



Aplicación de modelos operativos biológicos complejos en procesos proyectuales de diseño arquitectónico

Johan Yesid Llerena Jaimes

Universidad de Pamplona Colombia
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Pamplona, Colombia

Aplicación de modelos operativos biológicos complejos en procesos proyectuales de diseño arquitectónico

Johan Yesid Llerena Jaimes

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Arquitecto

Director:

Arq. MSc. Elkin Raúl Gómez Carvajal

Línea de Investigación:

Arquitectónica, artística, biológica, compleja y digital

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Pamplona, Colombia

2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a Dios, a mis padres, hermana y quienes me dieron su apoyo y consejos. A mi tutor por sus constantes asesorías y seguimientos. A mis compañeros de estudio y amigos, quienes sin su ayuda nunca hubiera podido hacer esta investigación. A todos ellos se los agradezco. Para todos ellos hago esta dedicatoria.

Agradecimientos

Primero y como más importante, me gustaría agradecer sinceramente los docentes María Bety Jaimes Parada y Santander Llerena Pérez a quien les debo mi pasión por el arte y la biología, a mi asesor de trabajo de grado Arq. MSc. Elkin Raúl Gómez Carvajal por su esfuerzo y paciencia, sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar que ha sido fundamental para mi formación.

Resumen

En un contexto dominado por los cánones de estandarización lógica para la generación arquitectónica se hace necesario la búsqueda de alternativas que contrarresten la dominante homogenización proyectual y formal, de aquí que se contempló la aplicación de un modelo de proyección arquitectónica que adopte una interrelación con los fundamentos operativos de sistemas biológicos complejos, valiéndose del estudio teórico y la síntesis de la información proporcionada por los principios simbióticos, individuales, sistémicos y naturales que fue gestionada a través de herramientas digitales que permitieron la interpretación algorítmica de los datos, lo que resultó el planteamiento alternativo de un sistema morfológico que se acercó al elemento arquitectónico a percepciones estéticas alternativas dotadas de complejidad, aleatoriedad y desproporción.

Palabras clave: sistemas complejos, operatividad biológica, proyección arquitectónica, algoritmos.

Abstract

In a context dominated by the canons of logical standardization for architectural generation, it is necessary to find alternatives that counteract the dominant project and formal homogenization, hence the application of an architectural projection model that adopts an interrelation with the fundamentals was contemplated. operations of complex biological systems, using the theoretical-synthetic study of the information provided by the symbiotic, individual, systemic and natural principles that were managed through digital tools that allowed the algorithmic interpretation of the data resulting in the alternative approach of a Morphological system that approached the architectural element to alternative aesthetic perceptions endowed with complexity, randomness and disproportion.

Keywords: complex systems, biological operability, architectural projection, algorithms.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XII
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
Capítulo 1: Aspectos teóricos de los sistemas complejos y la arquitectura	3
1.1 Estado del arte	3
1.1.1 Tendencias reconocidas en la documentación	3
1.2 Diagnóstico de modelos tradicionales de proyección arquitectónica	12
1.2.1 Visiones tradicionales para la concepción del diseño	12
1.2.2 Lógicas proyectuales	24
Capítulo 2: la operatividad de los sistemas biológicos naturales	28
2.1 Principios operativos de los sistemas biológicos complejos	28
2.1.1 La simbiosis cíclica	28
2.1.2 Variabilidad impredecible	33
2.2 De lo biológico a lo sintético	38
2.2.1 Vida sintética	38
2.3 Caso análogo Referencias.....	47
2.3.1 Mushtari - Neri Oxman.....	47
Capítulo 3: el elemento arquitectónico	54
3.1 Surgimiento del sistema morfológico	54
3.1.1 Caracterización y síntesis de la operativa del individuo	54
3.1.2 Definición de funciones algorítmicas.....	57
3.1.3 Definición de principios autómatas.....	61
3.2 Simulación del sistema morfológico	64
3.2.1 Sistema morfológico	65
Conclusiones y recomendaciones	74
Conclusiones.....	74
Recomendaciones.....	76
Bibliografía	86

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Esquema conexiones posibles.	5
Figura 1-2: Cuadro subcategoría de teorías de sistemas complejos.	7
Figura 1-3: Diagrama etapas de desarrollo algorítmico.	10
Figura 1-4: Elementos primarios de la forma en Villa Savoye – Le Corbusier.	16
Figura 1-5: Principios ordenadores de la composición.	20
Figura 1-6: Comparación metodológica de lógicas proyectuales.	26
Figura 2-1: Patrones de autoorganización natural.	40
Figura 2-2: Diagrama de flujo del proceso seguido por los algoritmos evolutivos.	42
Figura 2-3: Operatividad de la hormiga de Langton.	45
Figura 2-4: Simulación de la hormiga de Langton.	46
Figura 2-5: Simulación Agregación de difusión limitada.	47
Figura 2-6: Representaciones digitales de Mushtari.	49
Figura 3-1: Diagrama de flujo algoritmo evolutivo desarrollado.	57
Figura 3-2: Funciones del algoritmo evolutivo.	59
Figura 3-3: Individuos óptimos seleccionados.	61
Figura 3-4: Arreglo regular de los individuos.	62
Figura 3-5: Reglas de transición individuo X_1	63
Figura 3-6: Reglas de transición individuo X_2	63
Figura 3-7: Reglas de transición individuo X_3	64
Figura 3-8: Reglas de transición individuo X_4	64
Figura 3-9: Fases de ubicación de los individuos en el espacio vacío.	66
Figura 3-10: Variaciones morfológicas del elemento arquitectónico.	67
Figura 3-11: Variaciones morfológicas del elemento arquitectónico.	68
Figura 3-12: Elementos del material heterogéneo.	70
Figura 3-13: Componentes del sistema heterogéneo.	71
Figura 3-14: Aplicación de material heterogeneo a los elementos arquitectonicos.	72
Figura 3-15: Aplicación de material heterogeneo a los elementos arquitectonicos.	73

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Matriz DOFA elementos formales de la composición.	17
Tabla 1-2: Matriz DOFA principios ordenadores de la composición.	23
Tabla 2-1: Asociaciones simbióticas.	<u>33</u>
Tabla 3-1: Síntesis de características individuales.	56
Tabla 3-2: Variaciones individuales.	60

Introducción

En un contexto en el que los modelos de proyección arquitectónica evitan ser socavados por factores de estandarización, en el que los avances tecnológicos facilitan que los algoritmos excedan la esencia del ser humano “el crear”, surge la necesidad de explorar una realidad que posibilite el paso de un estado tradicional, primitivo y mecánico, a un estado de exploración, reinterpretación conceptual, morfológica y operativa. Con esto en mente, se plantea la aplicación de principios operativos biológicos en la proyección de nuevos elementos arquitectónicos que abandonen la generación homogénea y prioricen la complejidad en sus etapas de surgimiento.

Pero antes de experimentar alternativas que se contrapongan a las lógicas proyectuales tradicionales es pertinente diagnosticar las metodologías de surgimiento arquitectónico empleadas habitualmente. Se describe como el primer contacto con la académica la introducción a los principios proyectuales aportados por Wucius Wong y Francis Ching que destacan una serie de conceptos que tienen el objetivo de producir un orden compositivo aplicable a elementos arquitectónicos bajo la visión de que la belleza y armonía arquitectónica se alcanza al aplicar conceptos como la simetría, la jerarquía, la pauta, los planos seriados y la proporción, que facilitan la comprensión de la composición ortogonal de geometrías en un espacio pero sacrifican en cierto modo la libertad exploratoria.

De igual modo, las metodologías de surgimiento arquitectónico tradicionales son contenidas por los principios que actúan bajo el concepto de lógicas constitutivas del diseño que sumadas a las competencias metodológicas dadas por la academia

generan una estandarización regida por una serie de etapas a cumplir en cada una de las exploraciones que tengan como objetivo la generación de elementos arquitectónicos, priorizando el alcanzar un funcionalismo máximo con el cumplimiento fundamental de pautas como la selección de un contexto, la identificación de una problemática a través de un diagnóstico enmarcado por los estudios históricos, sociales y ambientales, entre otros, hasta llegar a una solución arquitectónica que mitigue o elimine la problemática encontrada. Si bien los pasos descritos facilitan el proceso proyectual y surgimiento de un elemento arquitectónico, limitan a los diseñadores que exploran las consideraciones de aleatoriedad, irregularidad, desproporción y complejidad como sus principios generadores de orden, armonía y operatividad.

Para poner a prueba la alternativa de exploración arquitectónica es necesario identificar una fuente de información que contenga las características de aleatoriedad, irregularidad y complejidad, por lo tanto, se aborda la operatividad del sistema biológico considerado como una fuente inagotable de información aplicable en contextos arquitectónicos. Dado que los datos que los sistemas biológicos son considerados complejos, es decir, son un todo que requiere del estudio de sus individuos, sus variaciones y sus conexiones simbióticas internas y externas, se recurre a las herramientas digitales que permiten la gestión de grandes cantidades de datos a través de los algoritmos diseñados para la simulación de vida sintética como los autómatas, los algoritmos genéticos o los algoritmos de crecimiento (growth). Todo esto con el propósito de desprenderse de la tradicionalidad homogeneizadora que concibe el ejercicio proyectual arquitectónico.

Finalmente, el desarrollo investigativo se estructura de la siguiente manera, primer capítulo que busca el estudio teórico a través del desarrollo del estado del arte y el diagnóstico de los modelos proyectuales arquitectónica tradicionales, continua con el segundo capítulo que hace referencia a la descripción de los principios operativos del sistema biológicos y finaliza con el tercer capítulo alusivo a la simulación operativa y morfológica del elemento arquitectónico.

Capítulo 1: Aspectos teóricos de los sistemas complejos y la arquitectura

1.1 Estado del arte

Para empezar, se realiza la construcción del estado del arte a partir del rastreo documental en la línea investigativa referente a la aplicación de teorías asociadas a los sistemas complejos y morfologías complejas en ejercicios de proyección arquitectónica, cabe señalar, que se realiza una búsqueda documental extendida para el desarrollo del estado del arte sobre el objeto de estudio desde el año 2012 hasta el año 2019 al evidenciar una cantidad limitada de documentos enmarcados en este tipo de áreas temática en periodos de tiempo más cortos (véase anexo 1).

El reconocimiento de tendencias teóricas y metodológicas que responden al primer objetivo subdividido en dos ejes temáticos; primero, implementación de teorías o morfologías complejas, segundo, implementación de herramientas tecnológicas avanzadas que permitan la aplicación de metodologías proyectuales complejas.

1.1.1 Tendencias reconocidas en la documentación

- Implementación de teorías o morfologías complejas

Se identifica que la concepción de los sistemas complejos alcanza su mayor relevancia durante la segunda mitad del siglo XX con el despertar del interés en el estudio de los diferentes tipos de sistemas por medio del conocimiento de sus partes. Ashby (1987) describe que la primera disciplina integrante de las ciencias de la complejidad fue la cibernética, la cual se encarga del estudio multidisciplinar de los sistemas de comunicación

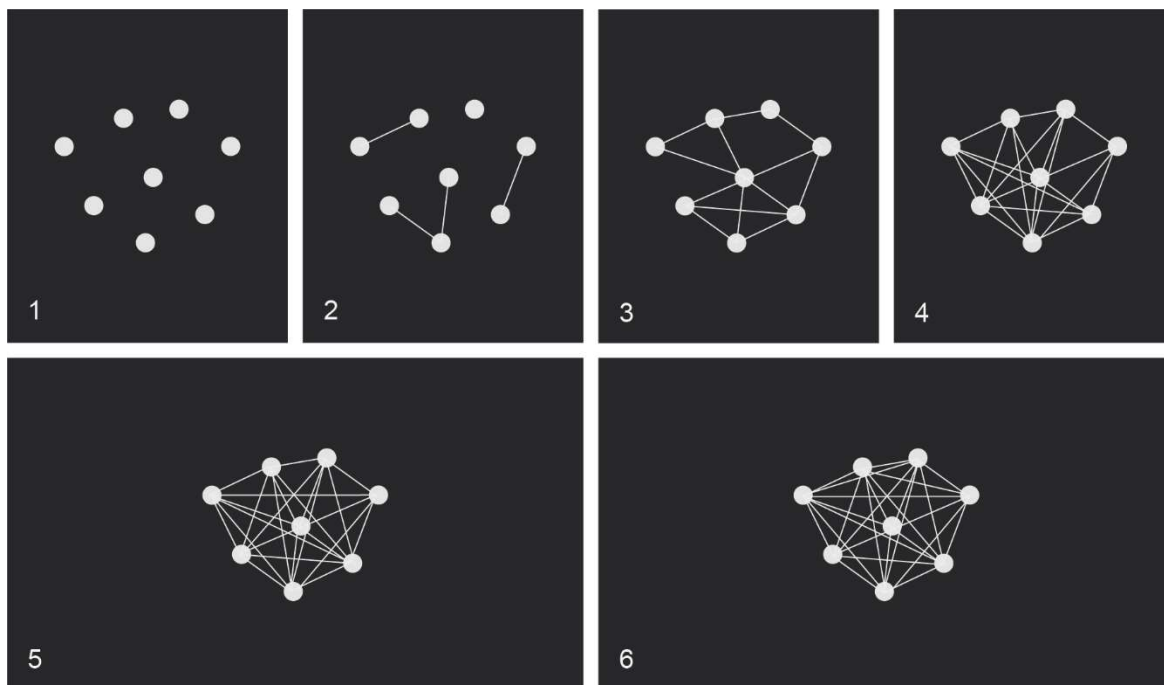
y autorregulación biológicos para su implementación en contextos de electrónica y mecánica. (TERRIDE, 1995)

Se considera la relevancia teórica de los aportes dados por Edgar Morin (1993) en su obra "*el método*" para la construcción del concepto de complejidad y sistemas complejos, al definir que un pensamiento basado en la complejidad debe integrar numerosas condiciones, no se debe considerar el objeto como individuo sino como un sistemas, se debe respetar la multidimensionalidad de los seres y de las cosas, se debe construir un dialogo que contemple la irracionalidad y la incertidumbre y se debe contemplar la integración al mundo de los fenómenos al evitar la mutilación de los mismos, de manera que la complejidad debe verse como un tejido heterogéneo que presenta la paradoja del uno y lo múltiple, la indeterminación y lo aleatorio de las ramas del conocimiento. (SOSA, 2012)

Edgar Morin (1994) postula que la definición de los sistemas complejos no conduce a la eliminación de la simplicidad, sino que deben ser entendidos como una unidad global organizada o el todo y por las interrelaciones entre los elementos, acciones o individuos, no puede ser explicada a través de la individualización de sus componentes o el manifiesto de propiedades únicas, además, recomienda tener la noción de sistema como una noción ambigua, es decir abierta múltiples interpretaciones. (SOSA, 2012)

Se resalta los aportes de Murray (1995), quien considera que un sistema complejo obtiene información de su contexto y de las interacciones al interior de sí mismo que pueden ser identificadas y expuestas en una clase de modelo en el que se expresan las relaciones trenzadas que rozan el orden y el desorden, la concepción del autor es ejemplificada en el esquema de relaciones posibles que muestra cómo se interrelacionan ocho puntos que pueden representar elementos físicos, químicos, biológicos, sistemas, entre otros como se observa en la Figura 0-1. (SOLER Y. , 2017)

Figura 0-1: Esquema conexiones posibles.



Fuente: Elaboración propia a partir de (SOLER Y. , 2017)

Las posturas de Edgar Morin y Murray permiten la considerar que la complejidad de un sistema radica en el alto grado de libertad e interacciones que presentan sus componentes, los cuales generan fenómenos aleatorios que no siguen de un modo predecible patrones fundamentales, dando lugar a eventos de comportamiento colectivo que están correlacionado en escalas altamente sensibles de tiempo y espacio, de aquí que la modificación o surgimiento de un fenómeno dentro del sistema se percibe en una cadena de reacciones que atraviesa todos sus componentes, que provoca el desarrollo de asociaciones como los procesos de autoorganización, adaptación o retroalimentación. (DOVAL, 2013)

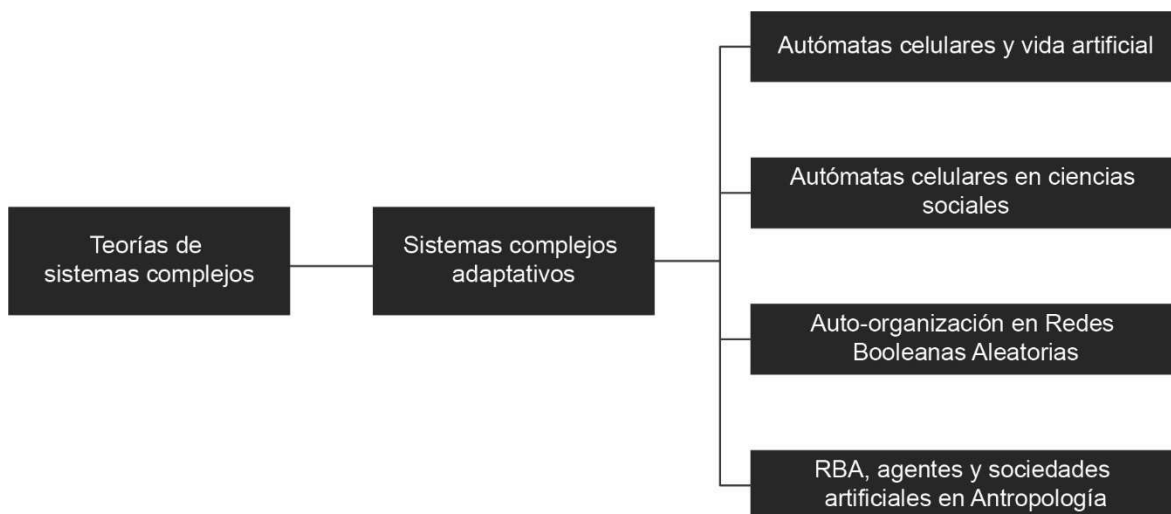
Cabe señalar que, la complejidad no es sinónimo de complicación, sin embargo, el desarrollo del pensamiento completo tuvo que pasar por distintas consideraciones para llegar a una definición que permite distinguir, modelar y predecir, de cierto modo, lo simple y lo complicado. Se destaca la necesidad de contemplar el concepto de complejidad como la percepción de un método o una forma de observación y no como la propiedad de un sistema o individuo, ya que la percepción de lo simple o complejo está ligada a la interpretación construida por el observador del sistema. (TERRIDE, 1995)

Se destaca como característica de los sistemas complejos su desarrollo inestable, es decir, no presentan un crecimiento lineal que concluye en el desarrollo de estabilidad, sufren rupturas impredecibles que inducen a una fragmentación del orden preconcebido que culmina en el surgir de una regularidad que produce y reorganiza el sistema de acuerdo a nuevas condiciones de desarrollo. Este comportamiento es típico de los sistemas biológicos, por ejemplo, el proceso de metamorfosis de los insectos cuya organización se da a diferentes niveles (huevo, larva, pupa y organismo adulto) y las condiciones que dirigen la causalidad de un nivel pueden ser totalmente diferentes a la de otro. (DOVAL, 2013)

Lo anterior también es descrito por Gabriel Bernasconi (2014), en su publicación "*Síntesis en la Complejidad*" al afirmar que de las interacciones presentes en un sistema complejo surgen nuevas propiedades inexplicables de forma aislada, pero, el aislamiento reprime algunas de sus propiedades, por ejemplo, las propiedades de una neurona, la cual al estar en un estado de aislamiento no posee ningún tipo de inteligencia, pero una gran cantidad de neuronas interactuando pueden dar origen la excitabilidad eléctrica que permite la conducción de impulsos nerviosos por todo el organismo. La consideración del sistema como un todo global y colectivo, dan paso al surgimiento de conceptos como la autoorganización concebida como un proceso de coherencia entre las conexiones de un sistema a distintas escalas sumado al concepto de emergencia, considerado como las nuevas propiedades que surgen por las conexiones de los elementos de un sistema.

Cabe señalar que, al entender la definición teórica de los sistemas complejos se reconoce que la teoría de los sistemas complejos contiene un extenso conjunto de sub teorías y áreas de aplicación; la cibernética, la teoría general de sistemas, estructuras disipativas, cibernética tardía, teoría de catástrofe, algoritmos genéticos y sistemas complejos adaptativos. Estos últimos enmarcados dentro de los denominados algoritmos de la complejidad que son empleados para la materialización en modelos de simulación, dado que tienen la capacidad de abordar y resolver diversas cuestiones de la complejidad. Del mismo modo, se considera que los sistemas complejos adaptativos están integrados por un número indefinido de individuos con conductas operacionales simples que al formar un sistema se transforman en complejas. (REYNOSO, 2010)

Figura 0-2: Cuadro subcategoría de teorías de sistemas complejos.



Fuente: Elaboración propia a partir de (REYNOSO, 2010)

La indagación documental permite identificar la forma en que los sistemas complejos adaptativos son conectados al contexto arquitectónico como se puede identificar en los siguientes aportes teóricos.

En el trabajo investigativo desarrollado por Sosa (2012), nombrado como “*diseño basado en los sistemas complejos adaptativos: el diseño de objetos auto referentes contenidos*” se identifican la influencia de los sistemas complejos en su desarrollo teórico que cumple con el objetivo de aplicar las propiedades generales de los sistemas complejos adaptativos en el diseño de elementos que presenten formas dinámicas determinadas por su interacción con el entorno. La investigación concluye con la descripción de que es posible direccionar los elementos arquitectónicos a través de los sistemas complejos, pero antes se deben identificar los términos de su complejidad, su organización, estructura y los patrones que emergen de ellos. (SOSA, 2012)

De la misma manera, se identifica que Estrada Galeano (2018) direcciona la implementación de las teorías de la complejidad al reconocimiento de la interacción humana como fundamental en el diseño de la forma arquitectónica y los efectos del ambiente construido en la dinámica espacial de los seres humanos. Se apoya en

la teoría de los grafos para medir las conexiones en términos de razonamiento matemático acercándose a la configuración de los espacios arquitectónicos a través la traficación de aristas, vértices y caminos, que permite la vinculación de los cuerpos con la practica proyectual, generando así nuevas propiedades visuales y perceptivas utilizables en el diseño de patrones probabilísticos para los usuarios de un espacio, además, permite explorar las trayectorias espaciales que tiene un usuario en relación con las formas que lo rodea. (ESTRADA GALEANO, 2018)

El documento desarrollado por Gabriel Bernasconi (2014), refleja como resultado de la aplicación de la teoría de sistemas complejos un prototipo de fachada denominada "*Fachada Voronoi Cinética*", el prototipo está compuesto por tres pieles tamizadas con patrones de puntos que dividen un plano en regiones que controlan la variación visual de las pieles considerando su orientación. El autor plantea que, el enmarcar la investigación en las ciencias de la complejidad permite cimentar una reflexión arquitectónica que busca encontrar y aportar nuevas herramientas para a proyección arquitectónica.

- Implementación de herramientas digitales avanzadas

Se reconoce que en la implementación de herramienta avanzadas se destaca la automatización de módelos arquitectónicos a través de procesos de diseño generativo. En el documento "*diseño arquitectónico íntegramente asistido por ordenador*", por Bono (2016), se logra evidenciar la intención de desarrollar modelos automáticos que simplifiquen la labor de un arquitecto a través de los modelos productivos y complementos de software como Grasshopper¹ y Houdini²,

¹ Herramienta digital desarrollada por David Rutten para la implementación de algoritmos a través de un lenguaje de programación gráficos integrado con las herramientas de modelado 3D de Rhino.

² Herramienta digital desarrollada por la empresa Sidefx que permite generar efectos especiales y sistemas procedurales a través de un flujo de trabajo basado en cadenas de acciones e información representadas gráficamente por nodos.

se presentan como un efecto que contrarresta la vulnerabilidad que presentaban los modelos artesanales de generación arquitectónica, además, se prioriza la proposición de metodologías capaces de automatizar el proceso de diseño y hacer proyecciones independientes de cualquier elemento arquitectónico. (BONO CREMADES, 2016)

El documento de Sosa (2012) resalta que la implementación de sistemas digitales representa una enorme evolución tecnológica que evidencia los alcances que tiene la creación de elementos inspirados en procesos biológicos. La autora considera que en su gran mayoría los sistemas digitales desarrollan procesos sin grandes variaciones continuas, son variaciones discretas que tienen como base la síntesis y manejo de grandes cantidades de información a través de la aplicación de códigos binarios. Cabe señalar que, para la implementación de metodologías digitales a modelos basados en sistemas complejos, es necesario clarificar el lenguaje con la identificación y unificación del idioma de los elementos que se dispone a diseñar a través de una herramienta que sea coherente y no de paso a conflictos. (SOSA, 2012)

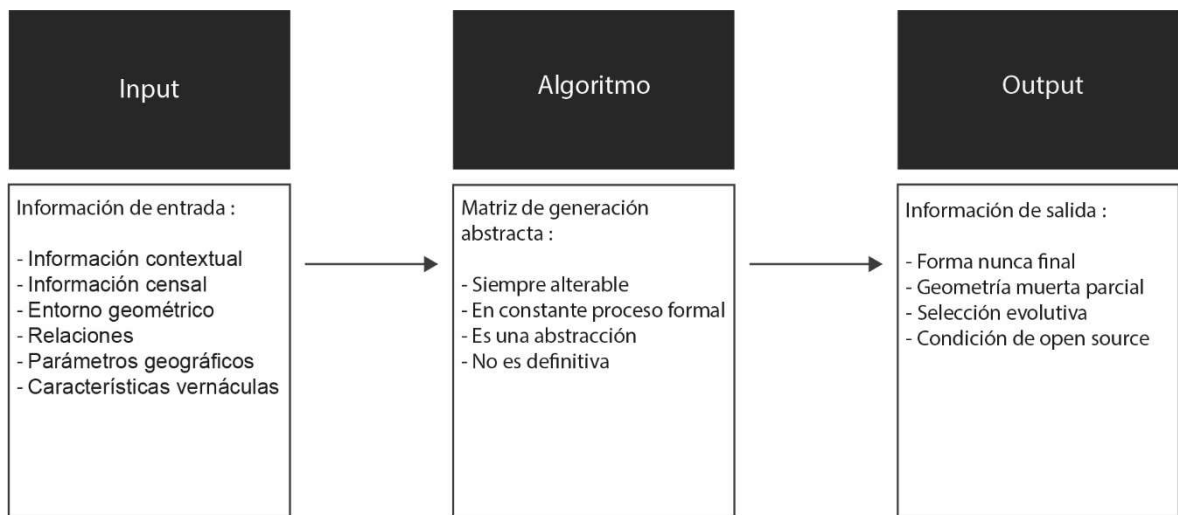
Miret (2014) describe que los recursos contemporáneos son cada vez más accesibles y permiten desarrollar estrategias en conjunto con las nuevas plataformas digitales que permiten identificar las relaciones entre los individuos y su entorno además la oportunidad de explorar posibilidades enfocadas a la elaboración de algoritmos que funcionen como semillas de proyectos abren la posibilidad de comprenderlos como sistemas generativos que producen artefactos arquitectónicos. Es importante resaltar que la autonomía de un proyecto arquitectónico generativo deberá abordar la complejidad de su sistema para que resulten en resultados precisos. (MIRET, 2014)

Además, se considera relevante la implementación de un lenguaje de programación para el desarrollo de funciones cinéticas automatizadas que orquestan mecanismos robóticos interactivos relacionados a través de sistemas de

control basados en software de estructuras paramétricas, como respuesta a los requerimientos de la aplicación de nuevos métodos tecnológicos de trabajo y diseño emergente. Esta perspectiva ofrece un modelo multidisciplinar, es decir, integra profesionales en arquitectura, ingeniería de diseño de sistemas, ingeniería eléctrica, informática y diseño industrial. (BEESLEY, CHAN, GORBET, & KUL, 2015)

Finalmente, Sarquis (1972) resalta el modo general en el que operan los procesos algorítmicos empleados en la gran mayoría de herramienta digitales, como un modo de entender los procesos de proyección arquitectónica y la posibilidad de crear familia de elementos a través de un diagrama que contempla las etapas organizativas expuestas en la Figura 1-3.

Figura 0-3: Diagrama etapas de desarrollo algorítmico.



Fuente: elaboración propia a partir de (MIRET, 2014)

El diagrama del proceso proyectual algorítmico se revela como una referencia organizativa que está sujeta a la identificación de los datos de entrada (input), necesarios para la determinación de un problema sobre el que se pretende actuar, postularon de un algoritmo que es el conjunto de operaciones al que se ve sometido

los datos que determinan el problema y finaliza con los datos de salida (output) correspondiente a los resultados gráficos que se obtienen luego de la ejecución del proceso algorítmico.

En síntesis, la indagación documental resalta que, el surgimiento del pensamiento investigativo complejo dio paso al desarrollo de teorías de la complejidad como la teoría de los sistemas complejos que deben su origen al despertar del interés de conocer los sistemas desde el comportamiento de sus partes con el todo.

Al mismo tiempo, la indagación documental permite la construcción de la definición del concepto de sistema complejo a partir de los aportes teóricos de autores como Edgar Morin y Gell Murray. El sistema complejo como el todo, una unidad global regida por las interrelaciones que se presenta entre sus individuos, elementos o acciones, con el exterior.

Es así como todo sistema que presente un conjunto de elementos con una interrelación profunda destacada por influencias mutuas que desencadenan cambios impredecibles e inevitables a nivel individual, de sistema con su exterior puede considerarse como sistema complejo. Afirmación que puede ser ejemplificada en la operatividad de sistemas biológicos desde escalas celulares hasta escalas ecosistémicas. La reflexión anterior perime la utilización de conceptos como la autoorganización, considerado como un proceso de coherencia entre las conexiones del sistema a distintas escalas para entender procesos y comportamientos naturales como los encontrados en la red neuronal, los enjambres, cardúmenes y manadas, donde la acción de un individuo interno o externo al grupo puede causar una reacción en la totalidad del sistema.

Al plantearse el estudio de los principios operativos de un sistema complejo en contextos proyectuales sintéticos es necesario implementar herramientas digitales que tengan la capacidad de interpretar esa complejidad, las cuales permiten gestionar grandes cantidades de datos a través de algoritmos que presenten una

operatividad no-lineal, es decir, no tienen un inicio y un fin predefinido, contemplan la imprevisibilidad y fragmentación de los órdenes preconcebidos que culminan en el surgir de una regularidad temporal.

1.2 Diagnóstico de modelos tradicionales de proyección arquitectónica

1.2.1 Visiones tradicionales para la concepción del diseño

Se define que los principios de desarrollo proyectual en la arquitectura pueden ser abordados desde múltiples perspectivas, maneras o modos, se considera que la generación de un proceso proyectual está sujeta a una solución arquitectónica de una problemática humana edificable con el enfoque primordial de dar una respuesta funcional. Es decir, el proceso proyectual prioriza la solución formal de una problemática con el planteamiento de una edificación con morfología habitable. Del mismo modo, la solución arquitectónica debe correlacionarse con procesos técnicos y creativos en la búsqueda de la expresión arquitectónica, la belleza formal y la funcionalidad edificable. (VIZOSO, 2017)

Joan Calduch (2001) expone que el modelo proyectual generador de arquitectura y la perspectiva compositiva son el reflejo de procesos formales, constructivos, teorías y pensamientos históricos, adoptados en el clasicismo, el movimiento moderno y en la actualidad. Muchos de los principios proyectuales son descritos a continuación de manera general y posteriormente se hace énfasis en los aportes de Wucius Wong y Francis Ching sumado a las lógicas proyectuales de Roberto Doberti, ya que sus trabajos se consideran como los contenedores de los principios que rigen el desarrollo de gran parte de los elementos arquitectónicos tradicionales.

El clasicismo centraba los procesos proyectuales con la interpretación de la arquitectura como un objeto definido por aspectos que delimitaban la estructura morfológica de las edificaciones; el primer aspecto hace referencia a resaltar la

corporeidad en la arquitectura, la tectónica, el volumen y la masa. El segundo aspecto hace referencia a la priorización de las leyes geométricas para el establecimiento del orden, la composición y las relaciones armónicas entre las partes edificables con el todo. (CALDUCH , 2001)

El pensamiento moderno desarrollaba los procesos proyectuales desde una perspectiva que considera lo formal como un volumen predefinido por escalas numéricas cuya proyección responde a la percepción psicológica de los espacios, las condiciones contextuales, la volatilidad social y el funcionalismo. El pensamiento moderno puede ser ejemplificado en la adopción de principios funcionalistas característicos de la escuela de arquitectura, arte y diseño Bauhaus como el descrito por el arquitecto Louis Sullivan (1930: p.6.) que en su artículo *“The tall office building artistically considered”* expresa que *“la forma sigue a la función”* refiriéndose a que el diseño se debe priorizar la aplicación de la función antes que el atractivo estético. (SULLIVAN, 2007)

El trabajo de Wucius Wong (1992), en su publicación *“Principios del diseño bidimensional y tridimensional”* destaca la practicidad del diseño contemplando que se debe considerar como un lenguaje visual que es la base de la creación de una respuesta a los problemas prácticos cuyo diseño está ligado a reglas, principios o conceptos que influyen directamente en la organización visual de un sistema proyectual, además, se resalta que en cualquier programa de estudio y todas las escuelas de arte, diseño y arquitectura existe un curso denominado diseño básico en el que se instruye sobre los elementos fundamentales de diseño bidimensional como una gramática de lenguaje visual. (WONG, 1992)

Los aportes de Francis Ching (2002), descritos en su libro *“Arquitectura Forma, Espacio y Orden”* agrupa y ejemplifica los principios y elementos históricos más relevantes empleados en procesos de proyección arquitectónica bajo la perspectiva de que la arquitectura se concibe como respuesta a condiciones preexistentes, puede obedecer a condiciones funcionales o propósitos sociales,

económicos, políticos paralelamente enfocada a la resolución de problemas a través del reconocimiento de situaciones problemáticas y la obtención de información del contexto. Además, resalta como característica proyectual vital la utilización de elementos geométricos básicos, sistemas y ordenes que hacen real el surgimiento de cualquier trabajo arquitectónico. (CHING , 2002)

Se destaca que, el extenso trabajo de Wucius Wong sumado al trabajo de Francis Ching y los aportes de Roberto Doberti consideran elementos fundamentales para el desarrollo proyectual arquitectónico. Los elementos son expuestos a continuación realizando un diagnóstico general con el objetivo de identificar la relevancia en procesos proyectuales de elementos arquitectónicos con enfoques formales inspirados en composiciones alejadas de la tradicionalidad y su impacto en el modo de percibir la proyección arquitectónica desde la academia.

- Elementos primarios de la forma

Francis Ching (2002) considera que la composición tiene como objetivo la búsqueda del equilibrio entre orden y diversidad al destacar que los elementos originadores de proyecciones formales arquitectónicas son: el punto, que indica la posición de un elemento en el espacio. La línea, considerada la prolongación de un punto. El plano, definido como la extensión de una línea y el volumen como la extensión de un plano. De igual modo considera que los elementos conceptuales primarios son invisibles pero perceptibles por la mente, por ejemplo, se puede percibir el punto de la intersección de dos segmentos o la línea que dibuja el contorno de un plano llegando a ser contenedores de formas dotadas de características esenciales como el contorno, el tamaño, el color y la textura. (CHING , 2002)

El punto es definido como una posición conceptual en el espacio carente de longitud, anchura y profundidad caracterizado por carecer de movimiento, ser un elemento central y ser un elemento sin dirección. En la proyección arquitectónica

puede ser empleado para definir los dos extremos de una línea, la intersección de dos segmentos, el encuentro de líneas en una intersección o el centro de un campo. (CHING , 2002)

La línea es expuesta como la formación de todas las construcciones visuales y la prolongación conceptual de un punto que posee una longitud, pero carece de anchura y profundidad. A diferencia de un punto que es estático la línea puede describir la trayectoria del movimiento y cuenta con la capacidad de expresar una dirección visual y un desarrollo. La línea tiene la función de unir, asociar, soportar o cortar elementos, además de definir las aristas y la forma de un plano o articular las superficies de dos planos. (CHING , 2002)

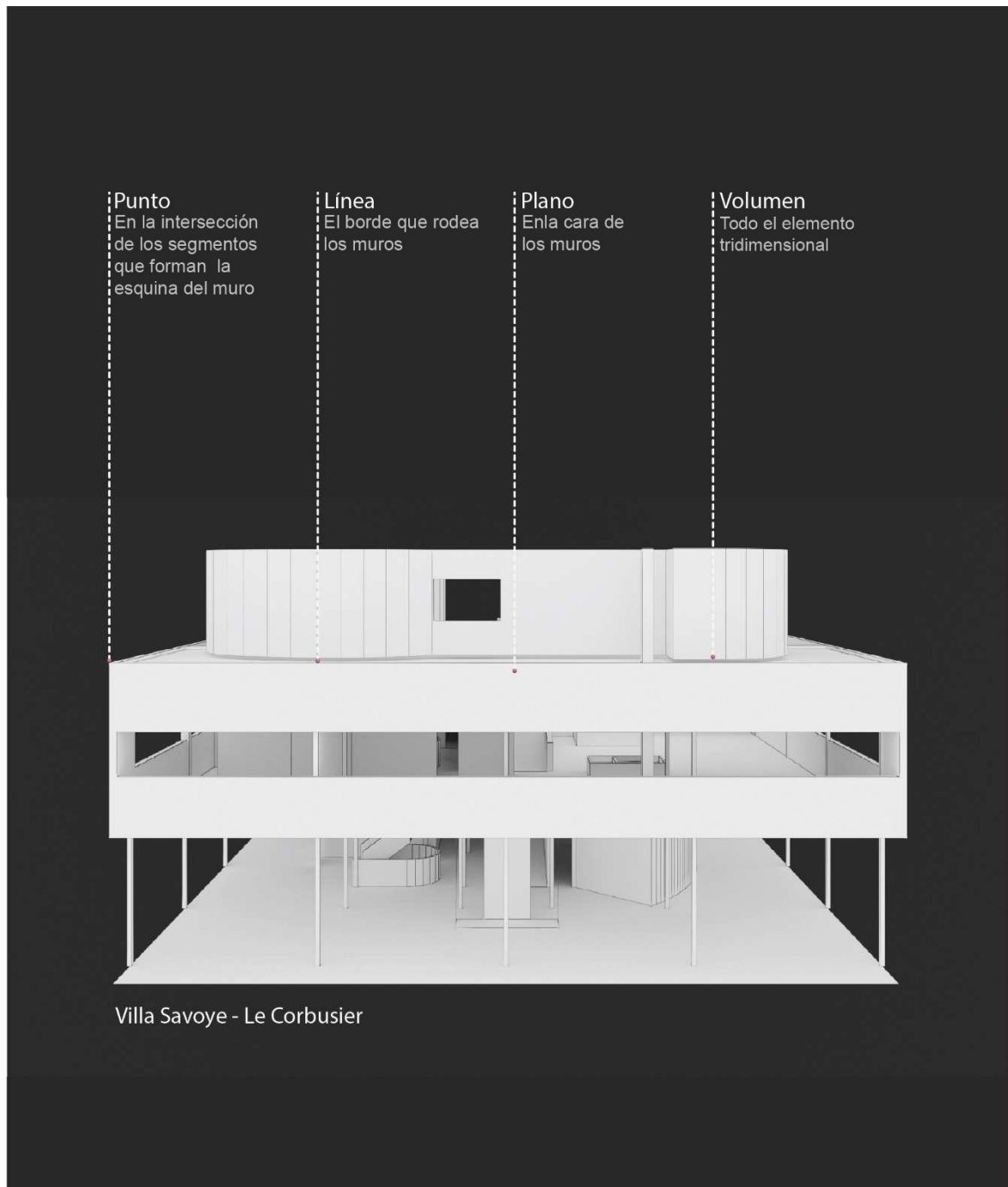
El plano es considerado la prolongación en una dirección de la línea que genera longitud y anchura, pero no profundidad, tiene como característica principal el ser determinado por una forma, el definir los límites de un volumen en el contexto arquitectónico o de las artes visuales y el ser considerado una forma fundamental en la proyección y diseño arquitectónico al definir específicamente volúmenes en tres dimensiones, masas y espacios, al mismo tiempo, los planos se clasifican en planos superiores, planos verticales planos base. (CHING , 2002)

Un volumen es definido como la prolongación de un plano que se convierte en un volumen tridimensional con longitud, anchura y profundidad, cuenta con la propiedad de contener puntos visibles en sus vértices, líneas visibles en sus aristas y planos visibles en sus superficies. El volumen puede ser identificado por la forma primaria que lo caracteriza y los componentes de su contorno que definen el límite de la forma. (CHING , 2002)

De la misma manera la percepción de Wucius Wong (1993) sobre los elementos fundamentales de la construcción formal se adhieren a la definición de Francis Ching al considerar el punto, la línea, el plano y el volumen, como los conformadores iniciales de la proyección de diseño enmarcándolos bajo el título de

elementos conceptuales invisibles, por ejemplo, en el cierre de un ángulo se puede identificar un punto o en el contorno de un volumen se puede identificar una línea. (WONG, 1992)

Figura 0-4: Elementos primarios de la forma en Villa Savoye – Le Corbusier.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 0-1: Matriz DOFA elementos formales de la composición.

DOFA - Elementos formales de la composición	
Debilidades	<ul style="list-style-type: none"> - Las limitaciones conceptuales y formales que se presentan al intentar utilizar los principios de surgimiento compositivo descritos por los autores en ejercicios que busquen el desarrollo de elementos arquitectónicos evolutivos basados en principios de vida sintética o inteligencia artificial. - La evidente desactualización de los principios de surgimiento proyectual respecto al desarrollo tecnológico impide la exploración de proyecciones arquitectónicas que tengan la intención de adoptar procesos complejos como la operatividad biológica. - La importancia que se le da a las formas geométricas básicas para el proceso proyectual dejando de lado importantes parámetros como la relación análisis de datos – geometría. - La aplicación de estos principios estuvo planteada para tiempos que difieren de los actuales donde la arquitectura se está desarrollando para y con tecnologías avanzadas.
Oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> - Ser actualizados para su utilización en procesos proyectuales complejos.
Fortalezas	<ul style="list-style-type: none"> - La síntesis de conceptos básicos que pueden ser utilizados en procesos proyectuales que apliquen geometrías simples. - Facilidad de comprender y aplicar los principios geométricos en entornos académicos y no académicos de diseño.
Amenazas	<ul style="list-style-type: none"> - Priorizar la utilización de geometrías simples en el desarrollo conceptual o formal de un elemento arquitectónico complejo. - La desconexión gradual entre los elementos arquitectónicos y los sistemas biológicos pueden interrumpir procesos naturales vitales para dichos sistemas. - La implementación de los elementos geométricos descritos por el autor puede impedir la exploración entre los límites de la geometría y la naturaleza. - Al ser uno de los primeros contactos que se tiene en la academia puede resultar en la posterior automatización del proceso de proyección.

Fuente: Elaboración propia.

- Principios ordenadores de la composición

Según Francis Ching (2002), los principios utilizados para generar orden en la composición de los procesos proyectuales arquitectónicos son la simetría, la jerarquía, el ritmo, la pauta, la transformación y la proporción, estos conceptos son empleados principalmente para proporcionar la regularidad geométrica y para la disposición de un conjunto de partes que den paso a una organización armónica.

Francis Ching (2002) considera que la diversidad y complejidad de las formas en los espacios deber ser ajustados en una jerarquía funcional que acoja a los usuarios, objetos y contexto, los cuales son reconocidos como la esencia de las formaciones arquitectónicas. Cabe aclarar que la carencia de diversidad en el orden genera monotonía y la carencia de orden en la diversidad produce caos, situación que impide la coexistencia conceptual de las formas con el espacio y de una formación arquitectónica ordenada o unificada, esta postura deja de lado jerarquías proyectuales que estén direccionadas a la relación del elemento arquitectónico con sistemas naturales, artísticos o escultóricos.

Se define la simetría como un principio que requiere la existencia de un eje o un centro que estructure la composición en dos puntos que requieren un equilibrio formal y espacial alrededor a una línea o punto en común, el autor identifica que en contextos de proyección arquitectónica la simetría es utilizada principalmente en la organización de los espacios. La simetría es clasificada en dos tipos, el primer tipo, es denominado simetría bilateral que se refiere al equilibrio en la distribución de elementos en los lados opuestos de un mismo eje que forma dos mitades idénticas, el segundo tipo, es denominado simetría central que corresponde a un equilibrio de elementos análogos compuestos de forma radial que puede ser dividido en mitades similares con un plano que atraviesa el centro del eje como se observa en la Figura 1-5. (CHING , 2002)

El concepto de jerarquía es resaltado por Francis Ching (2002) como un principio que debe estar presente en la totalidad de las composiciones arquitectónicas que,

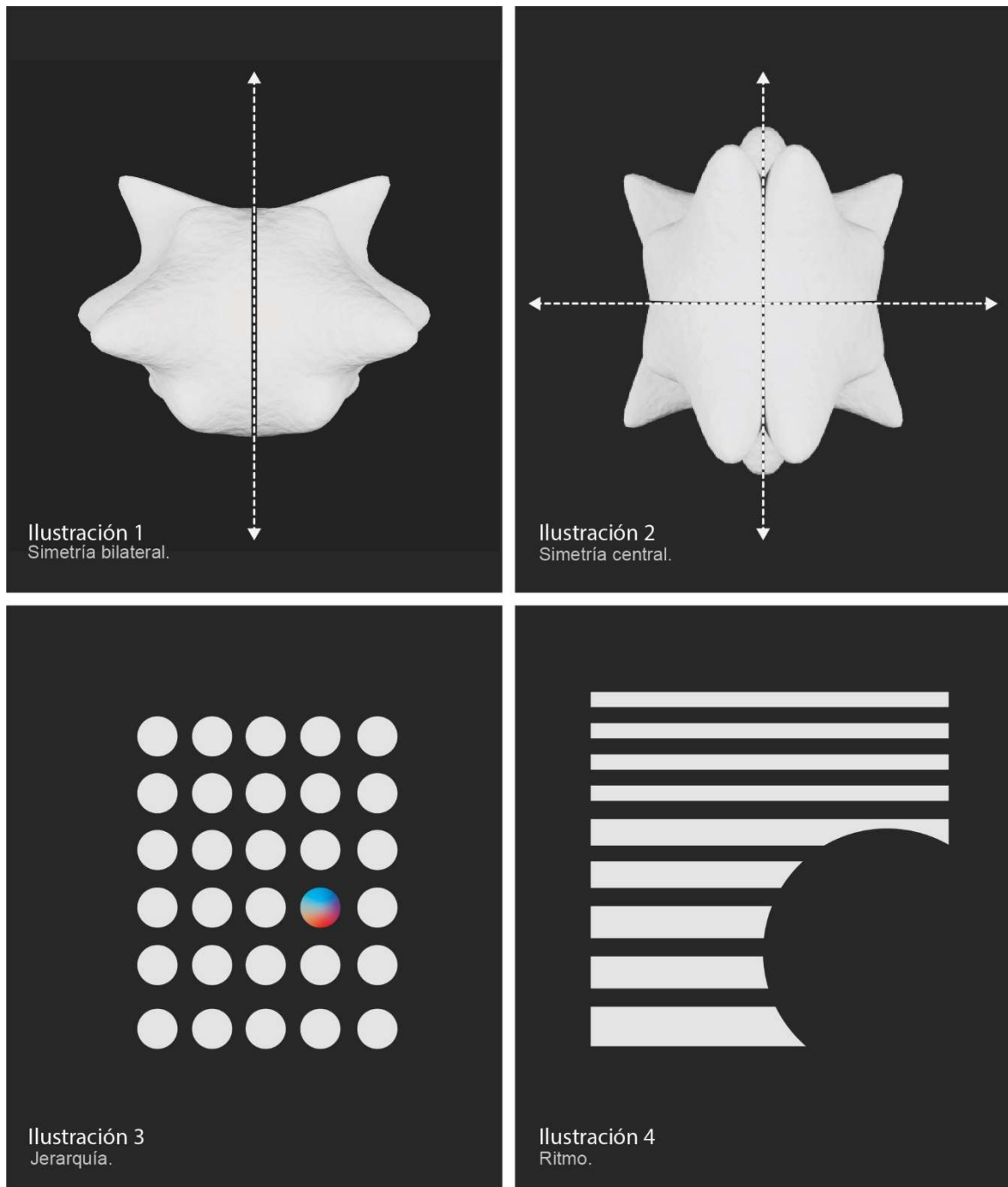
en cierto sentido, su presencia refleja el grado de importancia y la relevancia funcional y simbólica de la organización formal en un espacio. El grado de importancia es dependiente de las condiciones de un caso en concreto, de las necesidades de los usuarios o de las decisiones tomadas por el encargado de una composición formal que pueden ser decisiones individuales, colectivas, personales o culturales, convertidas en manifestaciones formales de un elemento arquitectónico. Además, cumple el propósito de darle importancia o significado a una forma en el espacio dotándola de claridad, por lo general aplicándole una dimensión excepcional, una morfología única o una localización estratégica. (CHING , 2002)

Del mismo modo la jerarquía puede contemplar múltiples elementos en un espacio como puntos focales que atraen la atención al crear acentos visuales, ritmo y tensión en la composición. El autor describe que la jerarquización de la forma puede alcanzar su diferenciación a través de tres esquemas de sub-organización; primero la diferenciación por el tamaño, en la que una forma o espacio puede destacar en una composición a través de un tamaño diferente a los integrantes de la misma composición, segundo, la diferenciación por contorno, en la que se crea una clara diferencia del contorno de una forma respecto a las otras, tercero, la diferenciación por situación, en la que se sitúa la forma a resaltar en un espacio estrategia o un punto jerárquico importante dentro de la composición. (CHING , 2002)

El ritmo hace referencia a la aplicación de la repetición como principio ordenador y a todos los movimientos modulares recurrentes de los elementos compositivos. El movimiento puede ser referido como el seguimiento secuencial que se le hace a la composición y su espacio e integra la noción de repetición. El autor considera que el ritmo en un elemento arquitectónico está representado en los elementos repetitivos, por ejemplo, las vigas y columnas de una edificación, los módulos espaciales o las puertas y ventanas del elemento arquitectónico que pasan de

elementos compositivos arbitrarios a grupos organizados ya sea por proximidad entre unos y otros o sus características visuales. (CHING , 2002)

Figura 0-5: Principios ordenadores de la composición.



Fuente: Elaboración propia.

La pauta corresponde a la aplicación de un orden entre los elementos aleatorios de una composición con la regularidad y la continuidad, la aplicación de una pauta lineal puede poseer un eje, una línea o un volumen como concepto organizador longitudinal para que la serie de elementos pueda alcanzar una continuidad visual. La aplicación en la proyección arquitectónica requiere de una dimensión, un cerramiento y una regularidad visible que tenga la capacidad de integrar los elementos a organizar. (CHING , 2002)

El concepto de transformación se considera como una manipulación discontinua de la composición arquitectónica y tiene como objetivo dar respuesta a condiciones y contextos compositivos específicos a través de la proyección de todos los elementos arquitectónicos que preceden a un estudio riguroso de su pasado formal, las experiencias y las referencias de anteriores realizaciones. Según Francis Ching (2002) la transformación da facultades al diseñador para la selección de un elemento arquitectónico con una estructura morfológica, un orden y una funcionalidad apropiada por medio de la prueba y error durante el proceso de proyección arquitectónica. (CHING , 2002)

El concepto de la proporción hace referencia las relaciones armónicas que están definidas por los sistemas de proporcionalidad, condicionados a aspectos funcionales y tecnológicos de las formas o los espacios. La implementación del principio de proporción permite al diseñador desarrollar la unificación, integración y un sentido de orden visual en los elementos arquitectónicos planteados en la proyección. Llegando a este punto Francis Ching (2002) expone la intención de mostrar un sistema de proporciones como un factor común de todos los periodos de la historia por ejemplo *“El Hombre de Vitruvio”* de Leonardo da Vinci, la proporción aurea o *“El Modulor”* de Le Corbusier, que, aunque sufren variaciones los fundamentos y el valor aportado al diseño son similares. (CHING , 2002)

Wucius Wong (1993) complementa los métodos ordenadores de la composición al contemplar los elementos tridimensionales que contienen expansión, profundidad

física y una tercera dimensión. Se argumenta que el diseño en tres dimensiones establece una armonía y un orden visual en el que se deben considerar múltiples perspectivas y distintas direcciones como la vertical, la horizontal y la transversal, ya que su formato no permite la visualización simplemente en un papel el autor describe los siguientes principios proyectuales ordenadores de elementos volumétricos.

Los planos seriados, descritos como la representación de un volumen por una serie de planos que corresponde a una sección transversal del volumen. La estructura de pared, ejemplificada con el ejercicio de cubo, columna y pared que se refiere a la distribución lineal de un cubo que forma una columna y posteriormente se replica en un plano horizontal para la formación de un muro. Los prismas, considerados como una forma cuyos extremos son figuras paralelas o que pueden sufrir variaciones, rotación o translación. La repetición, utilizada como transmisor de regularidad que consiste en la repetición uní o multidireccional de un volumen. Finalmente, las estructuras poliédricas, denominadas como de primordial importancia al ser sólidos geométricos que cuentan la propiedad de regularidad en sus caras y vértices.

De la misma manera se destacan la implementación de los planos de proyección que corresponde a el plano superior, frontal, y lateral. Los planos permiten la correcta distribución de un volumen y en ocasiones puede ser complementada con planos axiales y seccionales que permiten la descripción más exacta de la composición tridimensional. Además, la consideración de elementos constructivos como el vértice, el filo o la cara que pueden ser empleados para a formación de módulos descritos como elementos pequeños que se repiten con variaciones o sin ellas para formar una unidad más grande denominada super modulo.

Tabla 0-2: Matriz DOFA principios ordenadores de la composición.

DOFA - Principios ordenadores de la composición	
Debilidades	<ul style="list-style-type: none"> - El orden homogéneo que genera la utilización de conceptos como el ritmo, la pauta o los planos seriados regulares en procesos proyectuales arquitectónicos. - Considerar que la regularidad formal es sinónimo de armonía, orden y belleza visual, dejando afuera la información digital que ha cambiado la forma en que se proyecta la arquitectura. - Priorización de un estricto funcionalismo formal y espacial. - No contemplar como principio ordenador el desarrollo de capacidades autoorganizativas o de autoaprendizaje en procesos proyectuales arquitectónicos.
Oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> - Facilitar un tipo de ordenamiento ortogonal de las formas geométricas básicas en un plano bidimensional. - Ser aplicados en contextos donde la tecnología sea limitada y se necesiten soluciones formales generalizadas cuyo proceso de composición sea rápido.
Fortalezas	<ul style="list-style-type: none"> - La síntesis clara de los principios a tener en cuenta para la construcción de la lógica formal de un proyecto arquitectónico - Permite la comprensión de procesos proyectuales utilizados en proyectos canónicos como Villa Savoye de Le Corbusier. - La disminución del trabajo teórico y de exploración conceptual a través de la aplicación de los principios pre concebidos expuestos por los autores.
Amenazas	<ul style="list-style-type: none"> - La construcción de una lógica formal basada en lo sistemático y objetivo apartando exploraciones utópicas. - Contemplar el funcionalismo como elemento primordial en los principios ordenadores. - La búsqueda de la armonía puede resultar en monotonía formal. - El inferir que la belleza formal está en el estricto orden o en la simetría de un elemento arquitectónico. - No contempla la experiencia visual que exige un observador contemporáneo en n tiempo donde lo físico y lo digital es difícil de distinguir. - Está limitando la utilización de herramientas tecnológicas a agilizar la replicación de estos principios ordenadores y no a la exploración para la exploración desde perspectivas multidisciplinares

Fuente: Elaboración propia.

1.2.2 Lógicas proyectuales

Doberti (2012) señala que las dificultades a la hora de establecer las disciplinas proyectuales como metodologías de vital importancia se deben, por un lado, a la concepción científicista que predomina en los cuadros directivos de las academias y a los parámetros dados por los países centrales. De lo anterior resulta difícil clasificar las practicas proyectuales al no encajar en los esquemas que simplifican el orden arquitectónico actual. El reconocimiento de un carácter clasificatorio es el resultado de la distinción realizada bajo la identificación de cuatro posiciones; la artística, la científica, la tecnológica y el proyecto o proyectuales. (DOBERTI, 2012)

Dado que existe un sesgo que impide la armonía entre las cuatro disciplinas Doberti (2012), propone la implementación de las siguientes lógicas integradoras del diseño: lógica del espacio, observar el espacio como un ámbito específico en el que se desarrollan las actividades de la vida humana. Lógica de la producción, la configuración de materiales en los que se requiere un saber técnico y un reconocimiento de los factores socio económicos del contexto. Lógica de la función, reconocer y orientar la lógica que organiza la función (el habitar y el comunicar). La implementación de las tres lógicas según el autor son un gran paso para la capacidad crítica y propositiva reflejada en las practicas proyectuales. (DOBERTI, 2012)

Paralelamente a lo descrito por Doberti (2012) se puede identificar dentro las competencias metodológicas dadas por la academia, una serie de pautas que tienen como objetivo facilitar el proceso proyectual arquitectónico; primero, la selección del contexto que se desea intervenir, segundo, un acercamiento al contexto identificando y analizando a través de factores como el histórico, ambiental, funcional, físico y socio cultural, tercero, la consideración de una solución arquitectónica a partir de las problemáticas encontradas en el análisis contextual a las que se adhiere la exploración de referentes proyectuales que se relacionen con la propuesta, finalmente, la proposición de una solución arquitectónica o urbana

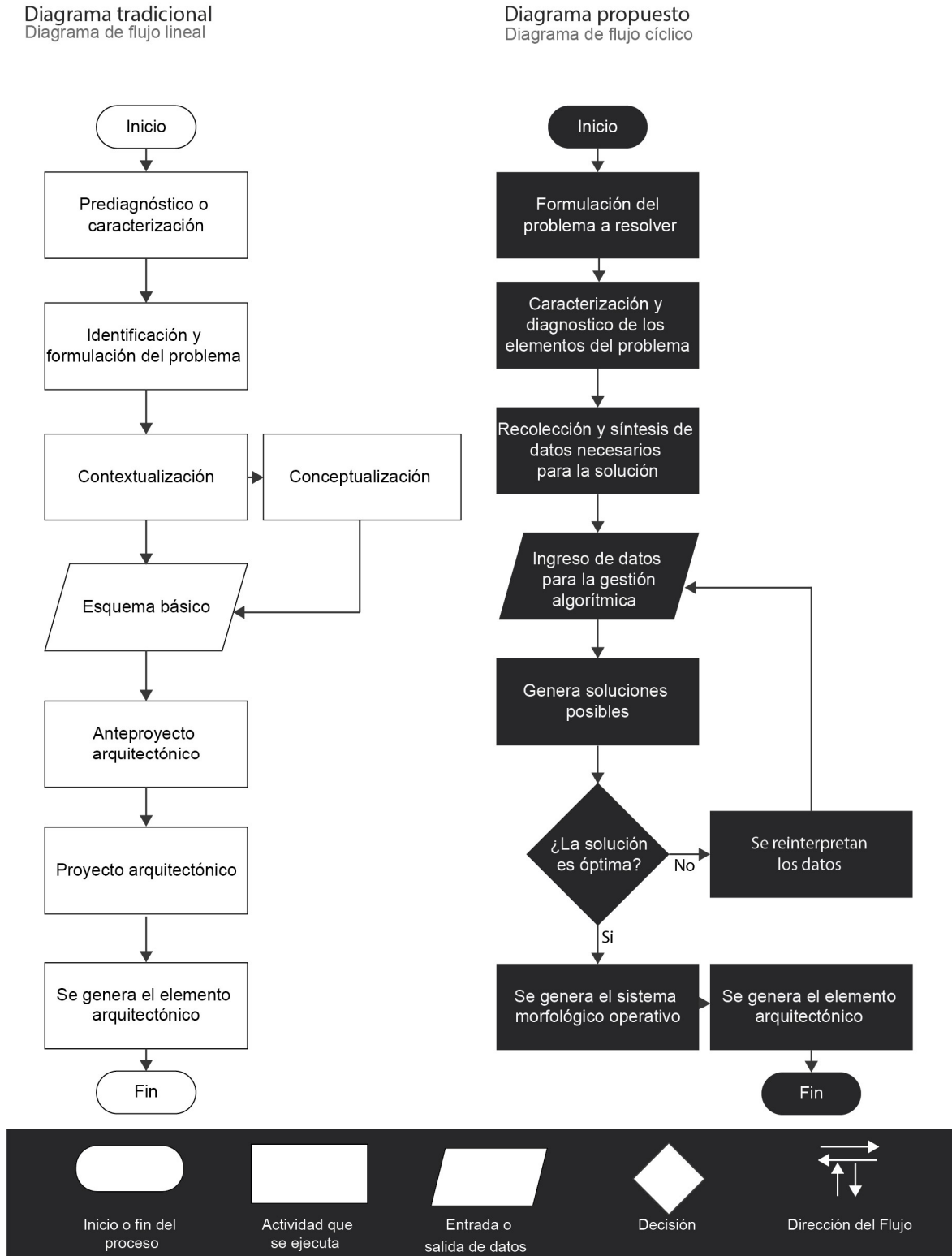
que se sustenta como unidad funcional a través de la presentación de esquemas y planimetrías de detalle.

Cabe señalar, que los datos metodológicos mencionados anteriormente fueron extraídos de la revisión documental realizada a la base de archivos digitales y contenidos programáticos de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad de Pamplona, contrastado con las experiencias académicas obtenidas.

En síntesis, los modelos proyectuales tradicionales empleados en la generación de elementos arquitectónicos basan su desarrollo en principios los elementos primordiales de la forma y principios ordenadores que se fundamentan en los aportes teóricos dados por Wucius Wong y Francis Ching. A esto se le adhiere la implementación de las lógicas proyectuales relevantes aportadas por Roberto Doberti para contextos académicos, las lógicas se centran en la selección del contexto, el acercamiento e identificación de problemáticas contextuales, la consideración de una solución arquitectónica a partir de las problemáticas detectadas y la generación del elemento arquitectónico.

Se describe como factor fundamental para la implementación de los modelos proyectuales tradicionales la flexibilidad aplicativa, es decir su accesible comprensión e implementación en el proceso de diseño que prioricen el desarrollo de geometrías simples que sumado a la implementación de las lógicas constructivas descritas por Roberto Doberti hacen del ejercicio proyectual arquitectónico un proceso lineal de competencias metodológicas que el diseñador debe cumplir en un orden estricto para el planteamiento de elementos funcionales. A continuación, se expone una comparación a través de diagramas de flujos que representan las lógicas proyectuales tradicionales y las lógicas proyectuales necesarias para la implementación de un modelo proyectual que permita la gestión de una gran cantidad de datos proveniente de la operatividad de los sistemas biológicos naturales.

Figura 0-6: Comparación metodológica de lógicas proyectuales.



La comparación permite adoptar el proceso proyectual no lineal, desde una perspectiva que evade la estandarización resultante tras la utilización de procesos tradicionales descritos anteriormente para el desarrollo de elementos arquitectónicos que contemplan la arquitectura y el modelo proyectual como herramientas organizadoras de sistemas biológicos complejos cuyo principio es la búsqueda de relaciones variables no-lineales en las que el comportamiento del elemento arquitectónico sea flexible responda a los cambios entre sus elementos y su entorno.

Para la implementación de este modelo proyectual es necesario la clasificación y comprensión de los datos que en este caso que corresponden al estudio de la operatividad de un sistema natural e identificación de información fundamental como sus principios o los actores y sus relaciones internas o externas descritas en el siguiente capítulo.

Capítulo 2: la operatividad de los sistemas biológicos naturales

2.1 Principios operativos de los sistemas biológicos complejos

La operatividad de los sistemas biológico se interpreta como los datos de entrada (input) caracterizados por que los individuos que lo integran están fuertemente ligados con su medio físico de modo reciproca en el cual se pueden identificar tres elementos que puede estar parcialmente separados, el primero es un elemento autotrófico que se nutre a sí mismo en el que predomina la fijación de energía y el empleo de sustancias simples para formar sustancias complejas, el segundo, un elemento heterotrófico que se alimenta de otro que adopta y descompone materiales complejos y el tercero los factores abióticos que rodea los elementos. (ODUM, 2003)

2.1.1 La simbiosis cíclica

La definición del surgimiento de los sistemas biológicos complejos está ligado al desarrollo de relaciones simbióticas que priorizan los flujos constantes de factores biogeoquímicos y energéticos entre los múltiples elementos bióticos y abióticos de los sistemas, estas complejas relaciones presentan una jerarquía autoorganizativa descritas por el ecólogo Charles Elton (1927) en la pirámide trófica que expresa la cantidad de individuos subdividida en niveles biológicos piramidales que se apoyan el siguiente un orden descendente; consumidores terciarios, consumidores secundarios, consumidores primarios último productores. De modo que cada jerarquía piramidal cumple con la función involuntaria de trasferir los compuestos biogeoquímicos y la energía al otro.

La transferencia de energía y compuestos biogeoquímicos presente en las cadenas tróficas de los sistemas naturales se establece el primer acercamiento los procesos

cíclicos simbióticos autoorganizados entre los individuos biológicos, otros individuos y su ambiente, procesos limitados por las dos primeras leyes de la termodinámica, la primera ley expone: “la energía puede transformarse de una clase a otra, pero nunca se crea o se destruye”. La segunda ley expone que: “ningún proceso que implique transformación de energía se producirá espontáneamente, a menos que exista una degradación gradual de la energía de una forma concentrada a una dispersa”. (PILEASANTS ODUM, 1972) Cabe aclarar que en los sistemas naturales se genera una gran red de procesos cíclicos que si bien cada uno de ellos es vital para el desarrollo del sistema se pueden resaltar como los más importantes el ciclo de la energía solar y los ciclos biogeoquímicos del carbono, oxígeno y el agua.

- Simbiosis energética

El ciclo de la energía solar es el punto de partida y condición específica de nacimiento de la red de procesos cíclicos de transferencia biogeoquímica y energética que se desarrollan en los sistemas naturales, describe el recorrido y transformación que sufre la energía proveniente del sol desde su nacimiento, el paso por la atmósfera y la llegada a un sistema natural. Dado que la energía tiene origen en el sol debe atravesar las cuatro capas atmosféricas conocidas (termosfera, mesosfera, estratosfera y troposfera) que absorben y disipan la cantidad total de energía que llega a la superficie terrestre, así mismo solo una fracción del 1 al 3 por ciento son aprovechadas por los sistemas naturales en sus procesos vitales como la fotosíntesis o fotólisis.

De igual modo, la cantidad de energía es suficiente para la producción de agua y varios miles de gramos de materia orgánica por año, a su vez la energía solar es fijada por organismos como las plantas y las algas la adoptan y transforman a través de la fotosíntesis la transfieren hacia otros organismos por medio de la alimentación es decir un organismo que se alimenta de las plantas y a su vez es comido por otro y este por un tercero en una serie de niveles tróficos definidos que no suelen superar un máximo de cinco eslabones ya que a medida que la energía

en cierto nivel trófico es transferida a un nivel superior, una parte de esta se disipa, por lo tanto el flujo de energía disponible disminuye con respecto a los niveles más bajos. (CUTIS, BOLAÑOS, ARAOZ, & BEHRENS, 2008)

Es así como la transmisión de la energía solar en un sistema natural va del primer nivel trófico constituido por los organismos productores, todas las especies fotosintéticas presentes en un ecosistema natural. Pasa por segundo nivel, los organismos consumidores que se clasifican en dos subniveles; consumidores primarios y consumidores secundarios, los primeros son organismos herbívoros responsables de transferir la energía obtenida por las plantas a los siguientes niveles tróficos, mientras que los segundos son organismos que se alimentan de otros. Para finalmente culminar el viaje de la energía solar a través de un sistema natural con su muerte y ser puesta nuevamente a disposición de los organismos productores con la descomposición de material orgánico por parte de los organismos saprófagos. (PILEASANTS ODUM, 1972)

- Simbiosis biogeoquímica

la transferencia de compuestos biogeoquímicos a diferencia la transferencia de energía solar no tiene un flujo constante sobre los sistemas naturales, es decir, está limitado a la transmisión de un organismo a otro mediante las cadenas tróficas y la simbiosis de los flujos de macronutrientes (carbono, oxígeno y agua) y micronutrientes (zinc y hierro) en los que intervienen los componentes bióticos y abióticos de un sistema natural. (EGE - IEGEBA, 2019)

La simbiosis cíclica del carbono es integrada al ecosistema a través del proceso de fotosíntesis, con la transformación de CO₂ presente en la atmósfera e hidrósfera en átomos de carbono que son integradas a los tejidos vegetales en forma de hidratos de carbono, proteínas y grasas. Los cuales son posteriormente transferidos a los organismos herbívoros presentes en el ecosistema, el carbono pasa de un organismo a otro a lo largo de la cadena trófica, primero a los herbívoros

que reorganizan y degradan los compuestos de carbono. La parte de carbono almacenada en los tejidos de los herbívoros es transferida a los organismos carnívoros, para que finalmente productores, consumidores primarios y secundarios de la cadena trófica liberen el carbono en forma de dióxido de carbono por medio de la respiración celular y la excreción en sus heces como compuesto sólido de carbono reducido que es nuevamente aprovechado por los organismos de primer nivel de la cadena trófica. (RAISMAN & GONZALES, 2019)

El oxígeno presente en la atmósfera se incorpora al sistema natural en forma gaseosa mediante la respiración de los organismos consumidores de la cadena trófica y se libera nuevamente a la atmósfera en forma de CO_2 , es absorbido y transformado por los organismos fotosintéticos a través del proceso de fotólisis del agua presente en la fotosíntesis, lo que genera la ruptura de los enlaces químicos y la posterior excreción en forma de átomos de oxígeno por parte de los organismos productores. (CUTIS, BOLAÑOS, ARAOZ, & BEHRENS, 2008)

La transferencia cíclica del H_2O inicia en los océanos, pasa por la atmósfera y llega a los depósitos acuíferos presentes en un ecosistema, este ciclo es impulsado por la energía térmica o solar, que transforma el agua de estado líquido a gaseoso e impulsa los vientos que la transportan como vapor a través de la atmósfera, una vez allí las partículas de agua se condensan y la gravedad la lleva de vuelta a los sistemas naturales en forma de precipitación (lluvia, nieve o granizo) para que finalmente, un porcentaje de la precipitación se infiltre en la superficie terrestre y penetre las capas de la litosfera: el porcentaje restante de agua es retenido en zonas de páramo y bosque húmedo la cual posteriormente se escurre por la superficie ecosistémica en forma de mantos que fluyen hasta las fuentes de agua en las cuales es contenida temporalmente y es vaciada en los océanos y reinicia la ruta cíclica de transferencia hidrológica. (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

- Simbiosis biótica

Las relaciones simbióticas entre la porción biótica de un sistema biológico son consideradas variadas y complejas al contener interconexiones directas e indirectas entre los individuos del sistema, las interacciones son clasificadas de acuerdo al efecto que tiene una población biológica sobre otra, de manera que las interacciones en la porción biótica de un sistema biológico son categorizadas como, la competencia que inicia al presentarse la necesidad por parte de los individuos de la misma o distinta especie de utilizar los mismos recursos ya sea alimentos, espacio o energía desencadenando daño en las dos especies. la depredación; se presenta tras la necesidad de un individuo (depredador) de obtener energía de otro (presa), al mismo tiempo una presión selectiva que prioriza la conversión de la presa en más difícil de capturar y al depredador en más aptos para cazar de manera que se crea una coevolución. (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

El parasitismo es una relación similar a la depredación que integra dos actores; el parásito que generalmente es más pequeño y vive en grandes números dentro o sobre un individuo y el huésped que corresponde al individuo ocupado por otro. La relación entre los dos actores puede ocasionar la destrucción del huésped a largo plazo o por el contrario crear una interrelación de coevolución beneficiosa para la obtención de energía y nutrientes del parásito y el para el proceso de selección natural en la comunidad del huésped, como un caso que ejemplifica las dos interrelaciones se describe en la Tabla 2-1 de asociaciones simbióticas entre individuos. (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

El mutualismo es definido por Henry Mark (1966) como la relación temporal o permanente entre los individuos de dos o más especies que obtienen beneficios indispensables para su existencia. (HILJE, 2008) El mutualismo se puede clasificar según el tipo de interrelación que desarrollan sus actores; las interrelaciones obligatorias simbióticas son aquellas en las que los individuos interactúan física e íntimamente creándose una dependencia vital entre ellos, las Interrelaciones

obligatorias no simbióticas en las que cada especie es independiente pero no puede sobrevivir una sin la otra, por último, las interrelaciones facultativas en las especies involucradas no están obligados a vivir unos con otros pero si existe una asociación entre sí, algunos ejemplos de las clasificaciones del mutualismo son descritos en la Tabla 2-1. (BADII, RODRIGUEZ, CERNA, LANDEROS, & OCHOA, 2013)

Tabla 0-1: Asociaciones simbióticas.

Asociaciones simbióticas		
Tipo de interacción	Efecto sobre especie A	Efecto sobre especie B
Competencia entre A y B	Daño	Daño
Depredación	Beneficio	Daño
Parasitismo	Beneficio	Daño
Mutualismo	Beneficio	Beneficio

Fuente: Elaboración propia a partir de (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

2.1.2 Variabilidad impredecible

los sistemas biológicos presentan un número indeterminado de variaciones que emergen de forma impredecible en los individuos que lo integran, dichas variaciones son las responsables de dar paso a la generación con la capacidad autónoma de dinamismo evolutivo característico de los sistemas biológicos. (DARWIN & WALLACE, 2006)

La anterior consideración fue inicialmente expuesta tras una síntesis y actualización de los postulados expuestos por el por el naturalista Charles Darwin (1859), en su obra *“El origen de las especies la lucha por la vida y la selección natural”* en la que describe el proceso evolutivo de los individuos con el planteamiento de cinco postulados dirigido a definir las condiciones de evolución de los individuos, estas son: el cambio perpetuo de los individuos, el origen común, la diversidad de las especies, el gradualismo y la selección natural como mecanismo de reproducción y autocontrol diferencial de los individuos. (DARWIN & WALLACE, 2006)

Tras una síntesis de los postulados darwinistas mencionados anteriormente realizada por un equipo multidisciplinar integrado por el genetista Theodosius Dobzhansky (1900-1975), el zoólogo Ernst Walter Mayr (1904-2005), el paleontólogo George G. Simpson (1902-1984) y el botánico George Ledyard Stebbins entre otros. como resultado de lo anterior surge la nueva “teoría sintética de la evolución” que prevalece como una hipótesis-teoría para la actualidad en contextos científicos y biológicos. (CURTIS, BARNES, SCHNEK, & MASSARINI, 2008)

La síntesis teórica de la evolución postula que en los procesos evolutivos de un individuo el fenotipo es diferente al genotipo, los caracteres adquiridos no son hereditarios, las variaciones hereditarias están basadas en partículas o genes, las partículas comúnmente mutan a una tasa baja, el cambio evolutivo es un proceso poblacional, la selección natural puede ocasionar pequeñas o grandes diferencias entre especies e impulsar la aparición de nuevos fenotipos, los sistemas naturales son redes genéticamente variadas lo que hace que la mutaciones operen de forma intraespecífica. (PEDROCHE, 2009)

Según la bióloga entomóloga West Eberhard (1992) la variabilidad de los individuos son el resultado de micro mutaciones que se replican de generación en generación durante miles de años acumulándose hasta lograr cambios en las poblaciones de organismos, permitiéndoles ajustarse a las condiciones de un sistema biológico particular. (WEST, 1992) lo que supone concernir los aspectos morfológicos y fisiológicos de los individuos como consecuencia de una serie de pequeñas modificaciones graduales que son exclusivamente efecto procesos selectivos involuntarios o voluntarios y no por la aparición de una sola macro mutación. (MARCHISIO & ROSSO, 2012)

Aquellas modificaciones que le permiten a los individuos ajustarse a las condiciones de un sistema biológico son clasificados de la siguiente manera: las modificaciones morfológicas, son en las cuales los individuos desarrollan micro mutaciones físicas generacionales durante millones de años y estas suponen la aparición de nuevos órganos con características formales diferentes a sus antecesores. Las modificaciones fisiológicas, corresponde a las micro mutaciones acumuladas que modifican la función de un órgano preexistente, por último, las modificaciones de conducta, que suponen el cambio del comportamiento o aparición de nuevos comportamientos del individuo. (BUIL, 2018)

Llegado a este punto, es necesario describir los factores de variabilidad que provocan cambios evolutivos en los individuos los cuales se interconectan con las condiciones y evolución de un sistema biológico determinado, factores de variabilidad expuestos a continuación.

- Variabilidad por aislamiento involuntario

Se identifica que los individuos que integran una especie dentro de un sistema biológico generalmente viven en una población reproductivamente aislada, sin importar si tienen la posibilidad de tener descendencia con individuos de otras especies. El aislamiento de estas poblaciones puede estar determinados por los factores externos como pueden ser; las barreras geográficas, constituidas por los accidentes geográficos o las condiciones climáticas que impiden la interacción entre las comunidades, los cambios en el paisaje como las cordilleras, los océanos, cañones entre otros. No necesariamente accidentes geográficos de gran escala, también de pequeña escala como unos metros de terreno seco o un río que cambia de curso. (BUIL, 2018)

Del mismo modo se encuentran las barreras ecológicas, la variación genéticas y de conducta de las especies denominadas barreras invisibles que impiden el contacto entre dos individuos de distintas poblaciones presentes en un mismo espacio, por ejemplo, una región con hábitats diferentes hace que los miembros de la población se especialicen en condiciones diferentes, creando diversos hábitos

adaptativos de conducta diurnos o nocturnos que con el tiempo pueden ser suficientemente grandes para impedir que estas especies se crucen. (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

- Variabilidad por recombinación o simbiogénesis

Las variaciones genéticas presentes en los individuos de una población son definidas como la materia prima de la sección natural, estas variaciones son resultado de las mutaciones, a recombinación sexual o la simbiogénesis que dan lugar a nuevos genes y nuevos caracteres hereditarios en los individuos, son consideradas aleatorias, incontrolables e inevitables y no responden a condiciones o necesidades ambientales simplemente son un error en el proceso de replicación del ADN. Si las mutaciones presentes en un individuo son grandes pueden ser letales, por otro lado, si la mutación es pequeña puede iniciar un efecto favorable o desfavorable sobre el descendiente que posteriormente lo transmitirá a su población. (BUIL, 2018)

La recombinación sexual o intercambio de la información genética hace referencia a las combinaciones de genes existentes, esta tiene lugar durante el proceso meiótico y la fecundación. El proceso meiótico o meiosis presente en la reproducción sexual de los organismos proceso que comprende la división celular en dos citocinesis para producir cuatro células hijas que posteriormente pueden convertirse en gametos los cuales llevan la mitad del material genético del organismo progenitor. (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

La simbiogénesis comprende el proceso de adquisición directa de genomas que lleva a cambios permanentes e irreversibles en los individuos a través de la fusión de dos especies pre existentes, con el objetivo impredecible de crear nuevas entidades y dar origen a cambios drásticos, como un ejemplo están la aparición de los primeros organismos eucariotas por medio de la simbiosis bacteriana. (Suárez, 2015)

- Variabilidad por inserción de genoma

Los virus son considerados como los principales laboratorios productores de nuevos genes y mecanismos de variación genética que en ocasiones insertan sus genomas en las células que se hospedan, a su vez son considerados como seres no vivos ya que no poseen rasgos estructurales de un organismo, ya que no son células ni están constituidos por ellas, carecen de ribosomas encargados de elaborar proteínas y no pueden reproducirse por sí solos. Los virus están constituidos por dos partes principales una molécula de material hereditario y un recubrimiento proteínico que puede estar formado a partir de la membrana plasmática de la célula en la que reside la cual cubre la molécula hereditaria ya sea ADN o ARN. (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

La operatividad de un virus guarda similitudes con la de un parásito al comprender que un parásito es aquel organismo que vive sobre otros organismos utilizándolo a su veneficio y causándole daño en el proceso, este proceso parasitario del virus permite su replicación que inicia cuando un virus penetra y se hospeda en una célula para posteriormente tomar control sobre el material metabólico del huésped y utilizarla para producir componentes de nuevos virus que se ensamblan rápidamente para invadir y hospedarse en células vecinas. (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

La replicación de los virus requiere de los sustratos, energía y maquinaria bioquímica de la célula para que pueda replicar su genoma, se identifica la siguiente secuencia en la replicación de los virus: Penetración, el virus entra en la célula en caso de los virus fagocitados por la célula huésped, después se liga a la membrana celular y estimula la endocitosis, otros virus están recubiertos con una envoltura con la capacidad de fusionarse con la membrana celular del huésped, una vez fusionado el material genético portado por el virus se libera en citoplasma. Síntesis, los virus alteran el proceso de síntesis de proteína en el huésped para producir copias de las proteínas del virus y del material genético. Ensamblado, el material genético y las enzimas liberadas por el virus quedan envueltas en el

recubrimiento proteínico y Liberación, los virus se liberan del huésped por gemación o separación de organismos del huésped desde la membrana o por ruptura de la célula. (AUDESIRK & AUDESIRK, 2013)

- Variabilidad por selección natural

Conocida como la supervivencia del más apto, la selección natural es un proceso ocasionado por la reproducción diferencial del genotipo de una población biológica, este cambio lo acompaña la variabilidad individual, la relación entre variabilidad en la eficacia biológica y fenotípica, y una relación entre esas características fenotípicas y el genotipo del individuo. (SOLER J. J., 2002) de aquí que aquellos individuos de una población que alcanzan la reproducción son aquellos que presentan alguna característica que favorece su supervivencia del sistema permitiendo que sobreviva el mejor diseño biológico que a su vez produce copias de sí mismo y sobre estas copias se desarrollan nuevas variaciones involuntarias que dan lugar a un proceso impredecible que se proyecta durante millones de años posibilitando la perfección gradual en la eficacia biológica de los individuos. (BUIL, 2018)

2.2 De lo biológico a lo sintético

2.2.1 Vida sintética

La vida sintética es una rama de estudio científico que tiene el objetivo de deslumbrar la mayor cantidad posible de las cuestiones naturales bajo la hipótesis de capturar las características fundamentales de la vida a través de modelos algorítmicos simples. Los modelos tienen la flexibilidad necesaria para ser implementados en medios tecnológicos artificiales (software) con el fin de sintetizar y simular comportamientos biológicos. (BEDAU, 2010) es así como la vida sintética busca optimizar la comprensión y explicación de los fenómenos biológicos que permiten la reconstrucción de sistemas biológicos complejos. (GÓMEZ, 2013)

La vida artificial está dividida en tres ramas que se traducen en tres modelos de síntesis biológica diferentes de acuerdo con los medios y las bases físicas, estas tres ramas son: La vida artificial suave; integra la creación y simulación digital que exhiben comportamientos como el de la vida, la vida artificial dura; son implementaciones de hardware y robótica que simulan sistemas biológicos. Por último, la vida artificial húmeda; es la implementación de sustancias bioquímicas con el objetivo de sintetizar procesos biológicos. Dentro de la vida artificial suave se resaltan los siguientes sistemas. (BEDAU, 2010)

- Autoorganización

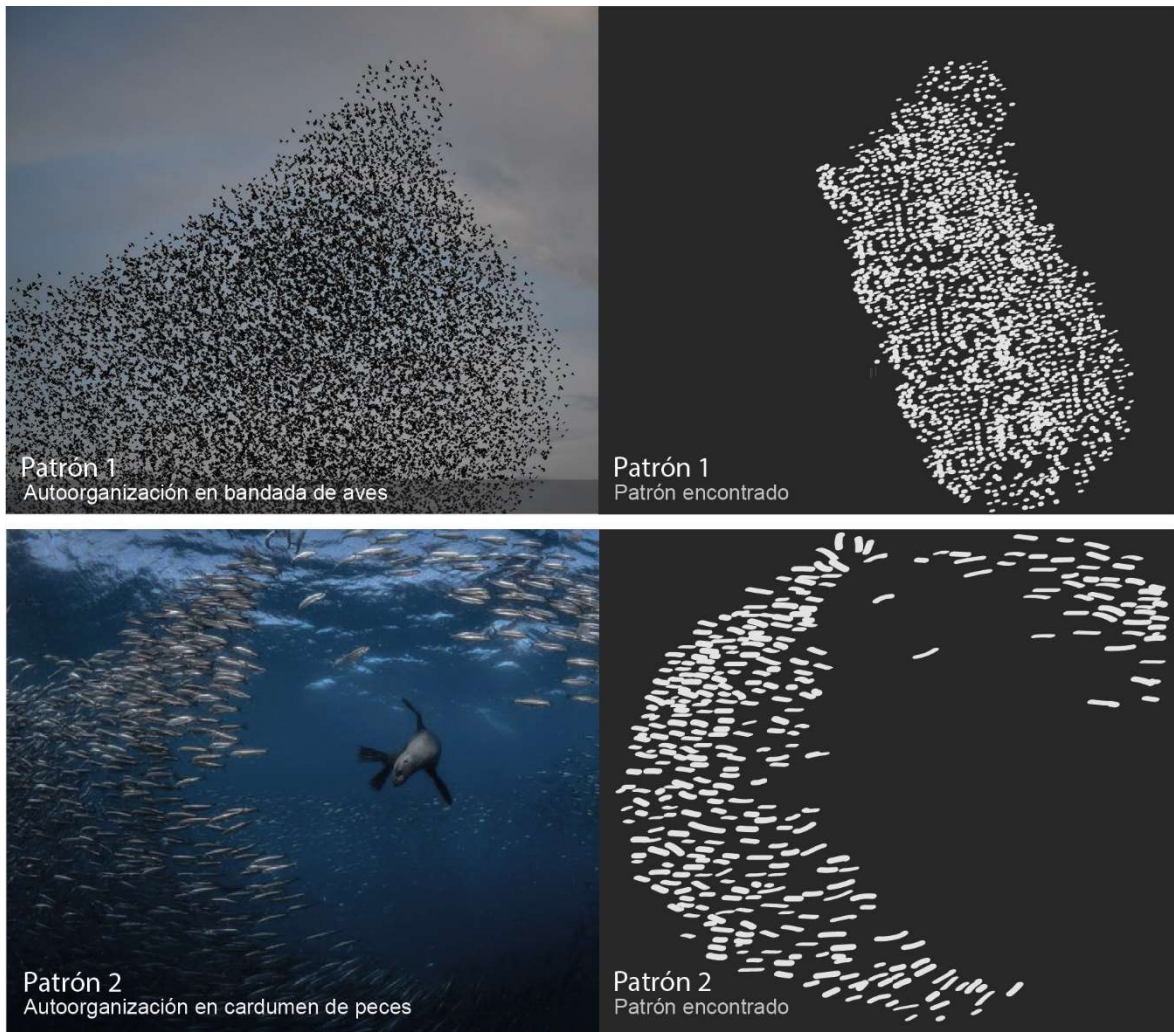
En un sistema con comportamiento impredecible en el que las variaciones y el cambio son transformaciones inevitables por los que debe transitar para crecer y desarrollarse, cuando estas transformaciones se logran sin la intervención de factores externos se reconoce como procesos de autoorganización. Es así como la autoorganización se reconoce como un proceso fundamental para los sistemas complejos a través del recupera el equilibrio y la capacidad auto modificarse y adaptarse al entorno inmediato.

El comportamiento autoorganizado presente en los sistemas complejos esta jerarquizado por la interrelación entre múltiples niveles de elementos en los que las interrelaciones entre componentes en un nivel pueden causar nuevos tipos de comportamientos en los niveles superiores que se comportaran de maneras diferentes a los niveles anteriores. De igual modo la auto autoorganización de un sistema actúa en un orden espacio-temporal ascendente manteniéndose en un estado simultaneo de orden y desorden, el orden suficiente para evitar la extinción el desorden necesario para proporcionar cambio y posterior capacidad de adaptarse fenómenos definidos por el doctor en ciencias de la computación Christopher Langton (1990) como “el borde del caos”.

Como ejemplo se toma el comportamiento de algunos seres vivos que establecen conexiones como fenómenos de autoorganización en el que ningún elemento es

más importante que el otro y cualquier cambio local tiene repercusión en la totalidad del sistema, modificándolo o generando variaciones del orden alcanzado inicialmente como las adaptaciones de conducta acumuladas de algunos organismos como las aves de una bandada o peces en los cardúmenes que se desplazan colectiva y masivamente, su comportamiento está basado en la reacción que realiza el organismo más cercano (vecino) que desencadena múltiples reacciones entre múltiples partes el sistema que modifica el patrón relativo de orden inicial. (DOVAL, 2013)

Figura 0-1: Patrones de autoorganización natural.



Fuente: Elaboración propia a partir de fotografías tomadas de <https://n9.cl/ptck>.

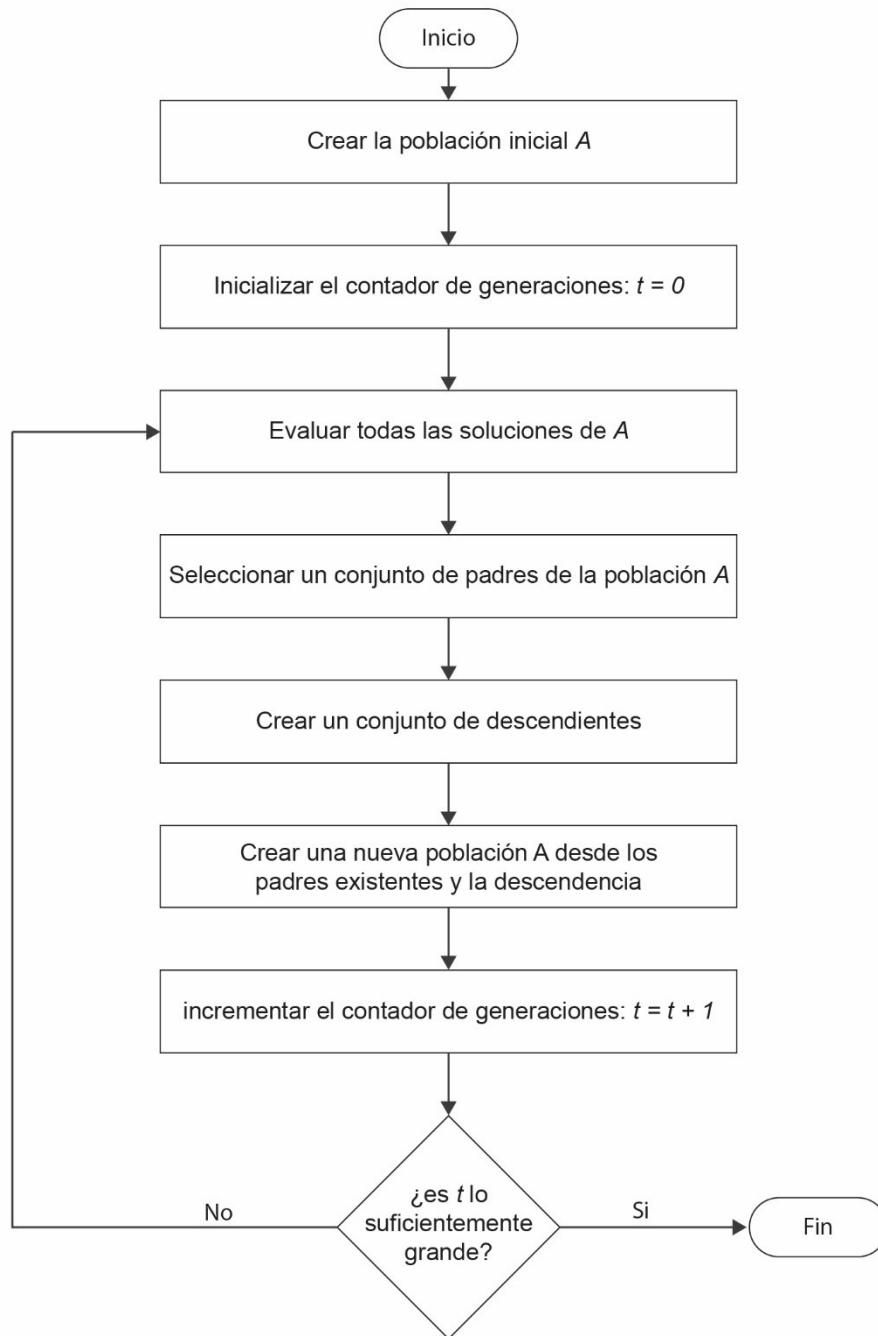
En la ilustración que expone los patrones de autoorganización natural en el que se puede observar de manera temporal en el patrón una bandada de aves y el patrón 2 un cardumen de pese, cabe señalar que estos patrones están en constante cambio ya que las variaciones de comportamiento individuales involuntaria o voluntarias desencadenan cambios en el sistema organizativo completo.

- Algoritmo evolutivo

Se describe a los algoritmos evolutivos como una serie de funciones que generan soluciones a partir de un sistema de aprendizaje. Los algoritmos evolutivos tienen una constitución general que se basa en la generación de un grupo de individuos que evoluciona a través de procesos de selección natural, mutación o recombinación para representar la solución óptima a un problema definido. (GÓMEZ, 2013)

La conformación general de un algoritmo evolutivo se fundamenta en los principios evolutivos propuesto por Charles Darwin (1859). Primero se contempla las características de los individuos que respondan a la solución que se busca. Segundo de se genera una población que puede ser aleatoria. Tercero, a la población seleccionada se le aplica una función de desempeño o selección que identifica los individuos poblacionales más óptimos a través de una serie de funciones que pueden aplicarse como la mutación o la recombinación las cuales facilitan la obtención de resultados con mayor complejidad evita el estancamiento del algoritmo.

Finalmente, en el cuarto fundamento una vez obtenido los individuos óptimos son reproducidos con el fin de generar descendientes diferenciados. Cuarto, se crea una población de nuevos individuos a partir de los individuos generados en la tercera etapa. Finalmente, el proceso es repetido hasta obtener las soluciones optima al problema definido al inicio del algoritmo. (GÓMEZ, 2013) El proceso algorítmico anteriormente descrito es expuesto en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 0-2: Diagrama de flujo del proceso seguido por los algoritmos evolutivos.

Fuente: elaboración propia a partir de (GÓMEZ, 2013)

- Autómatas celulares

los autómatas celulares (AC) puede ser considerado como una de las primeras aproximaciones de simulación computacional enfocada a la geometría y los comportamientos de seres vivos, el surgimiento de esta idea se da años antes de que se definiera el concepto de vida artificial tras el planteamiento del físico y matemático John Von Neumann (1940) en su publicación "*Theory of Self-reproducing Automata*" de modelar una maquina con la capacidad de autor reproducción a través de una red de células que crecían, se reproducían y morían durante un tiempo determinado. (GÒMEZ, 2011)

Los AC representan a las unidades de procesamiento interconectadas enmarcadas dentro de la computación emergente, esta afirmación surge al considerar que la conducta de múltiples agentes esta designada para recrear el comportamiento de una forma determinada que involucra desde las interacciones con otros agentes hasta la formación de patrones globales de procesamiento detectables a nivel macroscópico. Así mismo, se consideran a los AC como sistemas no-lineales, al presentar que cada unidad tiene la capacidad de interactuar en paralelo con otras unidades. (REYNOSO, Carlos Reynoso, 2010)

Al considerar los AC como un sistema algorítmico dinámico con un numero de componentes simples que se interrelacionan entre sí en un tiempo y espacio determinado. Componentes identificados como: primero, un espacio celular, una red se celdas finitas con condiciones de limite que cuenta un patrón idéntico de conexiones locales con las demás celdas que las rodean, segundo, las reglas de transición, que definen y actualizan los estados de cada celda, estas dos definiciones dan lugar a una celda. Además, una serie de conceptos que facilitan la comprensión de los AC descrito continuación. (GÒMEZ, 2011)

Al momento de desarrollar un autómata celular se debe considerar que trabajan bajo el principio fundamental de generación de dinámicas globales complejas a

partir de la interrelación local de partes simples denominadas como células, esas células son organizadas en una grilla *n-dimensional* con valores en n de 1, 2 y 3 subdividió en espacios celulares regularmente cuadrados o cúbicos en caso de ser un autómata tridimensional. Una vez formada la grilla el estado de una célula en el tiempo t lo determina el valor tomado dentro de un número finito entero en el que cada célula actúa como un autómata en estado finito. (REYNOSO, 2010)

Al momento de seleccionar la vecindad (g) se debe considerar el problema que se desea abordar y clasificarlas en términos de: vecindades simétricas, hacen referencia a las compuestas por un número entero a diferencia de las vecindades asimétricas, en las que se define un número de células vecinas distintas a cada lado, en este caso es presentada G como una pareja ordenada. En autómatas bidimensionales son mayormente utilizadas las vecindades simétricas conocidas como vecindades de Von Neumann y de Moore (GÓMEZ, 2013)

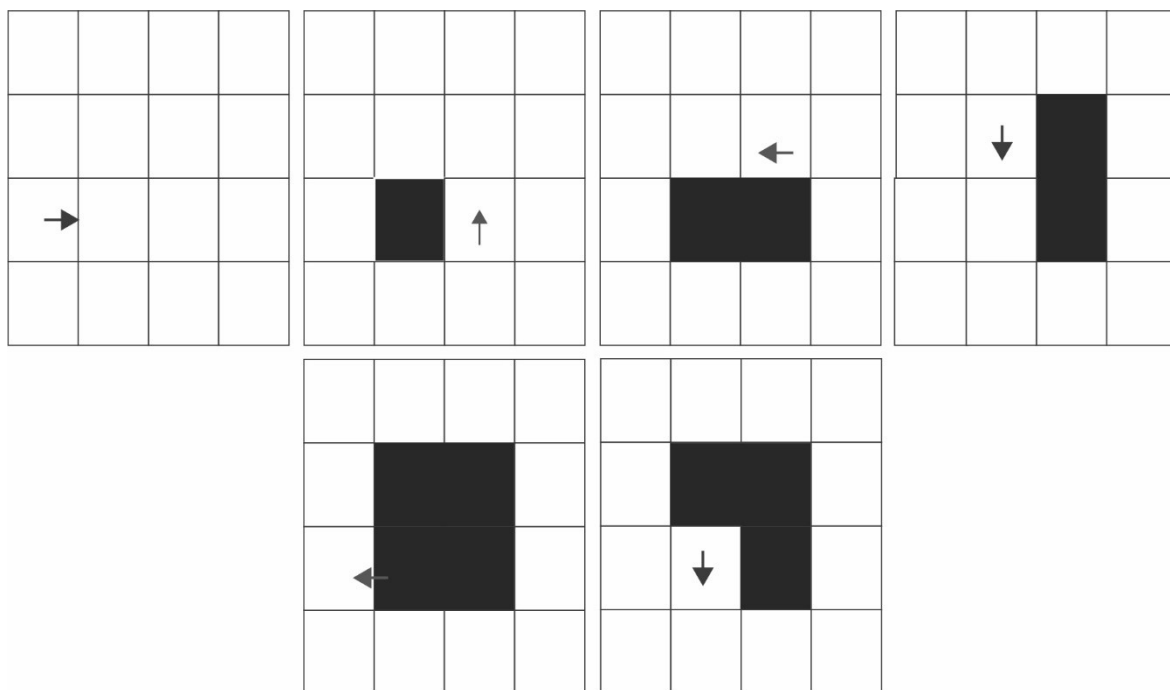
Considerando que las grillas celulares generalmente son finitas es necesario definir las condiciones de límite a través de la forma en la que serán construidas las vecindades de las células que se sitúen en los extremos de los autómatas unidimensionales, el perímetro de las bidimensionales y la superficie de las tridimensionales. La clasificación de las condiciones de límite es la siguiente: condiciones de límite nulo, en las que las células límites se les asigna el estado 0 .

Se especifican un conjunto de reglas de transición que determinan el modo de interacción entre las células a escala local las cuales pueden ser interpretadas como un genotipo que produce fenotipos con patrones complejos (KLAUS, 2007) Las reglas dentro de la grilla celular pueden seguir una o más condiciones reglamentarias dependiendo del fenómeno que se está modelando, esta decir: el autómata cuyas células se rigen por la misma regla de transición es denominado uniforme, y el autómata regido por diversas reglas de transición es denominado no-uniforme. (GÓMEZ, 2013)

Como ejemplo de los autómatas celulares se expone el algoritmo desarrollado por Christopher Langton (1986) nombrado Hormiga de Langton desarrollado como un intento de reproducir la evolución comportamental de las hormigas a través de simulación de la adaptación conductual y fisiológica de estas, enfatizado en el movimiento que siguen al detectar y reaccionar a las feromonas dejadas por otras de su misma especie. (LÓPEZ, 2011)

El algoritmo funciona en una malla cuadrática bidimensional, donde la hormiga es la cabeza interpretadora que se desplaza de acuerdo a lo que encuentra en cualquiera de los puntos cardinales, esta simulación sigue algunas de las reglas que guían su comportamiento; primero, la hormiga da un paso adelante. Segundo, si la hormiga encuentra un cuadro blanco, lo pinta de negro y da un giro a noventa grados hacia la derecha y avanza una unidad. Tercero, si la hormiga encuentra un cuadro negro, lo pinta de blanco y gira noventa grados a la izquierda y avanza una unidad. (LÓPEZ, 2011)

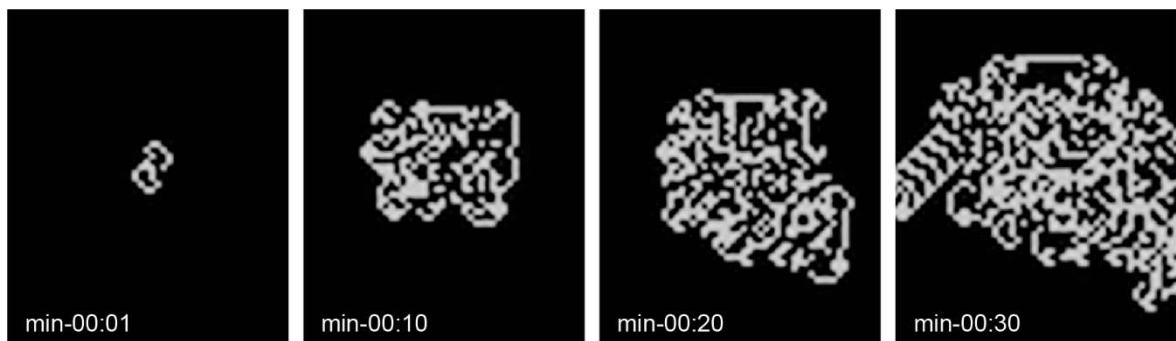
Figura 0-3: Operatividad de la hormiga de Langton.



Fuente: elaboración propia a partir de (GÓMEZ, 2013)

El ejercicio destaca que la sin importar que la hormiga siga las tres reglas, se obtiene un numero aleatorio de resultados en su gran mayoría caóticos. (LÓPEZ, 2011) Se realiza una simulación que explora la evolución del autómeta regido por las reglas descritas anteriormente a través del software Visions of Chaos de Softology durante un tiempo determinado los resultados se mostrarán a continuación.

Figura 0-4: Simulación de la hormiga de Langton.



Fuente: Elaboración propia a partir de simulación en el software Visions of Chaos.

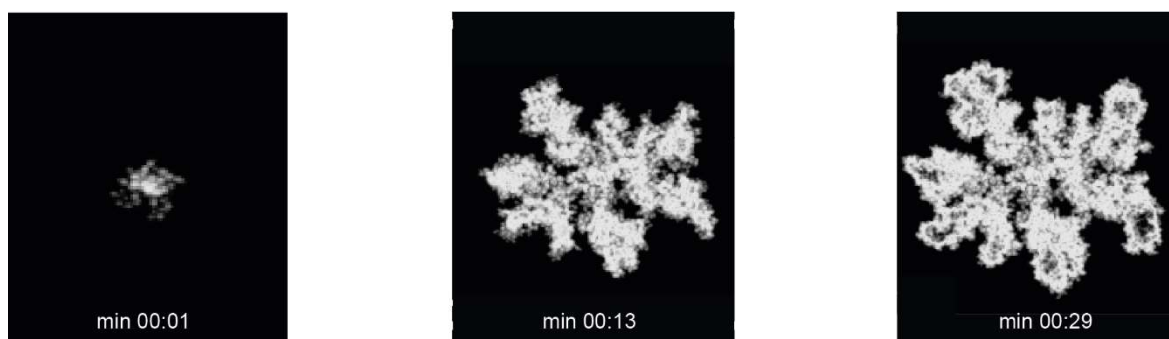
- Agregación de difusión limitada (DLA)

Los algoritmos DLA son modelos que simulan procesos físicos, biológicos o químicos, el algoritmo fue empleado por primera vez por Witten y Sander (1981) en el estudio *"Agregación limitada por difusión, un fenómeno crítico cinético"* para el estudio de modelos de crecimiento fractal en entornos bidimensionales como una herramienta más para la comprensión de eventos biológicos como la ramificación de las plantas o la formación de corales. Se representa como un conjunto de partícula que interaccionan entre si con la disposición de un espacio vacío en el que se sitúa una célula fija mientras se posicionan otras células que se mueven a distancias infinitas. (BOURKE, 2004)

Para la simulación del algoritmo en un entorno computacional continuo la estructura de datos descrita como una estructura simple la cual consta de una red de celdas ($n \times n$) donde n representa el tamaño máximo a alcanzar, una serie de enteros que son la representación de la posición celular en la red de celdas, la iniciación de cada entero en cero excepto el entero que represente la célula estática o el punto medio, un sistema de reproducción que inicia al encontrarse un entero con la posición actual de otro que a su vez generara nuevas células que reinicia todos los procesos anteriores. (BOURKE, 2004)

Se realiza una primera simulación en un entorno 2D que explora la evolución temporal de los individuos regido con los datos algorítmicos por defecto proporcionados por el software Visions of Chaos de Softology durante un tiempo determinado, los resultados se mostrarán a continuación.

Figura 0-5: Simulación Agregación de difusión limitada.



Fuente: Elaboración propia a partir de simulación en el software Visions of Chaos.

2.3 Caso análogo Referencias

2.3.1 Mushtari - Neri Oxman

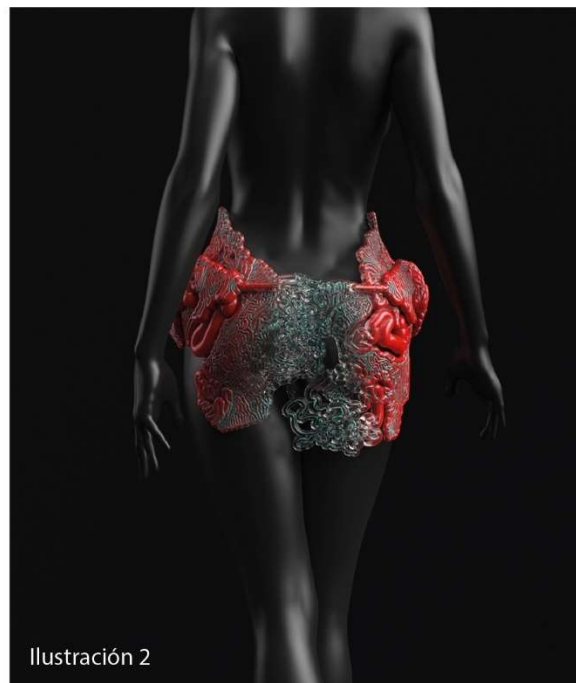
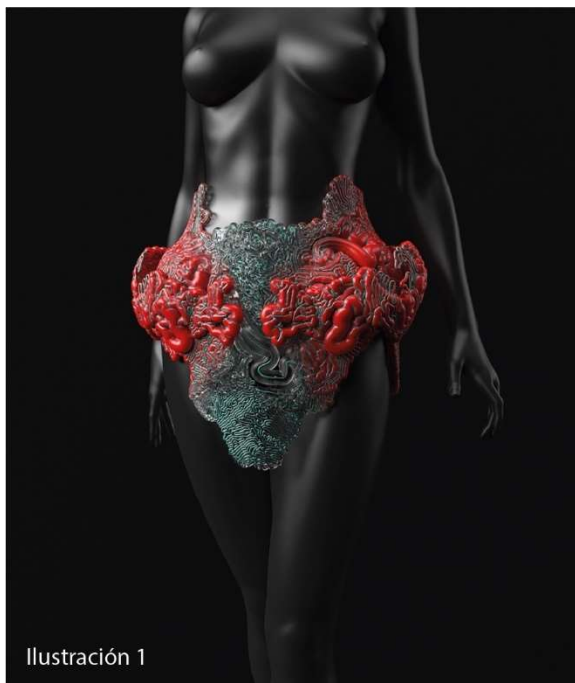
Cultivado, impreso y biológicamente aumentado es un elemento usable microfluídico y fabricado aditivamente que funciona como una plantilla funcional para microbios sintéticos. La investigación fue dirigida por la arquitecta Neri Oxman (2016) en Escuela de Arquitectura y Planificación del Laboratorio de medios del

Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) que fue presentado como parte de la colección Stratasys *“El sexto elemento: explorando la belleza natural de la impresión 3D”*

La investigación se desarrolla bajo la premisa de que, a pesar de los grandes avances en la biología sintética a escala programática, la fabricación e implementación a escalas de producto es casi nula. El desarrollo investigativo se fundamenta en las siguientes interrogantes, ¿Cómo se puede diseñar relaciones entre los elementos más primitivos y las formas de vida más sofisticadas? ¿es posible diseñar dispositivos vestibles con incrustaciones de microorganismos sintéticos que mejoren y aumentan la funcionalidad biológica?

Se destaca que la exploración que da respuesta a los interrogantes es un dispositivo portátil diseñado para las condiciones de Júpiter nombrado Mushtari un diseño que funciona como una cadena llena de fluidos con materia viva impresos en 3D geoméricamente complejo y materialmente heterogéneo mostrado en la ilustración 3 de la Figura 2-6 inspirado en la morfología y operatividad de tracto gastrointestinal del ser humano, Mushtari es diseñado como un sistema que consume y digiere biomasa además absorbe nutrientes y expulsar desechos orgánicos mientras realiza movimientos peristálticos que soportado con el flujo de cianobacterias convierte la luz del día en sacarosa comestible.

Figura 0-6: Representaciones digitales de Mushtari.



Fuente: elaboración propia a partir de <https://n9.cl/eans>.

Se resalta como aspecto importante que funciona como un cultivo de microorganismos simulado a través de procesos computacionales, un crecimiento

natural controlado por las estructuras orgánicas diseñadas artificialmente que desarrollan complejas geometrías generativas ramificadas como un contenedor de lo natural es decir, un microhábitat con relaciones simbióticas que integran microorganismos autótrofos, fotosintéticos, micro algas, cianobacterias compatibles con microorganismos heterótrofos como E. coli o Bacillus subtilis que tras su interacción generan la simbiosis microbiana encontrada comúnmente en la naturaleza.

La morfología implementa un sistema complejo que integra una geometría global, una geometría de una malla local y variaciones en las propiedades distributivas de los materiales en escalas longitudinales fabricados en un multilateral impreso en 3D (Vero Clear, materiales rígidos y Vero Red) que emplean fuerzas de relajación, atracción y repulsión, esto posibilita el crecimiento de las interacciones dentro de una amplia estructura acanalada interna con variaciones de diámetro que oscilan entre 1 a 25 milímetros mostrado en la ilustración 3 de la Figura 2-6 el cual tiene recubrimientos que integran variaciones de transparencia que permiten el funcionamiento de los microorganismos fotosintéticos con la penetración de la luz.

El esquema general que impulsan la formación de Mushtari está basado en el ciclo de aprendizaje experimental que se distribuye cíclicamente de la siguiente en manera: la primera representación hace referencia a la entrada geométrica ya sea una malla, un conjunto de segmentos, o una nube de puntos que posteriormente pasa a ser la segunda representación denominada como intermedia y por último una tercera representación denominada implícita. La información que origina la relación entre las tres representaciones es utilizada para deformar la representación inicial o entrada geométrica que es topológicamente modificada lo que provoca una serie de deformaciones crecientes a medida que el proceso cíclico se reinicia.

- Conclusiones de la investigación

La investigación concluye que los campos de la biología sintética e impresión 3D está sufriendo un desarrollo acelerado, pero de manera independiente. Mushtari pone en evidencia las posibilidades de diseño que se pueden generar al interconectar los dos campos y su relevancia en el diseño experimental de elementos construidos computacionalmente con canales de crecimiento fluídicos y multi materiales imprimibles en tres dimensiones a escala de producto.

La autora resalta como relevantes tres objetivos para el diseño computacional aditivo. El primero, desarrollo e implementación de una metodología computacional enfocada a la generación de fluidos y modelado heterogéneo. Segundo, implementación, caracterización y evaluación de fórmulas para materiales de soporte de fluidos. Tercero, la evaluación de citotoxicidad de fotopolímeros impresos en 3D con modelos de especies microbianas.

Se demuestra que la utilización de impresoras tridimensional con tecnología que permitan el control de superposición de múltiples materiales en una sola impresora centrándose en el caso de la investigación de integrar materiales flexibles en el proseo de diseño que permitieron la generación de un módulo elástico abriendo nuevas posibilidades como la incorporación de pieles portátiles que además de contener medios biológicos pueden filtrar dichos medios de manera selectiva dado que la moderna impresora tridimensional de multilaterales pueden imprimir en alta resolución.

El desarrollo de Mushtari allana el camino hacia a generación de elementos multifuncionales con variaciones de las propiedades espacio temporal en alta resolución que permiten en el futuro el diseño y producción de elementos que puede interactuar con el cuerpo humano y su entorno, y la formación de una verdadera ecología de material a través de las escalas.

En síntesis, la operatividad de los sistemas biológicos serán los datos de entrada que darán origen al sistema morfológico, estos datos son obtenidos a través de la categorización de los principios operativos generales a nivel de individuos, a nivel de sistema y a nivel exterior adoptándolo como un sistema complejo en el que las versiones individuales, en el sistema o su entorno repercuten directamente en la composición inicial del sistema que genera información que es tratada mediante la implementación de algoritmos y el estudio de casos análogos que faciliten su gestión y proyección.

La operatividad a nivel de sistema y exterior está determinada por las relaciones cíclicas simbióticas y no simbióticas entre factores bióticos y los abiótico es así como se contempla la generación del sistema biológico a través de constante flujo de intercambio biogeoquímico y energético. Se describe como la primera relación simbiótica el intercambio de energético el cual se caracteriza por proporcionar energías a todos los niveles tróficos, es decir desde los organismos productores como las plantas algas y algunas cianobacterias hasta el último nivel trófico integrado por los carnívoros y grandes carnívoros. El proceso simbiótico continua con el intercambio de compuesto biogeoquímicos como el agua, el carbono y el oxígeno, cabe señalar que este intercambio no es constante como el de la energía sol está limitada a la transferencia de organismo a organismo.

La operatividad a nivel individual está regida por una simbiosis entre el elemento biótico del sistema es decir los organismos, las relaciones entre individuos es clasificada como variada y complejas al presentar conexiones directa e indirectas que son clasificadas de acuerdo al efecto que tienen un individuo obre el otro de la siguiente manera; parasitismo, mutualismo, comensalismo y amensalismo. Además, se describe que los organismos pueden sufrir variaciones de marea aleatoria e impredecible, estas variaciones se clasifican en; variabilidad por aislamiento voluntario, variabilidad por recombinación o simbiogénesis, variabilidad por inserción de genoma y variabilidad por selección natural.

La gestión de la gran cantidad de datos que proporciona la etapa de caracterización del sistema biológico se aborda adoptando la perspectiva de vida sintética definida como una rama del estudio científico que captura y desarrolla cuestiones biológicas fundamentales para su simulación mediante herramientas digitales. Se describe la metodología general empleada para el desarrollo de las funciones del algoritmo evolutivo encargado de generar variaciones genéticas aleatorias en los individuos. Posteriormente se describe metodológicamente los principios de los autómatas celulares considerados como un sistema de simulación computacional que permite la sinterización de datos a su mínima expresión al trabajar con el principio de generar dinámicas complejas a partir de interacción local de partes simples, la simplificación de los datos facilita la utilización en ambientes algorítmicos.

Luego, se expone los principios generales de un algoritmo de agregación de difusión limitada definido como un sistema de simulación sintética de crecimiento natural en (growth) un entorno computacional a través de individuos que interaccionan entre si sobre un espacio vacío. El algoritmo fue desarrollado por Witten, TA y Sander, LM (1981) y permite tratar los datos sintetizados por medio de la metodología autómata a través de un modelo de simulación de principios biológicos para la obtención de morfologías que podrán ser empleadas como proceso proyectual del elemento arquitectónico.

Finalmente se describe como caso análogo el proyecto de investigación Mushtari dirigido por la arquitecta Neri Oxman que es un dispositivo vestible fabricado aditivamente como dispositivo portátil, diseñado para las condiciones atmosféricas de Júpiter. El diseño opera como una cadena heterogénea de materiales llena de fluidos y materia viva que funciona como un cultivo de microorganismos a través de la impresión 3D de alta resolución. La investigación demuestra la manera de implementar multilaterales abriendo el camino para la generación de elementos multifuncionales con variaciones en las propiedades espacio temporales a través de diseño computacional enfocado al modelado y desarrollo heterogéneo.

Capítulo 3: el elemento arquitectónico

En este capítulo se adopta la definición del término morfología como el análisis y descripción de las estructuras, formas, dimensiones, individuos y sus relaciones. Como expresión lógica que enmarca las interrelaciones entre los individuos cuyo resultado es la forma de un elemento arquitectónico que se concibe como el “output” a manera de exploración alternativa, conceptual y operativa que busca la diferenciación de herramientas compositivas tradicionales con la proposición de la simulación de los principios vitales de los sistemas biológicos, además se muestra como conclusión de los capítulos en los que se identifican las tendencias, se diagnostican los modelos proyectuales tradicionales y se describe los procesos operativos de los sistemas biológicos complejos, desarrollos temáticos que se transforman en los principios estratégicos que serán sintetizados para su aprovechamiento en el proceso de simulación y proyección del elemento arquitectónico.

3.1 Surgimiento del sistema morfológico

3.1.1 Caracterización y síntesis de la operativa del individuo

En este apartado se describen las características generales que presenta un individuo (X) que posteriormente serán útiles para la definición del ancestro común y los individuos más óptimos para la simulación morfológica, además se representa a los posibles individuos que formara al elemento arquitectónico. La descripción se realiza en función de los principios operativos individuales vitales para la

conformación de un sistema biológico complejo aplicables a contextos conceptuales de simulación y proyección arquitectónica. Se identifican tres características principales que representan los cambios evolutivos sufridos por el individuo:

Primero, la capacidad de generar relaciones simbióticas biogeoquímicas (*CA*) entre los componentes bióticos y abióticos que propician el intercambio de micronutrientes y macronutrientes vitales para la supervivencia del individuo.

Segundo, la capacidad de establecer relaciones simbióticas entre los factores sistémicos bióticos (*CB*), la relación está subdividida en dos tipos; el parasitismo (*CB₁*), considerado como una relación que puede ocasionar la destrucción o no de uno de los dos individuos. el mutualismo (*CB₂*) que es una relación evolutiva y se clasifica según el tipo de interacción, es decir una clasificación que abarca las interrelaciones obligatorias simbióticas que son en las que se crea una dependencia vital entre los individuos y las interrelaciones obligatorias no simbióticas que corresponde a una relacionen la que cada individuo es independiente pero no sobrevive sin el otro, por ultimo las interrelaciones facultativas en la que existe una relación entre individuos, pero no están obligados a vivir juntos.

Tercero, la capacidad de adoptar variaciones aleatorias o mutaciones (*CV*) definidas como las variaciones impredecibles presentes en los individuos que son las responsables de paso al dinamismo evolutivo. Las variaciones se subdividen en: Variabilidad por aislamiento involuntario (*CV₁*), en la que el aislamiento poblacional de los individuos imposibilita la reproducción con individuos de otra o la misma especie. Variabilidad por recombinación (*CV₂*), en la que los individuos presentas variaciones genéticas (Mutaciones) a través de la recombinación sexual o simbiogénesis que dan lugar a nuevas características hereditarias. Variabilidad por inserción de genoma (*CV₃*), correspondiente principalmente a las variaciones genéticas insertadas en los individuos por virus. Variabilidad por selección natural

(CV_4), es ocasionado por la reproducción diferencial en la que se favorece a el individuo con mayor eficacia biológica, es decir el individuo que cuenta con características que favorecen su supervivencia.

Llegado a este punto es necesario sintetizar las características que pueden contener un individuo, el proceso de sinterización se lleva a cabo reduciendo cada característica a una representación eficiente mínima que facilita su utilización en lenguajes de programación, el resultado de esta síntesis se muestra a continuación:

Tabla 0-1: Síntesis de características individuales.

Característica	Síntesis
CA	- El individuo puede sobrevivir solo (relación simbiótica con el medio abiótico).
CB_1	- El individuo se duplica si encuentra otro vecino al mismo tiempo elimina al individuo encontrado (parasitismo).
CB_2	- El individuo muere si al nacer no encuentra otro individuo vecino (simbiosis obligatoria).
CV_1	- El individuo se duplica si encuentra un individuo vecino con las mismas características (aislamiento de especies).
CV_2	- El individuo se duplica si se encuentra a otro individuo (recombinación sexual).
CV_3	- Modifica al individuo vecino lo elimina o no (modificación por inserción de genoma).
CV_4	- El individuo se duplica y crea a un individuo nuevo (capacidad reproductiva por selección).

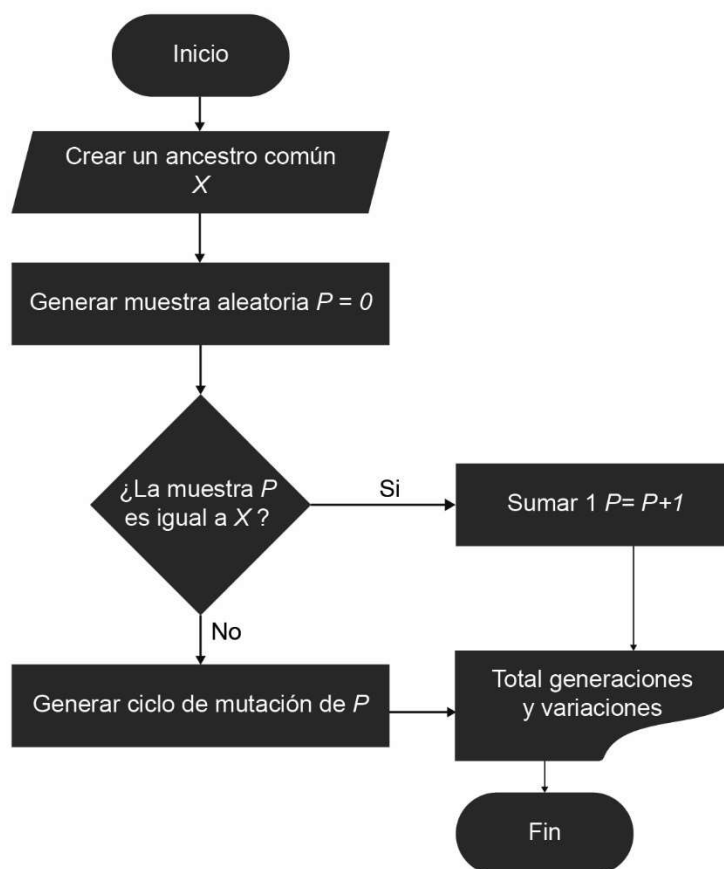
Fuente: elaboración propia.

Al identificar y sintetizar las características vitales se realiza la categorización por principio operativo biológico que busca reunir en grupos de características que presentan principios similares dando como resultado las siguientes categorías: categoría *A*, contiene las características de supervivencia o muerte (CA , CB_1 , CB_2), categoría *B*, contiene las características reproductivas (CV_1 , CV_4 , CV_2), por último, una categoría *C*, que contiene las características de modificación (CV_3).

3.1.2 Definición de funciones algorítmicas

En la segunda etapa se trata la información obtenida en la primera y se adiciona a la reinterpretación del diagrama de flujo genético descrito en el capítulo tres el cual representa gráficamente una definición metodológica general de funcionamiento y conformación de un algoritmo evolutivo, la reinterpretación permite la conformación de la posible población óptima así como la identificación de los individuos óptimos que presentan nuevas características a través de procesos algorítmicos impredecibles que simulan el proceso de selección natural, la mutación y la recombinación.

Figura 0-1: Diagrama de flujo algoritmo evolutivo desarrollado.



Fuente: Elaboración propia a partir de (BOURKE, 2004)

- Implementación del algoritmo evolutivo

La reinterpretación realizada al diagrama de flujo permite ajustar la aplicación del algoritmo evolutivo proporcionado por Guillermo Izquierdo (2017) a funciones para ancestro común también denominado como individuo (X) con el objetivo de generar una cadena evolutiva de individuos con variaciones genéticas que modifiquen las características respecto al ancestro común (X_1).

Se toma como semilla el ancestro común, aquel que carece de la totalidad de las características descritas en la primera etapa y se considera como individuo óptimo u objetivo a alcanzar aquel que contiene la totalidad de las categorías de los principios operativos biológicos.

El ancestro común y el individuo óptimo son representada en las siguientes expresiones $X = 0$ siendo X el ancestro común con un total de 0 características y $X_1 = (A, B, C)$ siendo X_1 el individuo óptimo con un total de tres características (A, B, C). A continuación, se describen las funciones del proceso algorítmico llevado a cabo.

Figura 0-2: Funciones del algoritmo evolutivo.

```

1  geneSet = 'ABCDEFGH0000000'
2  target = "A0B0C0A0B0C"
3  ----- Definición de Ancestro común e individuo optimo
4  import datetime
5  import random
6  random.seed(6)
7  startTime = datetime.datetime.now()
8
9  #Funcion para generar de manera aleatoria una muestra de genes
10 def generate_parent(length):
11     genes = [] #Lista donde se almacenan las secuencia aleatoria
12     while len(genes) < length:
13         sampleSize = min(length - len(genes), len(geneSet))
14         genes.extend(random.sample(geneSet,sampleSize)) #Obtención de la muestra aleatoria
15     return ''.join(genes) #Regresamos una cadena
16 ----- Función 1
17 #Funcion de optimización, si el nuestra muestra aleatoria tiene un caracter igual a nuestro target
18 def get_fitness(guess):
19     return sum(1 for expected, actual in zip(target,guess) if expected == actual)
20 ----- Función 2
21 #Funcion para mutar a nuestra cadena original o padre
22 def mutate(parent):
23     index = random.randrange(0,len(parent))
24     childGenes = list(parent)
25     newGene, alternate = random.sample(geneSet,2)
26     childGenes[index] = alternate if newGene == childGenes[index] else newGene
27     return ''.join(childGenes)
28 ----- Función 3
29 #Funcion para imprimir en pantalla los resultados
30 def display(guess):
31     timeDiff = datetime.datetime.now() - startTime
32     fitness = get_fitness(guess)
33     print('{}\t{}\t{}'.format(guess,fitness,timeDiff))
34 ----- Función 4

```

<p>Función 1 Se genera muestras aleatorias de P.</p>	<p>Función 2 Identificación de las muestras P.</p>	<p>Función 3 Se genera un ciclo para mutar P.</p>	<p>Función 4 Impresión del total de generaciones.</p>
--	--	---	--

Fuente: elaboración propia a partir del software Visual Studio Code.

Una vez obtenida la información generada por el algoritmo evolutivo se hace un recorrido a través de una selección aleatoria en la que se plantea un proceso analógico entre el árbol filogenético descrito por Charles Darwin (1859) en la “*teoría de la evolución biológica por selección natural*” y la información proporcionada por el desarrollo algorítmico que permite la identificación de las variaciones

generacionales y la clasificación de los individuos óptimos así como los extintos para la simulación biológica a través de ancestro común.

La información permite seleccionar aleatoriamente cuatro de los individuos óptimos que contemplen mínimo tres categorías de los principios operativos obtenidos de la información develada por el algoritmo genético y se especifica individualmente con el fin de evitar la superposición de características vitales en los individuos, es decir se eliminan aquellos individuos cuyas categorías se oponen por ejemplo un individuo que presente la capacidad de reproducirse y al mismo tiempo presente una característica de no reproducción es eliminado. Los individuos son expuestos a continuación.

Tabla 0-2: Variaciones individuales.

Individuos	Generaciones	No apto	Apto	Seleccionados	Definición
00BHEA0CF0D	3			si	X_1
00B0EA0CF0D	4			no	
00B0E00CF0D	5			no	
00B0E000F0D	6			no	
00B0E000B0D	7			no	
00B0E000B0C	8			no	
A0B0E000B0C	9			si	X_2
A0B0C000B0C	10			si	X_3
A0B0C0A0B0C	11			si	X_4

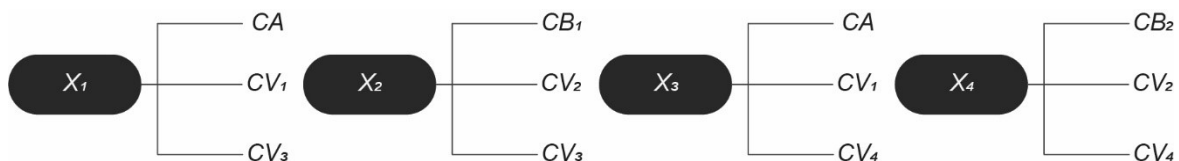
Fuente: elaboración propia.

Funciones algorítmicas resultados

- Individuos óptimos

Se describen los individuos seleccionados y sus características las cuales atravesaran por un proceso de sintetización a manera de autómatas para su aplicación en la generación formal del sistema morfológico del elemento arquitectónico. La representación gráfica de los individuos óptimos seleccionados se mostrará a continuación.

Figura 0-3: Individuos óptimos seleccionados.



Fuente: Elaboración propia.

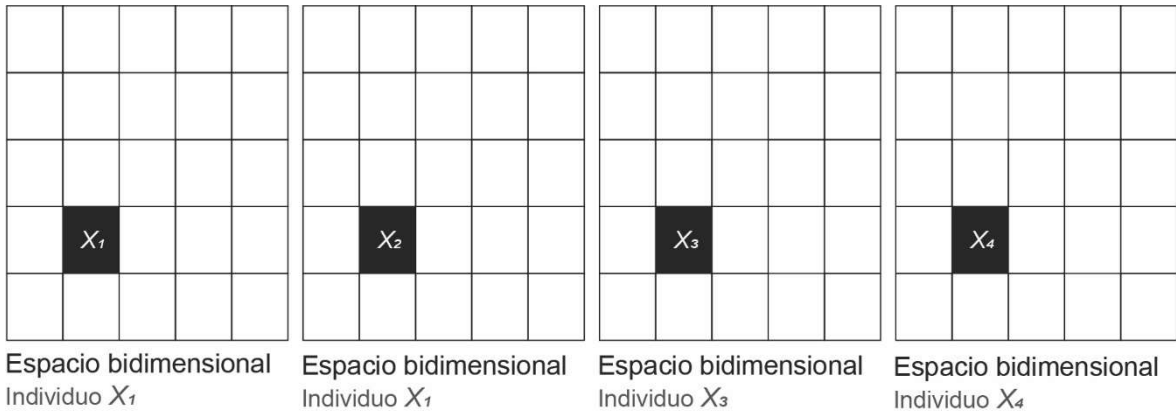
3.1.3 Definición de principios autómatas

Una vez definidos los individuos óptimos se genera la caracterización de individuos como autómatas que tendrán como objetivo convertirse en los elementos dinámicos del sistema morfológico capaces de soportar los comportamientos complejos del sistema proyectual. Cabe señalar que la representación de los individuos mediante la metodología de los autómatas celulares corresponde solo a un proceso de expresión que permite la síntesis y comprensión del conjunto de estados operativos que presenta un individuo, no a un definido sistema de organización ortogonal ya que el comportamiento de los individuos biológicos aptos se considera como impredecible.

- Arreglo regular de los individuos

Primero, se debe considerar que la organización del conjunto de individuos autómatas está regida por la grilla ortogonal *n - dimensional* en este caso se le asigna un valor de bidimensionalidad mostrada en la Figura 3-4 dado que se considera como un sistema equilibrado y agiliza la representación gráfica respecto a la organización unidimensional o tridimensional, es decir $n - 2$ será la representación organizativa de los individuos X_1 , X_2 , X_3 y X_4 en un espacio bidimensional que posteriormente permitirá su proyección y exploración en un entorno tridimensional.

Figura 0-4: Arreglo regular de los individuos.



Fuente: Elaboración propia.

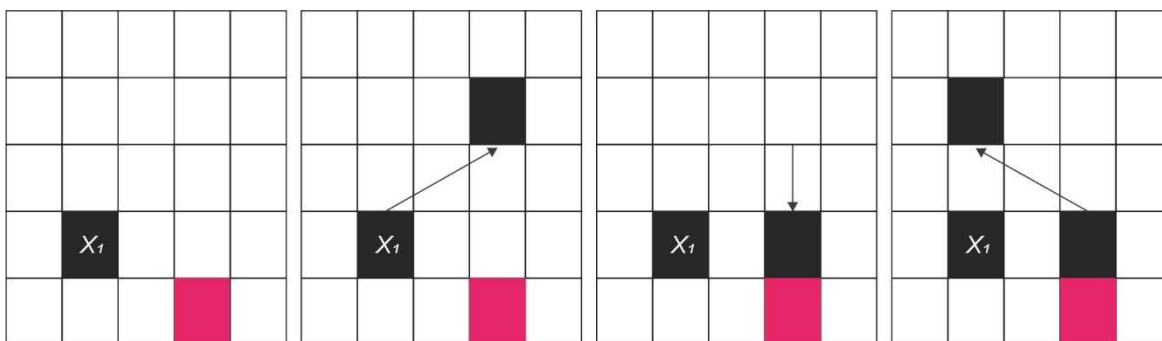
- Conjunto de estados posibles

Se determina que el estado del individuo autónomo en el tiempo t es finito y se define como una función de transición lo que permite que el individuo actúe como un autómata, en este caso el conjunto de estados específicos está determinados por las categorías de muerte, supervivencia, reproducción o modificaciones.

La definición del estado a nivel individual proporciona las características que presentan los individuos seleccionados las cuales son descritas y asignadas en función sintética de modo que determinen el proceso de interacción de los individuos y generen comportamientos complejos impredecibles, cabe señalar que al ser individuos que sigue distintas reglas de transición se enmarcan como individuos no - uniformes, es decir que está regido por diversas reglas de transición (supervivencia, muerte, reproducción y modificación). De igual modo se definen las vecindades (G) que permiten expresar el número de vecinos y la posición relativa de cada uno de ellos, a cada vecindad le corresponde un conjunto de estados posibles.

Individuo X_1 (individuo estático) el individuo nace y se duplica la cual se mueve aleatoriamente hasta encontrar un vecino al que se adhiere y genera una nueva replica con las mismas características. $X_1 = (CA, CV_1, CV_3)$

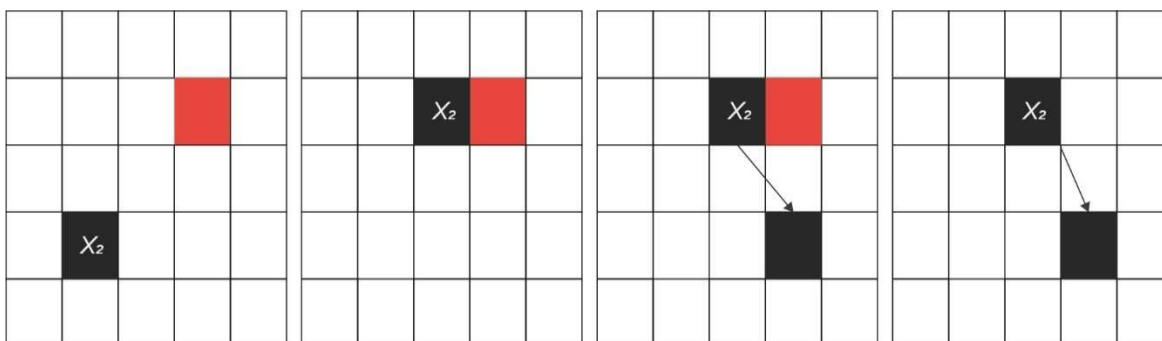
Figura 0-5: Reglas de transición individuo X_1



Fuente: Elaboración propia.

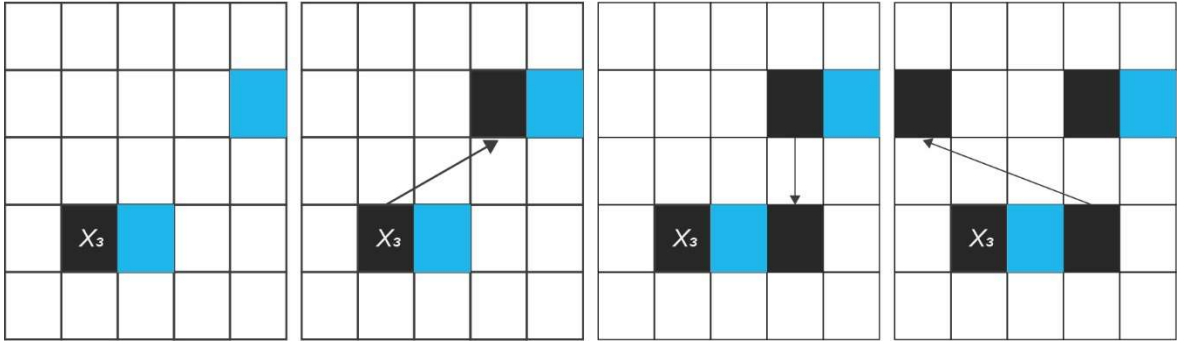
Individuo X_2 (individuo paracito móvil) el individuo nace y se mueve aleatoriamente al encontrar un vecino se duplica y elimina al vecino previamente encontrado. $X_2 = (CB_1, CV_2, CV_3)$

Figura 0-6: Reglas de transición individuo X_2



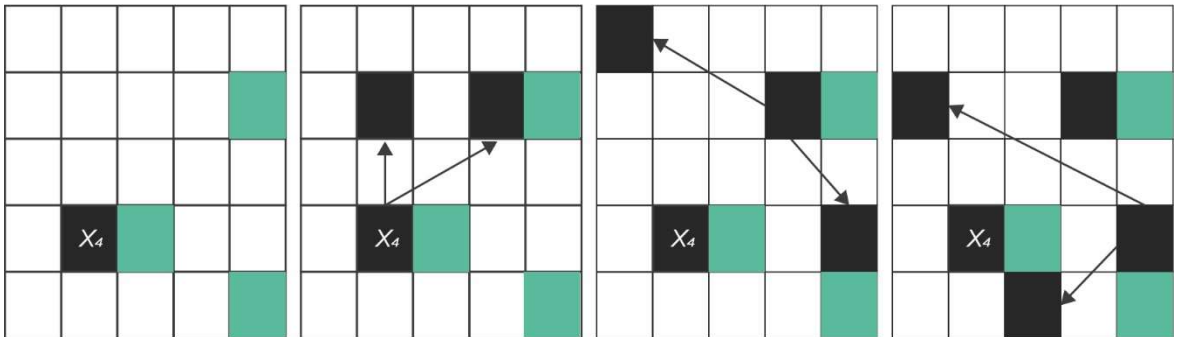
Fuente: Elaboración propia.

Individuo X_3 (individuo móvil) el individuo se genera en un lugar aleatorio si al nacer encuentra un vecino se duplica en otro individuo con las mismas características, si al nacer no encuentra otro individuo se elimina. $X_3 = (CA, CV_1, CV_4)$

Figura 0-7: Reglas de transición individuo X_3 

Fuente: Elaboración propia.

Individuo X_4 : (individuo móvil) el individuo se genera en un lugar aleatorio, si al nacer no tiene vecinos se elimina, si al nacer se encuentra con vecinos genera dos individuos nuevos. $X_4 = (CB_2, CV_4, CV_2)$

Figura 0-8: Reglas de transición individuo X_4 

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Simulación del sistema morfológico

La generación del elemento arquitectónico es realizada con los datos obtenidos de la definición de principios autómatas tratada a través de la implementación del modelo algorítmico de agregación limitada (DLA) dado que permite procesar la información compleja a través una metodología Growth (crecimiento) de partículas que corresponden a cada individuo y sus principios operativos. El proceso de simulación es desarrollado en el software Houdini en su versión 17.5 el cual se

toma como la herramienta procedural de simulación que permite la modificación e implementación de las funciones algorítmicas (DLA) las cuales son de código abierto, es decir puede ser utilizadas y modificadas sin restricciones.

3.2.1 Sistema morfológico

Es denominado como sistema morfológico al considerarlo como una red de elementos que interactúan de forma simbiótica, elementos que comprenden los individuos óptimos que simulan la operatividad de los individuos de un sistema biológico, los materiales sintéticos y orgánicos sumados al comportamiento de agentes autónomos.

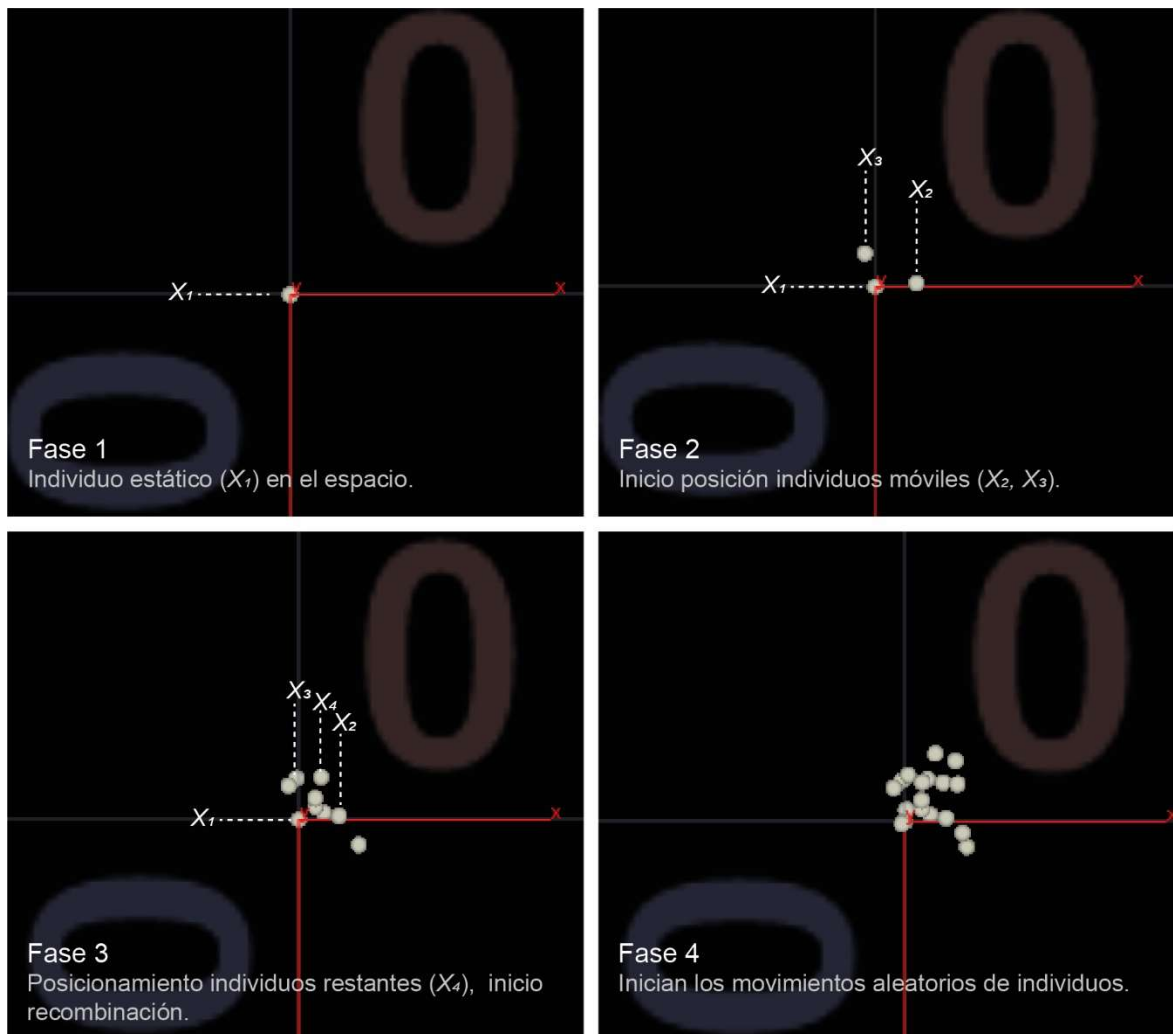
La simulación evidencia las interacciones que pueden presentar los individuos óptimos (X_1, X_2, X_3, X_4) en un sistema biológico bajo una perspectiva sintética que posteriormente se considerara como el sistema morfológico del elemento arquitectónico. Para iniciar la simulación se plantea un espacio vacío que puede ser comprendido como la vecindad imaginaria ($n \times n$) donde n representa el tamaño máximo que delimita el movimiento de los individuos y evita resultados poco prácticos para los procesos computacionales.

En el espacio se sitúan los individuos de manera estática es decir el individuo X_1 considerado el ancestro común dado que cumplen con una característica fundamental CA que le permite sobrevivir en aislamiento. Posteriormente se posicionan los individuos móviles que corresponde a X_2, X_3 y X_4 de forma aleatoria a diferentes distancias de espacio o vecindad imaginaria. Los individuos inician movimientos a direcciones elegidas al azar que simula los procesos de recombinación biológica respetando las condiciones operativas que presenta cada individuo, se adopta y modifica la función algorítmica dada por Moritz Schwind (2017) que permite regir el comportamiento de cada individuo.

Es así como X_1 deberá permanecer estático moverse aleatoriamente hasta encontrar un vecino al que se adhiere y genera una nueva replica con las mismas

características, X_2 deberá moverse aleatoriamente al encontrar un vecino se duplica y elimina al vecino previamente encontrado. X_3 deberá estar estático en un lugar aleatorio y duplicarse si encuentra un vecino en otro individuo con las mismas características, si al nacer no encuentra otro individuo se elimina, X_4 deberá nacer de forma aleatoria, si al nacer no tiene vecinos se elimina, si al nacer se encuentra con vecinos genera dos individuos, a aplicación de los principios se exponen a continuación.

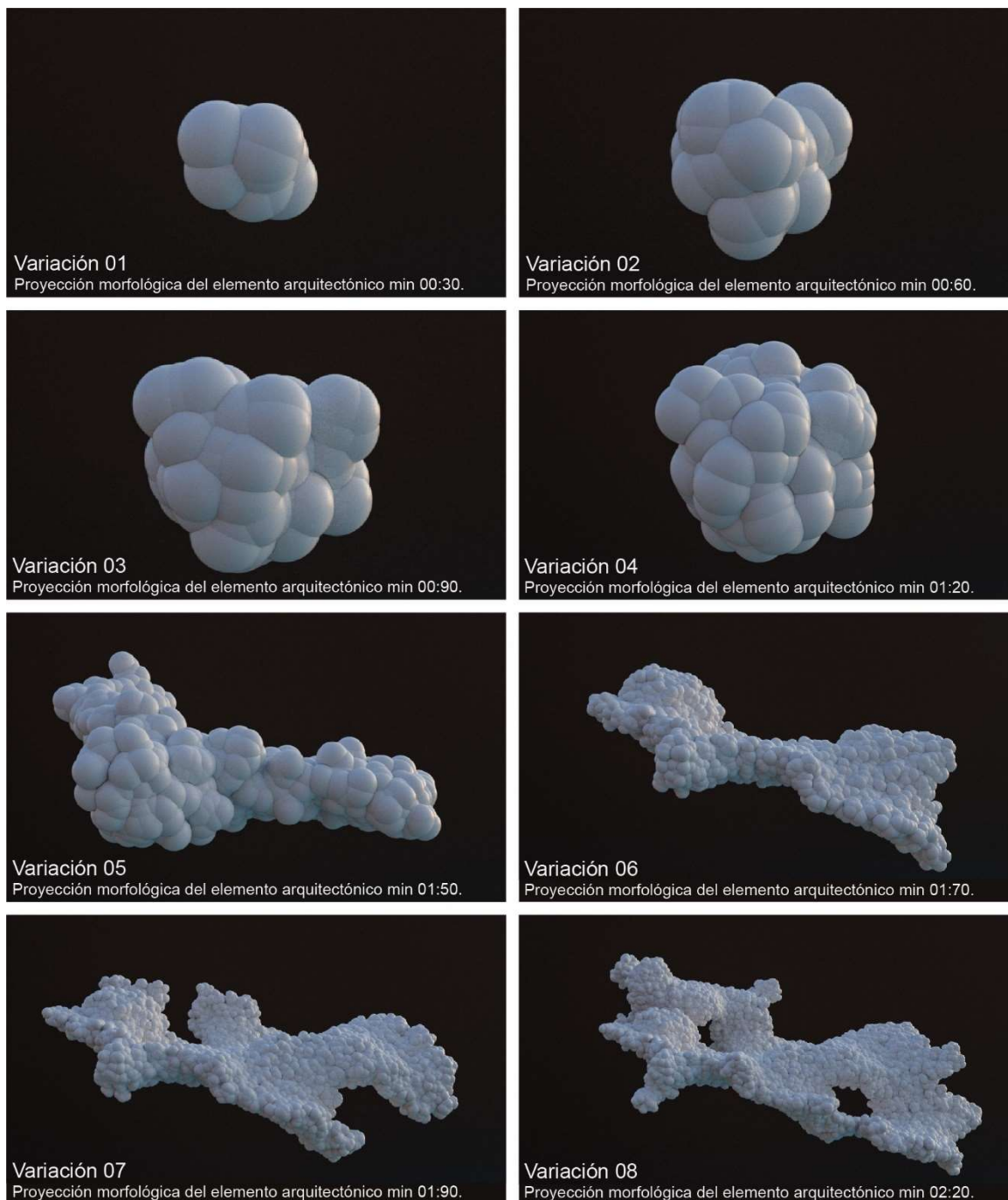
Figura 0-9: Fases de ubicación de los individuos en el espacio vacío.



Fuente: Elaboración propia.

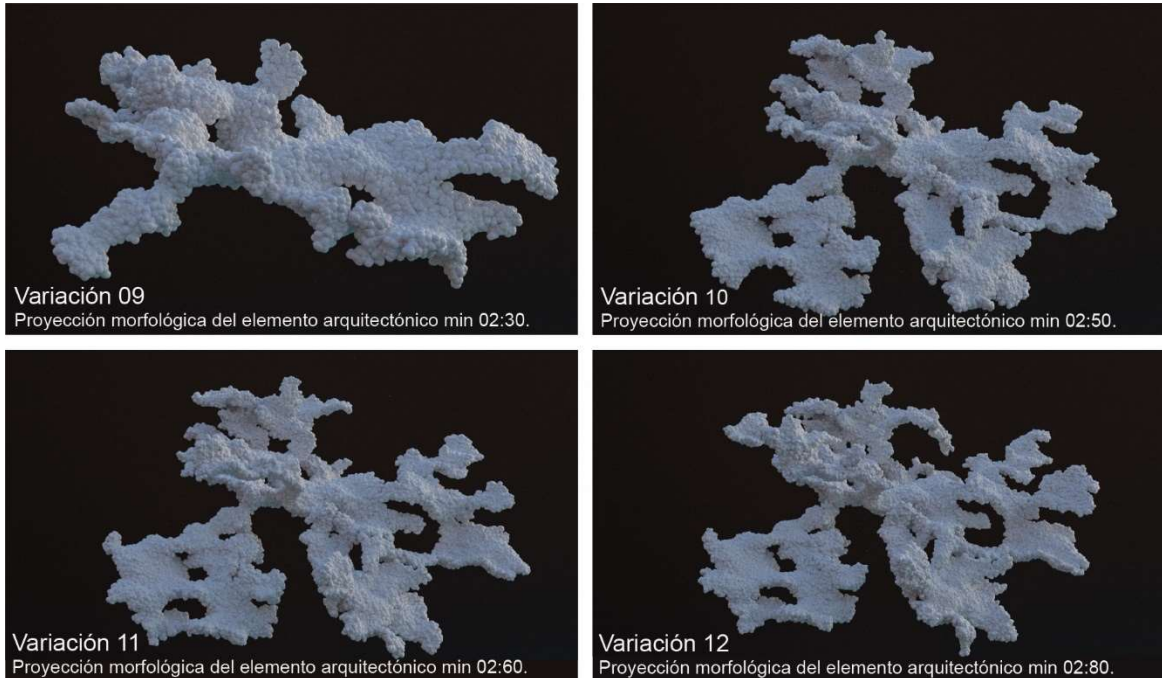
Los resultados de la simulación son mostrados a continuación, reflejan los comportamientos individuales que conforman el sistema morfológico y se considera cada representación como un potencial elemento arquitectónico.

Figura 0-10: Variaciones morfológicas del elemento arquitectónico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 0-11: Variaciones morfológicas del elemento arquitectónico.



Fuente: Elaboración propia.

- Estructura del sistema morfológico

Para completar la implementación de los principios de sistema biológico complejo en el sistema morfológico se recurre a la materialidad considerado como un elemento arquitectónico que además de adaptarse a las características operativas descritas a nivel individual debe cumplir la función vital de proporcionar las condiciones necesarias para el surgimiento de la transferencia biogeoquímica y energética cumpliendo con el propósito de transformar la energía solar para su aprovechamiento en los procesos la fotosíntesis o fotolisis y no interrumpir los ciclos biogeoquímicos vitales como el ciclo del oxígeno o carbono, de este modo se asegura que la energía y los compuestos sean fijados y transferidos cíclicamente hacia otros organismos.

A través de la fabricación digital de materiales heterogéneos que definen las propiedades distributivas de los materiales a escalas de fabricación longitudinal por

medio de impresión 3D avanzada de alta resolución. Se adopta la metodología implementada en la investigación dirigida por la arquitecta Neri Oxman (2016) nombrada "*Cultivado, impreso y biológicamente aumentado: Un portátil de microfluídica fabricado aditivamente, Funcionalmente diseñado para microbios sintéticos*" la cual permite el planteamiento de una fabricación biológica-sintética de elementos arquitectónicos formales.

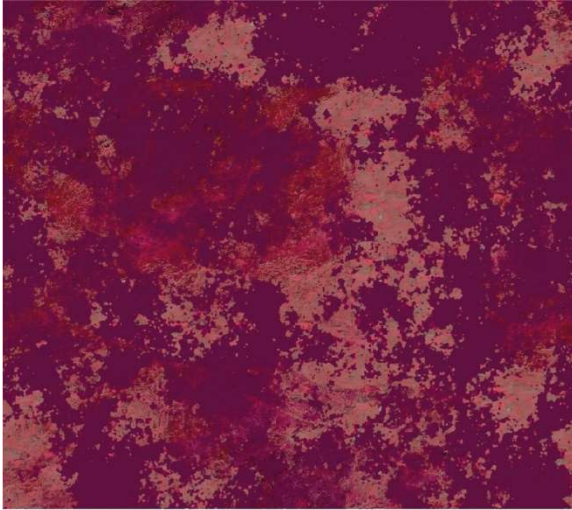
La reproducción de los principios operativos complejos del sistema morfológico se plantea a través de la impresión tridimensional aplicada a la fabricación de un multilateral para construir las piezas utilizando como sub - material sintético un fotopolímero translucido (quitina) que tendrán la función de permitir la penetración de la luz solar, la adherencia y contener los materiales vivos que conformarán el sistema morfológico arquitectónico. Las demás capas las integran la materia viva que tendrá como función la generación de un microsistema simbiótico integrado por las siguientes especies.

La cianobacteria también llamada cianófitas consideradas una forma de vida primitiva que cuentan con las características de carecer membrana nuclear y poseer sustancias fotosintéticas lo que las hace productoras de oxígeno y energías, son bacterias uní o pluricelulares lo que les permite autorreproducirse. El hábitat de estos organismos puede ser el agua, las rocas o los árboles y soportan temperaturas hasta de 90 grados centígrados. Las características descritas hacen de estas bacterias un elemento importante para el intercambio energético y biogeoquímico del sistema morfológico arquitectónico (UNP, 2009)

La bacteria *Bacillus subtilis*, encargada de producir endosporas resistentes a factores físicos como la desecación, la radiación y los ácidos, tiene como características principales la producción de enzimas hidrofóbicas que descomponen polisacáridos que posteriormente pueden ser empleados como fuente de carbono al fermentar la caseína y el almidón, además, promueven el

desarrollo de las plantas, lo que las hace indispensables para el desarrollo de micro ecosistema dentro del sistema morfológico arquitectónico. (LOZADA , 2010)

Figura 0-12: Elementos del material heterogéneo.



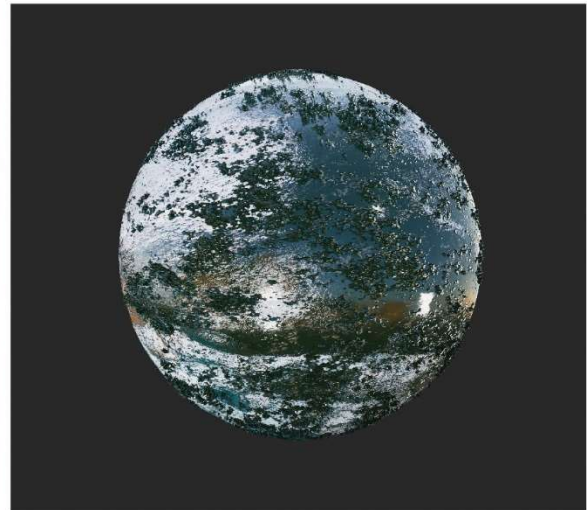
Cianobacteria
Representación de acercamiento 2D a las bacterias.



Cianobacteria
Representación de acercamiento 3D a las bacterias.



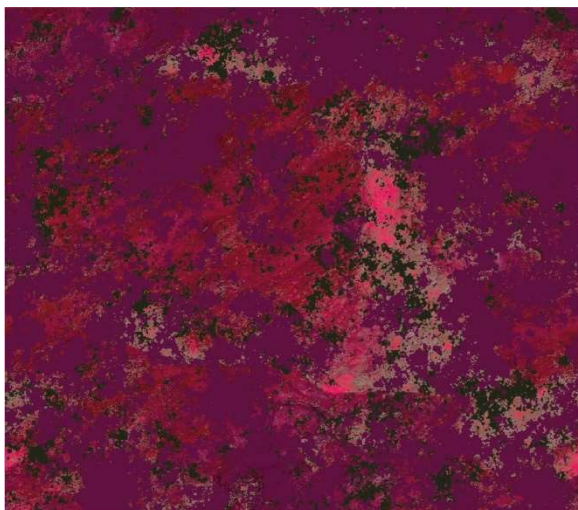
Bacillus subtilis
Representación de acercamiento 2D a las bacterias.



Bacillus subtilis
Representación de acercamiento 3D a las bacterias.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Quixel Mixer.

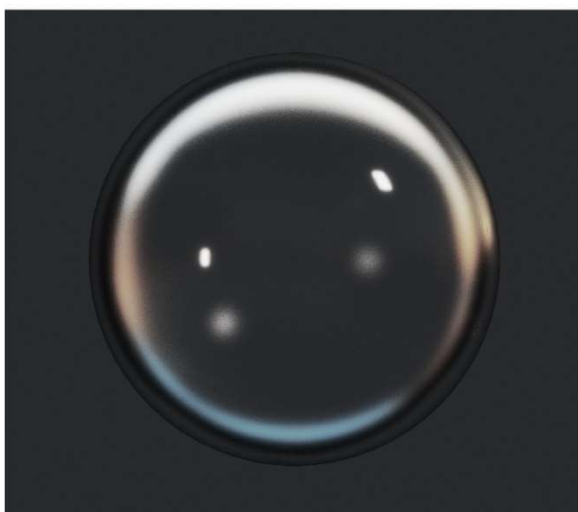
Figura 0-13: Componentes del sistema heterogéneo.



Microhábitat
Generación 3D del microhábitat de bacillus subtilis
y Cianobacterias.



Microhábitat
Generación 3D del microhábitat de bacillus subtilis
y Cianobacterias.



Vero Clear
Polímero traslucido.



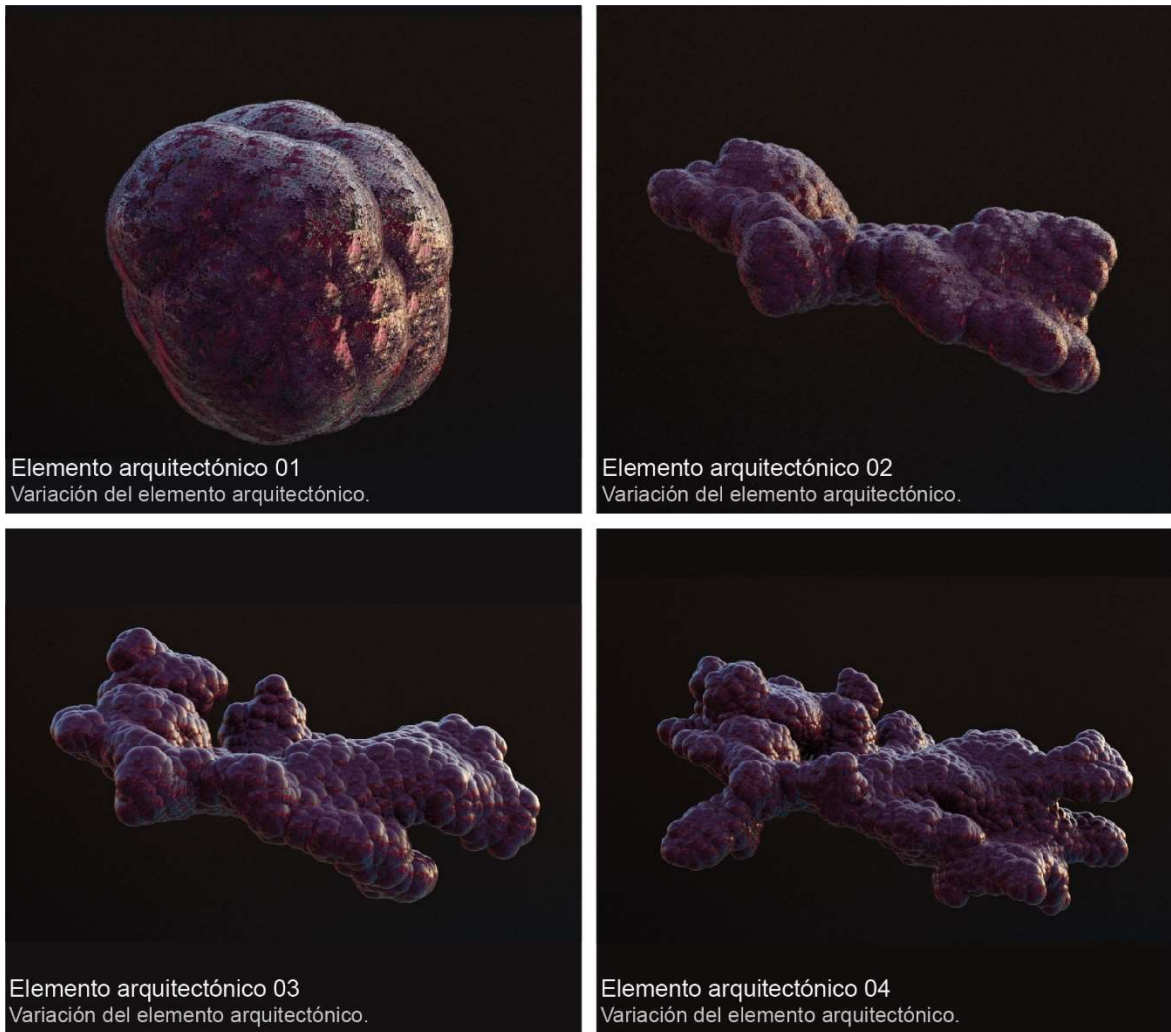
Representación 3D de la contención de Vero Clear
para el micro ecosistema

Fuente: Elaboración propia a partir del software Quixel Mixer.

Una vez definida la materialidad, se plantea la distribución del elemento arquitectónico por medio de agentes robóticos autónomos que interpretaran una nube de puntos proporcionada por el software Houdini para la formación de una estructura sintética que contenga microorganismos como datos que se transfieren

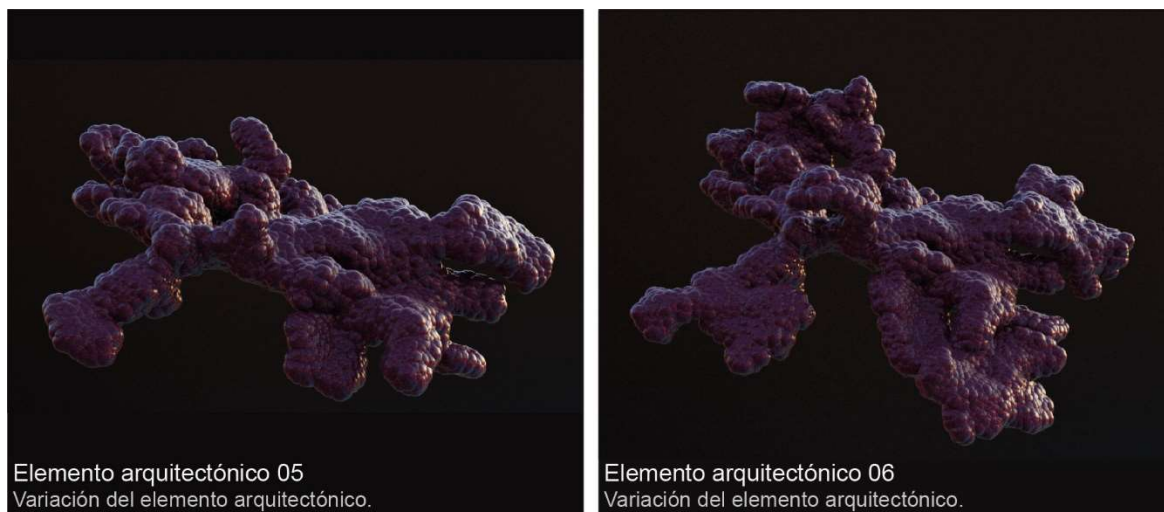
a un lenguaje volumétrico, utilizables en distribuciones heterogéneas de materiales como se puede observar en la Figura 3-14.

Figura 0-14: Aplicación de material heterogeneo a los elementos arquitectonicos.



Fuente: Elaboración propia a partir del software Houdini.

Figura 0-15: Aplicación de material heterogéneo a los elementos arquitectónicos.



Fuente: Elaboración propia a partir del software Houdini.

Finalmente, como resultado de la gestión algorítmica de los datos referentes a la operatividad de los sistemas biológicos, se culmina el modelo proyectual con el entrelazamiento del sistema morfológico, los elementos arquitectónicos y el material biosintético heterogéneo que da como resultado un elemento que se acopla a los principios de un sistema natural y refleja una estética, operatividad, composición y desarrollo arquitectónico alternativo que revela rasgos estéticos impredecibles que se confunden con los rasgos de un individuo biológico.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo aplicar un modelo proyectual basado en la operatividad y morfología de los sistemas biológicos complejos para la generación del sistema morfológico referente para el elemento arquitectónico a través de la gestión algorítmica de los datos obtenidos tras el estudio cronológico del estado del arte, el diagnóstico de los modelos tradicionales de proyección arquitectónica y el estudio teórico de los principios operativos de los sistemas biológicos. Es así como se allanó el camino para el surgimiento de una lógica proyectual alternativa no-lineal que pretende dejar atrás una era tradicional mecánica y se ubicó en la era actual que roza lo post digital, en la que se prioriza los algoritmos generadores de nuevas estéticas operativas que integran lo biológico y digital con lo arquitectónico.

Para iniciar el proceso de investigación, primero se indagó el estado del arte referente a las teorías de los sistemas complejos y geometrías complejas en ejercicios de proyección arquitectónica, se reconocieron las tendencias teóricas y metodológicas que guiaron el desarrollo del marco teórico a través de un rastreo cronológico de documentos que permitió identificar los principios de surgimiento del pensamiento complejo, la construcción de una definición para este concepto y la clasificación tipológica de los sistemas complejos. De ahí nace la consideración de la arquitectura como contenedor de complejidad, así como el descubrimiento de la herramienta digital Houdini como fundamental para el estudio de este tipo de fenómenos.

En segundo lugar, se diagnosticaron los modelos tradicionales de proyección arquitectónica, lo que permitió reconocer su organización, lógicas, ventajas y

desventajas a través del estudio de los aportes teóricos referentes en la composición geométrica dados por Wucius Wong y Francis Ching, y las lógicas constructivas de diseño dadas por Roberto Doberti adheriéndolas a las lógicas impartidas en la academia. De aquí que se propone un plan metodológico de acción que propició la reinterpretación e implementación lógicas proyectuales alternativas que contemplan principios no-lineales para su desarrollo en contextos biológicos complejos.

En tercer lugar, se definieron los principios operativos generales identificados en los sistemas complejos biológicos, lo que facilitó el reconocimiento y caracterización de la información biológica por medio del estudio a nivel de sistema que permitió destacar las conexiones simbióticas entre los factores bióticos y abióticos, se resaltaron las conexiones simbióticas y de variabilidad a nivel individual, posteriormente se definieron las funciones algorítmicas que permitieron la gestión y aplicación de los datos operativos biológicos en la lógica proyectual para el surgimiento de la morfología arquitectónica.

El proceso investigativo finalizó con la implementación de la metodología algorítmica de diseño a partir de los lineamientos recolectados referentes a los procesos operativos de los sistemas biológicos complejos, esto permitió la definición morfológica a través de la simulación algorítmica de los datos correspondientes a la caracterización individual, la síntesis de las características, la aplicación del algoritmo genético, la definición automática de los individuos óptimos y la aplicación de la simulación a través del modelo algoritmo de agregación limitada que facilitó el surgimiento del elemento arquitectónico que revela grandes semejanzas a la estética y forma de un organismo vivo.

Recomendaciones

Una vez concluida la investigación, se considera interesante investigar sobre los aspectos relacionados al planteamiento de modelos proyectuales arquitectónicos que contemple la operatividad de sistemas biológicos como eje central de generación de sistemas morfológicos aplicables a elementos arquitectónicos y se propone:

- Desligarse de principios funcionales estrictos generalmente adoptados durante el proceso académico que limitan el surgimiento de elementos arquitectónicos.
- Extender los estudios expuestos en esta monografía, al estudio o formulación de lógicas proyectuales experimentales que se desvíen de los modelos tradicionales.
- Trabajar en mejorar el sistema morfológico aquí expuesto para mejores resultados de elementos arquitectónicos.
- Contemplar que la generación arquitectónica no está únicamente determinada a la solución de problemas, puede ser un medio para la proyección artística, escultórica o crítica.
- Analizar con mayor detenimiento y buscar otras posibles soluciones algorítmicas que permitan gestionar y exponer los datos recolectados de un sistema complejo como el biológico.

A. Anexo: selección documental del estado del arte

Este anexo expone el listado de las investigaciones empleada en indagación documental realizada para la construcción del estado del arte.

Anexo 1 Selección documental del estado del arte										
Nº	Autores	País de origen	Artículo	País	Título	Año	Temática de fondo	Resumen	Palabras clave	Referencias Bibliográficas
1	Universidad de Navarra de Navarra (España)	Spain	El diseño basado en las Enteras Cuadradas de Fermat y el diseño de edificios	España	El diseño basado en las Enteras Cuadradas de Fermat y el diseño de edificios	2011	Temática de fondo	El artículo describe el concepto de diseño basado en las Enteras Cuadradas de Fermat y el diseño de edificios. El autor propone un método de diseño basado en las Enteras Cuadradas de Fermat y el diseño de edificios. El autor propone un método de diseño basado en las Enteras Cuadradas de Fermat y el diseño de edificios. El autor propone un método de diseño basado en las Enteras Cuadradas de Fermat y el diseño de edificios.	Enteras Cuadradas de Fermat, Diseño de edificios, Arquitectura, Ingeniería, Matemáticas, Geometría	Enferri, A. & Aguirre, A. (2011). El diseño basado en las Enteras Cuadradas de Fermat y el diseño de edificios. <i>Revista de Arquitectura</i> , 15(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=101
2	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2012	Conceptualización en proceso	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Proyecto arquitectónico, Metodología, Arquitectura, Ingeniería, Matemáticas, Geometría	ALLAN, T. (2012). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 16(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=102
3	The Royal Danish Academy of Fine Arts School of Architecture Design and Conservation	Denmark	Design Processes in Architectural Design	Costa Rica	Design Processes in Architectural Design	2013	Pro-Título	This research explores the notion of design processes in architectural design. It discusses the role of the architect in the design process and the importance of communication in the design process. The author proposes a methodology for architectural design based on the design process.	Pro-Título	REINHOLD, A. C. (2013). Design Processes in Architectural Design. <i>Revista de Arquitectura</i> , 17(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=103
4	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2013	Artículo de Conferencia	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Artículo de Conferencia	ALLAN, T. (2013). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 17(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=104
5	Universidad de Buenos Aires Facultad de Arquitectura	Argentina	Arquitectura metodológica y fenomenológica	Argentina	Arquitectura metodológica y fenomenológica	2013	Artículo de Investigación	Este artículo discute el concepto de arquitectura metodológica y fenomenológica. El autor propone un método de diseño basado en la arquitectura metodológica y fenomenológica. El autor propone un método de diseño basado en la arquitectura metodológica y fenomenológica. El autor propone un método de diseño basado en la arquitectura metodológica y fenomenológica.	Arquitectura metodológica, Fenomenología, Metodología, Arquitectura, Ingeniería, Matemáticas, Geometría	ORLANDO, A. C. (2013). Arquitectura metodológica y fenomenológica. <i>Revista de Arquitectura</i> , 17(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=105
6	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2014	Artículo de Investigación	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Artículo de Investigación	ALLAN, T. (2014). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 18(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=106
7	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2014	Artículo de Investigación	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Artículo de Investigación	ALLAN, T. (2014). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 18(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=107
8	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2014	Temática de fondo	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Temática de fondo	ALLAN, T. (2014). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 18(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=108
9	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2014	Temática de fondo	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Temática de fondo	ALLAN, T. (2014). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 18(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=109
10	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2015	Temática de fondo	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Temática de fondo	ALLAN, T. (2015). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 19(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=110
11	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2015	Temática de fondo	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Temática de fondo	ALLAN, T. (2015). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 19(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=111
12	Escuela Superior de Arquitectura de Valencia	Spain	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	España	El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología	2015	Temática de fondo	Este artículo discute el concepto de proyecto arquitectónico como un proceso de negociación entre el arquitecto y el cliente. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico. El autor propone un método de diseño basado en el proyecto arquitectónico.	Temática de fondo	ALLAN, T. (2015). El proyecto arquitectónico: Paradigma o metodología. <i>Revista de Arquitectura</i> , 19(1), 1-10. Recuperado de http://www.revistaarquitectura.com/ver_articulo.php?id_articulo=112

B. Anexo: laminas del proyecto

Este anexo expone las laminas de resumen del documento de investigación.



ASPECTOS TEÓRICOS

1.1 SISTEMAS Y GEOMETRÍAS COMPLEJAS

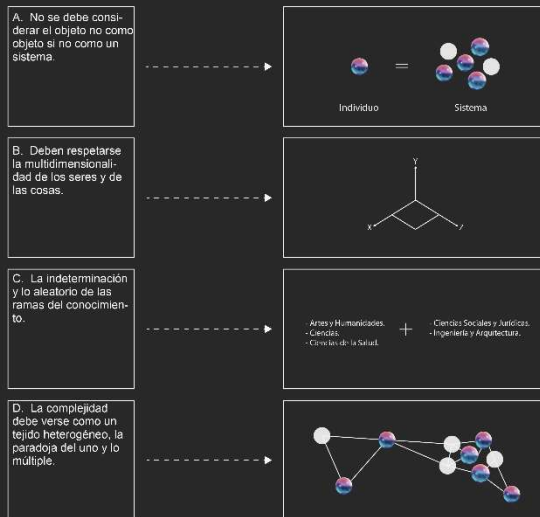
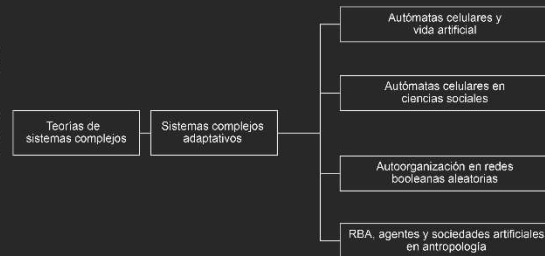
El estado del arte se realiza a partir del rastreo documental en la línea investigativa referente a la aplicación de teorías asociadas a los sistemas complejos y morfologías complejas en ejercicios de proyección arquitectónica durante el año 2012 al 2019 para reconocer las tendencias teóricas y metodológicas subdividido en dos ejes temáticos:

Dentro los sistemas complejos se reconocen un extenso conjunto de teorías y áreas de aplicación, la cibernética, la teoría general de sistemas algoritmos genéticos y sistemas complejos adaptativos. Estos últimos enmarcados dentro de los denominados algoritmos de la complejidad que son empleados para la materialización en modelos de simulación.

1.1.1 Definición e implementación de teorías o geometrías complejas

Se identifica que la concepción de los sistemas complejos alcanza su mayor relevancia durante la segunda mitad del siglo XX con el despertar del interés en el estudio de los diferentes tipos de sistemas por medio del conocimiento de sus partes.

Además postula que la definición de los sistemas complejos no conduce a la eliminación de la simplicidad, sino que deben ser entendidos como una unidad global organizada o el todo. Un pensamiento basado en la complejidad debe integrar numerosas condiciones que definen la indeterminación y lo aleatorio de las ramas del conocimiento.

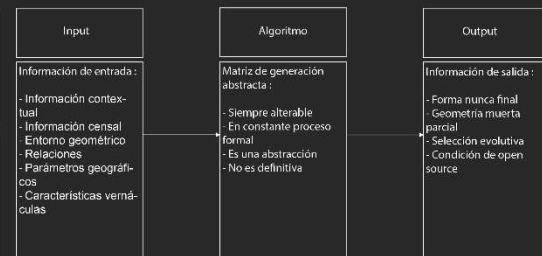


1.1.2 Implementación de herramientas digitales avanzadas

La implementación de herramienta avanzadas se destaca la automatización de modelos arquitectónicos a través de procesos de diseño generativo. A través de software como Houdini capaces de automatizar el proceso de diseño y hacer proyecciones independientes de cualquier elemento arquitectónico.

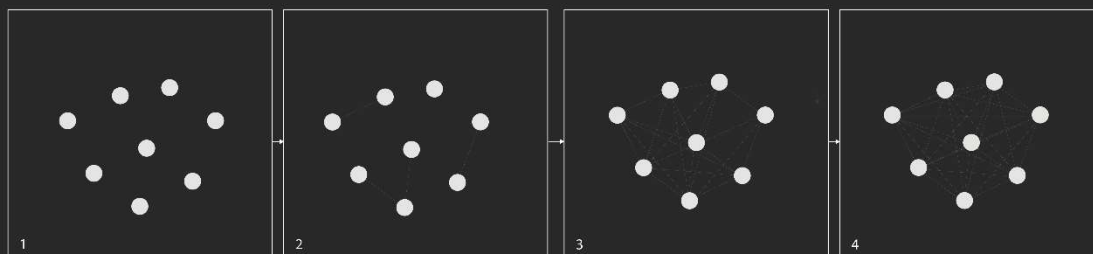
Además, el desarrollo de funciones cinéticas automatizadas que orquestan mecanismos robóticos relacionados a través de sistemas de control basados en software de estructuras paramétricas como respuesta a los requerimientos de la aplicación de nuevos métodos tecnológicos de trabajo y diseño emergente.

Se identifica en el diagrama planteado por Sarquis (1972) el modo general en el que operan los procesos algorítmicos como se observa en la siguiente ilustración.



Se describe que la complejidad de un sistema radica en el alto grado de libertad que presentan sus componentes. Esto permite la consideración de la autoorganización como un proceso de coherencia entre las conexiones de un sistema a distintas escalas. Las interacciones son expuestas por Murray (1995) el diagrama de ocho puntos que pueden representar elementos físicos, químicos, biológicos o sistemas, entre otros. Diagrama expuesto la siguiente ilustración.

Se concluye que las tendencias teóricas y metodológicas que guiaron el desarrollo del marco teórico a través de un rastreo cronológico de documentos que permitió identificar los principios de surgimiento del pensamiento complejos, la construcción de una definición para este concepto y la clasificación tipológica de los sistemas complejos.



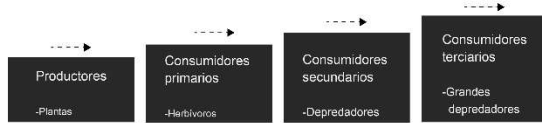
DATOS BIOLÓGICOS

2.1 PRINCIPIOS OPERATIVOS DE LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS COMPLEJOS

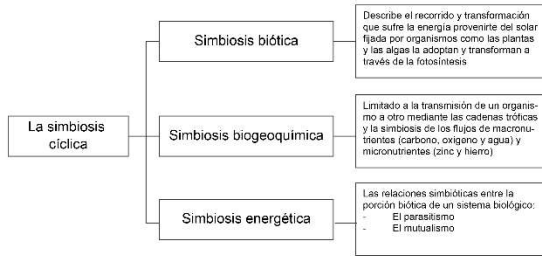
La operatividad de los sistemas biológico se interpreta como los datos de entrada caracterizados por la intrincada relación entre los individuos y su medio, constituido por: un elemento heterotrófico y el medio abiótico que presentan relaciones simbióticas y variaciones impredecibles.

2.1.1 La simbiosis cíclica

El surgimiento de los sistemas biológicos complejos está ligado al desarrollo de relaciones simbióticas que priorizan los flujos biogeoquímicos y energéticos entre los elementos bióticos y abióticos, estas complejas relaciones presentan una jerarquía autoorganizativa apoyada en el siguiente orden descendente, consumidores terciarios, consumidores secundarios, consumidores primarios último productores.



La simbiosis cíclica entre componente biótico y abiótico se subdivide de la siguiente manera.



2.1.2 Variabilidad impredecible

los sistemas biológicos presentan un número indeterminado de variaciones que emergen de forma impredecible en los individuos que lo integran, dichas variaciones son las responsables dar paso a la generación de la capacidad autónoma de dinamismo evolutivo.

la variabilidad de los individuos son el resultado de micro mutaciones que se replican de generación en generación durante miles de años acumulándose hasta lograr cambios en las poblaciones de organismos, permitiéndoles ajustarse a las condiciones de un sistema biológico particular. Son consecuencia de una serie de pequeñas modificaciones graduales que son efectos involuntarios o voluntarios y no por la aparición de una sola macro mutación y se clasifican de la siguiente manera:



2.2 VIDA SINTÉTICA

La vida sintética es una rama científica que tiene el objetivo de deslumbrar la mayor cantidad posible de las cuestiones naturales bajo la hipótesis de capturar las características fundamentales de la vida a través de modelos algorítmicos simples. A través del cual se gestiona los datos de sistemas biológicos con las siguientes subdivisiones.

2.2.1 Autoorganización

Son comportamientos impredecibles en el que las variaciones y el cambio son transformaciones inevitables por los que debe transitar los elementos. En los sistemas complejos esta jerarquizado por la interrelación entre múltiples niveles que pueden causar nuevos tipos de comportamientos en los niveles superiores por ejemplo:



2.2.2 Métodos y algoritmos

La siguiente ilustración es una síntesis de las metodologías, algoritmos y casos análogos priorizados para la simulación de los principios operativos del sistema biológico.



Finalmente el reconocimiento y caracterización de la información biológica por medio del estudio a nivel de sistema que permitió destacar las conexiones simbióticas entre los factores biótico y abióticos. Las funciones algorítmicas que permitieron la gestión y aplicación de los datos operativos biológicos en la lógica proyectual para la generación morfológico arquitectónico.

ASPECTOS TEÓRICOS

1.2 DIAGNOSTICO: MODELOS TRADICIONALES DE PROYECCIÓN ARQUITECTÓNICA

Se considera que la generación de un proceso proyectual está sujeta a una solución arquitectónica de una problemática humana edificable con el enfoque primordial de dar respuesta a problemáticas funcionales regidos por los elementos por los elementos primario de la forma, los principios ordenadores de la composición y las lógicas proyectuales.

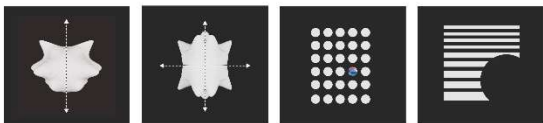
1.2.1 Elementos primarios de la forma

Francis Ching (2002) y Wucius Wong (1992) consideran que la composición tiene como objetivo la búsqueda del equilibrio entre orden y diversidad, que los elementos originadores de proyecciones formales arquitectónicas son: el punto, la línea, el plano y el volumen, perceptibles por la mente. Esta información permitió la construcción siguiente matriz DOFA que es descrita con mayor profundidad en el documento.

<p>- Las limitaciones conceptuales y formales que se presentan al intentar utilizar los principios de surgimiento en ejercicios que busquen el desarrollo de elementos arquitectónicos basados en principios de vida sintética.</p> <p>- La aplicación de estos principios estuvo planteada para tiempos que difieren de los actuales donde la arquitectura se está desarrollando para y con tecnologías avanzadas.</p> <p>- La importancia que se le da a la geometría básica deja de lado la relación datos - geometría.</p> <p style="text-align: right;">D</p>	<p>- La síntesis de conceptos básicos que pueden ser utilizados en procesos proyectuales que apliquen geometrías simples.</p> <p>- Facilidad de comprender y aplicar los principios geométricos en entornos académicos y no académicos de diseño.</p> <p style="text-align: right;">F</p>
<p>- Ser actualizados para su utilización en procesos proyectuales complejos.</p> <p style="text-align: right;">O</p>	<p>- La disociación gradual entre los elementos arquitectónicos y los sistemas biológicos pueden interrumpir procesos naturales vitales para dichos sistemas.</p> <p>- La implementación de los elementos geométricos descritos por el autor puede impedir la exploración entre los límites de la geometría y la naturaleza.</p> <p>- Al ser uno de los primeros contactos que se tiene en la academia puede resultar en la posterior automatización del proceso proyectuales.</p> <p style="text-align: right;">A</p>

1.2.2 Principios ordenadores de la composición

Francis Ching (2002) considera que los principios ordenadores son la simetría, la jerarquía, el ritmo, la pauta, la transformación y la proporción, estos conceptos son empleados para proporcionar la regularidad geométrica y armonía. demás reconoce a los usuarios, objetos y contexto, los cuales son reconocidos como la esencia de las formaciones arquitectónicas.

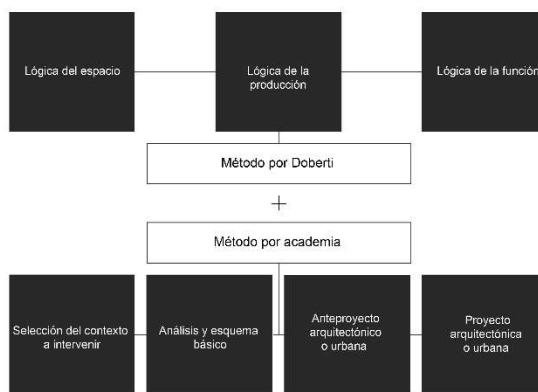


Wucius Wong (1993) complementa los métodos ordenadores de los elementos tridimensionales que contienen expansión, profundidad física y una tercera dimensión. Esta información permitió la construcción siguiente matriz DOFA que es descrita con mayor profundidad en el documento.

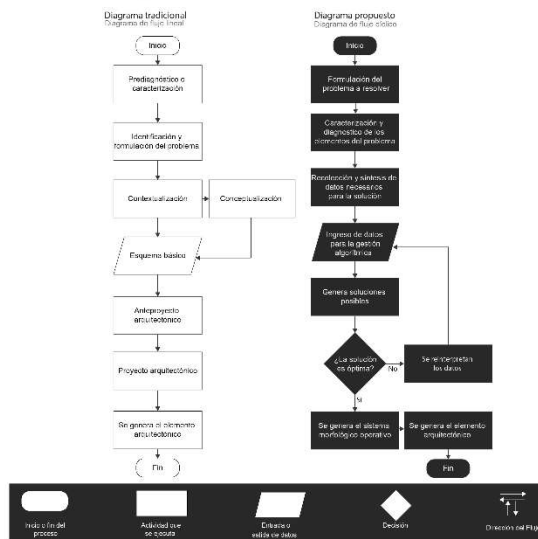
<p>- El orden homogéneo que genera la utilización de conceptos como el ritmo, la pauta o los planos seriados regulares en procesos proyectuales arquitectónicos.</p> <p>- Considerar que la regularidad formal es sinónimo de armonía y orden visual dejando afuera la información digital que ha cambiado la forma en la que se proyecta.</p> <p>- Priorización de un estricto funcionalismo formal y espacial.</p> <p style="text-align: right;">D</p>	<p>- La síntesis clara de los principios a tener en cuenta para la construcción de la lógica formal de un proyecto arquitectónico.</p> <p>- Permite la comprensión de procesos proyectuales utilizados en proyectos canónicos como Villa Savoye de Le Corbusier.</p> <p>- La disminución del trabajo técnico y de exploración conceptual a través de la aplicación de los principios pre concebidos expuestos por los autores.</p> <p style="text-align: right;">F</p>
<p>- Facilitar un tipo de ordenamiento ortogonal de las formas geométricas básicas en un plano bidimensional.</p> <p>- Ser aplicados en contextos donde la tecnología sea limitada y se necesiten soluciones formales generalizadas culto proceso de composición sea rápido.</p> <p style="text-align: right;">O</p>	<p>- Contemplar el funcionalismo como elemento primordial en los principios ordenadores.</p> <p>- El inferir que la belleza formal está en el estricto orden o en la simetría de un elemento arquitectónico.</p> <p>- Está limitando la utilización de herramientas tecnológicas a aplicar la replicación de estos principios ordenadores y no a la exploración para la exploración desde perspectivas multidisciplinares.</p> <p style="text-align: right;">A</p>

1.2.3 Lógicas proyectuales

Doberti (2012) describe la desarticulación entre la arquitectura y cuatro posiciones; la artística, la científica, la tecnológica y el proyecto o proyectuales por eso plantea la implementación de cuatro lógicas fundamentales, del mismo modo las competencias metodológicas dadas por la academia, una serie de pautas que tienen como objetivo facilitar el proceso proyectual arquitectónico descritos en la anterior ilustración que son:



Los modelos anteriores son factor fundamental para la implementación de los modelos proyectuales tradicionales debido a la flexibilidad aplicativa, es decir su accesible comprensión e implementación en el proceso de diseño. A continuación, se expone una comparación entre las lógicas proyectuales tradicionales y las lógicas proyectuales necesarias para la la gestión de una gran cantidad de datos proveniente de la operatividad de los sistemas biológicos naturales.



En este caso Implementar el modelo proyectual cíclico es necesario la identificación de información fundamental de la operatividad de un sistema natural e identificación de información fundamental como sus principios o los actores y sus relaciones internas o externas descritas en el siguiente capítulo.

Se concluye que el diagnostico permitió reconocer la organización, lógicas, ventajas y desventajas a través de los aportes teóricos referentes a la composición y geometría dados por Wucius Wong y Francis Ching, y las lógicas constructivas de diseño dadas por Roberto Doberti adhiriéndolas a las lógicas impartidas en la academia. De aquí que se propone un plan metodológico de acción que propicio la reinterpretación e implementación lógicas proyectuales alternativas.

SIMULACIÓN

3.1 EL ELEMENTO ARQUITECTÓNICO

se adopta el término morfología como el análisis y descripción de las estructuras, formas, dimensiones, individuos, y sus relaciones. Como expresión lógica que enmarca las interrelaciones de los individuos cuyo resultado es la forma de un elemento arquitectónico.

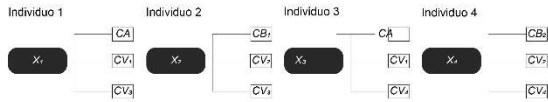
3.1.2 Surgimiento del sistema morfológico

En este apartado se describen y sintetizan las características generales que presenta un individuo (X) que posteriormente serán útiles para la definición del ancestro común y los individuos más óptimos para la simulación morfológica. La síntesis de las características arroja:

CA	El individuo puede sobrevivir solo (nacido ambiguo para el medio abiótico)	CV1	El individuo se duplica si encuentra un individuo vecino con las mismas características (arreglo de espacios)
CB1	El individuo se duplica si encuentra otro vecino al mismo tiempo elimina al individuo encontrado (parasitismo)	CV2	El individuo se duplica si se encuentra a otro individuo (recombinación sexual)
CB2	El individuo muere si al nacer no encuentra otro individuo vecino (condición obligatoria)	CV3	Modifica al individuo vecino lo elimina o no (modificación por inmersión de genes)
		CV4	El individuo se duplica y crea a un individuo nuevo (aparear reproductiva por selección)

3.1.3 Definición de funciones algorítmicas

En la segunda etapa se trata la información obtenida en la primera y se adiciona a la reinterpretación del diagrama de flujo genético descrito en el capítulo tres el cual y se aplica la definición metodológica general de funcionamiento del algoritmo evolutivo. Lo que da como resultado La selección de los individuos óptimos para la simulación:



3.1.4 Definición de principios autómatas

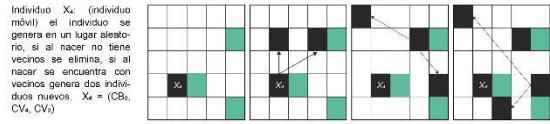
Una vez definidos los individuos óptimos se generan la caracterización de individuos como autómatas que tendrán como objetivo convertirse en los elementos dinámicos del sistema morfológico capaces de soportar los comportamientos complejos del sistema proyectual. Aclarando que corresponde solo a un proceso de expresión no a un definido sistema de organización ortogonal.

Individuos X_1 , X_2 , X_3 y X_4 en un espacio bidimensional que posteriormente permitirá su proyección y exploración en un entorno tridimensional.

Individuo X_1 (individuo estático) el individuo nace y se duplica la cual se mueve aleatoriamente hasta encontrar un vecino al que se adhiere y genera una nueva replica con las mismas características. $X_1 = (CA, CV_1, CV_4)$

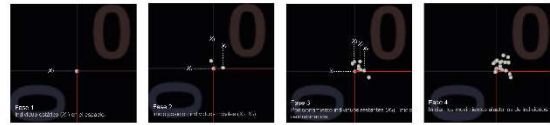
Individuo X_2 (individuo parásito móvil) el individuo nace y se mueve aleatoriamente al encontrar un vecino se duplica y elimina al vecino previamente encontrado. $X_2 = (CB_1, CV_1, CV_2)$

Individuo X_3 (individuo estático) se genera en un lugar aleatorio si al nacer encuentra un vecino se duplica si al nacer no encuentra otro individuo se elimina. $X_3 = (CA, CV_1, CV_4)$

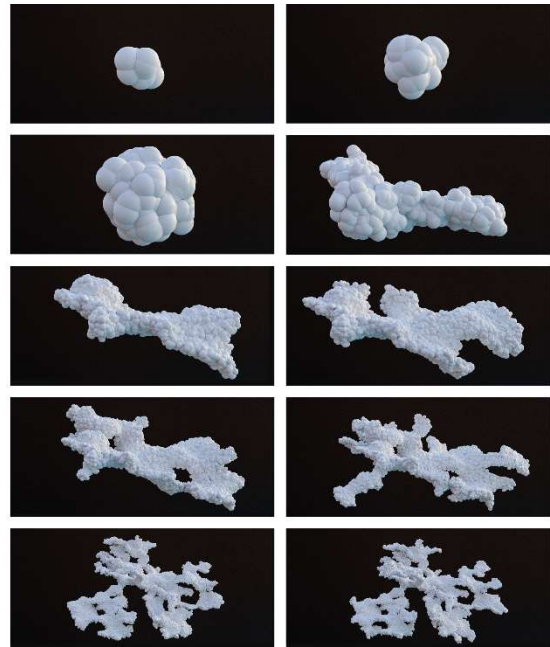


3.1.4 Simulación del sistema morfológico

La generación del elemento arquitectónico es realizada con los datos obtenidos de la definición de principios autómatas tratada a través de la implementación del modelo algorítmico (DLA) dado que permite procesar la información compleja a través una metodología crecimiento del grupo de individuos y sus principios operativos. Primero se sitúan los individuos X_1 (ancestro común) y X_2, X_3 y X_4 (móviles) en el espacio.



Los resultados de la simulación son mostrados en orden cronológico de manera que refleja los comportamientos individuales que desencadenan la operatividad de individual desde una perspectiva de sistema morfológico en el que se considera cada representación de los estados como un potencial elementos arquitectónico.



Los resultados de la simulación son mostrados en orden cronológico de manera que refleja los comportamientos individuales que desencadenan la operatividad de individual desde una perspectiva de sistema morfológico en el que se considera cada representación de los estados como un potencial elementos arquitectónico.

3.1.6 Estructura del sistema morfológico

67

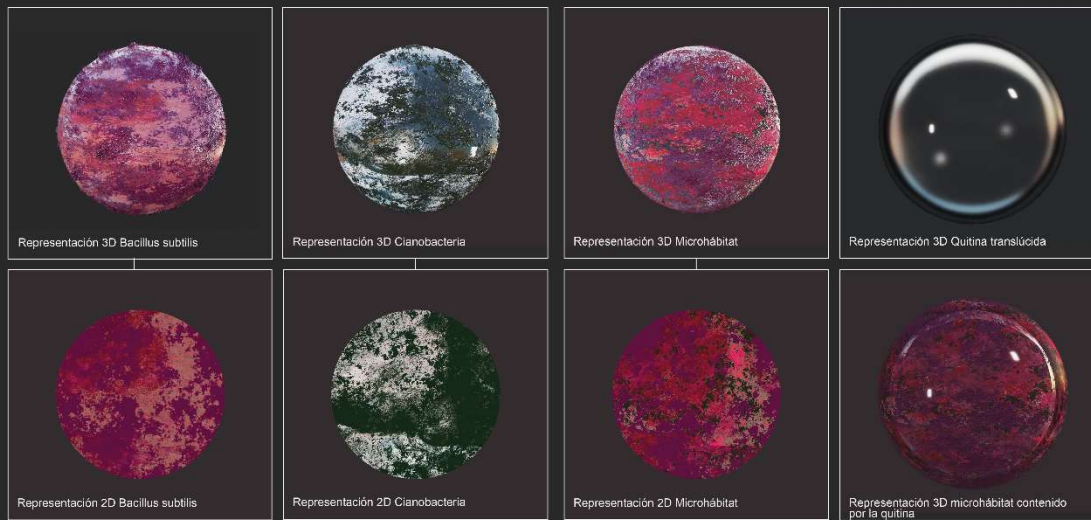
sistema morfológico se completa con la materialidad del elemento arquitectónico ya que debe cumplir la función de transferencia biogeoquímica y energética. Para ello se recurre a la fabricación digital de un material heterogéneo adoptando la metodología biológica-sintética implementada por la arquitecta Neri Oxman (2016).

a través de la impresión tridimensional aplicada a la fabricación de un multilateral para construir las piezas utilizando como sub-material sintético un fopolímero translúcido (Quitina) que tendrán la función de permitir la penetración de la luz solar, la adherencia y contener los materiales vivos.

Las demás capas las integran la materia viva que tendrá como función la generación de un microsistema simbiótico integrado por cianobacterias y *Bacillus subtilis*.

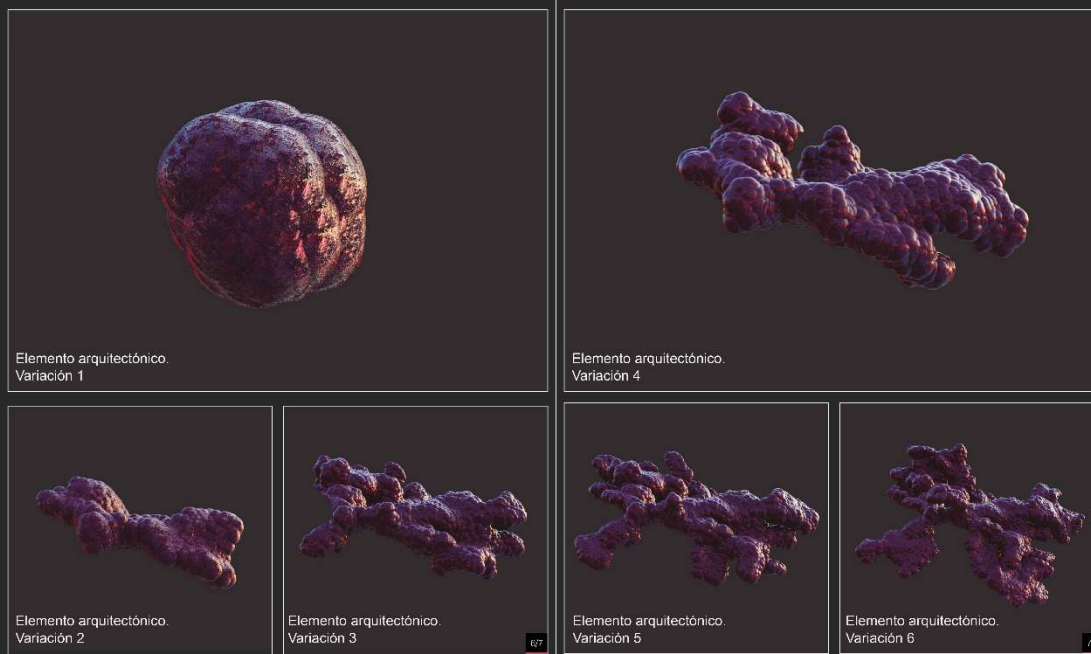
La cianobacteria son consideradas una forma de vida primitiva que cuentan con las características de carecer membrana nuclear y poseer sustancias fotosintéticas lo que las hace productoras de lo que las hace productoras de oxígeno, con bacterias uní o pluricelulares lo que les permite autorreproducirse. El hábitat de estos organismos puede ser el agua, las rocas o los árboles y soportan temperaturas hasta de 90°.

La bacteria *Bacillus subtilis*, encargada de producir endosporas resistentes a factores físicos como la desecación, la radiación y los ácidos, tiene como características principales la producción de enzimas hidrofílicas que descomponen polisacáridos que posteriormente pueden ser empleados como fuente de carbono al fermentar la caseína y el almidón, además promueven el desarrollo de las plantas.



Como resultado de la gestión algorítmica de los datos biológicos se culmina el modelo proyectual con el entrelazamiento en el sistema morfológico, los elementos arquitectónicos y el material biosintético heterogéneo que da como resultado un elemento que se acopla a los principios de un sistema natural y refleja una estética, operatividad, composición y desarrollo alternativo que revela rasgos estético impredecibles que se confunden con los rasgos de un individuo biológico.

Finalmente, se completa la definición morfológica a través de la simulación algorítmica de los datos correspondientes a la caracterización individual, la síntesis de las características, la aplicación del algoritmo genético, la definición automática de los individuos óptimos y la aplicación de la simulación a través del modelo algoritmo de agregación limitada que permitió el surgimiento del elemento arquitectónico.



Bibliografía

- AUDESIRK, T., & AUDESIRK, G. B. (2013). *Biología. La vida en la Tierra Con fisiología* (Novena edición ed.). Mexico: Pearson Educación de México, S.A.
- BADII, M. H., RODRIGUEZ, H., CERNA, E. V., LANDEROS, J., & OCHOA, Y. (2013). Coevolución y Mutualismo: Nociones Conceptuales. *Daena: International Journal of Good Conscience.*, 23-31.
- BAZZARA, L. E. (22 de Junio de 2015). *Universidad de Buenos Aires*. Obtenido de Question:
<https://www.perio.unlp.edu.ar/ojs/index.php/question/article/view/2490/2189>
- BEDAU, M. A. (2010). *Philosophical Aspects of Artificial Life*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BEESELEY, P., CHAN, M., GORBET, R., & KUL, D. (18 de 08 de 2015). "Evolving Systems within Immersive Architectural Environments: New Research by the Living Architecture Systems Group.". *Next Generation Building* , 2, 31 - 56. Obtenido de <http://livingarchitecturesystems.com/publication/evolving-systems-within-immersive-architectural-environments/>
- BONO CREMADES, J. (08 de Septiembre de 2016). *Universitat Politècnica de Valencia*. Obtenido de RiuNet repositorio UPV : <https://riunet.upv.es/handle/10251/81034>
- BOURKE, P. (20 de Septiembre de 2004). *paulbourke*. Obtenido de DLA - Diffusion Limited Aggregation: <http://paulbourke.net/fractals/dla/>
- BUIL, M. (19 de 02 de 2018). *IES BINÉFAR*. Recuperado el 01 de 07 de 2019, de <http://iesbinef.educa.aragon.es/departam/webinsti/bach/biogeo1/tse.pdf>
- CALDUCH , J. (2001). *Temas de composición arquitectónica. 7.Espacio y lugar* (Vol. VII). Alicante: Club Universitario. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=FKk4DwAAQBAJ&pg=PA1&lpg=PA1&dq=Temas+de+composici%C3%B3n+arquitect%C3%B3nica.+7.Espacio+y+lugar+Juan+Calduch+Cervera&source=bl&ots=w2ApEqA8An&sig=ACfU3U0OP6sU2BUDeM7eEixhoHNoFfqKRw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjDpuPW-drlA>
- CHING , F. (2002). *Arquitectura forma espacio y orden* (Treceava ed.). Barcelona: Gustavo Gili.
- CURTIS, H., BARNES, S., SCHNEK, A., & MASSARINI, A. (2008). *Curtis Biología* (Quinta ed.). Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana.

- CUTIS, E., BOLAÑOS, P., ARAOZ, J., & BEHRENS, V. (2008). *Biología I* (Séptima edición ed.). Buenos Aires: Medica Panamericana.
- DARWIN, C., & WALLACE, A. R. (2006). *La teoría de la evolución de las especies*. Barcelona: Crítica, S. L.
- DOBERTI, R. (13 de Diciembre de 2012). *Universidad Nacional de San Juan*. Obtenido de Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño:
<http://www.faud.unsj.edu.ar/descargas/LECTURAS/Arquitectura/EXTRA/3.pdf>
- DOVAL, D. (11 de 11 de 2013). *Universidad Autónoma de Madrid*. Recuperado el 09 de 07 de 2019, de <http://www.uam.es/>:
https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/14059/66009_Heredia%20Dovail%20Daniel.pdf?sequence=1
- EGE - IEGEBA. (26 de 05 de 2019). *Universidad de Buenos Aires*. Obtenido de Departamento de Ecología, Genética y Evolución. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales: http://www.ege.fcen.uba.ar/wp-content/uploads/2014/05/Eco_II.pdf
- ESTRADA GALEANO, A. (2018). Entrelazamientos de los cuerpos y las formas. *ESTOA*, Vol. 7(Número 14), 31 - 43. Obtenido de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/estoa/article/view/2165/1463>
- GÓMEZ, A. D. (25 de 08 de 2011). *Departamento de Computación - CINVESTAV*. Recuperado el 08 de 07 de 2019, de <https://www.cs.cinvestav.mx/>:
http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_DARG.pdf
- GÓMEZ, C. N. (2013). *Vida artificial: Ciencia e ingeniería de sistemas complejos*. Bogotá, Colombia : Universidad del Rosario. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/260158518_Vida_Artificial_Ciencia_e_Ingenieria_de_Sistemas_Complejos
- HILJE, L. (05 de 03 de 2008). *Dialnet*. Obtenido de dialnet.unirioja.es:
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5669895.pdf>
- KLAUS, M. (2007). *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of* (5 ed.). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- LÓPEZ, S. A. (26 de 08 de 2011). *Departamento de Computación - CINVESTAV*. Recuperado el 06 de 08 de 2019, de <https://www.cs.cinvestav.mx/>:
http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_AMLS.pdf

- LOZADA , J. P. (23 de Agosto de 2010). *Pontificia Universidad Javeriana*. Obtenido de Repositorio Institucional:
<https://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis404.pdf>
- MARCHISIO, O. D., & ROSSO, C. S. (12 de 03 de 2012). *UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. Recuperado el 02 de 07 de 2019, de [en.unesco.org](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-DAR6-evolucion.pdf):
<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-DAR6-evolucion.pdf>
- MIRET, S. (17 de Febrero de 2014). *Universidad de Palermo*. Obtenido de Publicaciones DC Facultad de Diseño y Comunicación :
https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/encuentro2010/administracion-concursos/archivos_conf_2013/1733_54060_2168pres_e.pdf
- ODUM, E. (14 de Enero de 2003). *Slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/Agenteeee/ecologia-3ra-ed>
- PEDROCHE, F. F. (30 de 06 de 2009). *Universidad Autónoma Metropolitana*. Recuperado el 22 de 09 de 2019, de <http://www.uam.mx/>:
http://www.uam.mx/difusion/casadeltiempo/21_iv_jul_2009/casa_del_tiempo_eIV_num21_32_38.pdf
- PILEASANTS ODUM, E. (1972). *Ecología*. Ciudad de México: Nueva editorial interamericana S.A.
- RAISMAN, J. S., & GONZALES, M. A. (26 de 05 de 2019). *Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Agroindustrias*. Obtenido de Hipertextos del Área de la Biología: <http://www.biologia.edu.ar/ecologia/CICLOS%20BIOGEOQUIM.htm>
- REYNOSO, C. (31 de Septiembre de 2010). *Carlos Reynoso*. Obtenido de <http://carlosreynoso.com.ar/archivos/libros/Reynoso-Complejidad-y-Caos.pdf>
- REYNOSO, C. (21 de 09 de 2010). *Carlos Reynoso*. Recuperado el 09 de 07 de 2019, de <http://carlosreynoso.com.ar/>: <http://carlosreynoso.com.ar/archivos/libros/Reynoso-Complejidad-y-Caos.pdf>
- REYNOSO, C. (21 de 09 de 2010). *Carlos Reynoso*. Obtenido de carlosreynoso.com.ar:
<http://carlosreynoso.com.ar/archivos/libros/Reynoso-Complejidad-y-Caos.pdf>
- SOLER, J. J. (30 de 10 de 2002). *Sociedad Española de Biología Evolutiva*. Recuperado el 02 de 07 de 2019, de http://sesbe.org/sites/sesbe.org/files/recursos-sesbe/SN_adaptacion.pdf
- SOLER, Y. (11 de Diciembre de 2017). *Dialnet*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/6403420.pdf>

-
- SOSA, L. B. (06 de Junio de 2012). *Repositorio académico Universidad Autónoma de Nuevo León*. Obtenido de eprints.uanl.mx: <http://eprints.uanl.mx/3310/>
- SULLIVAN, L. (18 de Agosto de 2007). *MIT OpenCourseWare*. Recuperado el 09 de Diciembre de 2019, de https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-205-analysis-of-contemporary-architecture-fall-2009/readings/MIT4_205F09_Sullivan.pdf
- TERRIDE, M. (01 de Junio de 1995). *Researchgate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/250028660_Complejidad_y_sistemas_c_omplejos
- UNP. (23 de Marzo de 2009). *Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco*. Obtenido de Facultad de Ciencias Naturales: <http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/botanicageneral/wp-content/uploads/2016/03/Cianobacterias.pdf>
- VIZOSO, O. (26 de Enero de 2017). *issuu*. Recuperado el 2019 de 11 de 10, de https://issuu.com/ovizoso/docs/morfoge__nesis-_la_composicio__n_ar
- WEST, E. M. (1992). *Keywords in Evolutionary Biology*. Cambridge: Harvard University Press. Recuperado el 02 de 07 de 2019
- WONG, W. (1992). *Fundamentos del diseño bi y tri dimensional*. Barcelona: Gustavo Gili.