rayos de luz directa y el contraste con la sombra que no había existido previamente en este espacio. La definición geométrica de plegamiento estuvo dirigida a proporcionar la capacidad estructural necesaria para sostener la estructura (carga vertical de la gravedad y la carga de viento horizontal) en tensión.



**Fig. 39:** Proyecto semillero dirigido por Diego Chavarro.  
(Diego Chavarro)



**Fig. 40:** Proyecto semillero dirigido por Diego Chavarro.  
(Diego Chavarro)

# Conclusiones

Gracias al reciente avance y popularización de equipos (hardware) y herramientas pre-programadas para el procesamiento de datos (software), durante los últimos años se ha generado un gran interés en incorporar el uso de tecnologías computacionales en el campo de la arquitectura, las cuales a su vez han catalizado cambios innovadores en la forma de pensar y hacer la arquitectura. En términos del proceso de diseño, las herramientas digitales no solo han servido para agilizar procesos tradicionales, sino que han cambiado las metodologías, utilizando el computador como un medio creativo para la generación de diseños, simulación y visualización de proyectos.

El manejo de herramientas digitales es cada vez más importante para los arquitectos, de manera que la Universidad tiene un rol importante en fomentar el uso de estas tecnologías dentro del proceso de aprendizaje, con el propósito de que los estudiantes sean capaces de hacer contribuciones relevantes en la práctica contemporánea.

En este contexto, el presente texto propone una particular adaptación del uso de herramientas digitales dentro del proceso de diseño arquitectónico, fruto de experiencias académicas dentro del Programa de Arquitectura de la Universidad Piloto de Colombia. El proceso propuesto implica la adopción de técnicas específicas apoyadas en herramientas computacionales

dentro de fases particulares del proceso de diseño, de una manera iterativa. De esa manera, más que un nuevo proceso de diseño, el texto plantea una manera particular de usar herramientas computacionales disponibles dentro del clásico ciclo generación-análisis-construcción, proponiendo ahora tres fases duales para el mismo proceso, a saber: análisis/generación-simulación/optimización-visualización/fabricación, sugiriendo además el uso de procesos y herramientas particulares dentro de cada una de las sub-fases. Si bien es cierto que los métodos sistemáticos para resolver problemas han sido comúnmente utilizados en las ingenierías, y que han llegado a ser integrados en la práctica del diseño (incluso arquitectónico) desde comienzos de los años sesenta (Bayazit, 2004), hay que anotar que a diferencia de esas primeras adaptaciones, por cierto, desde sus inicios consideradas algo ingenuas al ignorar la complejidad del problema de diseño, el planteamiento aquí propuesto es bastante menos rígido. No pudiendo ser clasificado como un método, sino más bien como la posible integración de procedimientos computacionales dentro de un proceso genérico, el proyectista vuelve a tomar completo control de las decisiones de diseño, aún sí es informado por tales procesos.

A manera de primera validación, se describen aquí nueve casos de aplicación dentro del contexto académico, donde diferentes procedimientos computacionales han sido integrados dentro del proceso de diseño propuesto. Es claro, sin embargo, que esta propuesta es solo un primer paso en la incorporación de tales metodologías de manera habitual dentro del proceso académico en el programa, y que aún se requiere mayor experiencia y evaluación de resultados para afinar y especificar procesos, pero se espera que tales avances puedan realizarse en el transcurso de los próximos años.

# Referencias

- Allen, S. (1998). Terminal velocities: The computer in the design studio. en Beckmann, J. (Ed.). *The virtual dimension: architecture, representation, and crash culture*. New York: Princeton Architectural Press.
- Architectural Design. (2013). *Computational works: The building of algorithmic thought.*, Hoboken, NY,USA
- Bayazit, N. (2004). *Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research in Design Issues*, 20 (1). Massachusetts Institute of Technology.
- Ching, F. (1996). *Architectural Graphics 3rd Edition*, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Chu, K. (2006). `Metaphysics of Genetic Architecture and Computation. *AD*, 76 (4). Mike Silver. (Eds.), *Programming cultures: Art and Architecture in the age of software*. Wiley. Hoboken, NY,USA
- De Landa , M. *Deleuze and the use of the Genetic Algorithm in Architecture*. Recuperado de <http://www.mat.ucsb.edu/~g.legrady/academic/courses/08f200a/sites/SS/refs/deleuze.pdf>
- Flake, G. W. (1998). *The Computational Beauty of Nature: Computer explorations of fractals, chaos, complex systems, and adaptation*. Cambridge, USA: MIT Press.
- Hensel, M. (2013). *Performance-oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment*. United Kingdom: Wiley.
- Knippers, J. (2013). From model thinking to process design. *AD*, 83 (2). Peters, B. and De Kestelier X. (Eds.), *Computational works*. Wiley. Hoboken, NY,USA
- Heiddeger, M. (1997). The Origin of a Work of Art. In Leach, N. (Ed.).*Rethinking architecture: a reader in cultural theory*. New York: Routledge.
- Jones, J. (1970). *Design methods: seeds of human futures*. London, New York: John Wiley & Sons

- Lynn, G. (1999). *Animate Form*. New York, USA: Princeton Architectural Press.
- Meredith, M., et. al. (2008). *From Control to Design*. Barcelona, Spain: Actar-D.
- Mitchell, W. (2005). Constructing an Authentic Architecture of the Digital Era. In Beigl, M., Flachbart, G., & Weibel, P. (Eds.). *Disappearing architecture: from real to virtual to quantum*. Basel: Birkhauser.
- Mygayrou, F. (2012). Towards specific and generic engineering. In Hesselgren et al. (Eds.), *Advances in Architectural Geometry 2012*. Springer. Heidelberg, Alemania
- Perez-Gomez, A., & Pelletier, L. (1997). *Architectural representation and the perspective hinge*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Schumacher, P. (2012). *The Autopoiesis of Architecture, Volume II: A New Agenda for Architecture*. John Wiley & Sons. Hoboken, NY, USA
- Steadman, P. (1982). *Arquitectura y naturaleza: Las analogías biológicas del diseño*. Madrid: Blume.
- Weinstock, M. (2006). Self-Organization and the Structural Dynamics of Plants. *AD*, 76 (2). Hensel et al. (Eds.), *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*. Wiley. Hoboken, NY, USA
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. Oxon: Routledge.

# Diseño *Digital*

2015

