

# VIRUS

28

## O DIGITAL E O SUL: TENSIONAMENTOS VOL. 1

PORTUGUÊS-ESPAÑOL | ENGLISH  
REVISTA . JOURNAL  
ISSN 2175-974X  
CC-BY-NC-SA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO  
NOMADS.USP  
REVISTAS.USP.BR/VIRUS  
DEZEMBRO 2024

NO  
MA  
DS  
USP

IU<sup>USP</sup>  
USP

# VI 28

**O DIGITAL E O SUL: TENSIONAMENTOS VOL. 1**  
**THE DIGITAL AND THE SOUTH: QUESTIONINGS VOL. 1**  
**LO DIGITAL Y EL SUR: CUESTIONAMIENTOS VOL. 1**

## EDITORIAL

- 001 O DIGITAL E O SUL: TENSIONAMENTOS VOL. 1  
THE DIGITAL AND THE SOUTH: QUESTIONINGS VOL. 1  
LO DIGITAL Y EL SUR: CUESTIONAMIENTOS VOL. 1  
MARCELO TRAMONTANO, JULIANO PITA, PEDRO TEIXEIRA, CAIO NUNES, ISABELLA CAVALCANTI, RENAN TEIXEIRA, ALINE LOPES

## ENTREVISTA

- 004 O DIGITAL COMO PRÁTICA COLETIVA  
THE DIGITAL AS A COLLECTIVE PRACTICE  
LO DIGITAL COMO PRÁCTICA COLECTIVA  
GABRIELA CELANI, MARCELO TRAMONTANO

## ÁGORA

- 014 EUGENIA MAQUÍNICA DO OLHAR: VISÃO COMPUTACIONAL, ETARISMO E GÊNERO  
MACHINIC EUGENICS OF THE GAZE: COMPUTER VISION, AGEISM, AND GENDER  
GISELLE BEIGUELMAN
- 029 DESDE AUTÓMATAS CELULARES HACIA IA Y FABRICACIÓN  
FROM CELLULAR AUTOMATA TO AI AND FABRICATION  
ALBERTO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ
- 042 E QUANDO A *SMART CITY* TRAVA?  
WHAT HAPPENS WHEN THE *SMART CITY* CRASHES?  
VINÍCIUS LOPACINSK
- 053 PLATAFORMAS COLABORATIVAS NO SUL GLOBAL: O CASO DO ARQUIGRAFIA  
COLLABORATIVE PLATFORMS IN THE GLOBAL SOUTH: THE CASE OF ARQUIGRAFIA  
SAYED ABDUL BASIR SAMIMI, ANA RIBEIRO FERREIRA DA COSTA, HENRIQUE SANTA CATHARINA JUNGES, ARTUR SIMÕES ROZESTRATEN

- 069 DO COMPUTACIONAL À FABRICAÇÃO: TEMAS E (DES)CAMINHOS NA AMÉRICA DO SUL  
FROM COMPUTATION TO FABRICATION: THEMES AND (MIS)PATHS IN SOUTH AMERICA  
RODRIGO SCHEEREN
- 079 DO VOO DO PÁSSARO AO OLHAR DEBRUÇADO: O VIRTUAL COMO MÉTODO  
FROM A BIRD'S FLIGHT TO AN OVERLOOKING GAZE: VIRTUALITY AS A METHOD  
PEDRO HENRIQUE VALE CARVALHO
- 090 CAMADAS URBANO-DIGITAIS: DA INFRAESTRUTURA GLOBAL DA INTERNET ÀS *DARK KITCHENS*  
URBAN-DIGITAL LAYERS: FROM GLOBAL INTERNET INFRASTRUCTURE TO DARK KITCHENS  
ALINE CRISTINA FORTUNATO CRUVINEL, LUISA DA CUNHA TEIXEIRA

## PROJETO

- 101 REDUZINDO A BRECHA: EMPÍRICO VS. SIMULAÇÃO NA MODELAGEM DE FACHADAS VERDES  
BRIDGING THE GAP: EMPIRICAL VS. SIMULATION IN GREEN FACADE MODELING  
CAMILA DA ROCHA HENDZEL, CLAUDIO VÁSQUEZ ZALDÍVAR

## DESDE AUTÓMATAS CELULARES HACIA AI Y FABRICACIÓN FROM CELLULAR AUTOMATA TO AI AND FABRICATION ALBERTO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ

**Alberto Fernandez Gonzalez** es Arquitecto RIBA, Master en Arquitectura, Académico e Investigador de la Universidad de Chile y de la University College London. Es candidato a MPhil/PhD en The Bartlett School of Architecture, Reino Unido, investigando Autómatas Celulares en diseño arquitectónico. Su carrera se enfoca en la exploración de formas desde una perspectiva local aplicando BIM, diseño generativo y fabricación digital. [alfernan@uchile.cl](mailto:alfernan@uchile.cl) <https://orcid.org/0000-0002-1411-1284>

## Resumen

Este *paper* presenta una investigación sobre flujos de trabajo (*workflows*) para el diseño arquitectónico mediante la integración de Autómatas Celulares (CA), Inteligencia Artificial (IA) y Fabricación Digital. El objetivo de este estudio es explorar cómo estas tecnologías pueden optimizar tanto la estructura, como la estética en el diseño arquitectónico, proporcionando un marco de trabajo eficiente e innovador. La metodología combina la generación de patrones complejos con CA, el uso de modelos de difusión en IA para la optimización de geometrías, y la traducción digital de estos diseños mediante *Autodesk Fusion*, lo que permite una gestión integral del proyecto y facilita la colaboración interdisciplinaria. La metodología de esta investigación se centra en la generación de patrones de Autómatas Celulares (CA) utilizando una combinación de algoritmos personalizados y existentes (*Langton Ant*). Los patrones de CA se desarrollan dentro del entorno de *Processing*, aprovechando reglas locales para crear configuraciones complejas. Se emplean modelos de Inteligencia Artificial (IA), específicamente modelos de difusión, para iterar y optimizar estas geometrías, facilitando el refinamiento continuo de los diseños arquitectónicos, garantizando una adaptación precisa de los patrones generados por CA. Este trabajo desarrolla un flujo de trabajo que se alinea con la adopción y transformación de tecnologías en el Sur Global, particularmente con la integración de AI dentro del proceso creativo, abriendo vías para que estas metodologías se adapten a contextos con limitaciones de recursos, proponiendo un marco integral que combina innovación y eficiencia, contribuyendo significativamente a la implementación futura de estas tecnologías.

**Palabras clave:** Autómatas Celulares, Inteligencia Artificial, Fabricación digital, Flujos de trabajo, Diseño arquitectónico

## 1 Introducción

El campo de la arquitectura está en constante evolución, buscando métodos innovadores para mejorar los procesos de diseño, especialmente en la optimización estructural y el refinamiento estético. En el contexto del Sur Global, estas tecnologías emergentes presentan un potencial significativo para superar limitaciones de infraestructura y recursos, ofreciendo soluciones adaptables y accesibles que pueden responder a desafíos locales específicos. Este enfoque invita a reconsiderar cómo la adopción de tecnologías de diseño computacional, como los autómatas celulares (CA), la inteligencia artificial (IA) y la fabricación digital, puede contribuir a un diseño arquitectónico más inclusivo y a debates descoloniales en la disciplina.

Las prácticas tradicionales, que a menudo dependen del dibujo manual y de modelos estáticos, son laboriosas y limitadas en su capacidad para explorar formas complejas y sistemas dinámicos (Ball, 2011). La llegada de las tecnologías digitales ha provocado un cambio significativo hacia métodos de diseño computacional, que ofrecen mayor flexibilidad, precisión y eficiencia (Batty, 2007). Uno de los avances más prometedores en este ámbito es la integración de estrategias computacionales complejas, como los CA y la IA. Los CA, un modelo discreto en matemáticas computacionales, implican una red de celdas que evolucionan mediante reglas simples basadas en los estados vecinos (Beigy & Meybodi, 2004). Este método puede generar patrones y estructuras intrincadas que imitan procesos naturales, demostrando ser una herramienta poderosa para el diseño arquitectónico (Beigy & Meybodi, 2006). De manera similar, la IA, especialmente a través del aprendizaje automático y los modelos de difusión, puede analizar grandes cantidades de datos para identificar soluciones óptimas de diseño que equilibren la forma y la función (Gilpin, 2018). Esta investigación se propone explorar la eficacia de los CA y la IA, en particular los modelos de difusión, en la generación de geometrías arquitectónicas estructural y estéticamente atractivas (Glover et al., 2021). Los modelos de difusión en IA simulan la propagación de partículas o información a lo largo del tiempo, refinando los diseños arquitectónicos mediante la mejora iterativa de los conceptos iniciales (Beigy & Meybodi, 2007). Este proceso iterativo puede conducir a soluciones innovadoras que no son inmediatamente evidentes a través de métodos tradicionales (Beigy & Meybodi, 2008).

El estudio enfatiza el uso de tecnologías de mapas de profundidad para la traducción de modelos 3D, abordando la brecha entre el diseño conceptual y el rendimiento estructural (Beigy & Meybodi, 2010). Los mapas de profundidad, que representan la distancia entre las superficies en un espacio 3D, son cruciales para convertir patrones 2D generados por CA y IA en estructuras tridimensionales (Berlekamp et al., 1982). Al aprovechar estas tecnologías, los arquitectos pueden crear modelos detallados y precisos listos para análisis y optimización estructural (Betka et al., 2020).

Además, se han realizado estudios que analizan cómo estas tecnologías pueden aplicarse en el Sur Global para abordar desafíos de recursos limitados y adaptarse a contextos locales (e.g., Oxman, 2017). La integración de CA, IA y tecnologías de mapas de profundidad permite a los arquitectos ampliar los límites del diseño tradicional, creando edificaciones estéticamente únicas y estructuralmente sólidas (Fernández González, 2023b). Este enfoque tiene el potencial de revolucionar el campo de la arquitectura en contextos diversos, ofreciendo nuevos caminos para desarrollar diseños sostenibles y eficientes mediante el entendimiento de formar provenientes de patrones derivados de formas orgánicas o inspiradas en naturaleza.

## 2 Desde Generative CA hacia AI

Esta investigación representa un avance significativo en el campo del diseño arquitectónico, al demostrar la aplicación práctica de los autómatas celulares (CA) y la inteligencia artificial (IA) en el proceso de búsqueda de formas, con un enfoque especial en la optimización estructural. Al integrar estas herramientas computacionales avanzadas, el estudio ofrece un marco sólido para explorar nuevas formas arquitectónicas y mejorar la eficiencia y creatividad en el proceso de diseño (Fernández González, 2023a), como se ilustra en la Figura 1.

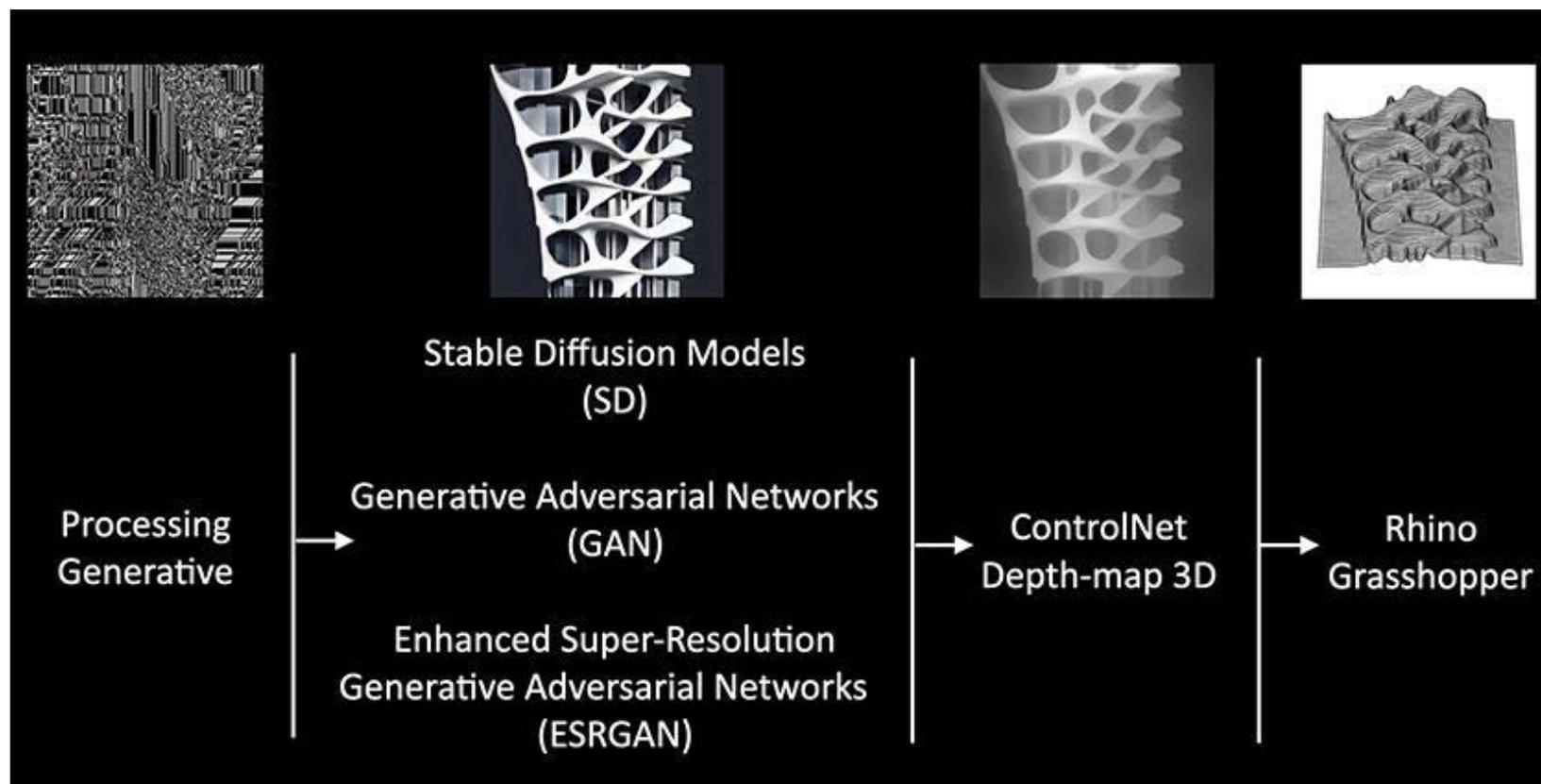


Fig. 1: Flujo de trabajo propuesto desde CA Generativo hasta IA. Fuente: Autor, 2024.

La integración de CA y AI demuestra el potencial transformador de combinar técnicas de diseño computacional con algoritmos de IA, tecnologías de mapas de profundidad. Los autómatas celulares, como modelo computacional, permiten la generación de patrones y estructuras complejas que imitan procesos naturales (Beigy & Meybodi, 2004). Esta capacidad de simular el crecimiento y la forma mediante sistemas basados en reglas simples proporciona a los arquitectos una herramienta poderosa para explorar soluciones estructurales innovadoras y eficientes. Los modelos de difusión, que simulan la propagación de partículas o información a lo largo del tiempo, facilitan el refinamiento iterativo de los diseños arquitectónicos. Este proceso iterativo permite una mejora continua y optimización, llevando a soluciones de diseño que equilibran el atractivo estético con el rendimiento estructural (Beigy & Meybodi, 2007).

La Figura 2 demuestra cómo las tecnologías de mapas de profundidad desempeñan un papel crucial en la traducción de diseños 2D generados por CA e IA en modelos 3D (Beigy & Meybodi, 2010). Este proceso cierra la brecha entre el diseño conceptual y el rendimiento estructural, asegurando que las innovaciones estéticas estén respaldadas por su viabilidad práctica (Berlekamp et al., 1982). La capacidad

de modelar y analizar con precisión geometrías complejas en tres dimensiones es esencial para desarrollar diseños que no solo sean visualmente atractivos, sino también estructuralmente eficientes y sostenibles (Betka et al., 2020). El uso de mapas de profundidad mejora la precisión y el detalle de los modelos arquitectónicos, permitiendo una comprensión más completa de las relaciones espaciales y las dinámicas estructurales. Esta capacidad es particularmente importante en el contexto del diseño arquitectónico de alta resolución, donde los detalles intrincados y las interacciones complejas deben ser representados y analizados con precisión (Christen & Del Fabbro, 2019).



**Fig. 2:** Traducción de una imagen generada por IA a partir de un patrón de CA a un mapa de profundidad 3D con ControlNet. Fuente: Autor, 2024

Al facilitar una integración más profunda de estas tecnologías, la investigación ofrece nuevas vías para desarrollar diseños arquitectónicos sostenibles, eficientes y estéticamente atractivos (Oxman, 2017). El uso combinado de CA, IA y BIM permite la creación de estructuras optimizadas tanto en rendimiento como en el uso de recursos, contribuyendo a los objetivos más amplios de sostenibilidad en la arquitectura. Este enfoque puede resultar en edificios más eficientes energéticamente, con menor desperdicio de materiales y con diseños que responden mejor a su contexto ambiental (Glover et al., 2021). El enfoque del estudio en el diseño arquitectónico de alta resolución, que incorpora detalles intrincados e interacciones complejas, está en sintonía con los principios del diseño sostenible. Al aprovechar herramientas computacionales para optimizar la forma y la función, los arquitectos pueden crear edificaciones que no solo sean hermosas, sino también responsables con el medio ambiente y económicamente viables (Beigy & Meybodi, 2008).

El estudio refuerza la relevancia de los métodos computacionales para abordar los desafíos contemporáneos de la arquitectura. A medida que las exigencias en el diseño arquitectónico se vuelven más complejas, incluyendo consideraciones de sostenibilidad, resiliencia y adaptabilidad, la necesidad de herramientas computacionales avanzadas se hace más evidente (Ball, 2011). Esta investigación demuestra que la integración de CA, IA y BIM puede satisfacer estas demandas, proporcionando un marco integral para soluciones de diseño innovadoras y prácticas (Mitchell, 2009). La capacidad de simular y analizar interacciones complejas dentro de los diseños arquitectónicos permite una toma de decisiones más informada y mejora la calidad general del entorno construido, donde las soluciones de diseño innovadoras son fundamentales (Kolarevic & Malkawi, 2005).

### 3 Metodología

El estudio adopta un enfoque metodológico en múltiples etapas, comenzando con la generación de patrones 2D mediante algoritmos de Autómatas Celulares (CA) personalizados, basados en el modelo de *Langton Ant*. Estos algoritmos fueron modificados a través de reglas de repetición específicas para promover patrones de distribución de Clase 4, según la clasificación de Wolfram, que permite generar configuraciones complejas y adaptativas. Los patrones resultantes son exportados en formato .txt, donde cada punto se describe con coordenadas x, y, z, y luego son importados a *Grasshopper*, donde son reinterpretados como mapas de puntos, listos para la siguiente etapa de exploración y transformación.

La siguiente fase del proceso involucra la integración de modelos de Inteligencia Artificial (IA), específicamente modelos de difusión estable, los cuales reinterpretan los patrones generados por CA. Esta integración permite condicionar los patrones previos, creando representaciones arquitectónicas bio-inspiradas con formas continuas y un alto nivel de detalle. La capacidad de los modelos de difusión para generar variaciones precisas y detalladas facilita una exploración creativa en el diseño arquitectónico, permitiendo descubrir soluciones que equilibran la estética y la estructura.

Para traducir los diseños en modelos 3D, se emplean tecnologías de mapas de profundidad en *Grasshopper*, que permiten transformar las configuraciones 2D en geometrías tridimensionales detalladas. Estos modelos 3D se exportan luego a *Autodesk Fusion* para un análisis estructural y optimización final. Este proceso iterativo de traducción y refinamiento combina el diseño computacional con los conocimientos de IA y la coordinación de *Building Information Modeling (BIM)*, asegurando que las formas arquitectónicas cumplan con criterios estéticos y estructurales.

Comparación con estudios similares: A diferencia de enfoques previos que se limitan a explorar patrones CA sin la integración profunda de IA, este estudio se destaca por su metodología innovadora que combina CA y modelos de difusión, logrando así un flujo de trabajo cohesivo y adaptativo. Esta combinación ofrece nuevas posibilidades en la generación de estructuras arquitectónicas bio-inspiradas, lo que coloca a esta investigación a la vanguardia en términos de innovación en diseño computacional.

Resumen de las etapas metodológicas:

A Exploración Inicial de diseño: Se generan patrones 2D en *Processing* y *Grasshopper*, utilizando algoritmos de CA basados en *Langton Ant* con modificaciones para la creación de patrones de Clase 4. Este proceso establece una base geométrica rica para las etapas de refinamiento posteriores;

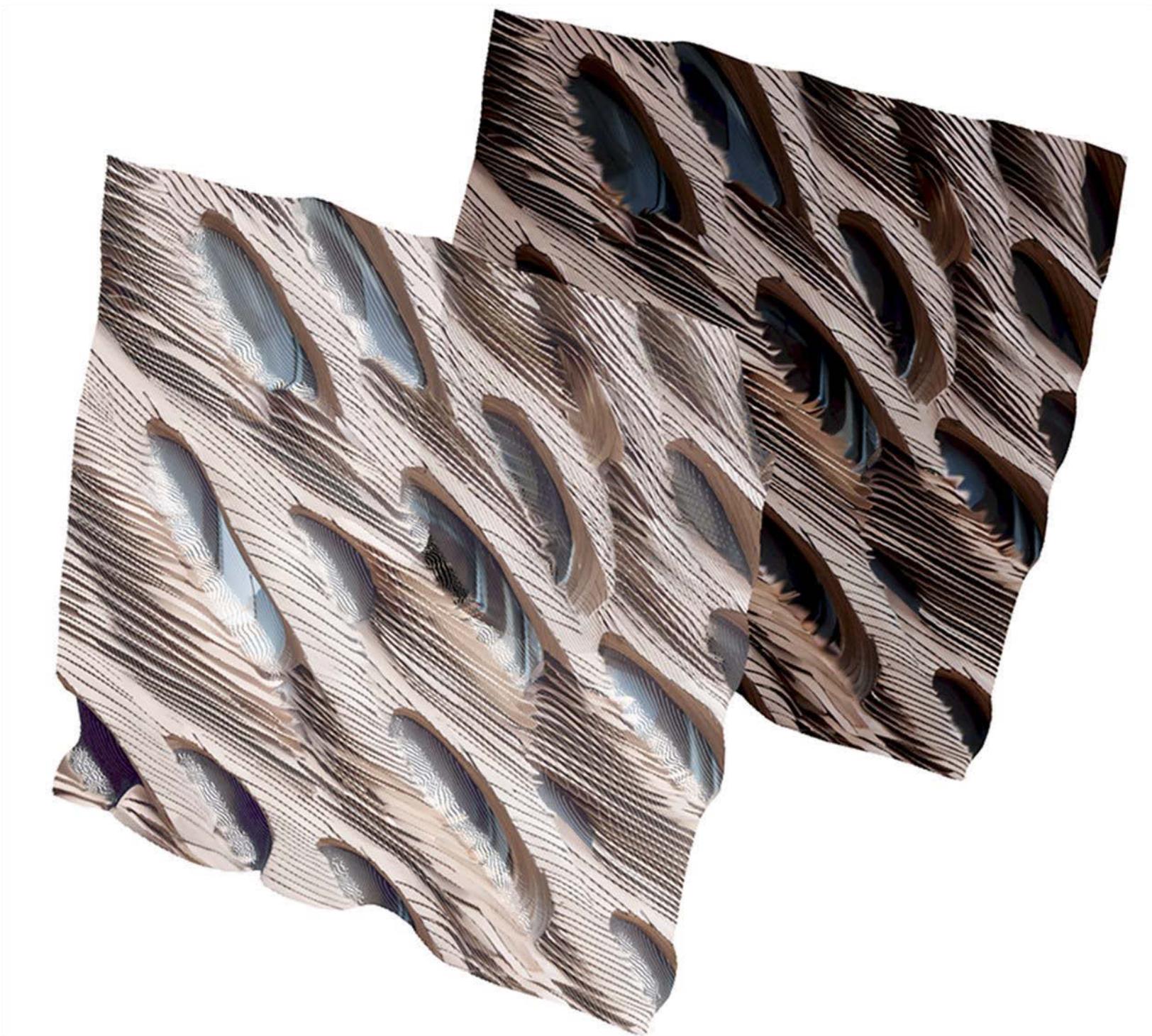
B Integración de IA: Los modelos de difusión de IA reinterpretan los patrones de CA, expandiendo las posibilidades de diseño y condicionando los resultados hacia configuraciones bio-inspiradas y de alta complejidad;

C Traducción a modelos 3D: A través de tecnologías de mapas de profundidad en *Grasshopper*, los patrones 2D se convierten en modelos 3D, que luego son optimizados en *Autodesk Fusion* para asegurar viabilidad estructural y precisión arquitectónica, ilustrado en la Figura 3.

Este enfoque metodológico permite una sinergia única entre los CA, IA y las tecnologías de fabricación digital, estableciendo un marco de trabajo innovador y adaptable a diferentes contextos arquitectónicos independiente de los recursos disponibles.

#### 4 Experimentos digitales y resultados

Aplicando algoritmos de CA en los entornos de *Processing* y *Grasshopper*, se generaron patrones 2D iniciales como el primer paso de este experimento, los cuales sirven como base para desarrollar geometrías más complejas. Estos patrones, regidos por simples reglas locales, evolucionan hacia formas intrincadas que pueden adaptarse a diversas necesidades arquitectónicas. La naturaleza iterativa de los CA permite un refinamiento continuo de estos patrones, como se indica en la Figura 4.



**Fig. 3:** Traducción de modelo 3D de CA a imágenes generadas por IA, utilizando un nodo personalizado de Processing basado en datos de mapas de profundidad. Los resultados se guardan como nube de puntos y como archivo OBJ para Rhino. Fuente: Autor, 2024

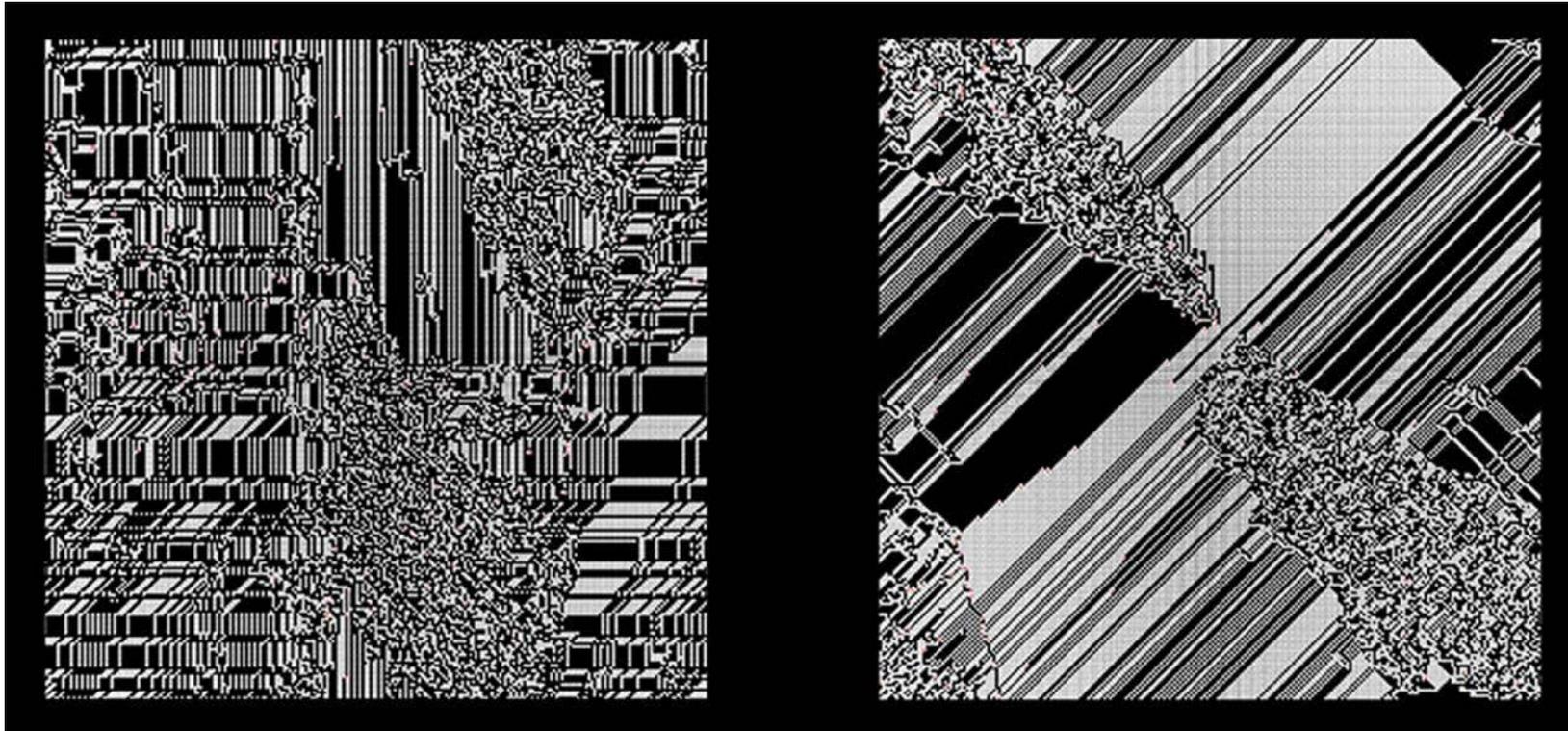


Fig. 4: Patrones generados por CA como primer paso en este flujo de trabajo. Fuente: Autor, 2024

**Paso 1:** El primer paso en este flujo de trabajo consistió en la generación de patrones 2D, utilizando algoritmos de Autómatas Celulares (CA) dentro de los entornos de *Processing* y *Grasshopper*. Los patrones iniciales, gobernados por reglas locales simples, fueron desarrollados a partir de algoritmos basados en el modelo de *Langton Ant*, que fueron personalizados mediante modificaciones en las reglas de repetición para generar patrones de Clase 4, según la clasificación de Wolfram. Esta clase de patrones permite una alta adaptabilidad y complejidad, lo cual resulta crucial para aplicaciones en arquitectura donde se buscan configuraciones funcionales y estéticamente únicas. Los patrones resultantes fueron exportados en formato *.txt*, con coordenadas *x, y, z*, lo cual permitió su fácil importación y manipulación en *Grasshopper*. Una ventaja importante del uso de CA es su capacidad de generar resultados con baja utilización de memoria y capacidad de procesamiento, lo que hace que este enfoque sea especialmente adecuado para entornos de recursos limitados. Esta etapa establece una base para la creación de geometrías más complejas, con potencial de adaptación a diversos tipos de necesidades arquitectónicas, desde la creación de fachadas hasta la optimización de estructuras internas.

Además, se analizan cómo estas tecnologías pueden aplicarse en entornos de recursos limitados y adaptarse a contextos locales debido a que los algoritmos de CA empleados consumen pocos recursos computacionales, siendo además fácilmente adaptables a patrones preexistentes propios de nuestra realidad local, pudiendo ser en si esto parte de un próximo trabajo. En tales entornos, la capacidad de los CA para generar configuraciones complejas a partir de reglas simples es especialmente relevante, ya que permite la exploración de soluciones de diseño que no dependen de tecnologías altamente sofisticadas o costosas (trabajo con memoria RAM no mayor a 16GB y procesos simples). Estos patrones, gobernados por principios computacionales básicos, pueden ser implementados en entornos de recursos limitados, permitiendo a los arquitectos en el Sur Global experimentar rápidamente con configuraciones arquitectónicas que respondan a las especificidades del contexto local. La naturaleza iterativa de los CA permite un refinamiento continuo de los patrones generados, lo cual es fundamental para alcanzar soluciones que no solo sean visualmente atractivas, sino también funcionales y viables en estos contextos.

**Paso 2:** El siguiente paso en los experimentos involucró la integración de modelos de difusión de Inteligencia Artificial (IA), lo cual amplió significativamente el espacio de exploración del diseño. Estos modelos de IA, particularmente los modelos de difusión, simulan la propagación de partículas o información a través de un medio, permitiendo una exploración más sofisticada de la forma y la función. Esta capacidad para explorar un amplio abanico de posibilidades de diseño es fundamental para la innovación arquitectónica, ya que permite a

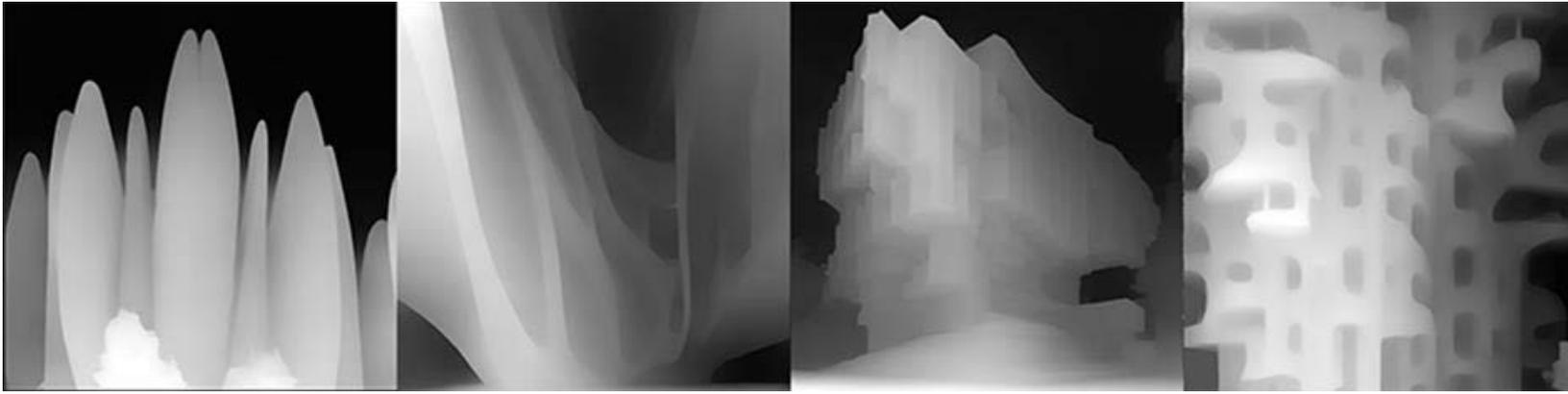
los arquitectos descubrir configuraciones que podrían no ser evidentes mediante métodos tradicionales (Gilpin, 2018). A través de miles de iteraciones generadas por estos modelos de difusión, el proceso permite identificar configuraciones óptimas que equilibran la estética con el rendimiento estructural. En nuestro contexto, donde los recursos pueden ser limitados, este enfoque tiene el potencial de permitir una experimentación adaptativa, maximizando la eficiencia de los materiales y ajustando el diseño a las condiciones específicas del entorno. En este sentido, la IA se convierte en una herramienta no solo de optimización, sino también de exploración creativa, que posibilita adaptaciones específicas a las necesidades locales, promoviendo así prácticas de diseño descoloniales y sostenibles.

Los modelos de difusión de IA facilitaron también la exploración de diversos escenarios de diseño, incluyendo el impacto de diferentes materiales y condiciones contextuales diversas. La aplicación de tecnologías de mapas de profundidad en la traducción de estos diseños a 3D resulta fundamental para realizar formas arquitectónicas complejas que puedan responder a requisitos posteriores de análisis espacial y de performance material. Los mapas de profundidad, que representan la distancia entre superficies en un espacio 3D, son esenciales para convertir los patrones generados por CA e IA en estructuras tridimensionales detalladas y precisas. Este proceso de traducción es crucial para cerrar la brecha entre los diseños conceptuales y su viabilidad de fabricación real, permitiendo la creación de estructuras que son no solo visualmente atractivas, sino también estructuralmente sólidas y económicamente viables en contextos de recursos limitados, como se indica en la Figura 5.

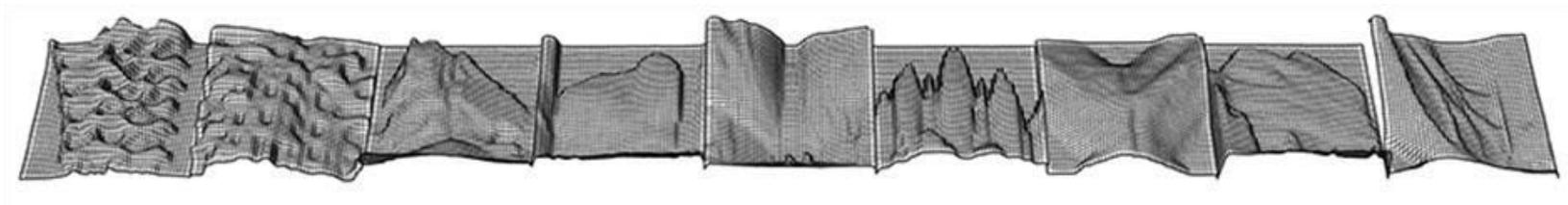


**Fig. 5:** Conjunto de variaciones de un patrón de CA hacia la búsqueda de una posible solución arquitectónica-estructural. Fuente: Autor, 2024

**Paso 3:** La aplicación de tecnologías de mapas de profundidad resultó ser un componente crítico en la traducción de los patrones 2D generados por CA e IA en modelos 3D, detallados dentro de *Grasshopper*. Los mapas de profundidad, que representan la distancia entre superficies en un espacio tridimensional, permitieron un control preciso sobre la forma final del modelo 3D. Este control es esencial para garantizar que los modelos arquitectónicos no solo sean estéticamente atractivos, sino también estructuralmente sólidos y fabricables. En los experimentos, se generaron mapas de profundidad para traducir los patrones 2D de CA en modelos 3D detallados dentro de *Grasshopper*, como se muestra en la Figura 6. La Figura 7 muestra como la tecnología de mapas de profundidad permitió un control preciso sobre la forma tridimensional, lo que permitió la creación de modelos arquitectónicos altamente detallados y precisos. El uso de mapas de profundidad también facilitó la integración de geometrías complejas en el diseño general del edificio. Al representar con precisión las relaciones espaciales y las interacciones entre diferentes elementos estructurales, los mapas de profundidad garantizaron que los diseños finales no solo fueran estéticamente innovadores, sino también estructuralmente viables (Christen & Del Fabbro, 2019).



**Fig. 6:** Conjunto de variaciones de mapas de profundidad a partir de un patrón de CA, hacia la búsqueda de una posible solución arquitectónica. Fuente: Autor, 2024



**Fig. 7:** Conjunto de traducciones de mapas de profundidad con diferentes densidades a *Rhinoceros* como paso previo hacia la traducción final en 3D. Fuente: Autor, 2024

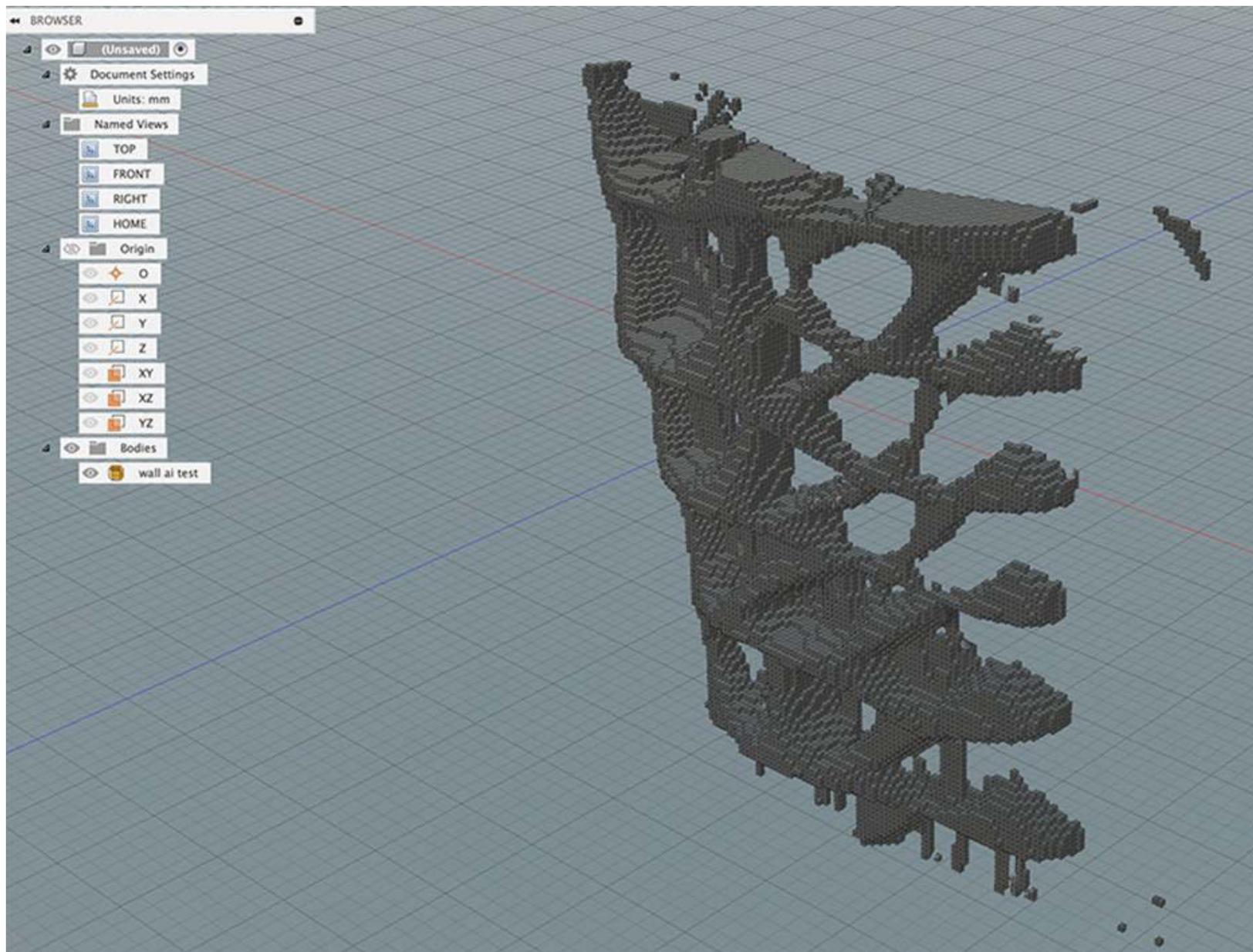
**Paso 4:** Los modelos 3D generados mediante Autómatas Celulares (CA), Inteligencia Artificial (IA) y mapas de profundidad fueron luego refinados y analizados utilizando *Autodesk Fusion*, una herramienta avanzada que permite realizar evaluaciones precisas de viabilidad estructural como paso final del proceso. En esta etapa, *Autodesk Fusion* proporciona una plataforma robusta para evaluar la integridad estructural de los diseños arquitectónicos, permitiendo a los diseñadores identificar y corregir posibles debilidades en la estructura antes de proceder a la fase de fabricación. Este análisis es fundamental para asegurar que las configuraciones arquitectónicas propuestas no solo sean visualmente atractivas y conceptualmente innovadoras, sino también capaces de soportar las cargas y condiciones que enfrentarán en entornos reales.

Durante este proceso de refinamiento, se evaluaron aspectos como la distribución de cargas, la resistencia de materiales y la estabilidad general del modelo. La simulación en *Autodesk Fusion* ilustrada en la Figura 8 permitió realizar ajustes iterativos para optimizar el modelo, modificando parámetros estructurales y mejorando la eficiencia del diseño en términos de uso de materiales y resistencia. Este enfoque iterativo asegura que el modelo final esté listo para su implementación en la fase de fabricación, minimizando riesgos y garantizando que el diseño cumpla con los estándares de seguridad y rendimiento requeridos en la práctica arquitectónica.

Si bien el trabajo con *Autodesk Fusion* tiende a realizarse bajo un entorno académico, donde el costo de esta herramienta es absorbido por licencias educativas, esta dependencia representa una limitante en el ámbito de la investigación, especialmente al considerar su aplicabilidad en contextos fuera del entorno académico. En futuras investigaciones, se propone la implementación de *Rhinoceros* y *Grasshopper* como alternativas viables, simulando los procesos de evaluación estructural que actualmente se realizan en la plataforma de *Autodesk*. Este enfoque permitiría un acceso más amplio a las técnicas desarrolladas en esta investigación, facilitando su adopción en contextos profesionales y en regiones donde el acceso a *Autodesk Fusion* puede ser limitado por restricciones económicas.

La tecnología de mapas de profundidad jugó un papel crucial en este proceso, facilitando la conversión de patrones 2D generados en etapas previas en geometrías 3D detalladas que luego se integraron en un flujo de trabajo de impresión y fabricación 3D. Esta transición de patrones planos a estructuras tridimensionales permite a los arquitectos y diseñadores explorar configuraciones complejas y probar su viabilidad estructural en un entorno digital antes de la fabricación física. Los resultados de este proceso de evaluación y optimización demostraron no solo la factibilidad del diseño, sino también su integridad estructural y su singularidad visual, destacando cómo la integración de CA, IA y

fabricación digital puede producir soluciones arquitectónicas innovadoras y adaptadas a las demandas actuales de sostenibilidad y eficiencia estructural (Fernández González, 2023b).



**Fig. 8:** Autodesk Fusion continuidad discreta del modelo 3D. Fuente: Autor, 2024.

Finalmente, los modelos 3D refinados fueron integrados en un proceso de fabricación digital mediante técnicas de impresión 3D por deposición de filamento *PLA*, lo que permitió materializar las complejas geometrías desarrolladas en etapas previas. Un paso clave en esta etapa fue el proceso de discretización de la forma en Autodesk Fusion, que simplificó las estructuras en componentes modulares y consistentes. Esta discretización no solo facilita la impresión 3D al crear geometrías adaptadas al proceso de fabricación, sino que también reduce significativamente la necesidad de soportes adicionales, optimizando así el tiempo y los recursos empleados en la impresión. Al minimizar el uso de soportes, el modelo resultante no solo es más eficiente en términos de material, sino también en calidad, al evitar posibles imperfecciones causadas por el uso excesivo de soporte en estructuras complejas.

La fase de fabricación, demostrada en la Figura 9, no solo validó la factibilidad del diseño, sino que también destacó su singularidad visual y la integridad estructural de los modelos creados. Las impresiones 3D, como la que se muestra en la imagen de referencia, capturan la precisión de los patrones generados mediante Autómatas Celulares (CA) e Inteligencia Artificial (IA), demostrando cómo estas tecnologías pueden producir estructuras detalladas y visualmente impactantes que mantienen su consistencia durante la impresión.

Los resultados obtenidos demuestran que la combinación de CA, IA y fabricación digital ofrece un enfoque innovador y eficiente para el diseño arquitectónico, capaz de producir estructuras que son tanto estéticamente atractivas como estructuralmente sólidas. La implementación de la discretización y la reducción de soportes permite una exploración de formas bio-inspiradas optimizadas para impresión, lo cual resulta en modelos sostenibles y resistentes que responden a las exigencias contemporáneas de la arquitectura.

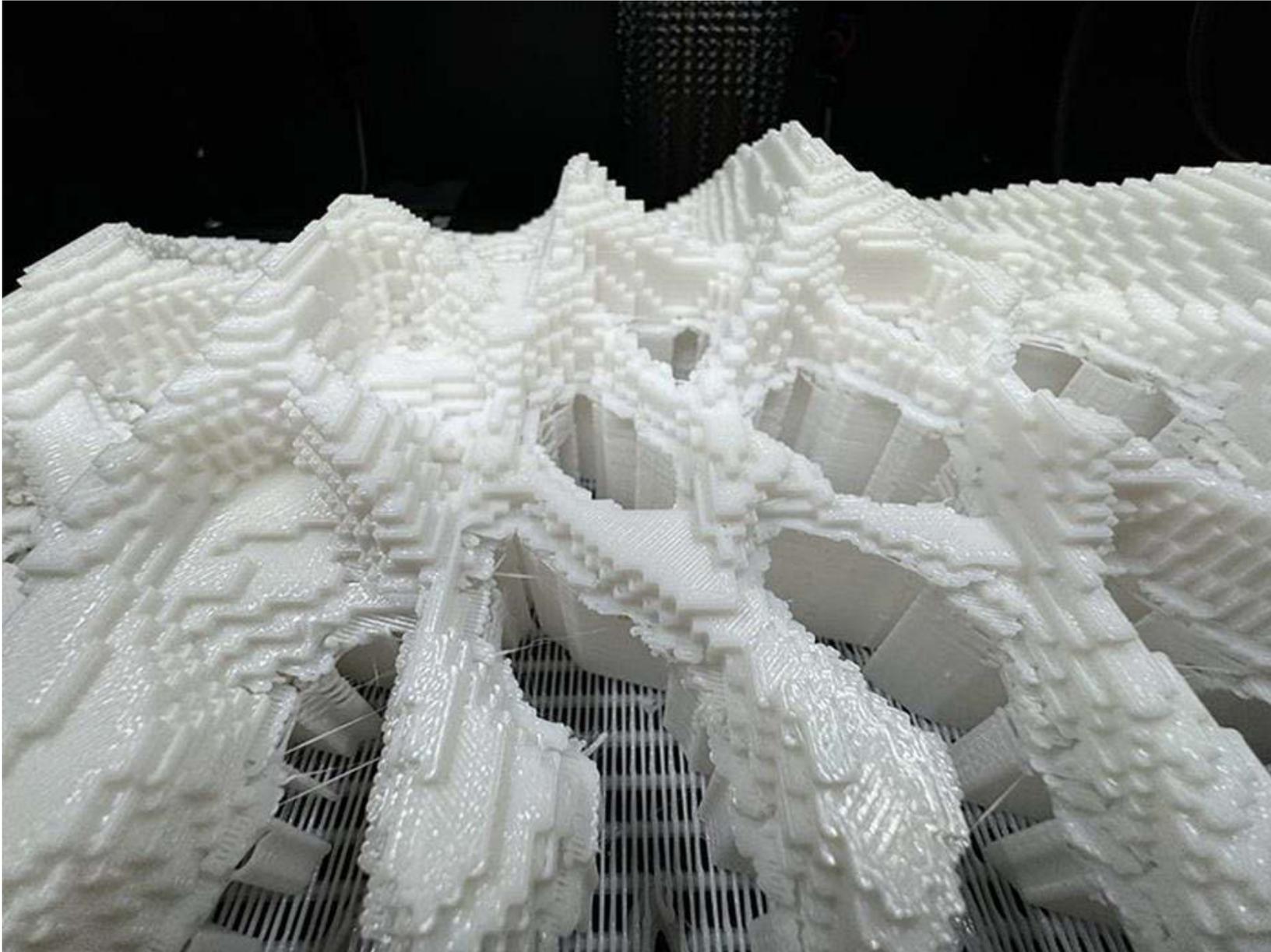


Fig. 9: Modelo 3D discreto impreso en 3D. Fuente: Autor, 2024.

## 5 Consideraciones finales

El presente estudio demuestra que la integración de Autómatas Celulares (CA), Inteligencia Artificial (IA) y fabricación digital en un flujo de trabajo coherente ofrece un enfoque innovador y robusto para el diseño arquitectónico. Este proceso permite una exploración enriquecida de formas, espacios y estructuras, facilitando la creación de diseños complejos que mantienen su consistencia durante la fabricación. En particular, el uso de CA para la generación de patrones complejos, en combinación con IA para la optimización de geometrías, proporciona un método adaptable y eficiente que responde a las demandas de sostenibilidad y estética en la arquitectura contemporánea. Además, la discretización de los modelos en *Autodesk Fusion* permite simplificar las formas para su impresión 3D, reduciendo la necesidad de soportes y optimizando los recursos, lo cual es especialmente relevante en contextos de recursos limitados.

La aplicación de este flujo de trabajo en contextos del Sur Global abre nuevas posibilidades para el diseño arquitectónico en regiones con limitaciones de infraestructura y acceso a tecnología avanzada. La capacidad de CA para generar resultados con baja utilización de memoria y capacidad de procesamiento hace que esta metodología sea viable en estos entornos, permitiendo que arquitectos y diseñadores experimenten con soluciones innovadoras que respondan a las particularidades de sus contextos locales. Este enfoque fomenta prácticas de diseño descoloniales, ofreciendo un camino para adaptar tecnologías avanzadas de manera que sean accesibles y relevantes para el Sur Global. Así, este flujo de trabajo se convierte en una herramienta para democratizar el acceso a métodos de diseño avanzados, promoviendo una arquitectura más inclusiva y contextualmente adecuada.

En términos de pasos futuros, se plantea la exploración de *Rhinoceros* y *Grasshopper* como alternativas a *Autodesk Fusion* para la simulación y evaluación estructural, lo cual podría ampliar la aplicabilidad de este enfoque en entornos fuera del ámbito académico, donde las licencias educativas de *Autodesk Fusion* no están disponibles. Además, futuras investigaciones podrían centrarse en el desarrollo de algoritmos de IA más avanzados que permitan una mayor adaptabilidad y personalización en el proceso de diseño, optimizando aún más los modelos generados mediante CA para responder a las condiciones específicas de materiales y cargas estructurales en cada proyecto.

Los resultados de este estudio sugieren que la combinación de CA, IA y fabricación digital no solo enriquece el proceso de exploración formal, espacial y estructural, sino que también ofrece un marco de trabajo consistente que facilita la creación de estructuras arquitectónicas viables. Este flujo de trabajo permite a los arquitectos y diseñadores del Sur Global superar barreras de acceso y explorar nuevas formas de diseño que son tanto estéticamente innovadoras como funcionalmente sólidas, aportando al desarrollo de una arquitectura que responda a las necesidades y desafíos contemporáneos de manera sostenible y eficiente.

## Referencias

- Ball, P. (2011). *Shapes: Nature's patterns: A tapestry in three parts*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Batty, M. (2007). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Beigy, H., & Meybodi, M. R. (2004). A mathematical framework for cellular learning automata. *Advances in Complex Systems*, 7(3), 295–319. <https://doi.org/10.1142/S0219525904000202>
- Beigy, H., & Meybodi, M. R. (2006). Utilizing distributed learning automata to solve stochastic shortest path problems. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 14(5), 591–615. <https://doi.org/10.1142/S0218488506004217>
- Beigy, H., & Meybodi, M. R. (2007). Open synchronous cellular learning automata. *Advances in Complex Systems*, 10(4), 527–556. <https://doi.org/10.1142/S0219525907001413>
- Beigy, H., & Meybodi, M. R. (2008). Asynchronous cellular learning automata. *Automatica*, 44(6), 1350–1357. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.11.018>
- Beigy, H., & Meybodi, M. R. (2010). Cellular learning automata with multiple learning automata in each cell and its applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 40(1), 54–65. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2009.2030786>
- Berlekamp, E. R., Conway, J. H., & Guy, R. K. (1982). *Winning ways for your mathematical plays*. Academic Press.
- Betka, A., Terki, N., Toumi, A., & Dahmani, H. (2020). Grey wolf optimizer-based learning automata for solving block matching problem. *Signal, Image and Video Processing*, 14(2), 285–293. <https://doi.org/10.1007/s11760-019-01554-w>
- Christen, P., & Del Fabbro, O. (2019). Cybernetical concepts for cellular automaton and artificial neural network modelling and implementation. *Proceedings. 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 4124–4130. <https://doi.org/10.1109/SMC.2019.8913839>
- Fernández González, A. (2023a). *A neo-postnatural high resolution aesthetic by cellular architecture*. Blucher Design Proceedings.
- Fernández González, A. (2023b). Autómata celular. ¿Un nuevo modelo de diseño participativo? *AREA - Agenda de Reflexión en Arquitectura, Diseño y Urbanismo*, 29(2), 1–12.

Gilpin, W. (2018). *Cellular automata as convolutional neural networks*. arXiv preprint arXiv:1809.02942.

Glover, T. E., Lind, P., Yazidi, A., Osipov, E., & Nichele, S. (2021). The dynamical landscape of reservoir computing with elementary cellular automata. In *ALIFE 2021: The 2021 Conference on Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press.

Kolarevic, B., & Malkawi, A. M. (2005). *Performative architecture: Beyond instrumentality*. London: Spon Press.

Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour*. Cambridge, MA: Oxford University Press.

Oxman, R. (2017). *Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking*. 52 4–39. *Design Studies*.  
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001>