

Diseño Generativo En Diseño Computacional: Obtener Patrones Morfológicos Inéditos

Generative Design On Computational Design: Obtaining Novel Morphological Patterns



Diego Rodríguez de Ita
Universidad Autónoma de Nuevo León
México

diego.rodriguezdt@uanl.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0001-2796-6484>

Sofia Alejandra Luna Rodríguez
Universidad Autónoma de Nuevo León
México

sofia.lunard@uanl.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2879-4132>

Fecha de recepción: 07 de marzo de 2024. Aceptación: 26 de abril de 2024.

Resumen

En este artículo se presenta un experimento en diseño digital en Grasshopper con enfoque arquitectónico, que intenta crear morfologías inéditas, al utilizar algunos conceptos de crecimiento biológico. Se usa para recoger una muy variada selección de geometrías con características biológicas, lo que permite aumentar el bagaje y conocimiento del diseño biofílico.

Debido a que reinterpretar todos los patrones de crecimiento biológico a todas las escalas es una tarea un tanto inalcanzable, para decidir sobre las reglas del algoritmo se toman en cuenta algunos de los conceptos de crecimiento en la cristalografía, organización celular y aleatoriedad. Esto se hace simultáneamente a las ideas de Schopenhauer, que se interpretan conforme a los conceptos de adaptabilidad.

Palabras clave: diseño generativo, emergencia en el diseño, arquitectura paramétrica, diseño paramétrico.

Abstract

This article presents an architectural-focused digital design experiment using Grasshopper. The experiment aims to create unprecedented morphologies by employing certain concepts of biological growth. It aims to gather a diverse selection of geometries with biological characteristics and increase the breadth and knowledge of biophilic design.

Because reinterpreting all patterns of biological growth at all scales is somewhat unattainable, the decision-making process for the algorithm rules considers some concepts of growth in crystallography, cellular organization, and randomness, concurrently with Schopenhauer's ideas, which are interpreted according to adaptability concepts.

Keywords: generative design, design emergence, parametric architecture, parametric design.

Introducción

Son varios los estilos arquitectónicos que llevan la sustentabilidad como eje principal de alcance mediante el diseño digital. Entre ellos, destacan la arquitectura biomimética y la arquitectura biofílica¹, la cual busca su enfoque sustentable desde tres estrategias medioambientales: integrar elementos de la naturaleza al interior y exterior, aplicar estrategias pasivas² y apreciar las formas encontradas en la naturaleza, para abstraerlas en las formas de los edificios y sus elementos. Esto se justifica con los beneficios a la salud de las personas: reducción del ritmo cardíaco, reducción en la frecuencia de la respiración, entre otros (Kellert y Calabrese, 2016).

La arquitectura biomimética, además de su enfoque a medios pasivos, también toma en cuenta los procesos de diseño con un alcance evolutivo (Pawlyn, 2016), que es entendido también como *form finding*³ y diseño generativo. En este experimento, se hace énfasis en la tercera estrategia del diseño biofílico. Así, se desarrolla un algoritmo en Grasshopper⁴, el cual establece parámetros y reglas, basados en algunos de los conceptos morfológicos comunes en los organismos biológicos como crecimiento celular, puntual y acumulativo (Goriely y Ben Amar, 2006). Esto se hace junto a una metodología paramétrica que usa, principalmente, conceptos como relaciones topológicas, comparaciones de distancias y rangos de aleatoriedad (García y Lyon, 2013).

De este modo, el código diseñado puede generar distintas alternativas de soluciones, encaminadas a una generación de patrones geométricos que emulen las formas que se encuentran en la naturaleza, con un enfoque a la arquitectura biofílica. El significado de diseño generativo se puede entender como aquello que diseña un sistema, no un edificio (García, Somonte y Espinosa, 2020). En este sentido, se lo conoce también como la cualidad de emergencia⁵. Así, se parte desde la idea de Schopenhauer en el entendimiento del crecimiento de los organismos naturales. Schopenhauer dice que “es un índice de fuerzas inexplicables y una indicación segura de la ley según la cual la aparición de estas fuerzas se efectúa en el tiempo y el espacio, se suceden y se ceden el paso las unas con las otras” (2009, p. 114). Esta idea se interpreta aquí como “adaptabilidad⁶”. Así mismo, la idea generalizada sobre las formas en los objetos naturales es que estas responden, principalmente, a las leyes de la física (teoría mecanicista), química, así como la ley de la selección natural

¹ El objetivo fundamental del diseño biofílico es crear una experiencia positiva y valorada de la naturaleza en el entorno construido por el hombre (Kellert, Heerwagen, y Mador, 2008). La idea se origina en la comprensión de la evolución humana, donde nos desarrollamos biológicamente en respuesta adaptativa a fuerzas naturales, no artificiales ni creadas por el ser humano (Wilson, 1984).

² Ayudan y mejoran el confort interior, aumentan la eficiencia energética y contribuyen a atributos estéticos y sostenibles.

³ La búsqueda de formas en la arquitectura es un proceso en el que la forma del edificio se determina a través de un proceso lógico inspirado en los procesos de la naturaleza. El objetivo es lograr la forma óptima que ofrezca estabilidad dinámica, adaptabilidad y sostenibilidad.

⁴ Grasshopper: Es un editor de algoritmos gráficos que se integra con las herramientas de modelado de Rhino3D. Se utiliza Grasshopper para diseñar algoritmos que automatizan tareas en Rhino3D (Akos y Parsons, 2014).

⁵ Una de las mayores cualidades de los sistemas complejos es la capacidad que se tiene para que emerjan los resultados u outputs que se están buscando.

⁶ La adaptación es tanto un proceso como un estado. Como proceso, la adaptación describe la parte del cambio evolutivo en un rasgo que es impulsado por la selección natural. Como estado se refiere al “rasgo de las adaptaciones”, los cuales generalmente tiene una historia larga y compleja y es un producto mosaico de varios procesos, el cual que ha sido producido por la misma selección natural (Futuyma, 2017). Identificar ese aspecto es uno de los objetivos del programa de investigación “adaptacionista”.

(evolución). Otro experimento basado en el crecimiento celular con fines de diseño puede verse en Biloría y Chang (2013). Ahí, se genera una latís⁷ celular de aproximadamente 100 elementos de forma poligonal que puede controlar cada uno de los vértices (cada una de las coordenadas). Con esta idea, se pueden generar distintos objetos en 3D con calidad de mobiliario como asientos, mesas, bases, entre otros.

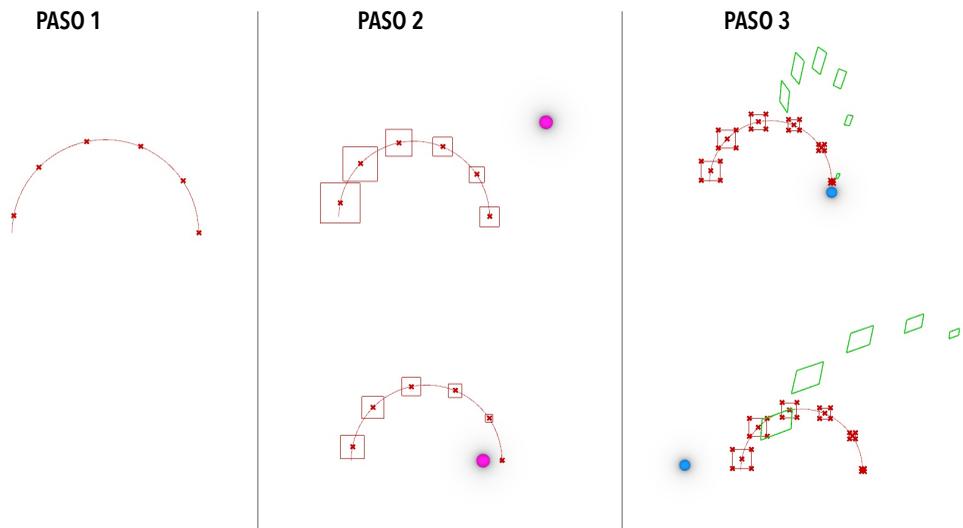
Elaboración: inicio y crecimiento

Según Wagensberg (2013): “La manera más sencilla de obtener una complejidad es construir una población de objetos simples” (p. 37). Por esto, el primer paso es crear un arco (Ver figura 1), o cualquier otra geometría básica, y dividirlo en seis partes iguales mediante puntos. Estos también pudieran tener cualquier otro número de partes. Así, estos van a ser utilizados como centro geométrico

de cuadrados, el tamaño de los cuales va a depender de acuerdo a la distancia de sus centros contra un punto arbitrario en el espacio en los ejes X y Y (representado por la esfera de color violeta). Dicho punto se puede entender también con el concepto de atractor⁸. Posterior a esto, otro punto es colocado (esfera celeste), con el fin que estos cuadrados se acerquen a él y modifiquen la distancia vacía que existe entre estos. Todo el proceso se puede ver en la siguiente figura 1.

Figura 1

Diagrama de la primera parte del algoritmo



Nota. Elaboración propia, 2024.

⁷ Reticula de gran número de unidades 2D en forma poligonal que simula el crecimiento celular o atómico en 2D y que puede generarse mediante diversos métodos, empleado ampliamente en la ciencia de materiales e ingeniería

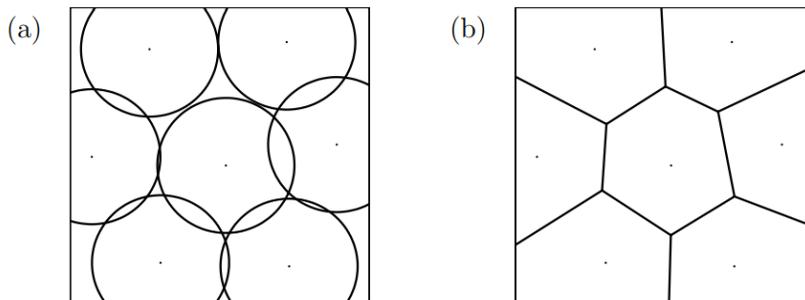
⁸ En el campo matemático de los sistemas dinámicos, un atractor es un conjunto de estados hacia los cuales tiende a evolucionar un sistema, para una amplia variedad de condiciones iniciales del sistema. Una trayectoria del sistema dinámico en el atractor no tiene que satisfacer ninguna restricción especial, excepto permanecer en el atractor, hacia adelante en el tiempo. La trayectoria puede ser periódica o caótica. Si un conjunto de puntos es periódico o caótico, pero el flujo en la vecindad se aleja del conjunto, el conjunto no es un atractor, sino que se denomina o repele (AcademiaLab, 2024).

Debido a que las estructuras orgánicas a una escala microscópica comúnmente se encuentran unidas, ya que son estructuras autoorganizadas y comúnmente se encuentran alrededor de una célula central (Wagensberg, 2013), dejan muy poco o nulo espacio vacío entre estas. Esto se debe a que se encuentran sometidas constantemente a diversos gradientes de presión, de temperatura, químicas, entre otras; además, comparten otras funciones (Ver figura 2). Según Wyn y Chapman (2012), "las células no guardan vacíos en sus uniones con las vecinas, todos sus vértices y lados deben de coincidir con las demás células" (p.89).

Existen diversos modelos matemáticos y de algoritmos computacionales que simulan el crecimiento celular y atómico en 2D, con el fin de estudiar y predecir las propiedades de los materiales

bajo distintas condiciones y características (Blikstein y Tschiptschin, 1999). Algunos de estos modelos son Voronoi, Montecarlo (Guziewski et al., 2020.), celular autómatata y la dinámica de vértices. En este experimento, se trabaja con los principales conceptos de dinámica de vértices; las células tienen forma poligonal y las posiciones de los vértices, así como el punto central, son indispensables para modelar las diversas fuerzas que actúan en las células (Goriely, 2017). Otras cualidades son tomadas en cuenta, como la autoorganización, además de los conceptos morfológicos y paramétricos mencionados. Se toman en cuenta estas cualidades, debido a que el objetivo de este experimento es crear una variedad de patrones geométricos con aplicación a la arquitectura biofílica.

Figura 2
Organización celular



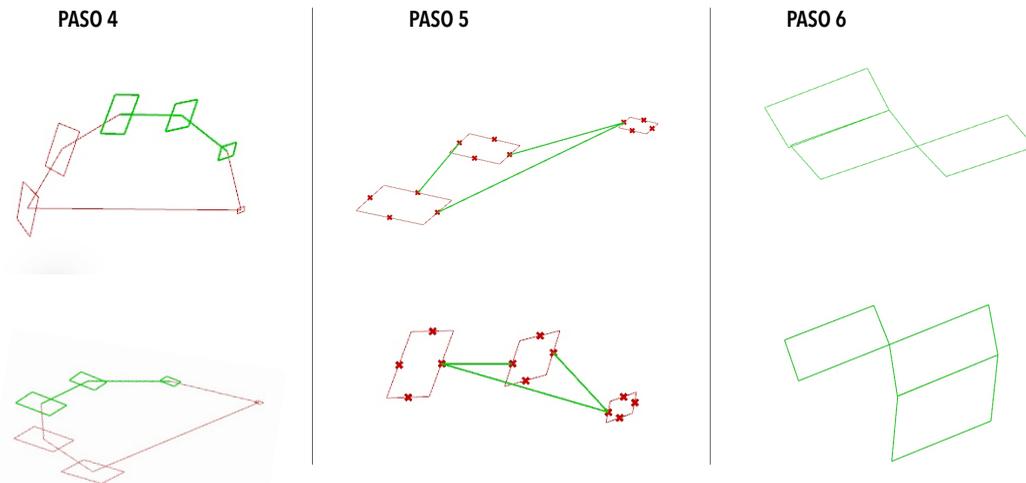
Nota. Wyn y Chapman, 2012, (p. 89).

En este experimento, se seleccionan únicamente tres rectángulos obtenidos cuya área se encuentre en la media con el resto [Paso 4]. Posterior a esto, los puntos centrales en cada arista, así como sus vértices, son evaluados y se busca la distancia más corta entre estos tres rectángulos, [Paso 5]. Con dependencia de la evaluación de estas distancias, los puntos que correspondan a estas son seleccio-

nados para atraer su geometría al rectángulo que se encuentre en medio de estos tres, de modo que se forme una célula central (lo que simula el gasto de energía mínima que presentan los organismos naturales al desarrollarse (Peña, 2016)) [Paso 6]. Para esta parte del proceso, se recomienda ver la figura 3.

Figura 3

Procedimiento de pasos 4 a 6



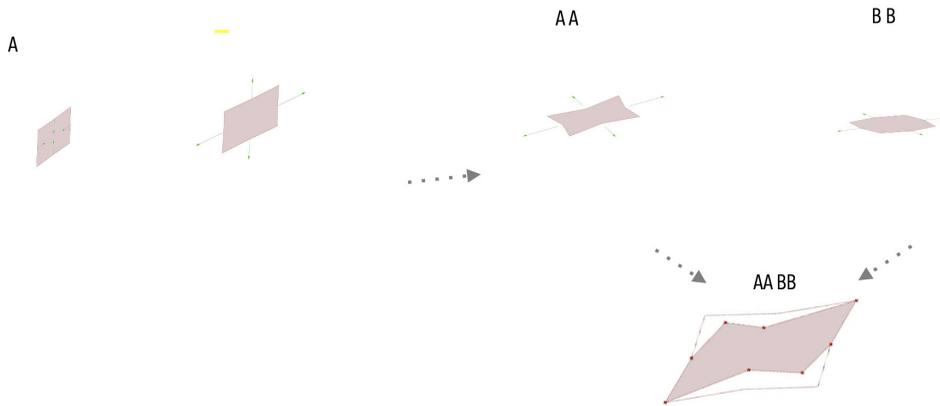
Nota. Elaboración propia, 2024.

En este momento, uno se encuentra con una geometría que se compone de tres rectángulos, los que están formando una única estructura organizada. En ella, dos de estos rectángulos rodean a uno central, que toma el rol de célula central. Además, estos tres rectángulos no pierden su individualidad geométrica.

En el rectángulo central se toman decisiones morfológicas inspiradas en la cristalografía⁹, junto a las mencionadas. Así, se simula la latís cúbica FCC (*Face Centered Cubic*), la cual compone estructuras moleculares muy comunes como el oro (Cuevas, Bayés y Calvet, 2022). En el rectángulo central, se toman en cuenta los puntos medianiles de cada arista (lo que simula una latís cúbica FCC) para crear vectores que se dirijan en dirección a puntos que estén cambiando su localización constantemente.

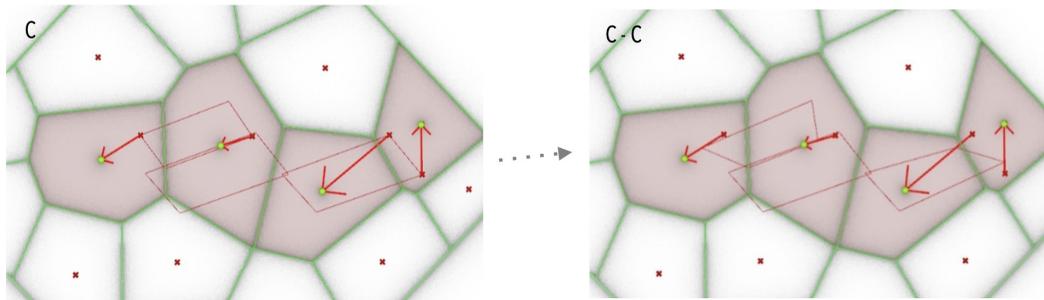
Esto se hace con el fin de obtener una gran variación de distintas formas. Cualquier vector se puede representar como una combinación lineal de la base de vectores de la celda unitaria (Bhadeshia, 2020). El tipo de crecimiento utilizado en este experimento está inspirado en el crecimiento biológico, denominado como puntual, de los más comunes en la naturaleza, el cual hace similitud al crecimiento de estirar una punta (Geitmann y Steer, 2006) como las raíces, ramificaciones, tallos, etc. Las magnitudes se consideran también controladas por los primeros puntos de control, para seguir teniendo mayor variación en los resultados. Por ello, esta magnitud podrá ser positiva o negativa y determinará la nueva forma obtenida.

⁹ La Cristalografía es la rama de la ciencia que estudia los cristales. Hoy sabemos que los cristales contienen átomos, moléculas y/o iones que forman unidades de repetición, llamadas latís elemental que, como ladrillos apilados en tres dimensiones, forman el edificio cristalino. Dentro de las latís elementales, los átomos también se pueden repetir a sí mismos mediante operaciones de simetría. Estos patrones de repetición provocan que los cristales muestren diferentes tipos de hábitos externos (www.xtal.iqf.csic.es/, 2024). La razón por la que los átomos se agrupan tan juntos es para formar la matriz más densa posible para proporcionar una estructura estable (Glazer, 2016).

Figura 4*Diagrama de proceso de crecimiento para el rectángulo central**Nota.* Elaboración propia, 2024.

Similar al crecimiento del rectángulo central, en los rectángulos que rodean al central se superpone una estructura voronoi arbitrariamente (Goriely y Ben Amar, 2006), con tamaños y posiciones aleatorias¹⁰ (Long et al., 2016). El centro de ellas se utilizará como atractor (punto rojo). De los cuatro vértices que conforman cada rectángulo lateral, son

seleccionados únicamente los más alejados al centro del rectángulo central. Estos puntos crecerán o el rectángulo se estirará en punta hacia el centro del voronoi que, en ese momento, se encuentre más cercano. Del mismo modo, la magnitud de los vectores se encuentra aleatoria con relación al área de cada rectángulo central.

Figura 5*Crecimiento de los rectángulos junto al rectángulo central**Nota.* Elaboración propia, 2024.

¹⁰ En los cálculos computacionales y matemáticos de los sistemas biológicos y dinámicos, estos procesos por ser de naturaleza compleja, son imposible de predecir a la totalidad, por lo que los investigadores utilizan los rangos de aleatoriedad para cubrir o ayudar a predecir esa información (Sheldrake, 2009). Muchos sistemas dinámicos al origen de su código poseen gran información de aleatoriedad (Baax, 2018). En el campo de la evolución, por ejemplo, la mutación y el giro genético dependen mayoritariamente de rangos aleatorios como información decisiva. (Baer, 2014).

Intersecciones y traslapes en la geometría

En esta etapa del experimento, se están buscando distintas acciones a realizar, ya que las figuras obtenidas hasta ahora varían sus características y posiciones respecto a las distancias de las que se encuentren los atractores iniciales (esferas violeta y azul). Se desarrollan nuevas condiciones (Figura 5) para determinar el tipo de unión en la intersección con la premisa de mantener la "individualidad" en los tres rectángulos, así como su crecimiento, para crear una sola estructura relativamente estable. Las nuevas condiciones se presentan de la siguiente manera:

Figura 6

Diagrama de proceso de condiciones de intersecciones y traslaciones



Nota. Elaboración propia, 2024.

2. Si el área de alguno de los rectángulos laterales es menor a la mitad del área de la célula central, entonces el vértice más cercano de la figura lateral buscará el vértice opuesto. Este es el opuesto que comparten la misma arista o lado de la figura para crecer en esta dirección (ver Figura 7).

1. Si la unión de una de las figuras se da por medio de sus vértices, de modo que únicamente un vértice tenga contacto con la célula central y ninguna otra intersección entre aristas tenga lugar, entonces el vértice de la figura lateral buscará unirse al vértice de la figura central más inmediato en cuanto a distancia (ver Figura 6).

Figura 7*Diagrama de proceso de condiciones de intersecciones y traslaciones**Nota. Elaboración propia, 2024.*

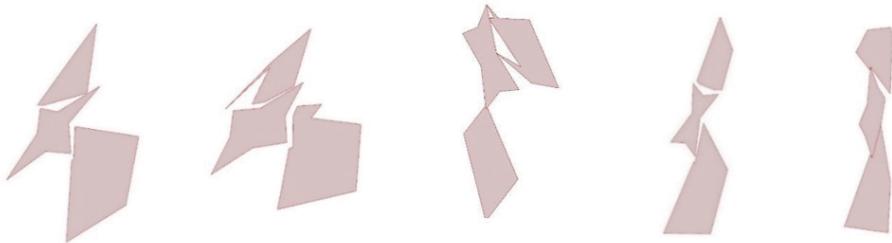
3. Si el traslape que existe de una célula lateral con la central es mayor a una cuarta parte del área de la célula central, entonces esta se trasladará de acuerdo a los vértices más cercanos de su propia geometría hacia los de la célula central. Si el traslape es menor, entonces se hará una intersección del tipo booleana, donde la célula central se incorpore en la célula central, sin reducir el área de esta.

Al recorrer continuamente las coordenadas de los atractores (esferas azul y violeta), una transición de la geometría ocurre evidentemente alrededor de la célula central. Ciertos patrones son más constantes que otros. Singularmente, en cierta magnitud de coordenada x,y , un nuevo patrón emerge y comienza su transición para, en otra nueva coordenada, desaparecer y que emerja otro. A continuación, se colocan los patrones o secuencias de transformaciones que se identifican mientras los dos primeros atractores se cambian de sus coordenadas x,y manipuladas de forma lineal y continua, con un límite de cien unidades de magnitud positiva y negativa.

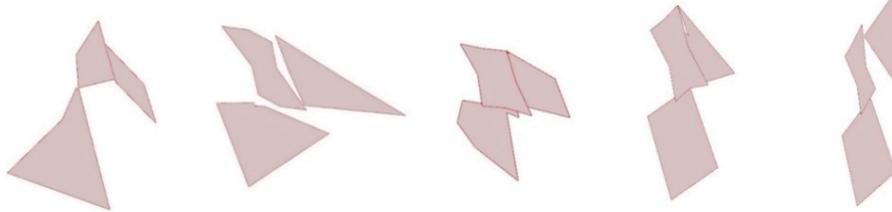
Figura 8

Patrones encontrados en el código colocados en orden en relación a su constancia y número de transformaciones

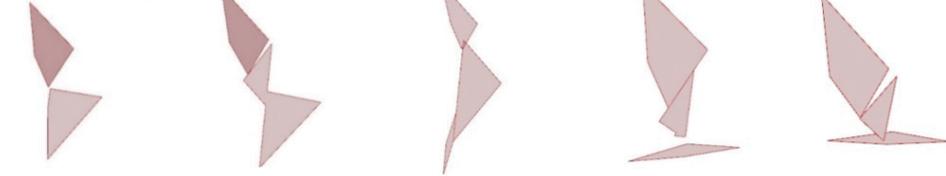
Patrón 1



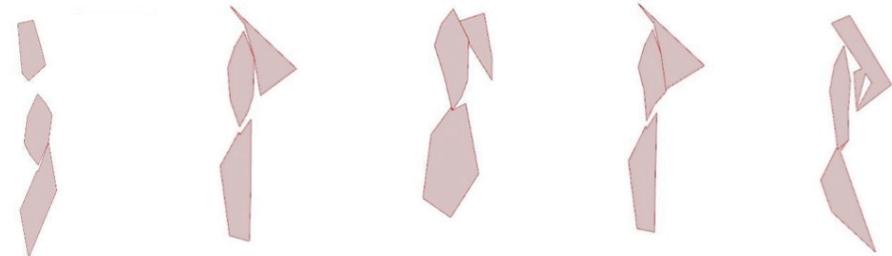
Patrón 2



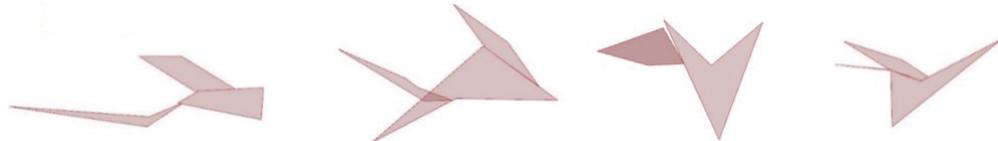
Patrón 3



Patrón 4



Patrón 5



Nota. Elaboración propia, 2024.

Al terminar de revisar las geometrías obtenidas hasta el momento, es fácil darse cuenta que tienen un cambio lógico al trasladar los atractores iniciales; pero al crecer o decrecer demasiado en áreas, estas cambian su posición referente a su unión con la célula central (Biloria y Chang, 2016) lo cual hace que emerja como lo hace Miramontes (1999) y, posteriormente, McNabb (2018) en otro patrón. Así mismo ocurre en el salto de la célula central, de "abrir o cerrarse" ocurre otro cambio determinante en el cambio de patrón en las transformaciones geométricas.

Para desarrollar las geometrías a un volumen (3D gráfico), las nuevas reglas que determinarán la altura se contemplan a partir de determinantes de crecimiento que se encuentran de manera general y repetitivamente en los organismos vivos como el crecimiento alométrico. El crecimiento alométrico se refiere a cómo las diferentes partes de un organismo se desarrollan en relación con otras partes del mismo organismo. También se le conoce como crecimiento de escalado.

Como ejemplo, se puede mencionar a la mayoría de los órganos del cuerpo, como el hígado y el corazón. Los cambios en la tasa de crecimiento alométrico pueden dar lugar a nuevas formas y funciones en los organismos (Santamaría y Silvia, 2018). Así mismo, se toman en cuenta diversos postulados de crecimiento biológico, como la Teoría de las Transformaciones, de D'Arcy Thompson.

Según Thompson, la forma de un organismo se puede describir mediante transformaciones matemáticas que explican cómo se modifican las dimensiones y proporciones de las partes del organismo durante su crecimiento. Al colocar una malla rectangular arbitrariamente, colocarla encima de cualquier estructura a nivel macroscópica y estirar solo un punto de esta malla, se estira al mismo tiempo la estructura macroscópica en relación proporcional a la fuerza que se ejerce en la malla. Thompson (1917),

Creo que está claro que podemos explicar muchos procesos biológicos ordinarios de desarrollo o transformación de la forma mediante la existencia de trabas o líneas de restricción, que

limitan y determinan la acción de las fuerzas expansivas del crecimiento que de otro modo serían uniformes y uniformes (p. 743).

Así mismo para la biología, durante la morfogénesis, los efectos más importantes del crecimiento son los que inducen un cambio en la forma directamente. Esto es que los crecimientos sobre masa y volumen se producen por los sistemas abiertos de la termodinámica; estos son los intrínsecos a su composición y en el entorno. La morfogénesis es el cambio más dramático en muchos sistemas orgánicos. Los tres procesos operativos durante el desarrollo son los siguientes: crecimiento, remodelación y morfogénesis; que puede ser ejemplificado como el cambio de una raíz a un tronco, de un tronco a la ramificación, etc. (Ambrosi *et al.*, 2010).

Las nuevas reglas señaladas anteriormente serán las siguientes, bajo la premisa que cada vértice tenga una altura distinta a los demás:

1. El valor del eje z de los vértices se determina de acuerdo al largo en promedio de las dos aristas que cada vértice comparte. Si esta longitud es menor a la distancia que se tiene entre este vértice y el de su propio centro geométrico, entonces se utilizan estas cantidades obtenidas para dar la altura. De lo contrario, se reemplazarán por la longitud más corta de estas dos distancias sobre los centros geométricos de las figuras laterales al centro geométrico de la figura central.
2. Se obtendrán los vértices de las figuras laterales más cercanos a la figura central; mientras más cercano a las aristas o vértices de la figura central, la magnitud en el eje z de estos vértices tenderá a ser 0. Esto se hace para evitar que choquen o se traslapen las geometrías.
3. Una vez obtenido el punto anterior, su magnitud en los ejes x,y será positiva o negativa, bajo la misma relación de dirección de crecimiento del rectángulo central (Ver figura 3: AA y BB)

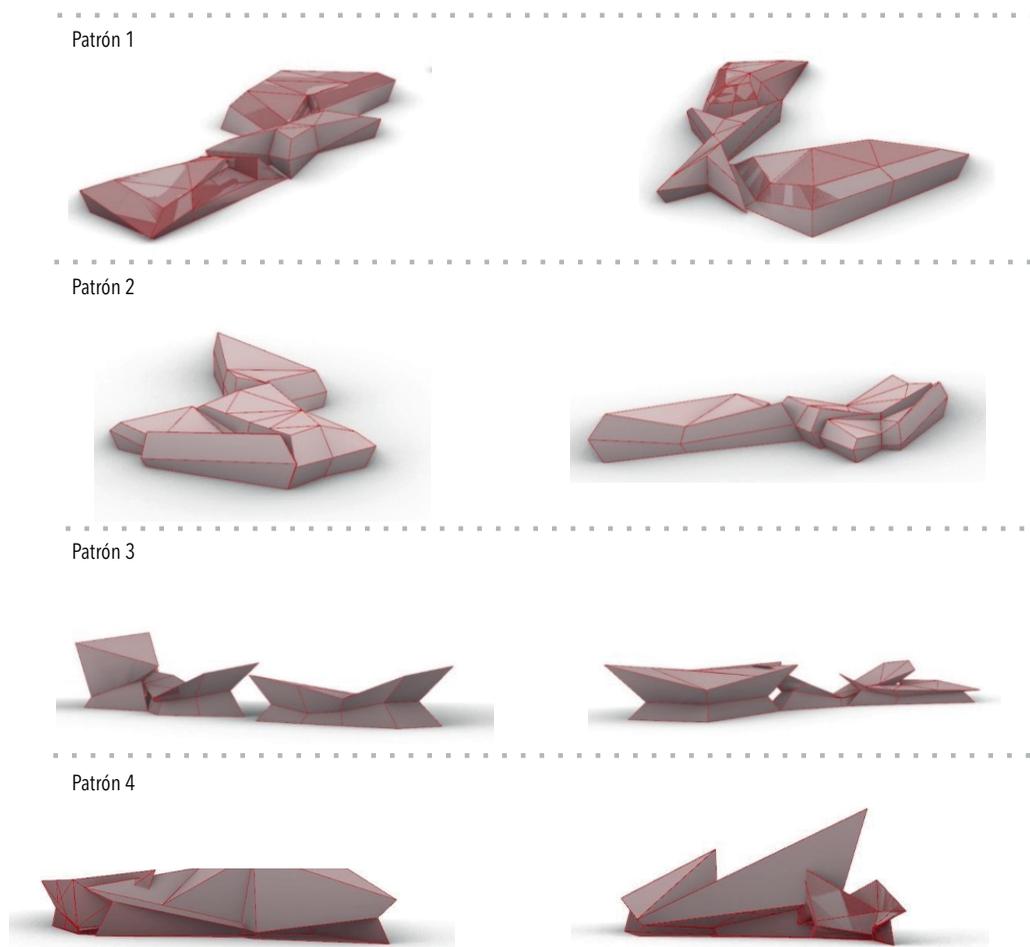
4. Se agregará otra magnitud en el eje x,y,z , con el fin de acercar estos valores a sus respectivos centros volumétricos hasta el momento. Esto se hace con el fin de obtener volúmenes "perfectamente cerrados".

En la elaboración de este código, la premisa principal es hacer que durante la transición geométrica, las figuras obtenidas siempre se resultan como curvas "perfectamente" cerradas, debido a que así es como se puede obtener una superficie. Cuando no se podían mantener como cerradas, en el

caso de un traslape de sus vértices o al reducir demasiado su tamaño, se vuelve a hacer el proceso desde el paso 0 del código; pero, en lugar de iniciar con tres rectángulos, se trabaja con dos. Así se obtienen figuras cerradas y puede continuar la transitoriedad geométrica (Figura 7, patrón 3 y 5, figura 8, patrón 4 y 5). Por ello, también surgen nuevos patrones geométricos. Este proceso podría tener un paralelismo con los procesos biológicos como el metabolismo, donde los procesos metabólicos son de carácter reversible, con tal de cumplir la alimentación que cada célula necesita (Peña, 2016).

Figura 9

Transformaciones volumétricas de los patrones de transición encontradas en la figura 8



Patrón 5



Nota. Elaboración propia, 2024.

En el siguiente link, se puede ver un clip que muestra la secuencia y transición de los patrones generados por el algoritmo para esta investigación: <https://youtu.be/bvdqd-kMLY4>

Conclusiones

Este experimento arroja entendimiento al estudiar cómo se comportan figuras geométricas elementales; en este caso, se trata de rectángulos. Se observa cómo se comportan al acercarse y repelerse, y se toma en cuenta sus propios vértices como fuerzas de atracción. Estos vértices representan direcciones, magnitudes y se seleccionan ordenadamente de acuerdo al que esté más cerca el uno del otro. Este es un acercamiento a la adaptación que sufre la morfología de los microorganismos, ya que se encuentran sometidos a diferentes presiones y temperaturas que están cambiando constantemente.

Lo anterior se debe a la cualidad principal de “emergencia” de la arquitectura generativa, donde se diseña un código, no un objeto, con el fin de obtener diversas opciones de producto de algo inesperado, pero a la vez objetivo. Así ocurre también con la arquitectura paramétrica, donde se busca que la cualidad de la arquitectura “responda” hacia un cierto entorno y ciertas particularidades.

Se obtuvo una transitoriedad de superficies cerradas con gran variación y multiplicidad. Estas, a su vez, se identifican en patrones de emergencia, debido a que comparten ciertas similitudes geométricas. Estas cualidades son semejantes a lo que busca la arquitectura biofílica, donde hacer analogías acertadas de los organismos vivos directamente a la morfología de la arquitectura trae consigo beneficios cognitivos al usuario como la reducción del ritmo cardíaco, una prolongación en el ritmo de respiración, observación y fascinación en la experiencia estética, entre otros.

Este trabajo se centra en la exploración morfológica de origen biológico y paramétrico hacia la arquitectura. Se enfoca en la funcionalidad de la arquitectura y la forma en los conceptos comunes de los sistemas biológicos. Esta investigación surge a través de exploración y búsqueda sobre la tercera regla del diseño biofílico, que es generar arquitectura que tenga similitud real en las formas de la naturaleza y fenómenos naturales.

Referencias

- AcademiaLab. (2024). *AcademiaLab*. <https://academia-lab.com/enciclopedia/attractor/>
- Akos, G. y Parsons, R. (2014). *Grasshopper Primer, third edition*. ModeLab .
- Ambrosi, G., Ateshian, G., Arruda, E., Cowin, S., Dumais, J., Goriely, A.,... Kuhl, E. (2010). Perspectives on biological growth and remodeling. *Mechanics of physics of solids*, 5-15.
- Baax, J. (2018). *Chreode landscapes in the Implicate Order and the formation of organisms*. Retrieved from Nomos: Dynamic metaphysics, If then constants as ultimate determinantes, and the implicate order. http://www.metafysica.nl/nature/nomos_3.html
- Biloria, N. y Chang, J. (2013). *Hyper-Morphology: Experimentations with bio-inspired design processes for adaptive spatial re-use*. eCAADe 2013 (pp. 529-538). Delft: Faculty of Architecture.
- Blikstein, P. y Tschiptschin, A. P. (1999.). Monte Carlo Simulation of Grain Growth. *Materials Research*, 2(3), 133-137.
- Cuevas, M., Bayés, L. y Calvet, T. (2022). Tierra y tecnología. *Minerología, Petrología y Geología aplicada. Revista de la Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad de Barcelona*, 60. <https://dx.doi.org/10.21028/mac.2022.11.21>.
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (22 de Abril de 2024). Cristalografía en pocas palabras (...en una cáscara de nuez...). *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*. <https://www.xtal.iqf.csic.es/Cristalografia/cascara.htm>
- Futuyma, D. (2017). Natural selection and adaptation. En J. Losos (Ed.), *Princeton Guide of Evolution* (pp. 189-200). Cambridge University Press.
- García, R. y Lyon, A. (2013). Diseño paramétrico en Arquitectura; método, técnicas y aplicaciones. *ARQUISUR*, 1(3).
- García, L., Somonte, M. y Espinosa, M. (2020). Diseño generativo: el estado del arte. *Técnica Industrial*, 327, 44-49.
- Geitmann, A. y Steer, M. (2006). The architecture and properties of the pollen tube cell wall. In: *Plant Cell Monogr* 3, 177-200.
- Glazer, A. (2016). *Crystallography: A Very Short Introduction*. Oxford University Press,
- Goriely, A. (2017). *The Mathematics and Mechanics of Biological Growth*. Springer Science + Business Media LLC.35.
- Goriely, A. y Ben Amar, M. (2006). *On the definition and modeling of incremental, cumulative, and continuous growth laws in morphoelasticity*. Springer-Verlag.
- Guziewski, M., Banadaki, A. B., Patala, S. y Coleman, S. P. (2020.). Application of Monte Carlo techniques to grain boundary structure optimization in silicon and silicon-carbide. *Computational Materials Science*, 182.
- Kellert, R., Heerwagen, J. y Mador, M. (2008). Biophilic design: the theory, science and practice of bringing buildings to life. *Urban Design and Planning*. 165(DP3), 193.
- Kellert, S. y Calabrese, E. (2016). *The Practice of Biophilic Design*. https://www.biophilic-design.com/_files/ugd/21459d_81ccb84caf6d4bee8195f9b5af92d8f4.pdf
- Long, N., Lang, D., Gessel, N. y Osstendorf, A. (2016). Evolutionary Processes as Models for Exploratory Design. *Biomimetic Research for Architecture and Building*, 9: 295-318.
- McNabb, D. (2018). *El paradigma de la complejidad*. Retrieved from YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=PT2m9IkGhvM>

- Miramontes, O. (1999). Los sistemas complejos como instrumentos. Perspectivas sobre la teoría de sistemas. *Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM siglo XXI*.
- Pawlyn, M. (2016). *Biomimetry in architecture*. RIBA Publishing.
- Peña, A. (2016). ¿Cómo funciona una célula? *Colección la ciencia para todos; 122*. FCE, SEP, CONACYT.
- Santamaría, C. y Silvia, J. (2018). Allometric growth in the armadillo *Chaetophractus villosus* (Xenarthra, Dasypodidae). *Acta Theriologica*, 63(1), 97-104.
- Schopenhauer, A. (2009). *El mundo como voluntad y representación*. Porrúa.
- Sheldrake, R. (2009). *A new science of life- 3rd Edition*. Icon Books.
- Thompson, D. (1917). *On growth and form*. Cambridge University Press.
- Wagensberg, J. (2013). *La rebelión de las formas. O cómo preservar cuando la incertidumbre aprieta*. Tusquets Editores .
- Wilson, E. (1984). *Biophilia: The Human Bond with Other Species*. Cambridge Harvard University Press.
- Wyn, G. y Chapman, J. S. (2012). Modeling Growth in Biological Materials. *SIAM REVIEW*, 54(1), 52-118.