

INTRODUCCIÓN A LA VIDA ARTIFICIAL Y AUTÓMATAS CELULARES

Departamento de Aplicación de Microcomputadoras
Instituto de Ciencias,
Universidad Autónoma de Puebla

López Salinas Ana Miriam
Matemáticas Aplicadas y Computación
Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM

25 de agosto de 2011

Resumen

En objetivo de éste reporte es dar una breve explicación del concepto de Vida Artificial y la importancia que tienen los Autómatas Celulares(AC) en el desarrollo y las investigaciones realizadas en ésta disciplina. Principalmente describe y cita algunos algoritmos que estudian e intentan describir y ejemplificar el comportamiento de seres vivos a través de programas de cómputo.

Índice

1. Introducción	3
2. Vida Artificial	3
2.1. Antecedentes	5
3. Autómatas Celulares	7
3.1. Juego de la vida (Conway's Life)	9
3.2. Hormiga de Langton	12
4. Sistemas de Lindenmayer	14
5. Boids de Craig Reynolds	16
6. Conclusiones	18

1. Introducción

*La Vida Artificial es la ciencia
que trata de situar la vida "tal como es"
dentro del contexto de la vida "tal como podría ser"
Christopher Langton*

El término Vida Artificial (Artificial Life) describe el intento del hombre al tratar de conseguir modelar y explicar la vida mediante la creación de sistemas artificiales que exhiben la conducta de los seres vivos naturales, definiendo su comportamiento en función de un grupo de reglas obtenidas mediante modelos de simulación y uso de herramientas de Ingeniería Computacional.

Éste artículo pretende dar una introducción general hacia el estudio de Vida Artificial, citando algunos principios históricos que dieron lugar a ésta disciplina, así como, su enfoque hacia los Autómatas Celulares (AC), principalmente al algoritmo del Juego de la Vida de Conway (Conway's Life)

Investigadores de Vida Artificial consideran a los Autómatas Celulares como un ejemplo de búsqueda de inteligencia y desarrollo de Vida Artificial, éste hecho no quiere decir que los AC sean inteligentes, ya que no parecen serlo, más en cambio poseen aspectos principales de la vida, y tienden a imitar procesos y comportamientos de los seres vivos. Los procesos celulares también tienen un gran vínculo con la VA, teniendo como objetivo el fenómeno de auto-reproducción, donde los trabajos con Autómatas Celulares son un ejemplo del intento de alcanzar la simulación de éste fenómeno.

2. Vida Artificial

La biología es el estudio científico de la vida en la Tierra, basado en la química del carbono y ésta es la única clase de vida que ha estado disponible para el estudio. Pero el hombre decidió aplicar sus conocimientos de la biología al mundo de la tecnología y la computación, para dar lugar a lo que ahora se le conoce como Vida Artificial (Artificial Life).

[Christopher Langton] *la Vida Artificial es la disciplina que tiene por finalidad el estudio de los sistemas contruidos por el hom-*

bre, ya sea en el interior de un ordenador u otro medio artificial y que exhiben comportamientos característicos de los seres vivos.

[Christopher Langton] *La vida artificial es simplemente el acercamiento a la biología sintética: en lugar de tomar los seres vivos además, la Vida Artificial trata de poner las cosas juntas. . . . Así, por ejemplo, La Vida Artificial consiste en los intentos de (1) sintetizar el proceso de evolución (2) en las computadoras, y (3) estarán interesados en lo que surge del proceso, aunque los resultados no tienen análogos en el mundo natural.*

[Bedau 1996] *Es el intento de comprender lo esencial de la naturaleza y de la vida mediante el uso de modelos computacionales.*

La Vida Artificial intenta desarrollar teorías sobre la vida y los seres vivos teniendo como objetivo emular características de éstos seres vivos mediante sistemas artificiales que estudien problemas de biología teórica, así como usar los resultados de la Vida Artificial para fines tecnológicos mediante la ingeniería. En otras palabras el objetivo de la VA no es sólo generar modelos biológicos, sino también investigar en general los principios de la vida.

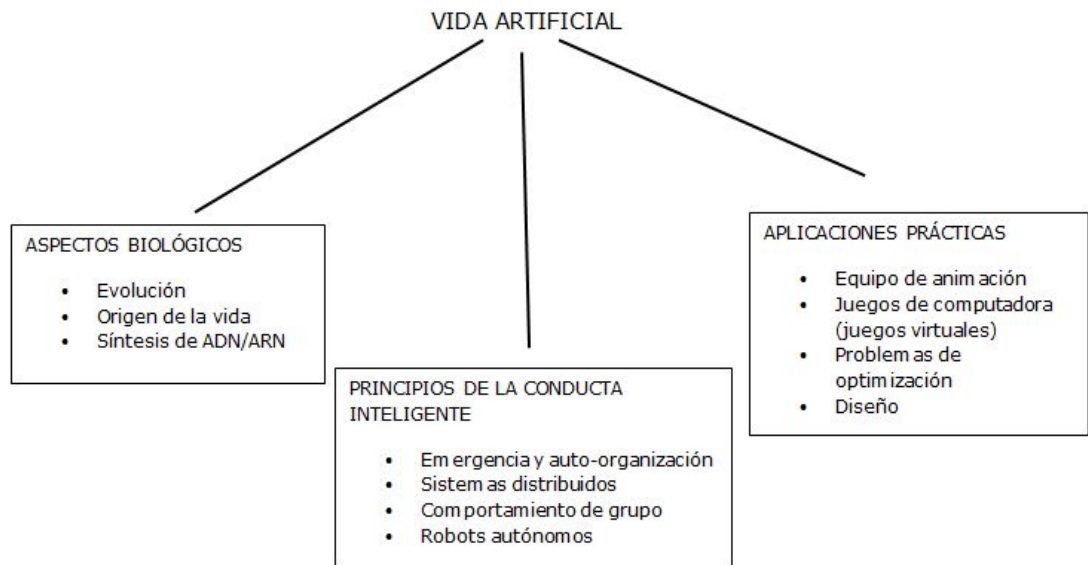


Fig - 1 Objetivos de la Vida Artificial

2.1. Antecedentes

Durante años el hombre ha concebido la vida como obra de los dioses y ha calificado cierto los mitos humanos que relatan la existencia de seres dadores de vida, sin embargo, con el desarrollo de experimentos de laboratorio con el fin de comprender el origen de la vida, así como, el descubrimiento de la evolución desde punto de vista biológico, esos mitos han quedado lejos del concepto de vida. Dentro de la Ingeniería, el uso de células embrionarias, evolución, genética y la aplicación de principios biológicos a sistemas computacionales se genera una nueva disciplina: **Vida Artificial**.

Desde siempre el hombre ha soñado con crear seres artificiales que presenten características esenciales de los seres vivos. A mediados de los 80's un grupo de investigadores especializados en distintas disciplinas, encabezado por Christopher Langton proponen por primera vez el término *Vida Artificial (Artificial Life)*, durante el primer congreso sobre VA, International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems ("Primera Conferencia Internacional de la Síntesis y Simulación de Sistemas Vivientes") organizado en el Laboratorio Nacional Los Álamos, Nuevo México, 1987 taller dedicado a la investigación científica multidisciplinaria en el medio natural, social y computacional. El propósito de éste taller fue reunir científicos de la computación, biólogos, físicos, antropólogos, etc., que se encontraban en la necesidad de comprender los sistemas complejos que la vida humana y gran parte del mundo presentan, desarrollando modelos matemáticos que trataban de explicar el origen de la vida, autómatas que se auto-reproducen, programas de ordenador mediante los mecanismos de la evolución darwiniana, simulaciones de comportamientos de aves y grupo de peces, modelos de crecimiento y desarrollo de plantas artificiales y mucho más. Durante ése tiempo de investigación, los participantes llegaron a la conclusión que los *modelos lineales* simplemente no podían describir muchos de los fenómenos naturales, y pequeños cambios en los parámetros del modelo afectaba en gran medida su comportamiento. También encontraron fenómenos como el clima, el crecimiento de plantas, el desarrollo de organismos multicelulares, la inteligencia, la evolución, etc., que no tenían forma de modelado, es decir, no existe algún modelo lineal que los satisfaga, por lo consiguiente decidieron hacer uso de *modelos no lineales*. Los sistemas lineales son aquellos para los

que el comportamiento del conjunto es la suma del comportamiento de sus partes, es decir, cumplen con el principio de superposición, mientras que en los sistemas no lineales el comportamiento de la totalidad es más que la suma de sus partes.

Los orígenes de ésta ciencia tienen bases en las ideas de Alan Turing durante los años 40 con la creación de una máquina ideal que consiste de una cinta infinita dividida en cuadros sobre la que se realizan las operaciones de manipulación de símbolos, la máquina dispone de una cabeza lectora posicionada en cualquier celda de la cinta, donde lee el contenido de dicha celda e interpreta ciertas instrucciones que definen el siguiente comportamiento de la cabeza; y es considerada como un autómata capaz de leer lenguajes formales. Pero el estudio de la ALife aumentó a principios de los 50's cuando el matemático e informático John Von Neumann publicó su libro "*Theory of Self-reproducing Automata*". como marco para el estudio del proceso de reproducción, donde implementó la Teoría de Autómatas Celulares y su principal intención era desarrollar una máquina capaz de construir otras máquinas a partir de sí misma y soportar un comportamiento complejo definido bajo ciertas reglas. Inició sus estudios desarrollando autómatas auto-reproductivos basándose en ecuaciones diferenciales parciales (EDP), pero rechazó la idea de usar las EDP, ya que no encontraba reglas básicas para poder desarrollar éstos autómatas, así que socorrió al uso de componentes celulares para poder darle solución al problema.

En los años 70 el matemático John Horton Conway inventó el juego más famoso de autómatas celulares, *El Juego de la Vida* (*The Game of Life*), que se definió como una equivalencia a una máquina de Turing. Los estudios continuaron en 1984 cuando Stephen Wolfram, un científico en computación mostró interés en los autómatas celulares y se dedicó a estudiar, observar y clasificar en cuatro clases los tipos de complejidad de comportamiento que presentaban los autómatas celulares unidimensionales, a través del tiempo. Entre los años 1992 y 2002, Wolfram hace un intenso estudio de AC's y su aplicación a la vida real, donde menciona como idea principal la posibilidad de modelar y comprender cualquier fenómeno natural.

3. Autómatas Celulares

A partir de casi medio siglo atrás, mucho antes de que existiera la Vida Artificial, el pionero de la informática John Von Neumann investigó la cuestión del origen de la vida y trató de diseñar una máquina capaz de reproducirse. La idea en el diseño de auto-reproducción llevó a Von Neumann a inventar un sistema denominado: Autómatas Celulares, capaces de contruir cualquier autómatas a partir de un conjunto apropiado de instrucciones codificadas.

Los Autómatas Celulares se consideran sistemas dinámicos extendidos, que consisten de un número considerable de componentes simples idénticos con conectividad local, y son definidos como un sistema que evoluciona en tiempo y espacio discretos, compuesto de una colección de celdas discretas y deterministas, ordenadas en fila, en forma de matriz o en tres dimensiones, que actualizan sus estados a lo largo del tiempo en base a los estados que tenían las celdas vecinas en el momento inmediato anterior, en otras palabras, el estado siguiente de una celda es determinado por el estado actual de ella y de sus celdas vecinas, donde cada celda se comporta como un autómatas de estado finito. Un autómatas finito es un modelo de sistema con entradas y salidas discretas, consiste en un conjunto finito de estados y un conjunto de transiciones entre esos estados. La entrada y el estado actuales del autómatas determinan su conducta en el instante siguiente.

Un Autómatas celular consiste de dos componentes: el primero es un espacio celular, una red de n celdas de estado finito, cada una con un patrón idéntico de conexiones locales con otras celdas, junto con condiciones de límite, si se trata de una red finita. El segundo componente consiste en reglas de transición que actualizan, o bien definen los estados de cada celda, donde éstos estados junto con el de las celdas conectadas a ellas dan lugar a lo que es una vecindad. Existen diversas definiciones de vecindad de una celda, la *Vecindad de Von Neumann* en una matriz unidimensional incluye sólo a las celdas vertical y horizontalmente vecinas y no a las diagonales, es decir, cada celda cuenta con 4 vecinos, mientras que la *Vecindad de Moore* involucra a todas las celdas de alrededor, ya sean las inmediatas conexas o las que ocupan zonas de vecindad de tamaño arbitrario, cuentan con 8 vecinos. Las figuras 2 - a) y b) nos muestran éstos tipos de vecindades

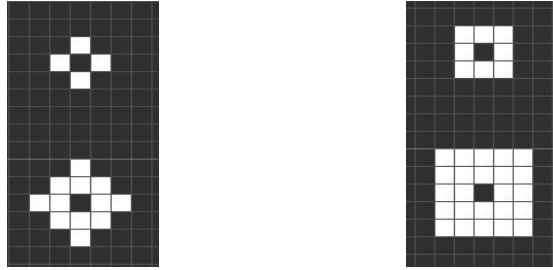


Fig. 2 - a) Vecindades de Von Neumann b) Vecindades de Moore

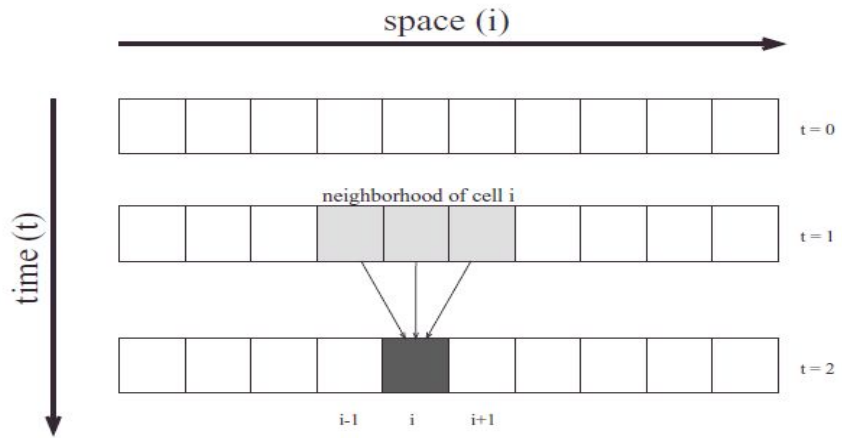


Fig. 3 - Ejemplo de autómeta celular

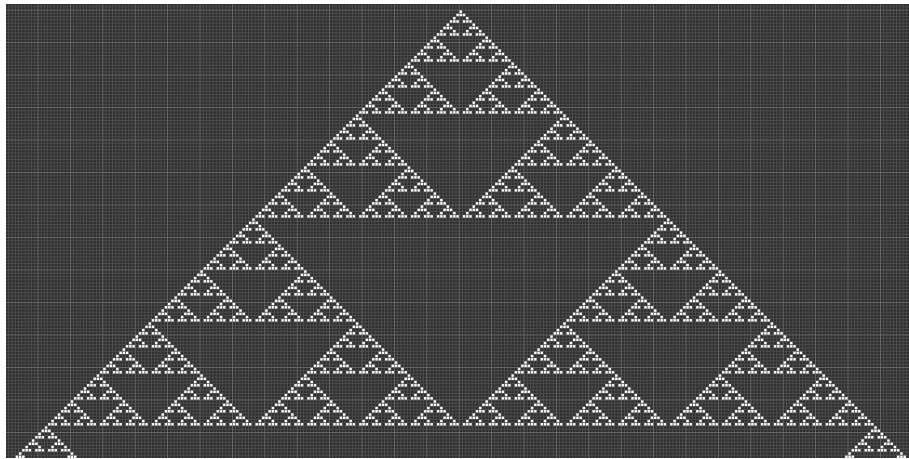


Fig. 4 - Evolución de un autómeta celular (Regla 22 de Wolfram)

En la formación de Vida Artificial los autómatas celulares son un concepto fundamental y son usados como modelos de simulación de sistemas químicos no lineales, físicos, biológicos y la evolución de las galaxias espirales (Gerola y Seiden, 1978; Schewe, 1981).

3.1. Juego de la vida (Conway's Life)

John Horton Conway nació en 1937, comenzó su carrera de Matemáticas en la Universidad de Cambridge. A finales de 1960 Conway, motivado por el trabajo de Von Neumann, siguiendo la idea de construir una máquina capaz de construir copias de sí misma y haciendo uso del concepto de vecindad de un autómata definido por Moore, diseñó y dió a conocer el autómata celular más famoso: *El juego de la Vida (The Game of the Life)*, también llamado *El Juego de Conway (Conway's Life)*, un juego de sentido solitario, es decir, para un solo jugador. Éste juego es un autómata bidimensional donde cada célula puede estar en uno de los dos estados 0 o 1, (muerto o vivo). A partir de un estado inicial el autómata va a evolucionar en base a unas funciones de transición, además una célula estará en un estado concreto determinado unicamente por el estado anterior de las células vecinas, así como el de la propia célula.

Conway definió el siguiente conjunto de reglas:

- *SOLEDAZ*, si una célula viva esta sola o tiene un solo vecino muere.
- *SOBREPOBLACIÓN*, si una célula viva tiene más de tres vecinos muere
- *ESTABILIDAD*, de lo contrario la célula se queda igual.

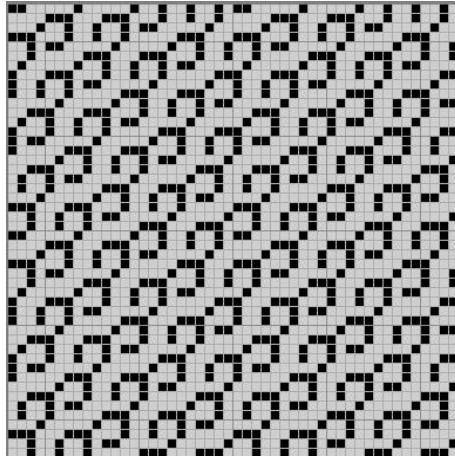


Fig. 5 - Ejemplos del juego de la vida

En 1970 el Martin Gardner describió y publicó el trabajo de Conway en la revista Scientific American, artículo que inspiró a mucha gente en todas partes del mundo a experimentar con el Juego de la Vida. El uso consecutivo de éstos autómatas encontró muchas configuraciones interesantes en ellos y se definieron patrones como consecuencia de la complejidad de su comportamiento.

Los patrones básicos segun nivel de complejidad son:

- *Patrones estáticos (Still-lifes)*, corresponde a las células que son estáticas, es decir, no producen nacimientos o muerte. Ejemplos:

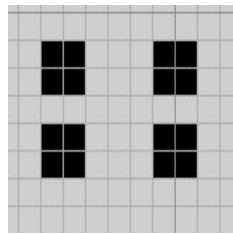
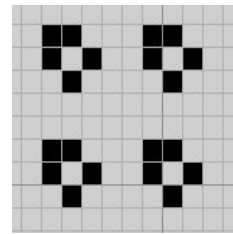
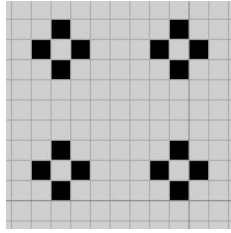


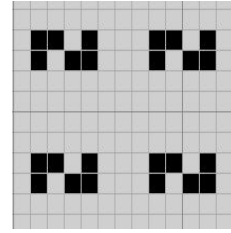
Fig. 6 - a) Patrón bloque (Block)



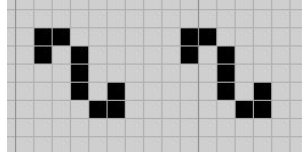
b) Patrón barco (Boat)



c) Patrón tina (Tub)

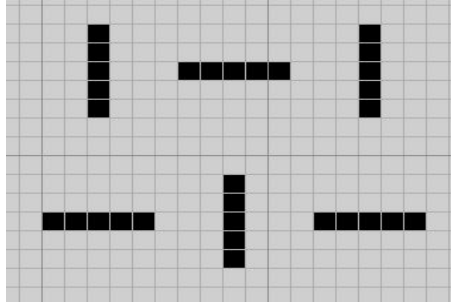


d) Patrón serpiente (Snake)



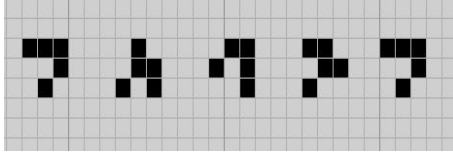
e) Patrón Integral(Integral)

- *Patrones repetitivos (Oscillators)*, son los patrones que se repiten después de una secuencia fija de estados y vuelven a su estado original, es decir, tienen un comportamiento periódico. Ejemplo:



f) Patrón parpadeador (Blinker)

- *Patrones que se ladean(Spaceships)*, se dice a los patrones que se repiten después de una secuencia fija de estados, retornando a su estado original y desplazándose por toda la rejilla a una velocidad constante. Ejemplo:



g) Patrón Glier, comportamiento de un glider en el los tiempos, $t=0$, $t=1$, $t=2$, $t=3$ y $t=4$

- *Patrones reproductores*. Patrones que aumentan constantemente su tamaño de población (células vivas).
- *Patrones inestables*, Patrones que evolucionan a través de una secuencia de estados y nunca vuelven a su estado original. Existen también patrones que tardan mucho tiempo en estabilizarse y son llamados "Methuselahs".

3.2. Hormiga de Langton

Las ideas de imitar características de seres vivos con ayuda de informática e ingeniería haciendo uso de sistemas dinámicos, y la búsqueda de modelos simples con comportamientos complejos, llevaron a varios investigadores a diseñar algoritmos que simulen éstas actitudes. En 1986 Christopher Langton creó un algoritmo sencillo, un tipo especial de autómatas celulares llamado *Hormiga de Langton* (*Langton's Ant*). Funciona en una maya cuadrículada bidimensional con celdas generalmente blancas o negras, donde la hormiga es la cabeza lectora e interpretadora que se desplaza de acuerdo a los estado que va encontrando hacia cualquiera de los puntos cardinales sobre ésta red, siguiendo un conjunto de reglas diseñadas especialmente para guiar su comportamiento.

REGLAS:

- La hormiga da un paso adelante.
- Si la hormiga encuentra un cuadro blanco, lo pinta de negro, da un giro de 90° hacia la derecha y avanza una unidad.
- Si la hormiga encuentra un cuadro negro, lo pinta de blanco, girá 90° hacia la izquierda y avanza una unidad.

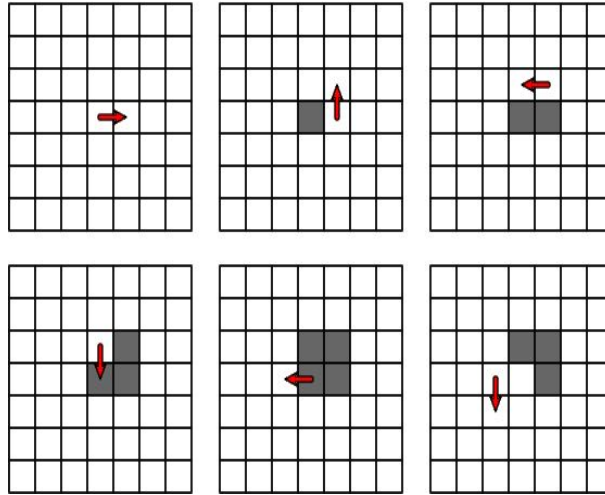


Fig. 7 - Comportamiento de la hormiga

A pesar de que la Hormiga de Langton se mueve siguiendo reglas relativamente simples, se obtiene un número infinito de posibles resultados, la mayoría de éstos caóticos. No existe algún método general de análisis que defina o infiera la posición de la hormiga después de un determinado número de movimientos, ya que ésta presenta un grado considerable de autonomía.

Es importante mencionar que La Hormiga de Langton representa una etapa esencial en la evolución de los sistemas complejos tales como la vida: una etapa en la que el comportamiento caótico es el estudio principal.

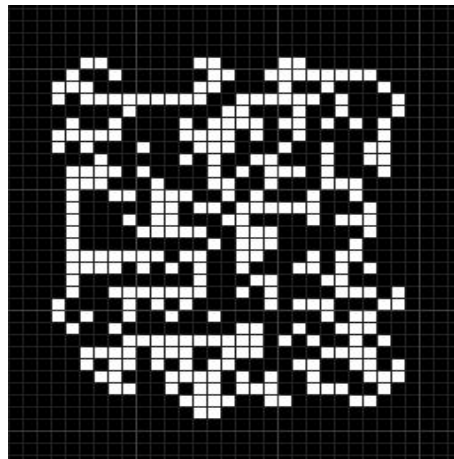


Fig. 8 - Ejemplo de evolución del algoritmo hormiga

4. Sistemas de Lindenmayer

En 1968 el biólogo Aristid Lindenmayer inventó un formalismo matemático para proporcionar una descripción formal del desarrollo de organismos multicelulares simples como algas, en términos generales creó sistemas para modelar y simular el crecimiento de plantas. Para hacer ésto en manera sistemática propone un tipo de sistema conocidos como *Sistemas de Lindenmayer (L-Systems)*, donde el desarrollo del organismo sigue un cierto patrón y es considerado como una serie de pasos, donde cada uno tarda cierta cantidad de tiempo para completarse dependiendo de la aplicación. Un sistema de éste tipo consiste de una célula originaria (semilla), y una descripción para generar nuevas a partir de las anteriores, actuando como mecanismo generativo y la semilla se redefine como un axioma.

Los Sistemas de Lindenmayer (L-Systems) son un tipo de gramática versátil y consisten en un conjunto de reglas de reescritura de cadenas de símbolos o células con un gran vínculo hacia las gramáticas formales tratadas por Chomsky.

Ejemplo:

$$\begin{array}{l|l} \text{Axioma:} & B \\ \text{Reglas:} & B \rightarrow F[-B] + B \\ & F \rightarrow FF \end{array}$$

A partir de éstas reglas se genera la cadena:

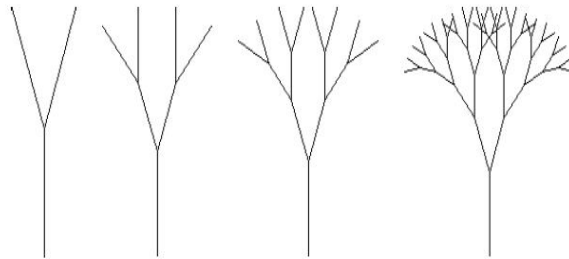
Pasos	Cadena obtenida
0	B
1	F[-B] + B
2	FF[-F[-B] + B] + F[-B] + B
3	FFFF[-FF[-F[-B] + B] + F[-B] + B] + FF[-F[-B] + B] + F[-B] + B

El ejemplo nos muestra como, con solamente tres iteraciones de la regla de sustitución se produce un resultado complejo, lo que nos hace pensar en la magnitud de complejidad que se puede esperar de un simple principio de recursividad.

Los L-System no generan ninguna especie de gráficas por sí mismos, sino sólo las cadenas de símbolos. Años más tarde, Alvin Smith (1984) le dió a los sistemas una interpretación computacional basada

en comandos de gráficos de tortuga, un lenguaje muy simple que había sido implementado por Seymour Papert, diseñado originalmente para que los niños aprendieran a pensar en las categorías geométricas, un módulo de dibujo del lenguaje LOGO. Existen varias formas elaboradas de L-System, la más simple es la llamada DOL, donde D da a entender que se trata de un sistema determinista, y el 0 expresa que la gramática es independiente del contexto. Los comandos básicos más comunes de graficación de un sistema DOL son:

Comando	Acción
F	Dibuja hacia adelante un número determinado de posiciones
G	Sin dibujar, mueve la tortuga hacia atrás un número de posiciones
+	Girar la tortuga hacia la derecha un ángulo determinado. Si se especifica un número entero antes del signo, la tortuga realiza el giro esa cantidad de veces.
-	Gira hacia la izquierda
[Guarda la posición y ángulo actual en un pila de estados.
]	Eliminar el último estado guardado en la pila y restaurar la última posición y ángulo guardado.
	Mover la tortuga hacia adelante cierta longitud, dibujando una línea desde la posición anterior hacia la nueva. En algunas aplicaciones, girar 90° o 180°.



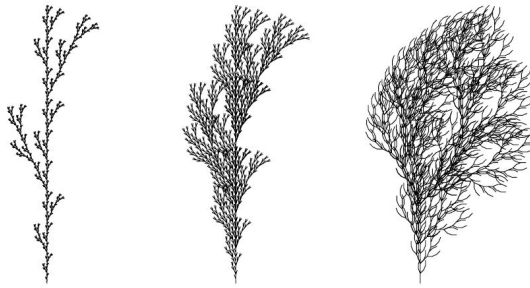


Fig. 9 - Ejemplos de L-System

El axioma (o semilla) junto con las reglas generan un árbol, tan grande como el número de recursiones que se generen. Con un dispositivo que pueda interpretar cada símbolo como una instrucción, las series que se van generando representarían el plan de construcción de una estructura fractal.



Fig. 10 - Ejemplo de L-System fractal

Los matemáticos y naturistas han utilizado los L-System para modelar plantas, arboles, arbustos, etc.

5. Boids de Craig Reynolds

Uno de los algoritmos más famosos en el campo de la Vida Artificial, es el ***Flocking Boids*** inventado a mediados de los años 80's

por Craig Reynolds. Es un modelo que simula el comportamiento de un conjunto de animales como aves y peces. El algoritmo está compuesto de reglas muy simples y en cada paso de evolución toma un comportamiento muy complejo y realista. Cada conjunto de organismos pertenecen a un barrio, que se caracteriza por estar limitado a cierta distancia. Las células fuera del barrio son ignoradas.

Las tres reglas definidas por Reynolds para explicar el comportamiento de un conjunto de animales son:

- *Separación*: Se utiliza para evitar que los miembros del conjunto de partículas choquen, conociendo y manteniendo una distancia existente entre ellos.

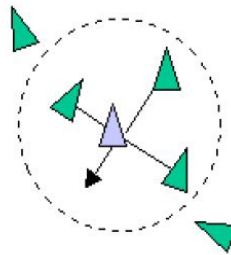
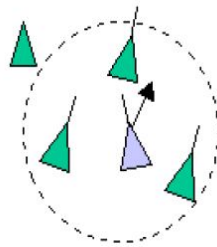


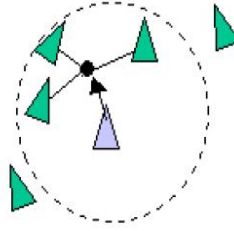
Fig. 11 - a) Separación

- *Alineación*: Es la regla que conserva la dirección de las partículas, es decir, se encarga de que todas las células se muevan en la misma dirección.



b) Alineación

- *Cohesión*: Regla que intenta conservar a los miembros del grupo lo más cerca posible. Cada célula se acerca a sus vecinos más próximos.



c) *Cohesión*

El algoritmo permite a los Boids evitar obstáculos, es decir, cuando el grupo de organismos esté en movimiento debe ser capaz de evitar chocar con objeto que se presente en su camino. Reynolds califica su algoritmo como una especie de sistemas de partículas. Se dice sistema de partículas, a un conjunto de células donde cada una de ellas se comporta de manera distinta y además tienen un ciclo de vida, nacen, crecen y mueren. Se clasifican según su comportamiento en: partículas que no interactúan entre sí y partículas que sí interactúan entre sí.

Actualmente los modelos Boids de Reynolds son utilizados en la biología, ecología, economía y otros campos de estudio donde son considerados como ejemplo de un modelo de base individual, una clase de simulación utilizado para capturar el comportamiento global de un gran número de agentes autónomos que interactúan entre sí.

6. Conclusiones

A lo largo de éste reporte se presentaron ejemplos de Vida Artificial; algunos algoritmos que hacen uso del concepto de Autómatas Celulares, basados en la formación de patrones en sistemas naturales y artificiales mediante reglas muy simples.

Los sistemas de Lindermeyer son utilizados para explicar el crecimiento de plantas, donde se presentan patrones muy complejos de conducta. La simulación que exhibe el fenómeno de auto-organización en un conjunto de animales, se encuentra en los Boids de Reynolds. El comportamiento de organismos (células) que interactúan entre sí, definiendo su comportamiento en función del comportamiento de

sus vecinos, formando patrones lo demuestra el Juego de la Vida. La aplicación de éstos algoritmos trata de conseguir un gran numero de soluciones a problemas de evolución y optimización.

La Vida Artificial es una nuevo campo de investigación, actualmente estudiado por diversas disciplinas, donde los principales objetivos son: estudiar cuestiones biológicas para tratar de explicar fenómenos complejos de la naturaleza, desarrollando aplicaciones prácticas que simulen éstos comportamientos, y abstraer los principios de conducta inteligente. El uso de técnicas de computación, máquinas de auto-reproducción, principios de biología, entre otras herramientas han logrado inquietar al hombre a desarrollar algoritmos que hacen posible alcanzar las metas de ésta nuevo concepto. Actualmente la Vida Artificial le ha dado un crecimiento muy notable al campo de la ciencia con la introducción de nuevas definiciones y métodos que pretenden dar solución a diversos problemas existentes. En consecuencia ayuda a comprender mejor los principios de la biología y su aplicación en la formulación de ideas que permitan dar solución a problemas del mundo actual, tales como la distribución de recursos, predicciones del mercado, minería de datos, entre otros.

Referencias

- [1] [Rafael Lahoz-Beltrá, 2004] *Bioinformática: simulación, vida artificial e inteligencia artificial*
- [2] [Christopher G. Langton, 2000] *Artificial Life*
- [3] [Sarah Kember, 2003] *Cyberfeminism and artificial life*
- [4] [Java Prog. Techniques for Games. Chapter 13. Flocking Boids]
<http://fivedots.coe.psu.ac.th/~ad/jg/ch13/chap13.pdf>
- [5] [Artificial Life] http://www.ais.uni-bonn.de/SS09/skript_artif_life_pfeifer_unizh.pdf
- [6] [Artificial Life] <http://alife.org/membership.html>
- [7] [Complejidad y el Caos: Una exploración antropológica]
<http://d.yimg.com/kq/groups/13334744/747498768/name/Complejidad+y+Caos+-+Una+Exploracion+Antropologica.pdf>

- [8] [Martin, Gardner, 1970] *Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'Life'*. *Scientific American*
- [9] [M. Jesus y C. Ro.] *Máquinas y Matemáticas-Los autómatas finitos y sistemas nerviosos*.
- [10] [Ciencias de la Computación] *Autómatas finitos*
- [11] [Robert C. Newman] *Artificial Life and Cellular Automata*
- [12] [Graphical Modeling using L-System] <http://algorithmicbotany.org/papers/abop/abop-ch1.pdf>
- [13] [Craig Reynolds] *Boids* <http://www.red3d.com/cwr/boids/>
- [14] *Los robots y el Algoritmo Genético - El robot como una forma de vida artificial* <http://www.blackwellpublishing.com/pdf/bechtel2.pdf>