

PALABRAS CLAVE
Autómata celular,
Diseño generativo,
Diseño digital,
Teoría digital,
Diseño participativo

KEYWORDS
*Cellular automata,
Generative design,
Digital design,
Digital theory,
Participatory design*

RECIBIDO
20 DE ENERO DE 2023

ACEPTADO
6 DE SETIEMBRE DE 2023



EL CONTENIDO DE ESTE ARTÍCULO
ESTÁ BAJO LICENCIA DE ACCESO
ABIERTO CC BY-NC-ND 2.5 AR

AUTÓMATA CELULAR. ¿UN NUEVO MODELO DE DISEÑO PARTICIPATIVO?

CELLULAR AUTOMATA. A NEW MODEL OF PARTICIPATORY DESIGN?

> **ALBERTO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ**
Universidad de Chile
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
University College London
The Bartlett School of Architecture

> **CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO (NORMAS APA):**
Fernández González, A. (2023, mayo-octubre). Autómata Celular. ¿Un nuevo modelo de diseño participativo? [Archivo PDF]. *AREA*, 29(2), pp. 1-12. Recuperado de <https://www.area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA2902/c.pdf>

RESUMEN

El Autómata Celular (CA, por sus siglas en inglés) emergió como un modelo matemático hacia 1940, posicionándose como uno de los sistemas complejos que pueden generar formas en 1D, 2D y 3D. Este modelo se fundamenta en la aplicación de principios de diseño de abajo hacia arriba (*bottom-up*), que permiten crear relaciones básicas entre cada elemento del sistema, facilitando la emergencia de resultados finales inesperados. El término refiere a un sistema que, por medio de modelos computacionales, aplica una serie diversa y limitada de reglas en un contexto simulado y discreto, modulando el estado de una malla discreta desde una posición de apagado a encendido (0 a 1) en su expresión más elemental. Este marco conceptual será fundamental para apreciar la intrincada naturaleza y la significancia de los resultados que puede producir este procedimiento.

A lo largo de los años, el CA se ha consolidado como un sistema de simulación matemática, desarrollándose principalmente en el ámbito digital, sin manifestaciones físicas explícitas en arquitectura a escala humana hasta el momento. Una *semilla* de CA (*seed*) puede generar un amplio conjunto de resultados, aplicables en campos tan diversos como la biología, medicina y física, así como también en modelos de estudios urbanos, estructurales y, en general, de organización espacial, demostrando la versatilidad de las escalas en las que puede operar con resultados sorprendentes. En este artículo, se explora el CA desde sus orígenes, analizando su surgimiento desde una perspectiva histórica, como un enfoque de diseño participativo. Se describen sus principios fundamentales y cómo estos conceptos se integraron gradualmente en el campo de la Arquitectura, convirtiéndose en parte de nuestras herramientas y métodos para el diseño digital. Además, se examina cómo la adopción progresiva de CA ha transformado el diseño y la resolución de problemas en la Arquitectura.

> ACERCA DEL AUTOR

ALBERTO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ. Arquitecto, educador e investigador de la Universidad de Chile y de la Bartlett School of Architecture de la University College London (The Bartlett/UCL), ha sido galardonado con premios como Holcim Awards, UIA Venice Biennale Celeb Cities 3, Archiprix International, entre otros. Nombrado Mejor Joven Arquitecto Chileno en 2009, actualmente es Lecturer y PhD en la UCL y miembro del consejo asesor de la

ABSTRACT

Cellular Automata (CA) emerged as a mathematical model in the 1940s, positioning itself as one of the complex systems that can generate forms in 1D, 2D, and 3D. This model is based on the application of bottom-up design principles, where we, as designers, can create basic relationships between each element of the system. This facilitates the emergence of unexpected final results, part of a process of debugging errors in our designs, diverging from the classic top-down methods.

To begin, establish a clear definition of "cellular automata." This term refers to a system that, through computational models, applies a diverse and limited series of rules in a simulated and discrete context, modulating the state of a discrete mesh from an off to on position (0 to 1) in its most elemental expression. This conceptual framework will be fundamental to appreciate the intricate nature and significance of the results that this procedure can produce. Over the years, the CA has established itself as a mathematical simulation system, developing mainly in the digital realm, without explicit physical manifestations in human-scale architecture to date. A CA "seed" can generate a wide set of results, applicable in fields as diverse as biology, medicine, and physics as well as urban studies models, structural and, in general, spatial organization, demonstrating the versatility of the scales at which this model can operate with impressive results.

In this article, the CA is explored from its origins, analysing its emergence from a historical perspective as a participatory design approach. Its fundamental principles are described, and how these concepts gradually integrated into the field of architecture, becoming part of our tools and methods for digital design. Additionally, it examines how this progressive adoption has transformed the way we approach design and problem-solving in architecture, answering the central question: Does this represent a new model of participatory design?

revista *Perspectives*. Su investigación, financiada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), la UCL y la Universidad de Chile, explora la aplicación de Autómatas Celulares en Arquitectura. Miembro de SIGraDi, co-fundador de DigitalFUTURES Español y RE Architects, estudia la intersección de IA, energía solar, diseño participativo en VR y espacios auto-generados.
✉ <alberto.fernandez.11@ucl.ac.uk>

Una teoría proveniente de la Matemática

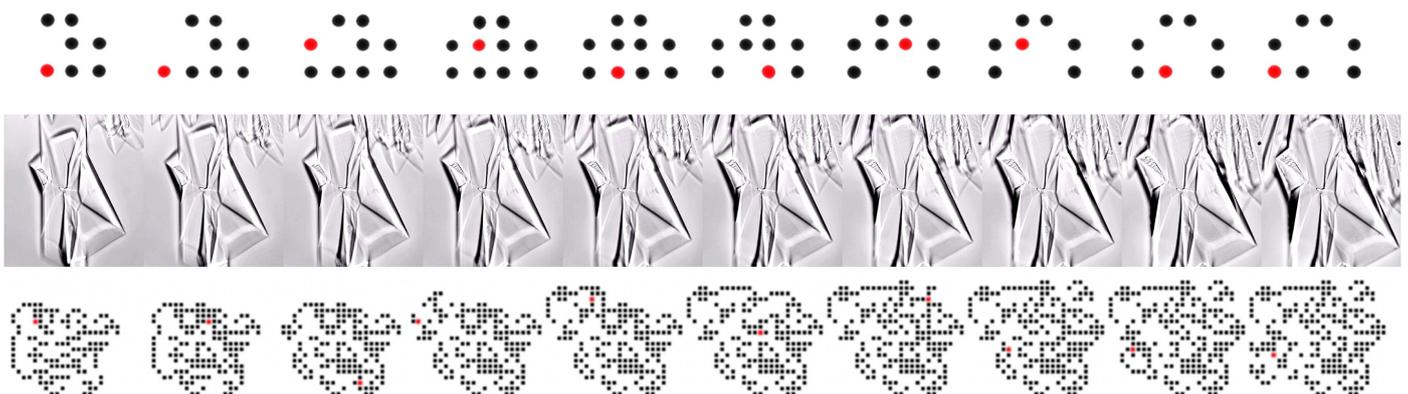
El *Cellular Automata* (CA) se inscribe dentro del estudio de las máquinas abstractas y los problemas computacionales solucionables a través de ellas. La principal aspiración de esta teoría es forjar métodos que permitan a los científicos analizar la dinámica de sistemas discretos que evolucionan y se manifiestan a través del tiempo, empleando una lógica de diseño generativo. Este análisis se realiza mediante el uso de una célula inicial o *semilla* (*seed*), denominada autómatas (*automaton*), que opera automáticamente en un dominio discreto. El nacimiento del CA se atribuye a John Von Neumann y Stanislaw Ulam en la década del cuarenta del siglo pasado, quienes conceptualizaron la autorreplicación, buscando establecer un modelo matemático que facilitara agregaciones eficientes en un entorno controlado. Este modelo simula fenómenos naturales como el crecimiento de cristales (Figura 1), la erosión del suelo, la difusión y las simulaciones de dinámica de fluidos. Paralelamente, surgieron las máquinas CA autorreplicantes, siendo Lionel Penrose, en 1957, el pionero en manifestar físicamente estos sistemas complejos en el mundo real, a través de dispositivos mecánicos autorreplicantes. Otros investigadores prominentes en el desarrollo de simulaciones de sistemas complejos desde una perspectiva matemática incluyen a Edward Moore en 1956 (Moore Machines), John Horton Conway en 1970 (juego de la vida), Stephen Wolfram en 1983 (CA elemental) y Chris Langton en 1987, quien introdujo las hormigas lógicas (vida artificial). Alrededor de 1947, Von Neumann concibió modelos fundamentados en la fabricación 3D, delineados por ecuaciones

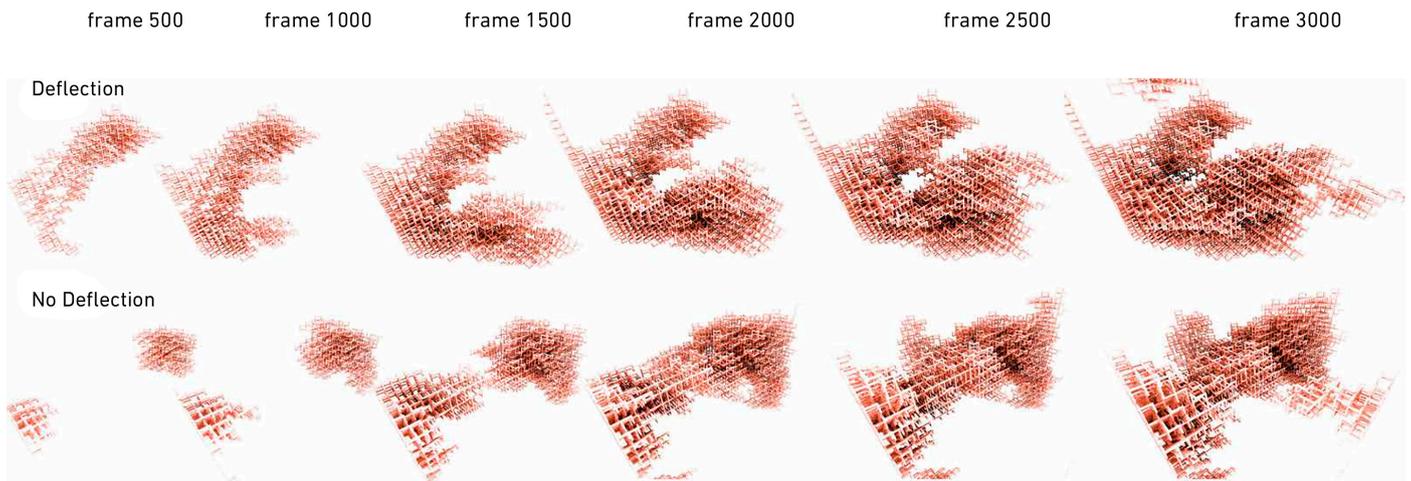
diferenciales parciales. Pronto, comenzó a visualizar robots y a imaginar cómo podría utilizar un *kit* de construcción para ilustrar su teoría (Wolfram, 2002). Posteriormente, propuso la creación de una configuración de 200 mil células que podrían replicarse, demostrando matemáticamente el potencial de la auto reproducción, con base en sus observaciones sobre la complejidad de los organismos biológicos reales y de computadoras electrónicas.

El fundamento conceptual del CA radica en la noción de un sistema de autocrecimiento que optimiza el uso de energía durante todo el proceso, implementando una racionalización completa mediante la utilización de elementos simples que obedecen a un conjunto limitado de reglas en un entorno discreto. En este contexto, la fuente y sus principios se integran en reinterpretaciones arquitectónicas, incorporando las características definitorias de un CA como metodología de diseño (Wolfram, 2002; Ilachinski, 2001): *Semilla, Vecindad, Sistema discreto y Dinamismo* (Figura 2, en la página siguiente).

Semilla: Un CA se inicia con la activación de una célula *semilla*, que cataliza cualquier secuencia en un campo discreto, siguiendo un conjunto preestablecido de principios que fundamentan la construcción de patrones en el sistema discreto donde cada semilla reside. Esta semilla opera en dos modos: síncrono y asíncrono. En el primero, genera nuevas células que actúan como activadores para ciclos posteriores antes de desaparecer. En contraste, el modo asíncrono funciona independientemente del entorno discreto, modulando su entorno inmediato pero permaneciendo constante en el proceso, transformándose en un agente independiente en cada iteración.

Figura 1
Una muestra generativa del modelo Langton Ant CA con una *semilla* (roja) activando su *vecindad*, simulando una estructura de crecimiento cristalino.
Fuente: reelaboración propia.





Vecindad: Este concepto esencial del CA se refiere a la proximidad de cada celda, que parte de un estado predeterminado (estado = 0) y, mediante un conjunto de reglas, transita hacia un nuevo estado (estado = 1), originando una nueva generación de funciones reasignables para diversos propósitos y escalas de aplicación. A partir de este proceso, emerge un vecino, *activado* del universo discreto que rodea la célula inicial.

Sistema discreto: El CA se originó como un sistema celular discreto compuesto por una cantidad finita de componentes homogéneos y aislados, denominados células. Este sistema funciona durante un período de tiempo específico, generando ciclos discretos y un número finito de estados. La discretización se aplica en la lógica del CA como un mecanismo de abstracción de complejidad que actúa sobre la simplicidad geométrica, permitiendo el crecimiento celular paso a paso e intercambiando información limitada con una vecindad restringida, definida inicialmente como una acción local.

Dinamismo: El CA registra información en forma de imágenes/modelos 1D-2D-3D que documentan los eventos ocurridos durante el proceso de generación desde el paso 0 hasta el paso N (predefinido en la simulación), constituyendo un dinamismo almacenado en este sistema. Esto facilita la comparación de diferentes posibilidades de CA, adaptándose dinámicamente a cambios en los datos de entrada, reglas, cantidad de semillas y parámetros del entorno discreto, generando una amplia gama de opciones que ayudan a identificar las soluciones óptimas de acuerdo con los requisitos establecidos.

Un camino hacia la Arquitectura

A finales de los años cincuenta, los CA fueron reconocidos como un modelo prometedor para las computadoras paralelas. En la década del sesenta, se establecieron teoremas más completos y técnicos respecto a sus capacidades de computación formal, consolidando a los CA como objeto de estudio en el ámbito de los sistemas dinámicos matemáticos. A lo largo del tiempo, los autómatas celulares han recibido diversas denominaciones en el campo de la ciencia de la computación, tales como autómatas de teselación, espacios celulares, autómatas iterativos, estructuras homogéneas y espacios universales. Los CA, inicialmente entendidos como un modelo matemático primordial y como un sistema abstracto para simulaciones computacionales y de vida, hicieron su entrada tardía pero significativa en el campo de la Arquitectura. Esta incursión se materializó explícitamente en el ámbito académico teórico entre 1966 y 1968 con el sistema *rep-tile* (Frazer, 1995), percibiéndose como una oportunidad para desarrollar tanto diseños como simulaciones de problemas arquitectónicos en diversas escalas. Este período marcó la introducción de una idea de concordancia y replicación en la Arquitectura, desde un lenguaje discreto y un enfoque estructuralista, y más tarde, la incorporación del *constructor universal* como concepto para el diseño digital. Siguiendo este nodo particular en el marco de la relación entre las historias de la Arquitectura y la Matemática, es posible rastrear una secuencia de desarrollos donde emergieron elementos que ahora forman

Figura 2

Muestras emergentes del CA con una *semilla* (roja) activando su *vecindad* en un sistema discreto 3D.
Fuente: reelaboración propia.

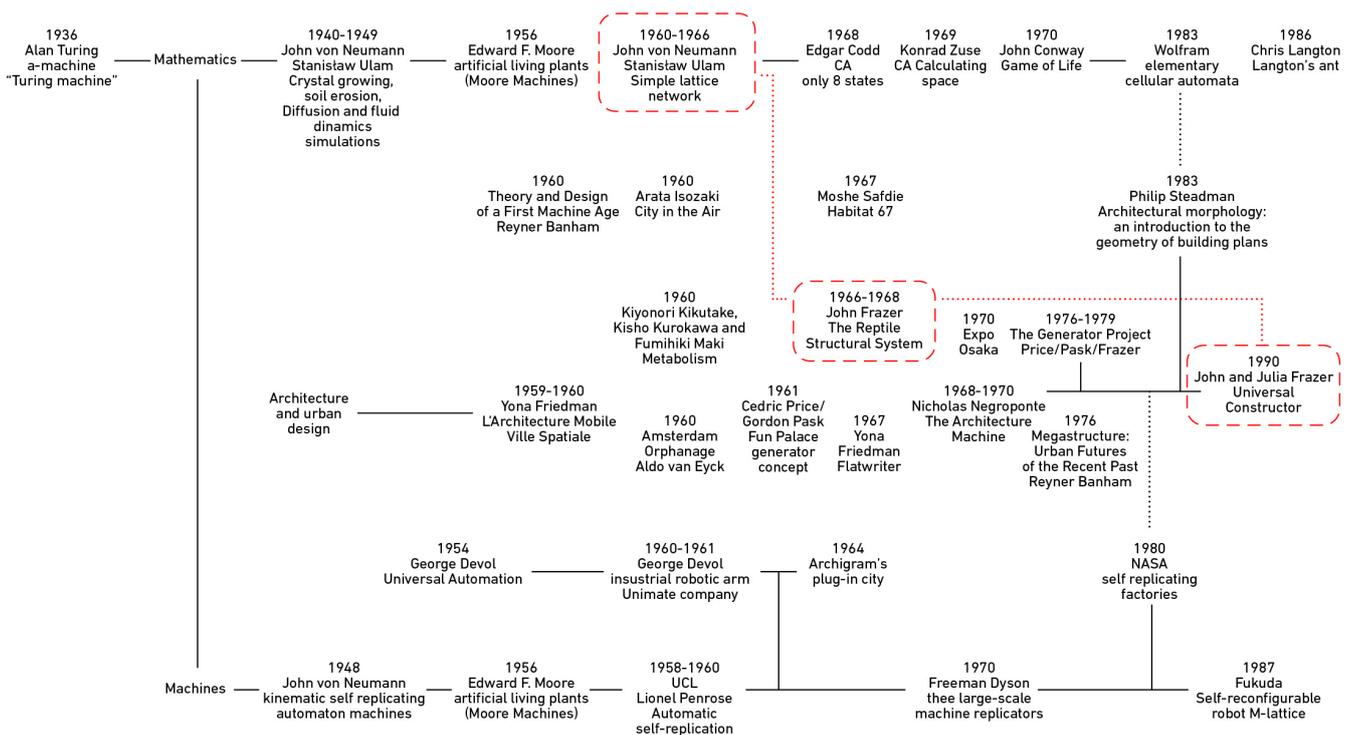
parte de nuestra comprensión de los CA. Desde una secuencia de hechos sin conexión lineal, conceptos como automatización, discretización, autoensamblaje, autoconfiguración, agregación, optimización y replicación fueron introducidos secuencialmente en el léxico arquitectónico.

Basándose en los cuatro elementos fundamentales que definen un CA, la Arquitectura ha adoptado gradualmente esta lógica de proceso constructivo de abajo hacia arriba en ciertas áreas o campos, especialmente aquellos relacionados con la computación, la automatización y la búsqueda de formas, actuando como un catalizador de cambio en términos de diseño, sin una lógica de arriba hacia abajo. Como estrategia generativa contemporánea, en la que el terreno común es la construcción participativa y colaborativa, similar a las sociedades de insectos (Meyboom y Reeves, 2013), es posible explorar soluciones óptimas para estructuras arquitectónicas colaborativas en escenarios complejos. A partir de la diversidad de patrones presentados brevemente más arriba, se aprecia la riqueza de los CA sólo en términos de posibles formas emergentes, simplemente ajustando algunos parámetros en sus configuraciones y reglas. Es nuestro deber intentar comprender qué escenarios potenciales pueden implementar estos sistemas. Desde una perspectiva práctica, este enfoque de diseño basado en reglas, lógicas

colaborativas y la casi ausencia de un arquitecto en los términos tradicionales de nuestra profesión, representa un tipo de arquitectura que está ganando terreno, redefiniendo el papel del profesional más como mediador que como único creador, con un fuerte sentido de autoría sobre lo diseñado. Esto fomenta una mayor participación del usuario, no como un fin para el proceso de diseño, sino como un motor de transformación para el espacio habitable en diferentes escalas. Esta participación activa del usuario en el proceso de diseño, como señaló Yona Friedman (1971; 1970), puede ser una fuerza poderosa para la innovación y la adaptación. Como se destacó anteriormente, John Frazer fue pionero en reconocer el potencial de los CA como una ruta viable hacia una perspectiva arquitectónica evolutiva. Sin embargo, este reconocimiento no surgió de la nada, sino que fue el resultado culminante de los esfuerzos concertados de arquitectos renombrados como Cedric Price, Gordon Pask, y John y Julia Frazer (Lopes, 2007). Esta línea de investigación ha demostrado ser particularmente fructífera, marcando una notable convergencia entre la Arquitectura, los sistemas y la computación, como se evidencia en proyectos emblemáticos como *Generator* y *Japan Net*. En este contexto, la contribución de Nicholas Negroponte (1970), fundador del Media Lab del MIT, no puede ser subestimada, especialmente su colaboración con

Figura 3

Una historia no lineal del CA de la Matemática a la Arquitectura: esta área de estudios se ha incluido seriamente en nuestra agenda profesional desde los años noventa con Michael Batty (1997), Paul Coates et al. (1996), John Frazer (1995) y otros, vinculando el conocimiento proveniente de matemáticos como John Von Neumann, Stanislaw Ulam, John Horton Conway, Chris Langton y Stephen Wolfram. Fuente: reelaboración propia.



Friedman, un pionero en la integración de sistemas computacionales de diseño participativo, como el *Flatwriter* (Vardouli, 2013). Friedman, una figura central en este diálogo interdisciplinario, enfatizó la importancia de involucrar a las personas en el proceso de diseño, proporcionando opciones viables y fomentando discusiones enriquecedoras sobre posibilidades variadas (Belogolovsky, 2020). Para ilustrar mejor estas conexiones intrincadas que han evolucionado desde la Matemática hasta la Arquitectura, se puede referir al diagrama (Figura 3) que traza una línea de tiempo desde los años cuarenta hasta los noventa, delineando los desarrollos clave en este campo (Gil y Coelho, 2017).

Autómatas celulares desde una perspectiva de diseño digital

El trayecto de la Arquitectura hacia una fase proto de los CA tuvo sus inicios con Friedman, como se señaló previamente. Sus teorías sobre la arquitectura móvil y

la emergencia de megaestructuras cristalinas resonaron fuertemente en la escena arquitectónica de los años sesenta presentando una visión radical y programática de concebir espacios habitables. Estas teorías facilitaron una plataforma para la autoplani-ficación y autoconstrucción. Ya durante la década del cincuenta, Friedman había introducido la noción de superestructuras expansivas que se cernían sobre nuestros desarrollos urbanos, denominadas *L'Architecture Mobile*, ilustradas vívidamente a través del concepto de la *Ville Spatiale* (Figura 4) (Friedman, 1958-1960).

En el manual operativo *Hacia una Arquitectura Científica* (Friedman, 1971), se fusiona la infraestructura física de la cuadrícula espacial con una infraestructura inmaterial gráfica, sirviendo como una representación calculable de la organización espacial. Friedman estableció una serie de axiomas y estrategias para abordar dos “cortocircuitos informativos” que identificó en los procesos arquitectónicos: la gestión de la vasta cantidad y complejidad de datos



Figura 4
Modelo de la *Ville Spatiale*,
Yona Friedman.
Fuente: © Yona Friedman
(1958-1960).

en proyectos arquitectónicos significativos por parte del arquitecto, y la adaptación de la edificación a las fluctuantes demandas y preferencias de sus futuros usuarios. Este enfoque representa la primera manifestación proto de los CA, o al menos encarna algunos de los principios que los definen. Inicialmente, se basó en la conceptualización de circuitos como estados binarios, estableciendo una conexión epistemológica con el pensamiento computacional. Además, incorpora la noción de *discretización*, materializada en una estructura tridimensional racional que permite una reorganización dinámica de los elementos internos, facilitando adaptaciones según las necesidades y creando dinamismo en el sistema. Este concepto se manifiesta en *barrios* tridimensionales organizados por los habitantes en una malla de acero de 6x6, funcionando tanto como un modelo estructural de *abstracción*. Esta idea se conecta con el *Flatwriter*, un software diseñado para permitir a los usuarios planificar el diseño de su futura vivienda en la *Ville Spatiale*, o reconfigurar su barrio en la misma, promoviendo así un diseño participativo digital. La segunda manifestación proto de los CA surgió con el Fun Palace en 1961, seguido por el Generator Project (1976-1979), una colaboración entre Cedric Price y Gordon Pask, con John y Julia Frazer como consultores (Lopes, 2007). La estructura fue concebida como un marco flexible donde se podrían integrar áreas programables, con la meta de permitir modificaciones según las solicitudes de los usuarios. Price, que formaba parte de un colectivo de arquitectos y educadores británicos, percibía la edificación como la máxima expresión del arte social y un medio para explorar el futuro. Posteriormente, en el Proyecto Generator, Price propuso una serie de estructuras reubicables sobre una cuadrícula permanente de bases en un terreno de Florida para la Gilman Corporation. Desarrollaron un software para organizar el diseño del sitio en respuesta a necesidades cambiantes, sugiriendo que cada componente de la edificación estuviera equipado con un microprocesador de *chip* único. Una grúa móvil podría ensamblar un conjunto de partes que comprendían gabinetes de módulos cúbicos y componentes de relleno (por ejemplo, marcos de madera que se complementarían con elementos modulares variados, desde paneles de pared móviles hasta mobiliario, servicios y accesorios), postes de cribado, cubiertas y componentes de circulación

sobre una cuadrícula ortogonal de bases de cimentación, rieles y drenajes lineales. Aunque este período fue fundamental en términos de conceptualización, la realización de estas ideas fue inalcanzable debido a las limitaciones tecnológicas de la época.

Autómatas celulares desde una perspectiva de diseño biológico

Una manifestación proto de los CA emergió de manera distinta a través del movimiento metabolista de finales de los años cincuenta. Este movimiento arquitectónico japonés de posguerra fusionó conceptos de crecimiento natural con superestructuras, creando un formato que puede interpretarse como una manifestación espacial de algunos principios intrínsecos a los CA. En este contexto, son vistos como simuladores biológicos de vida artificial, una herramienta que permite explorar formas agregadas vernáculas que se proyectan y programan en megaestructuras tecnológicas (Buš, Treyer, Schmitt, 2017). Dentro de este movimiento, destacan proyectos como la *Ciudad en el Aire* de Arata Isozaki y la *Nakagin Capsule Tower* de Kisho Kurokawa. Pero desde Kurokawa, uno de los enfoques teóricos más relevantes fue *Space City*, conceptualizado en la década del sesenta: una ciudad agrícola que utiliza un marco de 500 x 500 metros como unidad básica de la comunidad, que contiene veinticinco bloques de 100 x 100 metros para 200 personas. En este ejemplo, la idea de “crecimiento natural” es proporcionada por un sistema de red que funciona como conectores (calles, senderos y tuberías). Cada vivienda se define como un elemento cuadrado, componiendo barrios espontáneos autónomos, uniendo todas estas unidades, creando un pueblo como resultado. En este punto, es pertinente introducir las ideas de autopoiesis propuestas por los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela en la década del setenta. La autopoiesis, un término que literalmente significa “auto-creación”, se refiere a la capacidad de un sistema de regenerarse y mantenerse a sí mismo (Maturana y Varela, 1972). En el contexto de la Arquitectura, esta idea puede reinterpretarse a través de los CA para crear estructuras que son dinámicas y auto-sostenibles, capaces de adaptarse y evolucionar en respuesta a su entorno. En el diseño de *Space City*, pueden verse elementos de autopoiesis, presentes en la forma en que las unidades de vivienda

individuales pueden agruparse para formar barrios autónomos y espontáneos, que a su vez se unen para crear una comunidad más grande. Este enfoque orgánico y dinámico hacia la planificación urbana refleja una forma de autopoiesis arquitectónica, donde las estructuras pueden crecer y cambiar de manera orgánica, en sintonía con las necesidades y deseos de sus habitantes.

Además, la idea de “crecimiento natural” es facilitada, como se planteó más arriba, por una red de conectores que incluyen calles, senderos y tuberías, que interconectan las viviendas cuadradas individuales. Estos elementos no sólo sirven como infraestructura física, sino que también representan una forma de infraestructura inmaterial, facilitando la comunicación y la interacción entre diferentes partes del sistema, y permitiendo una forma de crecimiento y evolución que es verdaderamente orgánica y descentralizada.

En este escenario, podemos identificar varios principios que son característicos de los CA, incluyendo dinamismo, lógicas de crecimiento discreto y una noción de vecindad.

Aunque la abstracción está presente, se desvía de una interpretación matemática tradicional, optando en su lugar por una representación más orgánica y biológica.

Autómatas celulares como arquitectura

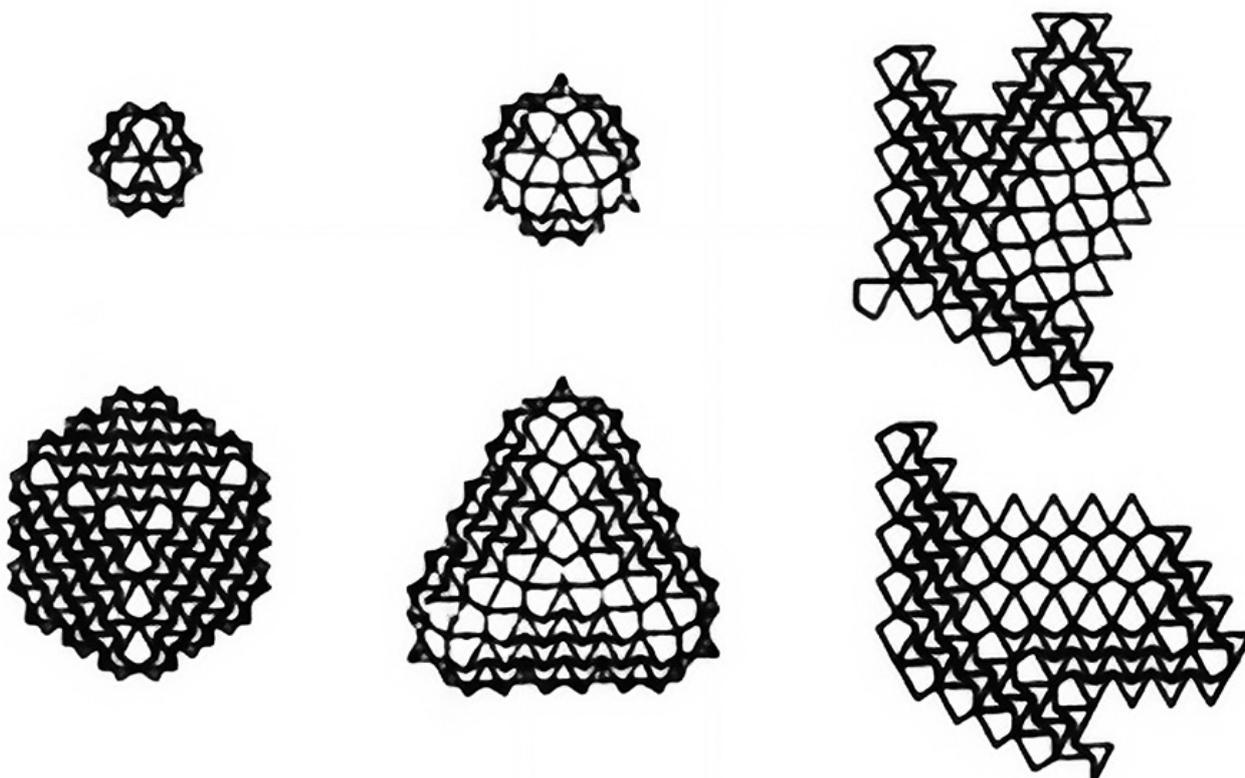
El ejemplo más interesante de este período proto de los CA es el sistema *rep-tile* (Figura 5) de Frazer (1995) en 1966, un sistema plegado basado en dos placas que se pueden organizar en varias formas y tamaños posibles, siendo un enfoque espacial basado en componentes. Este sistema funcionó con 18 combinaciones posibles entre estas dos placas, produciendo cerramientos en una amplia variedad de formas y arreglos estructurales. Una de las propiedades geométricas más fascinantes es la falta de necesidad de piezas únicas, al ser totalmente compatibles con los edificios rectangulares tradicionales debido a que sus componentes se pueden combinar de forma ortogonal. Para 1969 se introdujo el concepto de *semilla* en el sistema como la celda inicial desde donde la repetición geométrica de azulejos como sistema agregado puede comenzar su crecimiento, marcando simbólicamente la primera vez en que la terminología CA apareció en el léxico del diseño arquitectónico.

Después de estos tiempos, la terminología del CA gradualmente comenzó a ser parte de un enfoque arquitectónico

Figura 5

Rep-tile Structural System de 1966 de John Frazer.

Fuente: reelaboración basada en Frazer (1995, p. 69).



en diferentes escalas. Aun así, el desarrollo no fue relevante durante los años setenta, ochenta y noventa, principalmente porque el contexto sufrió varias contracciones, incluido el cierre tecnológico de los ochenta. Pero, algunas de las lógicas del CA como proto-manifestaciones fueron parte de este tiempo, incluyendo el ya mencionado Proyecto Generador. Justo en 1990, podemos encontrar una manifestación tangible del CA nuevamente en Arquitectura con el Constructor Universal de John y Julia Frazer; un conjunto de cubos translúcidos (que pueden representar cualquier cosa en cualquier escala posible), disponiendo estos elementos en un espacio tridimensional con la posibilidad de ser activado por uno de los 256 estados posibles. Este modelo fue la primera manifestación física real de CA en un esquema preciso y una expresión de lógica e información en el espacio, creando un enfoque de diseño genuinamente pionero desde una perspectiva del CA.

A finales de los años noventa, el trabajo de Paul Coates (Coates, Healy, Lamb y Voon, 1996) exploró el uso del CA como una manifestación ascendente de la arquitectura en el espacio, entendiéndolo como una oportunidad real a partir de un desarrollo de enfoque de diseño descentralizado basado en simulaciones digitales que exploraban las posibilidades del CA mediante el uso de la potencia computacional de estos tiempos. Y casi en paralelo, Batty (1997) ejemplificó la utilización del CA como herramienta para simulaciones de crecimiento urbano, demostrando en este proceso que es posible simular sistemas complejos como una ciudad mediante el uso de reglas locales simples (vecinos), lo que indica que el CA puede cruzar escalas como una herramienta de simulación y diseño.

Al borde de la primera década de 2000, varios enfoques nuevos surgieron como una síntesis de la historia del siglo XX, siendo el libro *A new kind of science [Un nuevo tipo de ciencia]* el más relevante en el campo (Wolfram, 2002). El texto sintetizó y clasificó los CA en una serie de experimentos basados en programas simples siguiendo un conjunto de reglas básicas, ejecutándose sistemáticamente y, finalmente, entendiendo cómo se comportan, organizando y creando complejidades muy por detrás de las reglas iniciales que siguen en su proceso generativo.

En este renacimiento del CA en la Arquitectura, figuras como Philippe Morel y Alisa Andrasek jugaron un papel significativo. Philippe Morel (2006), cofundador

de EZCT Architecture & Design Research y más tarde de Clouds Architecture, ha sido una figura central en la promoción del CA en la Arquitectura, especialmente a partir de 2000. Su enfoque en la computación y la generación algorítmica ha llevado a desarrollos significativos en el campo. Su *Bolívar Chair* de 2004, con su diseño voxelizado fue una manifestación deliberada del método computacional aplicado para calcularlo, utilizando el Análisis de Elementos Finitos, una matemática de partes discretas que está en el núcleo de las herramientas de diseño digital contemporáneo. Este método de diseño, utiliza los CA, permitiendo modelar fenómenos naturales dividiendo la materia continua en filas de células indivisibles y estableciendo reglas para las interacciones simples entre cada célula y sus adyacentes. Alisa Andrasek (2006), por su parte, ha estado a la vanguardia de la integración de los CA al utilizarlos como parte de una estrategia de diseño computacional avanzada. En este proyecto, Andrasek explora la intersección de la biología, la computación y el diseño, utilizando los CA para simular procesos de crecimiento y evolución, creando estructuras complejas y orgánicas que se asemejan a organismos vivos. Este proyecto cuenta además con la participación de Neri Oxman quien también aporta a los CA con *Tropisms: Computing Theoretical Morphospaces of Branching Growth Systems*, desde el MIT. Este momento en particular inició un nuevo renacimiento del CA en el camino arquitectónico con artículos como *Architectural Applications of Complex Adaptive System* (Anzalone y Clarke, 2003) o *Using Hardware Cellular Automata to Simulate Use in Adaptive Architecture* (Herr y Fisher, 2004), en las que los CA finalmente forma parte de un plan de diseño desde una perspectiva arquitectónica, pero aun así tratando al CA en el ámbito de la investigación en arquitectura y diseño, pero sin un salto real de metodología de diseño arquitectónico verdaderamente aplicable.

Conclusiones: el CA como modelo participativo para una perspectiva diferente basada en la práctica más allá de lo digital

Desde una perspectiva final del CA y su aplicación en arquitectura, podemos entender a esta última como el constructor universal de nuestras ciudades, funcionando como

una célula que se nutre con la información emergente de nuestro entorno construido. Estos bloques de arquitectura, que pueden ser vistos como las semillas del CA, están gobernados por reglas humanas que han transformado nuestros entornos naturales en manifestaciones físicas de nuestra evolución cultural. Estas reglas están sintetizando principios fundamentales en nuevas formas artificiales, transformando entornos con intervenciones espaciales y fusionando propiedades de materiales de diversas fuentes en soluciones tangibles innovadoras. Con la implementación del CA en la arquitectura, tenemos la oportunidad de revolucionar la forma en que modelamos el paisaje, creando formas discretas y orgánicas que evolucionan por sí mismas, agregando nuevas capas y formas a lo largo de los siglos hasta conformar lo que, en la actualidad, reconocemos como una ciudad. En este contexto, el CA emerge como un modelo de diseño interesante, permitiendo entender el entorno construido como una máquina en constante evolución, que puede ser reconfigurada a través de estados de negociación. Bajo esta lógica, el espacio habitable puede ser conceptualizado como un mapa discreto saturado de estados binarios, que alberga estructuras espaciales viables como subelementos que pueden ser reorganizados según los procesos de negociación subyacentes entre los habitantes. En este escenario, el arquitecto asume un rol no paternalista en el diseño espacial, actuando más bien como un planificador del sistema propuesto, estableciendo reglas de combinación en un procedimiento automatizado que traduce los deseos y la creatividad del usuario al núcleo de la disposición espacial. Esto permite a los usuarios elegir entre diferentes reglas como posibles configuraciones a implementar, basándose en las dinámicas presentes en el sistema habitable. ¿Representa esto un nuevo modelo de diseño participativo? En este marco, el arquitecto, aunque pierde autoría sobre el resultado final, se convierte en el creador del proceso, mecanizando y automatizando las reglas y acciones que los usuarios implementarán a lo largo de la vida útil del sistema. Aquí, el desafío radica en regular la imprevisibilidad del comportamiento humano, intentando predefinir opciones de vida y negociación. La traducción de las preferencias del usuario ha sido un desafío constante, con los arquitectos desarrollando un léxico espacial para ser utilizado por procesos computacionales.

En el contexto contemporáneo, la idea de diseño participativo ha evolucionado significativamente, especialmente con la integración de herramientas digitales avanzadas y aplicaciones móviles que facilitan una colaboración más dinámica y directa entre los arquitectos y los futuros residentes o usuarios de un espacio. Este enfoque moderno puede considerarse como una versión 2.0 del concepto original de *Flatwriter*, que fue una herramienta pionera en su tiempo, permitiendo a los usuarios diseñar el plano de su futuro hogar o rediseñar su barrio en la *Ville Spatiale*.

En esta versión renovada y mejorada, las aplicaciones móviles y las plataformas en línea actúan como facilitadores de un diseño *bottom-up*, donde los usuarios pueden tener un control más directo y significativo sobre el proceso de diseño. Estas herramientas digitales contemporáneas permiten una interacción más fluida y flexible, donde los futuros residentes pueden participar activamente en el diseño de su espacio habitable, eligiendo entre una variedad de opciones y configuraciones que mejor se adapten a sus necesidades y preferencias.

Esta evolución hacia un diseño participativo más inclusivo y democrático se alinea con la filosofía central de los AC, donde cada célula o unidad puede influir en el estado de sus vecinos, creando así un sistema dinámico y adaptable que puede evolucionar con el tiempo. En este sentido, las aplicaciones móviles y las plataformas digitales actúan como una extensión de este concepto, permitiendo una mayor participación y colaboración entre los diferentes actores involucrados en el proceso de diseño.

Por ejemplo, podríamos imaginar una aplicación que permite a los usuarios explorar y modificar diferentes aspectos de un proyecto arquitectónico en tiempo real, desde la selección de materiales hasta la configuración de espacios individuales, facilitando así un proceso de diseño más colaborativo y participativo. Los usuarios podrían incluso colaborar con otros, compartiendo ideas y retroalimentaciones contribuyendo así a la creación de un proyecto que es verdaderamente co-creado y refleja las necesidades y deseos de una comunidad.

Esta nueva ola de diseño participativo, potenciada por las herramientas digitales contemporáneas, no sólo democratiza el proceso de diseño, sino que también permite una mayor flexibilidad y adaptabilidad, características que son centrales en la filosofía de los CA. Al integrar estas herramientas en el proceso

de diseño arquitectónico, podemos comenzar a ver la emergencia de una nueva forma de arquitectura, una que es más orgánica, dinámica y, sobre todo, en mayor sintonía con las necesidades y deseos de las personas que habitarán estos espacios. Como resultado de esta operación automatizada, el proceso de diseño inicia de manera pseudo determinista: una vez que el objetivo de diseño ha sido especificado y articulado, la solución ya existe en forma de reglas preestablecidas, y una de las posibles combinaciones será aplicada, con la libertad del usuario siendo guiada por un conjunto de combinaciones posibles que el sistema espacial prediseñado ofrece.

A través de la revisión histórica realizada, hemos aprendido que esta lógica de diseño es parte de nuestro legado arquitectónico. Desde los inicios del siglo XXI, hemos visto cómo la importancia de una lógica de construcción ascendente y automatizada ha crecido, especialmente en proyectos como los de la NASA Innovative Advanced Concept (NIAC) en 2002-2003, que destacaron la necesidad de desarrollar arquitectura utilizando los CA y sistemas autocrecientes y discretos como principios fundamentales. Estos principios se han vuelto cada vez más centrales en esta agenda, junto con otros ejemplos como la macrofabricación del MIT con materiales digitales y la plataforma robótica BILL-E de la NASA.

Es crucial reconsiderar por qué los CA y sus principios están resurgiendo con fuerza en el contexto de una carrera espacial, mientras que su adopción en el diseño arquitectónico tradicional ha sido más lenta.

Hoy, la diversificación en los campos de la Arquitectura ha generado un nuevo terreno donde tenemos robots de autoensamblaje 4D, enfoques de diseño urbano mereológico, y arquitecturas discretas que están trabajando con una agenda basada en principios de discretización. Esto está creando un contexto positivo que permite al CA ser parte de nuestro progreso disciplinario de una manera más robusta y exploratoria, viendo el CA como una oportunidad para desarrollar una arquitectura diferente, más centrada en las relaciones entre elementos y en la interacción a diferentes escalas, desde el barrio hasta la ciudad y el espacio habitable.

Finalmente, este enfoque vincula nuestro progreso disciplinario a lo largo de más de 80 años de relaciones históricas no lineales desde la Matemática hasta la Arquitectura, abriendo nuevas posibilidades para el futuro de la disciplina ■

> REFERENCIAS

- Andrasek, A. (2006). CONTINUUM: A Self-Engineering Creature-Culture. [Archivo PDF]. *Architectural Design*, 76(5), pp. 18-25. DOI: doi.org/10.1002/ad.316
- Anzalone, P. y Clarke, C. (2003). Architectural Applications of Complex Adaptive Systems. Connecting Crossroads of Digital Discourse. Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture. Indianapolis, Indiana, 24-27 de octubre, pp. 325-335.
- Batty, M. (1997). Cellular Automata and Urban Form: A Primer. [Archivo PDF]. *Journal of the American Planning Association*, (63), pp. 266-274. DOI: [10.1080/01944369708975918](https://doi.org/10.1080/01944369708975918)
- Belogolovsky, V. (2020, 24 de febrero). Interview with Yona Friedman: "Imagine, Having Improvised Volumes 'Floating' In Space, Like Balloons". [En línea]. *ArchDaily*. Recuperado de <https://www.archdaily.com/781065/interview-with-yona-friedman-imagine-having-improvised-volumes-floating-in-space-like-balloons>
- Buš, P., Treyer, L. y Schmitt, G. (2017). Urban Autopoiesis - Towards Adaptive Future Cities [pp. 695-704]. En P. Janssen, P. Loh, A. Raonic y M. A. Schnabel (eds.), *Protocols, Flows, and Glitches - Proceedings of the 22nd CAADRIA Conference*, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, China, 5-8 de abril.
- Coates, P., Healy, N. Lamb, C. y Voon, W. L. (1996). The use of Cellular Automata to explore bottom-up architectonic rule. [Archivo PDF]. *Eurographics UK Chapter 14th Annual Conference*, 26-28 de marzo. Londres: Eurographics Association UK. Recuperado de <https://repository.uel.ac.uk/item/86q73>
- Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association.
- Friedman, Y. (1971). *Pour Une Architecture Scientifique*. París: Bel-fond.
- Friedman, Y. (1970). *L'Architecture Mobile*. París: Casterman.
- Friedman, Y. (1958-1960). Model Spatial City, project. [En línea]. Recuperado de <https://www.instagram.com/p/CpLYkkUPpi/>
- Gil, B. y Coelho, C. (2017). Laying the fundamentals: Early methods and intentions from the outskirts of space syntax. *Proceedings of the 11th International Space Syntax Symposium*, (13), pp. 1-13.
- Herr, C. M. y Fischer, T. (2004). Using Hardware Cellular Automata to Simulate Use in Adaptive Architecture. CAADRIA 2004, proceedings of the 9th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia. Seúl, Corea, 28-30 de abril, pp. 815-828.
- Ilachinski, A. (2001). *Cellular Automata: A Discrete Universe*. Singapore: World Scientific.
- Lopes, G. (2007). Envisioning an evolving environment - The encounters of Gordon Pask, Cedric Price and John Frazer. [Tesis doctoral]. Londres: UCL.
- Maturana, H. y Varela F. (1972). *De máquinas y seres vivos*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- Meyboom, A. y Reeves, D. (2013). Stigmergic Space. ACADIA 13: Adaptive Architecture [Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture], Cambridge, pp. 200-206.
- Morel, P. (2006). Computational Intelligence: The Grid as a Post-Human Network. [Archivo PDF]. *Architectural Design*, 76(5), pp. 100-103. DOI: doi.org/10.1002/ad.330
- Negroponte, N. (1970). *The Architecture Machine: Toward a More Human Environment*. Cambridge: The MIT Press.
- Vardouli, T. (2013). Performed by and Performative for [pp. 243-252]. En R. Stouffs y S. Sariyildiz (eds.), *Computation and Performance - Proceedings of the 31st eCAADe Conference - Volume 1*. Delft: Faculty of Architecture/University of Technology.
- Wolfram, S. (2002). *A new kind of science*. Champaign: Wolfram Media.