

## Heritage parametric modeling

Juan Pablo Portillo, Luis Flores.

Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Universidad de la República.  
Montevideo. Uruguay.  
[jportillo@fadi.edu.uy](mailto:jportillo@fadi.edu.uy), [lflores@fadi.edu.uy](mailto:lflores@fadi.edu.uy)

**Abstract.** The study focuses on the digital documentation and geometric modeling of the Susana Soca Chapel, an architectural masterpiece designed by Antonio Bonet in Uruguay. The chapel is known for its unique geometric form composed of equilateral triangles, and it holds significant historical and cultural value. The research utilizes advanced digital technologies such as laser scanning and photogrammetry to capture the three-dimensional data of the chapel. The model is then analyzed to establish compositional rules and generate a new model using Dynamo Revit and parametric design techniques. The results include a high-quality point cloud model, facilitating the exploration of generative design principles. The discussion highlights the use of non-explicit modeling tools in architecture, emphasizing the need to understand the underlying geometric principles that govern the creation of complex spatial compositions. The research aims to establish guidelines and protocols for the digital documentation and algorithmic design of architectural landmarks, presenting a challenging yet promising proposition in the field.

**Keywords:** Digital heritage, Dynamo, Point cloud, Parametric design, 3D scanning

### 1 Introducción

El repertorio patrimonial en Uruguay es actualmente objeto de estudio desde las tecnologías digitales de registro tales como el escaneo láser y fotogrametría.

En el marco del proyecto Fabricando Mundos que busca conformar un registro de obras mediante tecnologías de captura se utiliza la nube de puntos como estrategia fundamental.

En este contexto, uno de los casos elegidos es la capilla Susana Soca del Arq. Español Antonio Bonet, arquitectura perteneciente a la década del 60.

Se trata de una verdadera obra de arte, realizada a partir de un encargo de una importante familia de la época. Es una obra singular por su forma geométricamente definida a partir de triángulos equiláteros (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Esta capilla ubicada a pocos kilómetros de

la localidad de Soca se encuentra en un relativo buen estado de conservación y posee características formales y geométricas únicas.



Ilustración 1 foto del autor

Construida entre 1962 y 1966 la capilla se enmarca dentro del culto católico destinada a capilla mausoleo relacionada con la escritora Susana Soca, perteneciente a una importante familia que da nombre a la localidad cercana.

El edificio se presenta en planta como cruz latina (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) a partir de un rectángulo de 12 x 24 m, a la vez que utiliza un elemento simple como es el triángulo que parece gobernar toda la composición (Méndez, 2016). Éste se manifiesta como un fractal que va definiendo toda la geometría del conjunto como si se tratase de una operación matemática.

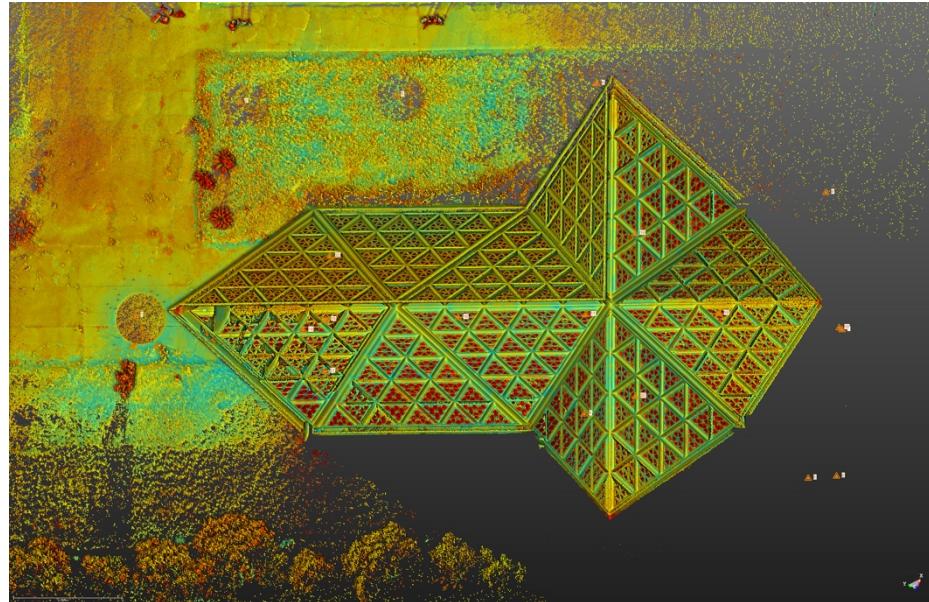


Ilustración 2 nube de puntos. Foto del autor

Es precisamente esta característica peculiar la que hace interesante modelar geométricamente el volumen a partir de diseño paramétrico generativo.

La capilla soca fue diseñada por el Arq. Español Antonio Bonet, un destacado arquitecto referente internacional (Ponte et al., 2008), en la localidad de uruguaya de Soca, a pocos kilómetros al norte del balneario Atlántida, dedicada a Susana Soca. Su construcción se inició en 1962.

Se trata de una obra de gran interés, como toda obra de Bonet, resuelta a partir de una estructura de hormigón armado que posee vitrales de colores en sus fachadas. Forma parte del acervo de arquitectura moderna en el Uruguay introducida por una serie de arquitectos formados en el extranjero (Lucchini, 1986).

En el marco del registro de obras patrimoniales mediante nube de puntos, tal como se expresa en la introducción del proyecto de investigación Fabricando mundos: “Este proyecto se presenta como un plan de acción para la recuperación, restauración y conservación digital del patrimonio arquitectónico uruguayo, a través de la utilización de tecnologías de escaneo 3D, con el propósito de construir un Metaverso patrimonial interactivo.” (Payssé & García Amen, 2016)

El objetivo general del trabajo presentado en este paper es por un lado obtener un modelo digital del edificio del tipo nube de puntos, que es ya una información valiosa de cara a la preservación del patrimonio y por otro modelar el edificio mediante el uso de algoritmos de Dynamo Revit. Ambos modelos

son contrastados para confirmar o no la hipótesis de que todo el conjunto responde a una ley de generación geométrica como es el tetraedro. Por ultimo se busca que el modelo obtenido mediante el uso de algoritmos nos proporcione el "ADN" de la geometría (Jabi, 2013).

La capilla de soca de Arq. Bonet puede ser entendida como un fractal. Tanto a nivel volumétrico como en el plano de sus fachadas, el motivo que se repite una y otra vez es el triángulo equilátero.

Volumétricamente se compone de tetraedros regulares que conforman una cruz latina en planta. Este cuerpo se construye a partir de triángulos equiláteros que una vez desarrollados forman el mismo patrón que observamos en los vitrales de las fachadas.

Entre dos tetraedros contiguos se forma medio octaedro, figura que también se conforma de triángulos equiláteros como pirámide de base cuadrada. Esta pirámide es el elemento que da origen a la planta rectangular de 12 x 24 m.

Este desarrollo forma un patrón fractal de triángulos equiláteros, que si bien no es exactamente el patrón que se utiliza en las fachadas, éstas responden también a un fractal de triángulos equiláteros.

Se trata a su vez de un sólido platónico auto conjugado, es decir que su sólido dual es otro tetraedro.

El tetraedro regular es un poliedro tridimensional compuesto por cuatro caras triangulares equiláteras, lo que significa que todas las caras tienen la misma longitud en todos sus lados y todos los ángulos internos miden 60 grados. Es uno de los poliedros platónicos, que son los sólidos geométricos regulares convexos.

Un tetraedro se inscribe dentro de un cubo, es decir, las aristas del tetraedro son las diagonales del cubo si sus vértices coinciden. Esta característica hace que en una vista superior el tetraedro recomponga una cruz producto de superponer las dos diagonales. Este aspecto hace que combinar tetraedros resulte eficaz para recomponer la forma de cruz en planta.

El tetraedro se forma con triángulos equiláteros al igual que el octaedro, siendo éste el sólido dual del cubo.

Estas particularidades geométricas sirven como excusa para realizar un modelo algorítmico utilizando herramientas de diseño generativo como Dynamo Revit.

El modelo, potencia las cualidades geométricas del tetraedro y su capacidad fractal para definir cada detalle del espacio. Esta condición fractal es intrínseca a éste sólido platónico justamente por la propiedad que tiene de desarrollarse en el plano y generar triángulos unos dentro de otros en un patrón fractal.

Al repetir este proceso de subdivisión recursiva, se obtiene una estructura fractal conocida como "tetraedro de Sierpinski". Se trata de un fractal tridimensional que está compuesto por múltiples tetraedros regulares en

diferentes escalas, formando una estructura auto similar. Cada nivel de subdivisión del mismo muestra una mayor cantidad de tetraedros más pequeños (Prusinkiewicz & Lindenmayer, 1990).

## 2 Metodología

El proceso de modelado implica dos grandes etapas bien diferenciadas.

Primero se realiza un registro de la forma a partir de la obtención de una nube de puntos.

En el caso de la capilla de Soca, por sus condiciones y estado de conservación, ésta requirió, para el relevamiento y registro digital tridimensional (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), de la coordinación de equipos de escaneo terrestre y aéreo, incluyendo registros exteriores e interiores, permitiendo evitar las dificultades de accesibilidad de algunos espacios notables. Para ello se utilizaron tecnologías de escaneo láser LiDAR, más fotogrametría mediante drones (Di Stefano et al., 2021).

En segundo lugar, se analiza el modelo para definir reglas de composición que darán lugar a un nuevo modelo paramétrico generativo utilizando Dynamo Revit.

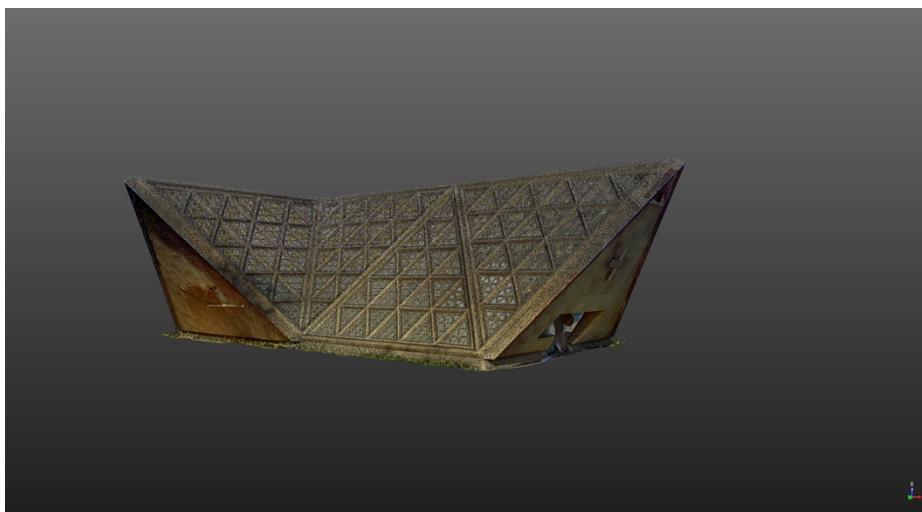


Ilustración 3. Nube de puntos. Foto del autor

### 2.1 Registro

Las etapas en el proceso de registro de la forma o escaneo 3D pueden ser divididas en:

- a) Preparación previa a la salida de campo o registro.

- b) Etapa de registro, donde se lleva a cabo el escaneo y captura de datos.
- c) Procesamiento de datos, donde se trabajan y procesan las nubes de puntos y demás información obtenida.
- d) Compilación de datos y generación de archivos compatibles y manipulables.

El proceso completo permite obtener un registro exhaustivo y detallado de la capilla, lo que proporciona una base sólida para futuros proyectos y análisis.

#### Previo al registro:

Esta etapa involucra un análisis exhaustivo y reconocimiento del objeto que se desea relevar.

La accesibilidad del objeto a relevar juega un papel importante en este proceso. Si hay zonas inaccesibles o inapropiadas para fijar las estaciones láser, se recurre al uso de equipos aéreos, como drones, para llevar a cabo los registros.

En cuanto a los vuelos, se dividen en dos tipos: vuelos programados y vuelos con control manual. Los vuelos programados abarcan áreas de relevamiento general en el exterior, mientras que los vuelos manuales permiten capturar detalles que no son posibles de lograr con estaciones terrestres.

#### Durante el registro:

El registro de la información se realiza utilizando dos tecnologías: Lidar terrestre y registros fotogramétricos mediante vuelos de drones. Estas tecnologías permiten obtener datos precisos y detallados para el relevamiento del objeto o territorio en cuestión.

#### Registro o relevamiento terrestre:

El registro terrestre se lleva a cabo utilizando un escáner Lidar con una estación, específicamente el modelo TRIMBLE x7. Este dispositivo recopila información mediante la emisión de intensa luz láser.

El proceso se repite múltiples veces, creando una especie de barrido en forma de esfera alrededor de la ubicación de la estación de registro obteniendo una "nubes de puntos" (PdN).

En total fueron necesarias 22 estaciones de escaneo.

#### Registro o relevamiento mediante vuelos:

Existen dos tipos de registros: programados y manuales, ambos realizados mediante tomas fotográficas en serie, que luego serán procesadas en el laboratorio utilizando técnicas de fotogrametría.

Los vuelos programados se emplean para áreas exteriores e inaccesibles, donde se define un plano de registro, generalmente horizontal, pero también puede ser vertical, como en el caso de fachadas de gran superficie y altura.

Para llevar a cabo esta programación, se utilizan programas con funcionalidad gratuita como Dronedeploy y Droneharmony, así como plataformas con licencia como Dronelink.

En cambio, el registro a través de vuelos manuales se emplea cuando no es posible automatizar el proceso y las características del objeto a registrar lo requieren. En este caso, las fotografías se toman manualmente de forma secuenciada, definiendo un intervalo de tiempo entre cada toma. Durante este procedimiento, el dron se posiciona y la cámara se dirige a los sectores de interés para el registro. Las secuencias de imágenes resultantes se suman al proceso fotográfico para su posterior procesamiento. Este último es el caso de la capilla, en el que el vuelo programado no resultaba del todo útil.

Se utilizaron 267 fotografías programadas en dos vuelos y 249 manuales en el exterior en un vuelo y 89 en el interior en un vuelo manual.

## 2.2 Procesamiento de la información primaria.

Como ya se mencionó previamente, el procesamiento de la información obtenida de los registros fotográficos y el escáner láser se realiza mediante dos metodologías distintas.

Aunque ambos procesos tienen como resultado la generación de nubes de puntos que luego se unifican para crear una base de datos única del objeto, es el origen de los datos el que determina el enfoque a seguir.

### Procesamiento LIDAR:

Las nubes de puntos provenientes del escáner láser se unifican para asegurar la coherencia de la volumetría y definir planos comunes entre estaciones y puntos notables del objeto registrado. Posteriormente, se realiza un proceso de depuración para eliminar datos que no son relevantes, segmentando la nube para clasificar únicamente los datos que aportan información requerida. Este proceso de depuración se realiza principalmente de manera manual utilizando el software Trimble RealWorks como herramienta primaria. Una vez depuradas las nubes de puntos, se exportan a otros formatos no nativos, como .e57, .las, .rcs/.rcp, para poder continuar con el manejo de nubes de puntos en otros softwares, como CloudCompare.

### Procesamiento fotográfico mediante técnicas de fotogrametría:

Las secuencias de fotografías capturadas por los dispositivos son ingresadas al software fotogramétrico Metashape para obtener la Nube de Puntos (NdP). Aunque este software ofrece diversas opciones formales como resultado del proceso de fotogrametría, como mallas 3D e imágenes rectificadas, para lograr una cohesión adecuada al unificar la información proveniente del escáner láser, se prioriza la obtención de una nube de puntos densa.

Las condiciones de iluminación difusa pueden reducir la interpretación de formas debido a sombras arrojadas más marcadas, pero también disminuir la detección de detalles superficiales.

Además, es importante que las series fotográficas no se realicen con variaciones significativas en las condiciones de iluminación, ya que el software podría interpretar que se trata de objetos diferentes. Por esta razón, cada vuelo debe llevar a cabo su propio proceso de generación de la Nube y luego unificarlos.

### 2.3 Flujo de trabajo

Una vez que hemos obtenido las series de Nubes de Puntos (NdP) provenientes de dos fuentes principales, vuelos y estaciones terrestres, el siguiente paso es unificar la información para crear un único modelo consolidado. Este proceso puede llevarse a cabo utilizando varios programas, pero en Realworks contamos con la ventaja de mantener la información de resolución y tamaño, además, es posible integrar datos georreferenciales si es necesario.

Modelado:

Finalmente, obtenida la malla ésta se utiliza para analizar la geometría completa. Éste confirmó todas las dimensiones conocidas a partir de la documentación existente sobre el edificio, y sobre todo permitió establecer cuanto se acerca lo construido al proyecto.

Se utilizó la herramienta de diseño generativo Dynamo Revit para crear en primera instancia el tetraedro mediante nodos, de a manera de generar un objeto paramétrico (Khabazi, 2012).

El uso de herramientas de modelado paramétrico y algorítmico como Grasshopper o Dynamo permite obtener geometrías dinámicas que se convierten potencialmente en infinitas versiones del modelo. Son descripciones genéricas en las que la variación de uno o más parámetros da como resultado un rango de iteraciones. (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)

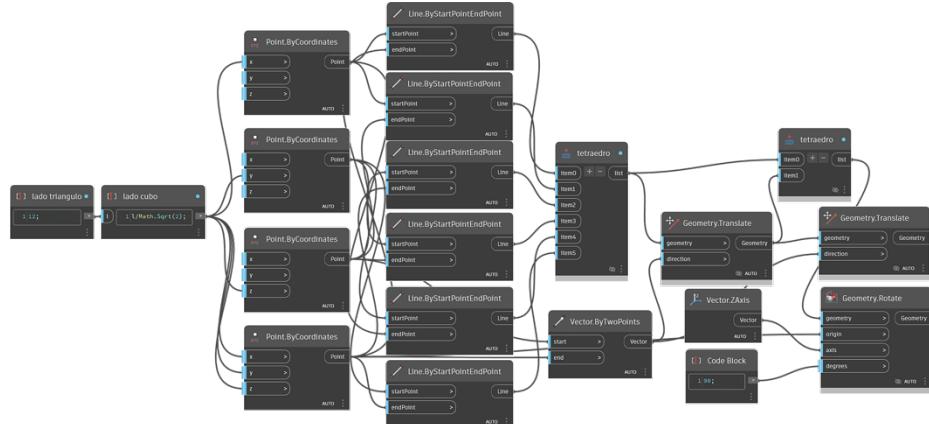


Ilustración 4. Algoritmo. Foto del autor

Emilio Garroni llamaba “invariante dinámico” a un tipo de representación capaz de albergar todas las posibles representaciones de un elemento, en cierto sentido esto sucede con un modelo de Dynamo (Garroni, 1973).

Fueron ensayadas varias técnicas de modelado generativo, que permiten obtener el tetraedro como figura a partir de sus propiedades geometrías. Una de ellas aprovecha la cualidad del tetraedro de desplegarse en cuatro triángulos equiláteros. Otra de las técnicas ensayadas que resultó mucho más compacta en cuanto al código desarrollado es la que aprovecha la propiedad de tetraedro de inscribirse dentro de un cubo y surgir a partir de las diagonales de sus caras.

El elemento se replica para completar la totalidad de los módulos que conforman la cruz en planta dando lugar a una sucesión de tetraedros y pirámides de base cuadrada.

A su vez se utilizó código Python para aprovechar la capacidad de éste y crear recursividad y modelar el patrón de fachada que conceptualmente se entiende como un fractal. Este código es parte del script general.

Se obtiene de esta manera un conjunto de aristas que conforman la geometría del modelo.

La naturaleza de la geometría se nos presenta infinita en el espacio, como si el conjunto se proyectara más allá de sus límites, esta cualidad viene dada desde las propiedades intrínsecas a la geometría fractal que desde el punto de vista teórico es justamente eso, un espacio infinito.

### **3 Resultados**

Los resultados obtenidos en primer término son dos productos bien diferenciados: la nube de puntos y el modelo algorítmico generativo.

Respecto de la nube de puntos cabe destacar que el modelo obtenido es de gran calidad debido a las características geométricas del edificio. El escáner laser es capaz de capturar la casi totalidad de la estructura edilicia gracias al hecho de contar con muros inclinados que son a la vez techos. Esto facilita que no sea necesario subir el escáner a partes altas de la misma.

Estos registros permitieron una verificación precisa de la constitución morfológica y poder así, verificar las hipótesis que conciernen en la determinación de una lógica generativa, posibilitando ordenar algorítmicamente, los pasos en programación visual.

Algunas observaciones:

En los procesos de adquisición de la forma, la calidad y precisión de la información registrada dependen, como mencionamos anteriormente, de las condiciones de iluminación y los materiales que se desean capturar (Di Stefano et al., 2021).

En la fotogrametría, la iluminación desempeña un papel crucial, ya que influye en la interpretación de los objetos. Los materiales transparentes dificultan la identificación de la geometría, mientras que los materiales reflectantes pueden distorsionar los resultados. Por otro lado, en el registro mediante tecnología Lidar, la luz ambiental no afecta la captura, ya que el propio equipo emite su propia luz láser. Sin embargo, los materiales reflectantes también pueden generar datos incorrectos durante la recopilación.

Para mejorar la calidad y precisión de la información, las nubes de puntos pueden ser procesadas utilizando software especializado como CloudCompare, que es de uso libre. Este programa permite segmentar, simplificar y depurar las nubes de puntos, además de interpretar los puntos como vértices de una malla 3D, lo que facilita la creación de un modelo tridimensional digital. Esta información se puede luego utilizar en diversos programas para su procesamiento, como la visualización a través de renderizaciones o la impresión 3D, entre otros usos.

En el caso del modelado basado en la información obtenida mediante escaneos, se trabaja directamente con la combinación de las nubes de puntos. Posteriormente, se exporta el archivo en un formato específico, adecuado para su procesamiento a través de software BIM, lo que permite utilizar esta información para el modelado y diseño del objeto con una mayor precisión y detalle.

Respecto del modelo paramétrico éste surge de un pequeño script que se replica una y otra vez para dar lugar a cada parte del edificio tanto a nivel de las grandes secciones del mismo como en los patrones que construyen la fachada. Este carácter que señalábamos al principio relacionados a la

repetición de una figura una y otra vez tiene su correlato en el código Dynamo que es compacto.

Como observamos, la construcción del modelo algorítmico permite verificar la hipótesis de partida respecto de las leyes de generación geométrica. Así mismo ambos modelos obtenidos a saber: la nube de puntos y el modelo algorítmico son versiones diferentes de un mismo objeto arquitectónico. El primero contiene la forma exhaustivamente descrita, el segundo se constituye como el “ADN”. Este hecho es interesante en si mismo como aprendizaje a la hora de concebir nuevos objetos. Hace algunos años nuestra preocupación se centraba en obtener modelos 3D en un CAD, mas recientemente nos enfocamos en los modelos BIM. El espectro de posibilidades con nubes de puntos y modelos paramétricos del tipo grasshopper o Dynamo complementa la descripción geométrica de los edificios.

#### **4 Discusión**

La discusión actual en el campo de la arquitectura se ha centrado en la utilización de herramientas de proyecto y modelado que podemos llamar “no explícito”, esto es, herramientas que generan la forma a partir de reglas compositivas, a diferencia de lo que sería un modelado tradicional como un modelo CAD 3D. En estos últimos que llamamos “explícitos” definimos la geometría que se desea y si se pretende modificarla muchas veces se debe recomenzar desde cero.

El modelado “no explícito” conocido como algorítmico o paramétrico (Jabi, 2013) en cambio permite introducir parámetros en todos y cada uno de los componentes geométricos y esto los vuelve versátiles y muy útiles para generar información.

El edificio de la capilla de Soca posee una geometría que parte de una forma simple, pero genera un espacio muy rico siguiendo algunas leyes claras. Encontrar esa ley de generación geométrica es quizás dilucidar la génesis del proyecto. Entendemos importante poder codificar las formas desde el diseño generativo mediante scripts que nos retroalimenten la creación de nuevos proyectos a partir del estudio de la obra construida.

Ambos modelos, la nube y el algorítmico contribuyen al rescate y puesta en valor del patrimonio arquitectónico que muchas veces en nuestro país cae en cierta forma en el olvido.

Precisar instrucciones y protocolos en la digitalización de casos emblemáticos arquitectónicos, con su posterior definición algorítmica de diseño, es el desafío de la propuesta.

#### **Referencias**

- Ponte, C y Cesio, L. (2008.). Arquitectura y patrimonio en Uruguay: proceso de inserción de la arquitectura como disciplina en el patrimonio. UdelaR: FADU.
- Lucchini, A. (1986.). El concepto de arquitectura y su traducción a formas en el territorio que hoy pertenece a la República Oriental del Uruguay. UdelaR. FARQ. IHA.
- Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A. (1990). *The algorithmic beauty of plants*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co.K.
- Payssé, M. and García Amen, F. (2016). *Diente Ex Machina. Tecnología y patrimonio*. SIGraDi.
- Garroni, E. (1973). Proyecto de semiótica: Mensajes artísticos y lenguajes no verbales, problemas teóricos y aplicados. Gustavo Gili.
- Mendez, M (2016). *Divinas Piedras, Arquitectura y catolicismo en Uruguay 1950-1965*. UdelaR
- Kolarevic, B. & Pinto Duarte, J. (2019). *Mass Customization and Design Democratization*. Routledge
- Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387-2429. DOI: 10.1080/19475705.2021.1964617
- Díaz, H. P., Jiménez, J. J. C., & Lancheros, E. O. G. (2014). Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 18(41), 134-153.
- Jabi, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. Laurence King Publishing Ltd.
- Khabazi, Z. (2012). Generative Algorithms. morphogenesis. <http://morphogenesis.com/>