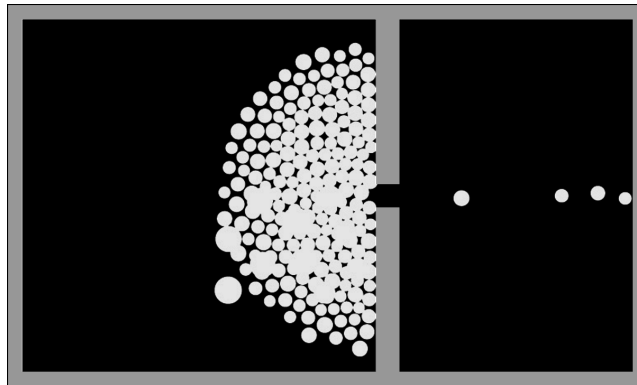


COMPLEJIDAD Y MODELADO BASADO EN AGENTES

UNA APROXIMACIÓN A LOS ECOSISTEMAS
VIRTUALES EN EL A-LIFE ART



Proyecto Final de Máster Artes Visuales y Multimedia (UPV)

Presentado por: Miguel Angel García Oliver

Dirigido por: Dtor. Francisco Giner Martínez

Valencia, Septiembre 2012



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

PROYECTO FINAL DE MASTER

COMPLEJIDAD Y MODELADO BASADO EN AGENTES

UNA APROXIMACIÓN A LOS ECOSISTEMAS
VIRTUALES EN EL A-LIFE ART

-
- Línea de investigación: Estética Digital, Interacción y Comportamientos
 - Sublínea: Sistemas dinámicos de interacción.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN

| | |
|---|----|
| 1.1. Objetivos..... | 05 |
| 1.2. Metodología e hipótesis de trabajo..... | 06 |
| 1.3. Estado de la cuestión: Delimitación de los conceptos fundamentales, teorías y referentes destacados..... | 07 |

2. APROXIMACIÓN AL CONCEPTO DE COMPLEJIDAD

| | |
|--|----|
| 2.1. Antecedentes a las teorías de la complejidad.Consideraciones..... | 12 |
| 2.1.1. Teoría General de los Sistemas (TGS)..... | 14 |
| 2.1.2. Cibernética. Concepto de Retroalimentación..... | 15 |
| 2.2. Concepto de Emergencia..... | 19 |
| 2.2.1. Novedad y causalidad..... | 19 |
| 2.2.2. Propiedades Emergentes..... | 22 |

3.MODELOS COMPUTACIONALES DE SISTEMAS COMPLEJOS. CASOS DE ESTUDIO

| | |
|---|----|
| 3.1. Consideraciones generales..... | 25 |
| 3.2. Antecedentes:..... | 28 |
| 3.2.1. Autómatas Celulares. Game of Life..... | 28 |
| 3.2.2. Modelos Basados en Individualidades. <i>Boids</i> | 29 |
| 3.3. Sistemas Multi-Agente (MAS)..... | 32 |
| 3.4. Sistemas Adaptativos Complejos(CAS)..... | 38 |
| 3.4.1. Cómo la Adaptación crea la complejidad. John Holland. | 38 |
| 3.4.2. Algoritmo Genético..... | 41 |
| 3.5. Modelado Basado en Agentes (ABM). Aplicación en ecosistemas y sociedades artificiales..... | 45 |
| 3.5.1. De los Micromotivos a la Macroconducta. (Bottom-up)..... | 45 |
| 3.5.2. Sugarscape. Laboratorio de sistemas sociales..... | 47 |
| 3.5.3. Implementación de ABM..... | 49 |

| | |
|---|-----------|
| 4. ECOSISTEMAS VIRTUALES EN EL A-LIFE ART | |
| 4.1. De los modelos de control a los sistemas autoorganizados..... | 52 |
| 4.2. Emergencia y Vida Artificial..... | 55 |
| 4.3. Emergencia Interactiva..... | 58 |
| 4.4. Ecosistemas virtuales como paradigma en el A-Life Art. Procedimientos de diseño..... | 63 |
| 4.5. Referentes artísticos de ecosistemas virtuales..... | 66 |
| 5. CONCLUSIÓN Y FUTURAS INVESTIGACIONES | |
| 5.1. Prototipo para un ecosistema basado en comportamiento social..... | 80 |
| 5.2. Crítica a los modelos computacionales..... | 86 |
| 5.2. Conclusión | 89 |
| 6. BIBLIOGRAFIA..... | 91 |
| 6.1. Índice de Ilustraciones | 99 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS

En la presente investigación abordaremos las cuestiones fundamentales sobre el concepto de Complejidad y la visualización de fenómenos emergentes a través de modelos computacionales. Estableceremos una base teórica de las principales aportaciones científicas, para su posterior aplicación en la implementación de ecosistemas virtuales dentro de la disciplina del A-Life Art.¹A modo de conclusión presentaremos un prototipo experimental sobre Modelado Basado en Agentes(ABM)².

Los objetivos quedan agrupados en tres ejes temáticos:

- En primer lugar, realizaremos un recorrido por las principales aportaciones científicas que desde la aparición del pensamiento sistémico, en las primeras décadas del siglo XX, darán origen a las denominadas ciencias de la Complejidad. El objetivo es establecer una relación de los conceptos fundamentales que definen a los sistemas complejos: patrones de comportamiento, autoorganización y propiedades emergentes.
- En segundo lugar, analizaremos la visualización de fenómenos complejos mediante modelos computacionales, estableciendo como paradigma, el Modelado Basado en Agentes. Desde una perspectiva interdisciplinar – entre la física, las matemáticas, la informática y las ciencias sociales – estudiaremos la aplicación de estas simulaciones a campos tan diversos como pueden ser los ecosistemas naturales, el movimiento migratorio de especies, situaciones de tráfico, flujo de peatones, fenómenos sociales como la segregación cultural, fluctuaciones en los mercados o estrategias de cooperación.
- Finalmente, a través del concepto de Vida Artificial, estableceremos una metodología para la implementación de ecosistemas virtuales dentro de la

1 Artificial Life Art: disciplina relacionada con el concepto de Vida Artificial.

2 Utilizaremos las siglas en inglés ya que favorece la búsqueda de información: *Agent Based Modelling*.

disciplina del A-Life Art. El análisis de referentes artísticos se basará en la articulación de conceptos sobre interactividad y propiedades emergentes. El prototipo de programación – no considerado como parte práctica de la investigación– tendrá como objetivo la aplicación técnica de los conceptos estudiados, a modo de conclusión o resumen, y está orientado hacia una futura investigación sobre «Complejidad social, modelos de predicción y database».

1.2. METODOLOGÍA E HIPÓTESIS DE TRABAJO

Desarrollaremos un trabajo de investigación teórico, basado en una metodología cualitativa. Durante el proceso de revisión bibliográfica contemplamos que se podían abrir tres líneas de investigación teóricas para abordar la investigación: una primera científica, otra más vinculada a la antropología y la filosofía, y una tercera de intersecciones entre Arte, Ciencia y Cultura. Dado que el concepto de complejidad tiene su origen en los cambios de paradigma científicos, y en gran medida su desarrollo se debe a los avances en computación, nos pareció más oportuno recurrir principalmente a estos campos de conocimiento. Detallamos brevemente los contenidos según el tipo de fuentes consultadas:

- Apartado 2, Concepto de complejidad: Hemos atendido principalmente a fuentes científicas, salvo en el apartado 2.2, donde tratamos el concepto de emergencia según principios de causalidad, más relacionados con la filosofía.
- Apartado 3, Modelos de computación: estudios de base científica y técnica, metodologías que tendrán una aplicación posterior en la disciplina del A-Life Art.
- Apartado 4, Ecosistemas en el A-life Art: referentes teóricos proporcionados por investigadores en arte o artistas cuyo trabajo conceptual se basa en principios de Complejidad.

El motivo de analizar este tipo prácticas científicas se debe a que durante la revisión bibliográfica advertimos que existía una información muy detallada y precisa en los textos divulgativos, que van desde la definición de qué es un agente, atributos y comportamientos del sistema, a una gran variedad de implementaciones y *frameworks*, (muchos de ellos de código abierto) en lenguajes de Programación Orientada a Objetos, tales como C++, Java, Python.

Consideramos por tanto, que un análisis detallado de estas prácticas, puede ser una fuente de recursos tanto a nivel conceptual como técnico para aquellos investigadores – que desde la práctica artística – estén interesados en desarrollar propuestas sobre sistemas complejos dentro del A-life Art.

Finalmente, hemos desarrollado un blog³ para la investigación – a modo de publicación digital o anexo – para ampliar información relativa al visio-nado de vídeos y detalles sobre el diseño del prototipo presentado.

1.3. ESTADO DE LA CUESTIÓN. Delimitación de los conceptos fundamentales, teorías y referentes destacados.

Desde que en las primeras décadas del siglo XX irrumpe la corriente de pensamiento sistémico, en oposición a las teorías mecanicistas propuestas por Descartes, asistimos a un cambio constante en los paradigmas⁴ del conocimiento científico: desde las teorías cuánticas (1925) y el principio de incertidumbre formulado por Werner K. Heisenberg⁵, pasando por

3 <http://interaccioneslocales.wordpress.com/>

4 El concepto de *paradigma* formulado por Thomas Kuhn hace referencia al conjunto de valores, conceptos y logros compartidos por una comunidad científica y que en última instancia es lo que permite formular los problemas y dar respuestas.
Referencia Bibliográfica: KUHN, Thomas S., *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica, México D.F., 1962, (8ªEd., 2004), p. 13.

5 Heisenberg, Premio Nobel de Física en 1932.

el teorema de incompletitud de Gödel⁶ (1930), la Cibernética⁷ (1948), la Teoría del Caos⁸ (1980) con los sistemas no lineales y atractores, hasta llegar a finales y principios del nuevo siglo a conceptos como los de Vida artificial propuestos por Christopher Langton⁹ (1989) o las recientes teorías de grafos y redes libres de escala con Albert-László Barabási¹⁰.

El pensamiento sistémico se basará en los principios de «autoorganización» y en la búsqueda de patrones comunes que permitan observar el comportamiento de un sistema. Algunas corrientes de pensamiento tratarán de unificar dichos criterios bajo un nuevo paradigma de conocimiento interdisciplinar, en lo que ha venido denominándose Teorías de la Complejidad. Es por ello, que en la actualidad resulta frecuente hablar de intersecciones entre Arte, Cultura y Ciencia¹¹ (Pau Alsina), hacer referencia al nacimiento de una tercera cultura¹² (John Brockman), o ver como ingenieros y biólogos estudian el comportamiento colectivo de las colonias de hormigas¹³ para poder aplicarlo posteriormente a modelos computacionales en la resolución de problemas tales como la congestión del tráfico o la evacuación de un edificio.

-
- 6 HOFSTADTER, Douglas R., *Gödel, Escher, Bach*. Tusquets editores, Barcelona, 1987, (9ªEd., 2005).
 - 7 WIENER, Norbert, *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*. The Technology Press, MIT, New York, 1948.
 - 8 REYNOSO, Carlos, *Complejidad y el Caos. Una exploración antropológica*. Complejidad Humana, Sb, Buenos Aires, Sb, 2006, p. 174-240.
 - 9 LANGTON, Christopher G., (ed.), *Artificial Life: The proceedings of an interdisciplinary workshop on the synthesis and simulation of living systems*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.
 - 10 BARABÁSI, Albert-László y RÉKA, Albert, *Emergence of scaling in random networks*. Science, nº 286, 1999, pp.509-512.
 - 11 ALSINA, P., y PERELLÓ, J., "Arte, cultura y ciencias de la complejidad" en *Artnodes*, nº 9. UOC, 2010. Texto Online: http://artnodes.uoc.edu/ojs/index.php/artnodes/article/view/n9_nodo_presentacion [consultado 06/09/2012]
 - 12 BROCKMAN, John, y PÁNIKER, Salvador, (ed.), *El nuevo humanismo y las fronteras de la ciencia*. Kairós, Barcelona, 2007.
 - 13 JOHNSON, Steven, *Sistemas emergentes. O qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Turner Fondo de Cultura Económica, Madrid, 2003. (reimpresión, 2008).

Desde su aparición en escena a mediados del siglo XX – con la Teoría General de los Sistemas y la Cibernética – el término de complejidad ha sido sometido a grandes debates entre la comunidad científica. Su propia naturaleza transdisciplinar¹⁴, que va desde las matemáticas, la biología, la física o la química, hasta los estudios en sociología, antropología, economía o política, imposibilita el hecho de encontrar unos criterios unificadores que permitan definir aquello que entendemos por Teorías de la complejidad. Tal y como afirma Oscar González¹⁵ en un ensayo sobre los diferentes estudios de complejidad, nos encontramos lejos de la existencia de una verdadera comunidad de conocimiento, motivos que atribuye en parte a la fuerte competencia entre las instituciones¹⁶ y las expectativas que suscita un tema tan “de moda” para un público científico y no científico. Según González, los diferentes grupos suelen marcar sus diferencias y es frecuente ver como en sus publicaciones suelen ignorarse unos investigadores a otros. Mientras que la tendencia europea (Prigogine, Heylighen¹⁷, Morin¹⁸) busca propuestas más totalizadoras, más o menos híbridas entre ciencias y humanidades, en Estados Unidos, los investigadores parecen más interesados en la investigación científica que en la búsqueda de nuevos paradigmas de conocimiento.

Parece ser que la falta de criterios unificadores o la aspiración inacabada de una teoría de la *omnisciencia*, forma parte de la propia naturaleza del concepto que aquí tratamos. Si tomamos las palabras del filósofo Edgar

14 MORIN, Edgar, *Introducción al pensamiento sistémico*, Gedisa, Barcelona, 1990, (9ª Ed. 2007), pp. 78,79.

15 GONZÁLEZ, Oscar, “Entre modelos y discursos: complejidad y antropología” en *Anales de Antropología*, vol. 41-I, Instituto de Investigaciones Antropológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.

16 Entre los principales centros de investigación destacamos el Santa Fe Institute (SFI) de Nuevo México, con Stuart Kauffman y John Holland, y en Europa la Escuela de Bruselas, cuyo mayor exponente es el químico Ilya Prigogine, con los estudios realizados sobre las Estructuras Disipativas.

17 HEYLIGHEN, Francis, CILLIERS, Paul, GERSHENSON, Carlos, “Complexity and Philosophy” en BOGG J., y GEYER, R., (ed.), *Complexity, Science and Society*. Radcliffe, Oxford, 2007.

18 MORIN, Edgar, *Introducción al pensamiento sistémico*, Gedisa, Barcelona, 1990, (9ª Ed. 2007).

Morin, el pensamiento complejo “*está animado por una tensión permanente entre la aspiración a un saber no parcelado, no dividido, no reduccionista, y el reconocimiento de lo inacabado e incompleto de todo conocimiento.*”¹⁹

Frente al «paradigma de simplificación»²⁰, las ciencias de la complejidad emergen como una tercera vía²¹ entre los métodos inductivos y deductivos. Mediante el estudio de patrones de organización es posible generar modelos computacionales que permiten observar el comportamiento de sistemas complejos. Más allá de las bases empíricas sobre las que se asienta la biología tradicional, el concepto de Vida artificial abrirá una nueva perspectiva en los métodos de observación científicos, produciéndose una transición de «la vida tal y como la conocemos» a un nuevo espacio de posibilidades que simula «la vida como podría ser».²²

19 op. Cit., pag. 23.

20 op. Cit., pag. 34.

21 MACAL, Charles M., y NORTH, Michael J., “Tutorial on agent-based modeling and simulation” en Kuhl, M., Steiger N., Armstrong F., y Joines, J., (ed.), *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 2005. Texto online: <http://informatics.org/wsc05papers/prog05.html> [consultado 06/09/2012]

22 LANGTON, Christopher G., "Artificial Life" en LANGTON, C., (Ed.), *Artificial Life*. Addison-Wesley, Massachusetts, 1989, p. 1.

2. APROXIMACIÓN AL CONCEPTO DE COMPLEJIDAD

2.1. ANTECEDENTES A LAS TEORÍAS DE LA COMPLEJIDAD. CONSIDERACIONES GENERALES.

Si en algo parecen estar de acuerdo la mayoría de teóricos e investigadores, es en considerar dos hechos clave que posibilitan la aparición del concepto de complejidad: En primer lugar, una ruptura con las teorías clásicas que han predominado durante varios siglos desde Newton y Descartes. En oposición a esta visión mecanicista y en cierta manera a las corrientes vitalistas, aparecerá durante las primeras décadas del siglo veinte el denominado pensamiento sistémico. En segundo lugar, el concepto de complejidad entra en escena de manera explícita entre las décadas de los cincuenta y sesenta con el desarrollo de la Teoría General de los Sistemas (TGS) cuyo mayor exponente será Ludwig von Bertalanffy²³, y con la aparición del movimiento Cibernético, encabezado por Norbert Wiener²⁴.

Las principales características que definen el pensamiento sistémico emergen de manera simultánea desde diversas disciplinas, aunque podemos considerar los primeros indicios en los estudios realizados sobre biología, donde se empieza a considerar los organismos vivos como «totalidades integradas», rechazando así cualquier explicación reducida únicamente a principios físico-químicos. Mientras el método analítico propuesto por Descartes actúa *aislando* las partes para comprenderlo, el pensamiento sistémico por el contrario actuará no sobre los componentes, sino en el contexto y los principios que rigen la organización del conjunto.

La consideración de un todo organizado – que más tarde se matizará en la capacidad de «autoorganización» con el movimiento cibernético – es lo que empieza a producir un desplazamiento desde un pensamiento mecanicista y uno sistémico. En adelante, el término de sistema²⁵ será utilizado

23 BERTALANFFY, Ludwig von, *Teoría general de los sistemas*. Fondo de Cultura Económica, México, 1976, (17ª Ed. 2009).

24 WIENER, Norbert, *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*. The Technology Press, MIT, New York, 1948.

25 El biólogo Lawrence Henderson será el primero en utilizar el término «sistema» para referirse a los organismos vivos y a los sistemas sociales. Citado en: CAPRA, Fritjof, «La emergencia del pensamiento sistémico», en CAPRA, F., *La trama de la*

para referirse a un conjunto integrado cuyas propiedades esenciales surgen de la interacción y relación que se establece entre sus partes. Esta consideración, vendrá reforzada en los años veinte por los principios de las teorías cuánticas²⁶, donde las partículas o patrones de probabilidad ya no representan cosas, sino más bien interconexiones.

Para dar respuesta a esta totalidad organizada, haremos referencia a una segunda oposición entre el pensamiento sistémico y la corriente del *vitalismo*, que aunque comparten ciertas ideas difieren en una consideración fundamental. Si el comportamiento de un sistema viene determinado por la interacción o relación de sus partes, y esa totalidad no puede ser explicada a partir del análisis o la suma de sus partes ¿en que consiste exactamente esa totalidad? Mientras los vitalistas lo atribuyen a una hipotética fuerza o impulso vital, inmaterial (*Élan vital*²⁷ de Henri Bergson) el pensamiento sistémico negará cualquier entidad no física, y postulará que sólo mediante la comprensión de las relaciones organizadoras es posible conocer el comportamiento total del sistema. La explicación causal a estas relaciones organizadas, viene dada por lo que se define posteriormente como «*propiedades emergentes*» del sistema, y que veremos de manera extensa en el siguiente apartado.

Para concluir, cabe mencionar la estructura «*multinivel*» que caracteriza un sistema, y que debe ser entendida no como una *jerarquía* piramidal, sino en tanto que redes o sistemas anidando unos dentro de otros: nos encontramos células que se agrupan en tejidos, y estos a su vez en órganos; los organismos y los seres vivos habitan en grupos o sistemas sociales, y por ende conforman los ecosistemas. Existen por lo tanto diferentes niveles de «*complejidad organizada*»²⁸, donde cada uno eviden-

vida. *Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama, Barcelona, 1998 (2ª Ed. 2010).

26 CAPRA, Fritjof, *The Tao of Physics*. Shambhala, Boston, 1975 (3ª Ed. 1991), p 264.

27 BERGSON, Henri, *La evolución creadora*. Espasa-Calpe, Madrid, 1985.

28 CHEKLAND, Peter, *Systems Thinking, Systems Practice*. John Wiley, Nueva York,

cia unas propiedades exclusivas que no se dan en los niveles inferiores. Las propiedades del sistema en un determinado nivel, es lo que recibirá el nombre de «*propiedades emergentes*» y que en su conjunto definen la especificidad del sistema.

2.1.1. TEORIA GENERAL DE LOS SISTEMAS

A mediados de los años cuarenta, el pensamiento sistémico se establece como movimiento científico con la Teoría General de los Sistemas (TGS) desarrollada por el biólogo Ludwig von Bertalanffy²⁹. Su aportación más importante es la consideración de los organismos vivos como sistemas «*abiertos*» que interactúan con el ambiente absorbiendo y liberando energía para permanecer vivos. La TGS reformulará el concepto clásico de *entropía* que mide el nivel de desorden, considerando en adelante, que los sistemas abiertos se encuentran permanentemente en un estado de «*equilibrio dinámico*». El orden prefijado y estable de un mundo mecánico definido por la ciencia clásica, empieza a desplazarse hacia estados estables «*alejados del equilibrio*».

De las investigaciones llevadas a cabo por la TGS, se desprenden fundamentalmente dos consideraciones:

- En primer lugar, la realidad ya no se entiende como partículas materiales, sino como relaciones abstractas y organizaciones complejas. Esto permite a Bertalanffy formular «*principios generales*» aplicables a diferentes campos de estudio como la sociología o la psicología, con independencia de la naturaleza del sistema: “*El hecho de que ciertos principios se apliquen a los sistemas en general, sin importar la naturaleza de los mismos ni las entidades, explica que aparezcan en diferentes campos de la ciencia concepciones y leyes que*

1981, p. 78.

29 BERTALANFFY, Ludwig von, *Teoría general de los sistemas*. Fondo de Cultura Económica, México, 1976, (17ª Ed. 2009).

*se corresponden.(...) Surgen en diferentes campos de la ciencia natural, al igual que en psicología y en sociología”.*³⁰

- En segundo lugar, y al hilo de esa búsqueda de patrones de organización, la voluntad explícita por parte de la TGS de crear un marco para unificar las diferentes disciplinas de la ciencia: “*La teoría general de los sistemas debería ser (...) un medio importante para controlar y potenciar la transferencia de principios entre campos, no siendo necesario duplicar o triplicar el descubrimiento del mismo principio en distintos campos aislados entre sí.*”³¹

2.1.2. CIBERNÉTICA

Paralelamente a los principios establecidos por Bertalanffy en la Teoría General de los Sistemas, aparecerá la Cibernética, definida por Norbert Wiener como la ciencia del «*control y la comunicación en el animal y en la máquina*»³². Los estudios cibernéticos, que en un principio se centraron en el estudio de los fenómenos mentales mediante el uso de lógica matemática, pueden ser considerados entre otras cosas, como pioneros en la concepción unificada de mente y cerebro que en la actualidad trabajan las ciencias cognitivas.

Mientras la TGS es desarrollada fundamentalmente dentro de la disciplina de la biología, el movimiento cibernético³³ es llevado a cabo por un grupo heterogéneo de matemáticos, neurocientíficos, ingenieros y científicos sociales. Su interés se centrará fundamentalmente en la búsqueda de «*patrones de organización*»³⁴. Según Wiener, las nuevas nociones de control,

30 op. Cit., pag 89.

31 op. Cit., pag 38, 83.

32 WIENER, Norbert, *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*. The Technology Press, MIT, New York, 1948.

33 El movimiento cibernético se inicia durante la Segunda Guerra Mundial, con Norbert Wiener, John von Neumann, Claude Shannon y Warren McCulloch, Gregory Bateson.

34 “No somos materia perdurable, sino pautas que ser perpetúan a sí mismas”.
WIENER, Norbert, *The human use of th Human Beings*. Houghton Mifflin, Nueva

mensaje e información³⁵ harán referencia precisamente a estas pautas de organización. De sus investigaciones, se derivan principalmente los conceptos de retroalimentación, autorregulación y finalmente de «*autoorganización*»³⁶ que pasamos a describir.

CONCEPTO DE RETROALIMENTACIÓN

De igual forma que los organismos cuentan con eficaces funciones de control y autorregulación, uno de los principales objetivos para la cibernética será cómo controlar o influir en la información de un sistema para que este sea más eficaz.

Así, uno de los mayores logros de la cibernética basado en la comparación entre sistemas vivos y máquinas fue el concepto de «*retroalimentación*» propuesto por Wiener: Un bucle de retroalimentación o *feedback-loop*, es una disposición de elementos conectados causalmente, en la que una causa inicial (*input*) se propaga a través de la cadena, de tal manera que cada elemento tiene una influencia sobre el siguiente, hasta que el último (*output*) «*retroalimenta*» al primero.

La «*autorregulación*» constituye una característica fundamental en los patrones no lineales de los sistemas vivos. En este sentido, el efecto de retroalimentación aplicado a una máquina podría ser entendido en sí mismo como la propiedad de «*autorregulación*» del sistema. Dado un sistema abierto (propuesto en la TGS) habría un flujo de información, un intercambio con el entorno, y en cierta medida, los efectos pasarían a formar parte de las causas.

York, 1950, p. 96.

35 El termino información puede llevar a equívocos, ya que en la cibernética adquiere el sentido de “señal”

36 La autoorganización es la aparición espontánea de nuevas estructuras y nuevos modos de comportamiento en sistemas abiertos que están lejos del equilibrio. CAPRA, Fritjof, *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama, Barcelona, 1998, (2ª Ed. 2010) p.103,104.

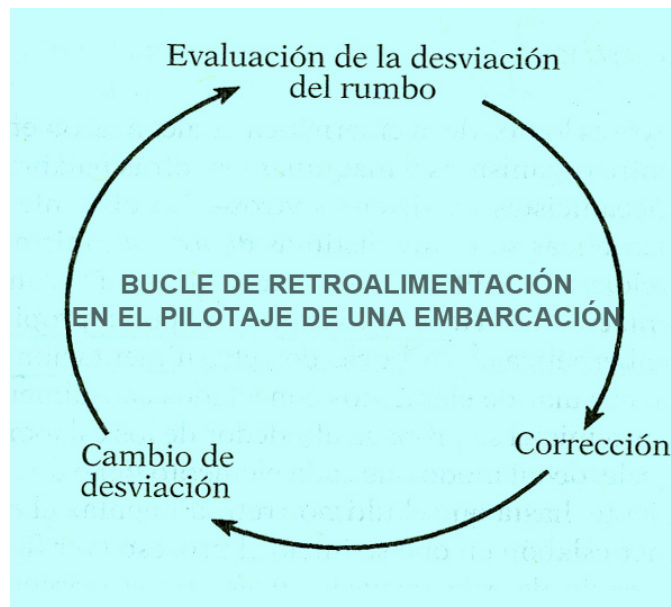


Fig 01: Bucle de retroalimentación.

En consecuencia, el efecto de «*autorregulación*»³⁷ (aplicado a un organismo o una máquina) puede ser entendido como un comportamiento intencionado o dirigido a un objetivo. Tal y como afirma el antropólogo Carlos Reynoso, la cibernética no se construye anteponiendo las causas, sino privilegiando los propósitos: “*Dado que los aviones vuelan a gran velocidad, es preciso predecir la posición futura del aparato a partir de sus posiciones anteriores (...). El mecanismo de puntería del cañón requiere de un procedimiento o circuito de información que vaya acercando los disparos hasta abatir el avión, reduciendo paulatinamente la magnitud del error con oscilaciones cada vez más estrechas. Este circuito de información devuelve al mecanismo elementos de juicio acerca de los resultados de su propia conducta.*”³⁸

37 La retroalimentación es “el control de una máquina en base a su comportamiento real, y no al esperado”. WIENER, Norbert: *The human use of the Human Beings*, Houghton Mifflin, Nueva York, 1950, p. 24.

38 REYNOSO, Carlos, *Complejidad y el Caos. Una exploración antropológica*. Complejidad Humana, Sb, Buenos Aires, Sb, 2006, p. 23.

Finalmente, los modelos cibernéticos de retroalimentación, según Wiener, pueden ser considerados como patrones generales, extensibles desde las máquinas u organismos vivos, a otros de nivel superior como los sistemas sociales³⁹. Uno de los ejemplos más conocidos sobre los procesos de autorregulación sea quizás la «mano invisible» que regula los mercados en la teoría económica de Adam Smith⁴⁰.

39 WIENER, Norbert, *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*. The Technology Press, MIT, New York, 1948, p. 24.

40 SMITH, Adam, *Teoría de los sentimientos morales*. Edición conmemorativa 70 Aniversario, México, 2004.

2.2. CONCEPTO DE EMERGENCIA

En el apartado anterior hemos establecido una relación de conceptos que definen las principales características de los fenómenos complejos: el comportamiento de un sistema, entendido como una totalidad, viene dado por el contexto y los patrones de organización de sus partes. Estos patrones ya no representan entidades materiales sino interconexiones, y la capacidad de autoorganización generada por estas redes relacionales es lo que permite al sistema aprender y adaptarse al medio.

En este apartado, desde una perspectiva diferente al enfoque científico, definiremos la complejidad a través de las «*propiedades emergentes*» del sistema. Siguiendo a Pau Alsina⁴¹, podríamos decir que la Complejidad es un fenómeno emergente, y que la emergencia, a su vez, es lo que los «*sistemas autoorganizados*» producen, la razón explicativa de fenómenos tales como los huracanes, los organismos complejos, la inteligencia colectiva o los ecosistemas sociales que habitamos.

2.2.1. NOVEDAD Y CAUSALIDAD

El origen moderno del término Emergencia aparece a mitad del siglo XIX y se remonta a los estudios realizados por John Stuart Mill⁴² sobre los diferentes efectos de causalidad aplicados a la física y la química. Un ejemplo clásico en la física es que cuando dos cuerpos o partículas colisionan, el resultado global es la suma de ambos. Sin embargo, no ocurre lo mismo cuando dos moléculas interactúan químicamente, ya que emerge un resultado completamente nuevo, como cuando el hidrogeno y el oxigeno dan como resultado el agua. El primero autor en introducir el término de Emergencia, fue el filósofo George Henry Lewes en 1875:

41 ALSINA, Pau, "Arte, Complejidad y Emergencia" en *Sobre la complejidad*. Zehar nº66, Arteleku, Diputación de Gipuzcua, p.75. Texto disponible online: <http://www.arteleku.net/publicaciones/editorial/zehar/66-complejidades/view> [consultado 06/09/2012]

42 MILL, John Stuart, *A System of Logic. Ratiocinative and Inductive*. Longmans, Green, and Co., Londres, 1906, p. 243.

"Cuando dos causas separadas simplemente se unen o se mezclan y producen un efecto conjunto, de manera que podemos ver como su agencialidad actúa en dicho efecto, el resultado es un mero resultante, mientras que si existiera novedad o heterogeneidad en el efecto, entonces hablaríamos de un emergente"⁴³.

Podríamos definir, en un primer momento, las propiedades emergentes como aquellos procesos resultantes de las interacciones locales cuyos efectos a nivel global son impredecibles: "El todo es más que la suma de sus partes"⁴⁴

Este efecto de sorpresa o novedad⁴⁵ asociado al concepto de emergencia, ha sido un tema recurrente entre las posturas más detractoras – como las de Bertrand Russell⁴⁶ que lo consideran un epifenómeno sin validez científica – o aquellas más optimistas, que buscan en la emergencia la explicación última a problemas como la creatividad, no alejadas de un cierto misticismo o efecto mágico como el del físico Doyne Farmer.⁴⁷

Sin embargo, podríamos cuestionarnos si este «efecto de sorpresa» es debido a nuestra incapacidad para entender la complejidad del sistema, o si es meramente una cualidad transitoria que desaparece en el momento en que somos capaces de describirla. Joan Soler Adillon, en su artículo *Emergencia e interactividad*⁴⁸, plantea esta cuestión a partir de aquellos

43 LEWES, George H., *Problems of Life and Mind*. Vol. 2., Trübner & Co., 1875, p. 412.

44 MILL, John Stuart, *A System of Logic. Ratiocinative and Inductive*. Longmans, Green, and Co., Londres, 1906, p. 243.

45 WHITE LAW, Mitchell, *Tom Ray's Hammer. Emergence and Excess in A-Life Art*. Leonardo, Vol. 31, nº 5, MIT Press, 1998, pp. 377-381.

46 RUSSELL, B., *The Analysis of Matter*. Allen & Unwin, London, 1927, pp. 285-286.

47 "No es magia, pero se siente como magia". ALSINA, Pau, "Arte, Complejidad y Emergencia" en *Sobre la complejidad*. Zehar nº66, Arteleku, Diputación de Gipuzcua, p. 75. Texto disponible online: <http://www.arteleku.net/publicaciones/editorial/zehar/66-complejidades/view> [consultado 06/09/2012]

48 SOLER-ADILLON, Joan, "Emergencia e interactividad: A-Life Art como paradigma para la creación de experiencias de comunicación interactiva" en *Hipertext.net*, nº 8, UPF, 2010. Texto online: http://www.upf.edu/hipertextnet/numero-8/a-life_art.html [consultado 06/09/2012]

autores que consideran la emergencia como un fenómeno relativo al observador y que en última instancia depende del modelo o marco de observación, poniendo como ejemplo más paradigmático la postura de Peter Cariani⁴⁹ dentro del ámbito del A-life Art, o de artistas generativos como Gordon Monro⁵⁰ que hablan de una emergencia subjetiva.

Tratando de dar una respuesta a los efectos de causalidad, el filósofo materialista Manuel Delanda⁵¹ sostiene que, aunque los primeros filósofos emergentistas acertaron en el sentido de bloquear el reduccionismo de las explicaciones científicas, se equivocaron en el hecho inherente de su inexplicabilidad. Esta imposibilidad o rechazo a explicar la causa, es lo que teñirá bajo una “*sospecha de misticismo*”⁵² cualquier intento de definir una teoría sobre el concepto emergencia.

Según Delanda, la cuestión estriba en qué es lo que entendemos por causalidad. Si entendemos ésta como un fenómeno homogéneo y lineal, esto es, “*la misma causa, el mismo efecto, siempre*”, o si por lo contrario, entendemos la causalidad como un fenómeno heterogéneo de interacciones, donde “*la no linealidad es la norma, mientras que la linealidad es la excepción*”. Delanda afirma que no existe tal dicotomía de términos, sino que es más bien una cuestión de intensidades de causa:

"Una propiedad de un todo será emergente si se produce mediante interacciones causales entre sus partes componentes. Estas interacciones, por medio de las cuales las partes ejercen sus capacidades de afectar y ser afectadas, constituyen el mecanismo de emergencia

49 CARIANI, Peter, "Emergence and Artificial Life". En Langton, C., Taylor, C.; Farmer, J. D., Rasmussen, S. (Ed.), *Artificial Life II*. AddisonWesley, Redwood City, 1992, pp. 775-789.

50 MONRO, Gordon, "Emergence and Generative Art" en *Leonardo*. Vol. 42, nº 5, 2009, pp. 446-447.

51 DELANDA, Manuel, "Emergencia, causalidad y realismo" en *Artnodes*, nº 9. UOC, 2010. Texto Online:
http://artnodes.uoc.edu/ojs/index.php/artnodes/article/view/n9_delanda/n9_delanda
[consultado 06/09/2012]

52 Op. Cit., pag 7.

que yace detrás de las propiedades del todo."⁵³

En conclusión, estas interacciones no lineales abren un espacio de posibilidades o capacidades potencialmente infinitas, pues no solo depende de la potencialidad de un ente para afectar, sino que también depende de una cantidad innumerable de entes para ser afectados.

2.2.2. PROPIEDADES EMERGENTES

Al hablar de propiedades emergentes⁵⁴ nos referimos a un tipo de sistema «*descentralizado*», construido en una jerarquía “*de abajo hacia arriba*” (*bottom-up*), donde las interacciones en un determinado nivel son la causa del comportamiento del sistema en un nivel superior. Encontramos ejemplo de ello, en fenómenos complejos como puede ser el crecimiento orgánico de una ciudad o el contagio de enfermedades y pandemias.

Estos sistemas se basan en una «*dinámica no-lineal*», puesto que no existe una relación de proporcionalidad entre las causas y sus efectos globales. En este sentido, son sistemas extremadamente sensibles a las fluctuaciones y pequeñas perturbaciones que pueden provocar grandes cambios a nivel global. Es lo que John H. Holland denomina como *efecto amplificador*⁵⁵. Un ejemplo básico es el efecto que provocan las vacunas sobre un organismo, donde la introducción de una pequeña cantidad de antígenos en el torrente sanguíneo, provoca un cambio brusco en todo el sistema inmune que aprende mediante la creación de anticuerpos a preservarnos de una enfermedad.

Finalmente, las interacciones locales de estos sistemas autoorganizados suelen estar basadas en patrones de comportamiento relativamente sen-

53 Op. Cit., pag 9.

54 Según Pau Alsina, una de las descripciones sobre propiedades emergentes, que mayor aceptación ha tenido es la realizada por: GOLDSTEIN, Jeffrey, “Emergence As a Construct: History and Issues”. En *Emergence*. Vol. 11, 1999, p. 50.

55 HOLLAND, John H., *El orden oculto. De cómo la adaptación crea la Complejidad*. Fondo de Cultura Económica, México, 2004, p. 21.

cillos. Un ejemplo de ello lo encontramos en el comportamiento de las colonias de las hormigas o en el vuelo de las bandadas de pájaros. A partir de normas muy básicas las hormigas consiguen la autoorganización de una colonia, que sin un poder centralizado, es capaz de adaptarse y sobrevivir al medio.

Esta noción de una «*percepción local*» como estrategia de aprendizaje nos lleva a la consideración de un *conocimiento subjetivo*⁵⁶. En un sistema de tales características, no existirá una estructura predeterminada, sino que ésta es generada por el propio sistema para adaptarse a un entorno en constante evolución. Tal y como afirma Philip Ball, “*pensando a escala local, podemos, de forma colectiva, llegar a ejercer una influencia global y sólida.*”⁵⁷

56 HEYLIGHEN, Francis, CILLIERS, Paul, GERSHENSON, Carlos, “Complexity and Philosophy” en BOGG J., y GEYER, R., (ed.) , *Complexity, Science and Society*. Radcliffe, Oxford, 2007.

57 BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, p.41

3. MODELOS COMPUTACIONALES DE SISTEMAS COMPLEJOS. CASOS DE ESTUDIO

3.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Existen diferentes maneras para referirse al tipo de modelos computacionales que permiten observar los fenómenos complejos: desde las primeras investigaciones con Autómatas Celulares llevadas a cabo por John von Neumann⁵⁸, a los Modelos Basados en Individualidades (IBM) de Reynolds⁵⁹, los Sistemas Adaptativos Complejos (CAS)⁶⁰ de Holland, los Sistemas Multi-Agente(MAS), así como un gran número implementaciones específicas como puedan ser los Modelos de Segregación Cultural de *Shelling*⁶¹ o el ecosistema *Sugarscape*⁶² de Epstein&Axtell.

Actualmente, una de las denominaciones más aceptadas, ya que reúne las condiciones de comportamiento y adaptabilidad es el Modelado Basado en Agentes (ABM⁶³). Algunos autores, como Macal y North consideran este campo de investigación como una tercera vía⁶⁴ para la ciencia, entre el método inductivo y deductivo. El término de agente hará referencia a los elementos activos, interactuantes de un sistema. Podríamos definir un agente⁶⁵ como unidades autónomas con unas características determinadas y capacitadas para la toma de decisiones en base a un conjunto de reglas.

58 NEUMANN, John von, *The Theory of Self-reproducing Automata*. University of Illinois Press, IL, 1966.

59 <http://www.red3d.com> [consultado 06/09/2012]

60 HOLLAND, John H., *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*. Helix Books, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1995.

61 SCHELLING, Thomas C., *Micromotives and Macrobehavior*. WW. Norton, Nueva York, 1973.

62 AXTELL, Robert, y EPSTEIN, Joshua, *Growing artificial societies. Social Science from the Bottom Up*. The Brookings Institution, Washington, 1996.

63 (ABM, Agent Based Modelling): Utilizaremos las singlas en inglés ya que es la más extendida y facilita la búsqueda de recursos online y bibliográficos.

64 MACAL, Charles M., y NORTH, Michael J., "Tutorial on agent-based modeling and simulation" en Kuhl, M., Steiger N., Armstrong F., y Joines, J, (ed.), *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 2005, p.1. Texto online: <http://informs-sim.org/wsc05papers/prog05.html> [consultado 06/09/2012]

65 HOLLAND, John H., *El orden oculto. De cómo la adaptación crea la Complejidad*. Fondo de Cultura Económica, México, 2004, p. 22.

Por lo que se refiere al modo de visualización, cabe considerar si se trata de un espacio explícito o no: si los agentes interactúan con el entorno, como por ejemplo en un ecosistema natural, o si se trata de un espacio no explícito donde no importa la ubicación espacial de los agentes, tal y como sucede en un sistema de redes. Este segundo caso, no será estudiado en la presente investigación dada la limitación y extensión que supone tratar una teoría de redes. Así, según el modo de visualización espacial, podemos establecer cuatro tipologías básicas:

- Espacio euclidiano (2D,3D): donde los agentes se pueden mover libremente en un espacio continuo explícito.
- Espacio reticular: el espacio esta delimitado por celdas y los agentes (autómatas celulares) interactúan según la ley de vecindad de von Neumann⁶⁶.
- Red Espacial: los agentes (nodos) están conectados por redes que pueden ser de tipo estático o dinámico.
- GIS: los agentes interactúan con un Sistema de Información Geográfica.

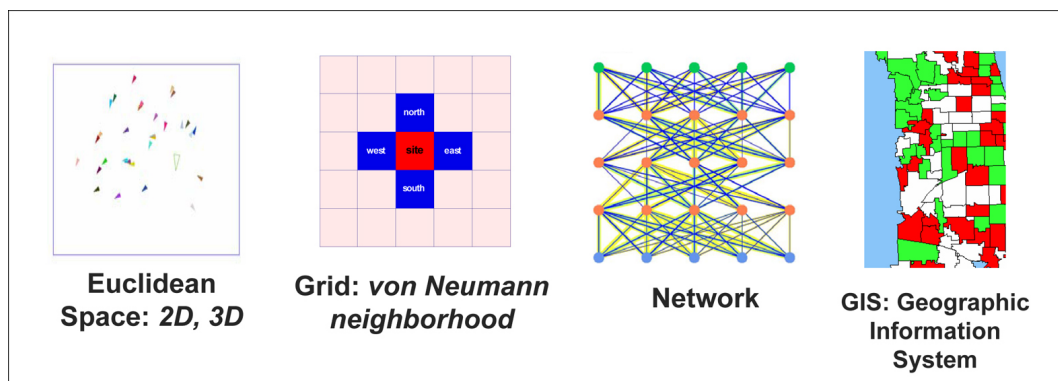


Fig 02: Visualización de agentes según tipologías espaciales.
MACAL, C., y NORTH, M.

66 NEUMANN, John von, *The Theory of Self-reproducing Automata*. University of Illinois Press, IL, 1966.

Para analizar los diferentes modelos de computación que veremos a continuación, estableceremos un criterio basado en el incremento gradual de la complejidad del sistema:

- Un primer nivel, donde agruparemos aquellos sistemas basados en la aplicación de leyes físicas y dinámica de partículas que permite a los agentes desplazarse e interactuar en un espacio explícito. Son agentes con un objetivo predeterminado en sus reglas de interacción, pero no son capaces de adoptar ninguna estrategia que les permita modificar su conducta. Este tipo de modelos suele utilizarse en la simulación de movimientos de grupos y multitudes. Nos referiremos a ellos en el apartado 3.2 y 3.3, con los antecedentes y los Sistemas Multi-Agente.
- El segundo nivel de complejidad lo establecemos para aquellos sistemas que tienen la capacidad de adaptación al entorno en el sentido de aprendizaje. A diferencia de los anteriores, estos agentes son capaces de tomar decisiones y modificar su comportamiento a partir de la experiencia acumulada (tienen memoria). Estos modelos se corresponden con el paradigma de computación de los sistemas complejos, y los veremos en el apartado 3.4 y 3.5.

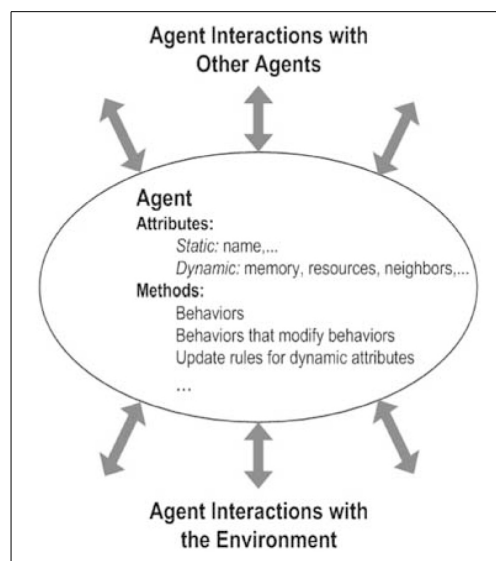


Fig. 03: Un Agente típico. MACAL, C., y NORTH, M. (2010).

3.2. ANTECEDENTES

3.2.1. AUTÓMATAS CELULARES

La idea de autómatas surge a principios del siglo XX a partir de las investigaciones llevadas a cabo por el matemático John von Neumann⁶⁷ sobre la capacidad de los organismos celulares para reproducirse. En colaboración con el científico Stanislaw Ulam⁶⁸ desarrollaron un modelo sencillo basado en un espacio reticular similar al de un tablero de ajedrez. Cada celda representaría uno de los posibles estados binarios del autómata (on/off) y estaría determinado por los estados de sus celdas vecinas. Siguiendo una serie de reglas de interacción (ley de vecindad de Neumann⁶⁹) se podía comprobar cómo estas *células* eran capaces de autoreplicarse sobre la retícula.

Existe una infinidad de “*juegos*” basados en autómatas celulares (AC). El más célebre sin duda es el desarrollado por el matemático John Horton Conway en 1960, y que con toda la intencionalidad llamaría el “Juego de la Vida”. Cada celda puede presentar dos estados, estar vivo o muerto. Las reglas⁷⁰ de la vida para estos “organismos” son muy sencillas: Las células solas mueren, en comunidad prosperan y se reproducen, pero si hay sobrepoblación, mueren por falta de recursos o alimentos.

Tal y como afirma Ball, el Juego de la Vida “*es un universo extraño, lleno de riqueza y de sorpresas que surge de unas pocas reglas sencillas sobre las interacciones locales entre células*”⁷¹.

67 NEUMANN, John von, *The Theory of Self-reproducing Automata*. University of Illinois Press, IL, 1966.

68 Op. Cit.

69 Op. Cit.

70 Una definición concreta de Las reglas en el Juego de la Vida sería la siguiente:

- una celda sigue viva si tiene dos o tres celdas vecinas vivas a su alrededor
- una celda muere si tiene menos o mas de dos o tres celdas.
- una celda nace si tiene exactamente tres celdas vivas al alrededor.

71 BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura

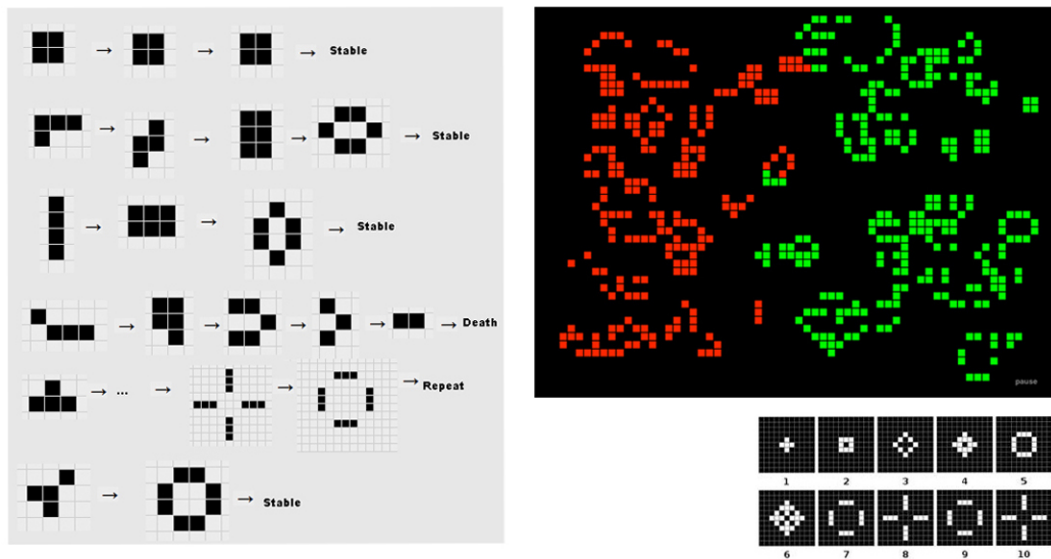


Fig. 04: *Game of Life*. Conway, John H. (1960). Reglas y simulación.

3.2.2. MODELOS BASADOS EN INDIVIDUALIDADES. *BOIDS*

Un segundo antecedente de referencia obligatoria son los trabajos realizados durante la década de los ochenta por el informático Craig Reynolds⁷², considerados como pioneros en la simulación del movimiento de grupos, tales como las bandadas de pájaros o los bancos de peces.

A diferencia de los primeros autómatas celulares que toman como referencia a la biología molecular, estas simulaciones están basadas en reglas físicas y dinámica de partículas. El espacio, en este caso ya no es una retícula sino un espacio continuo (euclidiano) donde los agentes se pueden desplazar *libremente*.

Las simulaciones de Reynolds se basan fundamentalmente en el principio de «*percepción local*»: dado que un pájaro es incapaz de anticipar el movimiento que todos sus compañeros van a realizar, este actuará conforme a su percepción local del mundo, siendo el movimiento del grupo el resultado “agregado” de las acciones llevadas a cabo por todos los pájaros.

Económica, México, 2008, p. 150.

72 <http://www.red3d.com> [consultado 06/09/2012]

Los *Boids*⁷³ de Reynolds están basados en tres normas⁷⁴ de comportamiento relativamente sencillas: Separación, Alineación y Cohesión. El movimiento del grupo emerge a partir de estas normas, aunque no exista en ellas nada que prescriba cómo será el movimiento o cual es la preferencia u orientación deseada por el grupo. Estas simulaciones incorporan un vector de tiempo, de manera que la coordenada espacial de cada agente es rastreada y actualizada (*update*) para la fracción de tiempo determinada. Una de las aportaciones pioneras de estos trabajos, es que las simulaciones de grupo no tienen nada que ver con un física estadística donde se promedia un valor global para una población determinada.

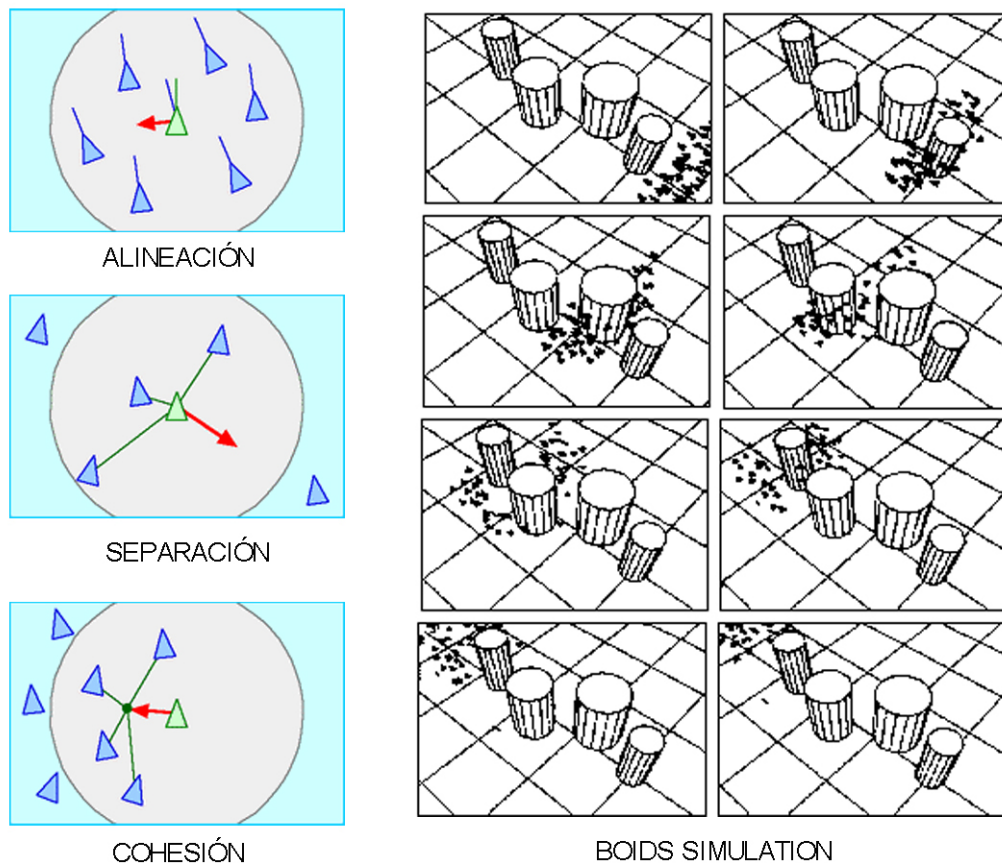


Fig. 05: *Boids*. Reynolds, Craig. (1986). Reglas y simulación.

73 Término que proviene de la fusión de birds y android.

74 REYNOLDS, Craig, *Steering Behaviors For Autonomous Characters*, en <http://www.red3d.com/cwr/boids/> [consultado 06/09/12]. Existen numerosas implementaciones de los modelos realizados por Craig Reynolds, entre las que destacamos las llevadas a cabo por Daniel Shiffman, en *Processing*. Ver Bibliografía.

Tanto los *Boids* de Reynolds, que se mueven con energía propia y emulan fenómenos físicos de la realidad, como los autómatas de Conway que nacen, mueren o se reproducen, pueden ser considerado como pioneros en las investigaciones sobre vida artificial⁷⁵ y que veremos en el cuarto apartado.

75 BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, p. 150.

3.3. SISTEMAS MULTIAGENTE (MAS⁷⁶)

*“Circular por redes de carreteras atestadas es como jugar en la bolsa: no paras de tomar decisiones basándote en una información incompleta”.*⁷⁷

Los Sistemas Multi-Agente, son una extensión de los modelos creados por Reynolds⁷⁸, y aunque en la actualidad tienen múltiples acepciones, en este apartado nos centraremos en aquellos modelos que se basan en la física de dinámicas para simular el comportamiento colectivo de multitudes o *masa crítica*. Encontramos ejemplos de su aplicación en estudios tan diversos como pueda ser la congestión de tráfico, el paso de peatones, la evacuación de edificios en situaciones de pánico, o la simulación de multitudes en el desarrollo de videojuegos y la industria cinematográfica.

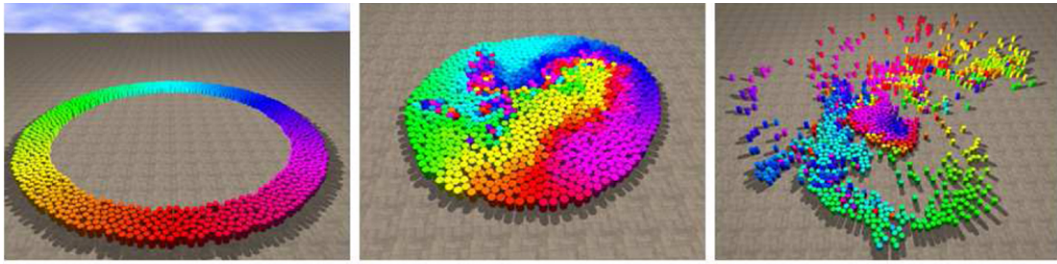


Fig. 06: Estudio sobre senderos que se forman espontáneamente en un espacio abierto, Universidad de Stuttgart. Helbing-Molnár.

76 (MAS, *Multi-Agent Systems*): Utilizaremos las singlas en inglés ya que es la más extendida y facilita la búsqueda de recursos online y bibliográficos.

77 Op. Cit., pag. 187.

78 Reynolds define estos sistemas de autómatas como *Individual-based models* (IBM): REYNOLDS, Craig, “Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model” en *Computer Graphics*, Vol. 21(4), ACM SIGGRAPH '87 Conference Proceedings, California, 1987, pp. 25-34.



Simulación de 1000 agentes intentando moverse hacia el centro hasta el lado opuesto. El resultado es un movimiento en espiral



Simulación de 1000 agentes intentando evacuar un edificio

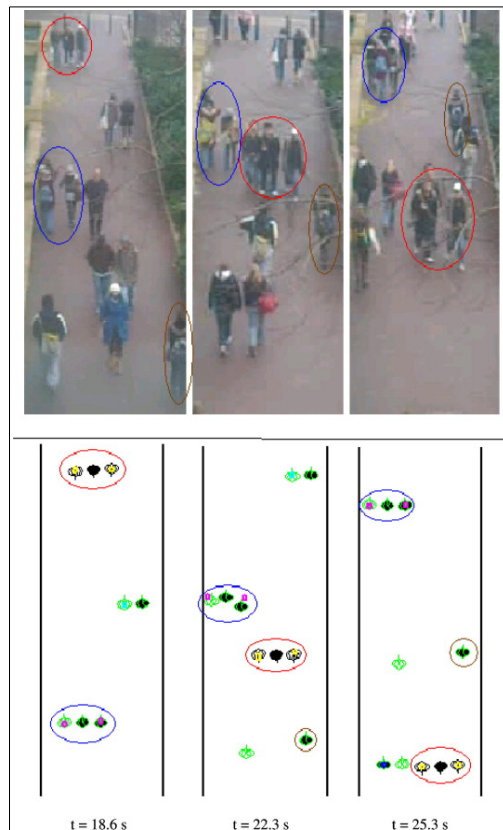


Fig 07, 08, 09: Análisis de movimiento de masa peatonal (ORCA)⁷⁹

79 Optimal Reciprocal Collision Avoidance.

Estos sistemas, en un primer nivel de complejidad como el establecido, están constituidos por agentes autopropulsados – como los *boids* de Reynolds – y la preferencia de su movimiento y orientación viene determinada por unas reglas básicas de percepción local, no siendo capaces de modificar su conducta a partir de ninguna estrategia avanzada.

Una investigación similar a las simulaciones de Reynolds, es la realizada por Tamás Vicsek y Eshel Ben-Jacob⁸⁰ para describir el movimiento de las colonias de bacterias. Al igual que los *boids* de Reynolds, estas autómatas disponen de energía propia para autopropulsarse y una cierta autonomía de movimiento para acelerar o frenar. Pero a diferencia de éstos, Vicsek y Ben-Jacob introdujeron un cierto grado de aleatoriedad para que las bacterias no obedecieran siempre a estas reglas básicas, observando cómo el sistema era sensible a estas fluctuaciones en la transición de fase: si el nivel de ruido es bajo, las bacterias adoptan un comportamiento colectivo, todas se desplazan en la misma dirección, y a medida que se aumenta el ruido, tienden a ir creando pequeños grupos y a desplazarse en remolino. Si el nivel de ruido excede el punto crítico, el comportamiento de cada partícula es completamente aleatorio, desaparece cualquier indicio de cohesión y la velocidad del grupo desciende a cero.

A finales de la década de 1980, Dirk Helbing⁸¹ en colaboración con Péter Molnár⁸² (Universidad de Stuttgart), empezó a desarrollar estudios sobre el concepto de *sinergia*⁸³ y movimiento de multitudes. Este tipo de simulaciones están basadas en el conflicto entre las preferencias internas del individuo y las circunstancias externas del entorno que obligan a modificar su conducta: tengo que aminorar mi ritmo porque la aglomeración de pea-

80 BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, pp. 150-154.

81 Dirk Helbing (ETH Zürich) ha desarrollado trabajos pioneros sobre el comportamiento de multitudes: <http://www.soms.ethz.ch/research/researchhigh>

82 BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, pp. 156-164.

83 Dirk helbing en *Sinergia. Encuentros «nuevas fronteras de la ciencia, el arte y el pensamiento»*, en Ars Santa Mònica, 2011. <http://www.youtube.com/watch?v=ceFHWqANGEQ> [consultado 06/09/12]

tones me impide avanzar mas rápido. Estos modelos se rigen por una serie de normas parecidas a las vistas en Reynolds o Vicksec, pero en éstos, la tendencia a formar grupos (gregarismo) se introduce como una nueva variable en función del contexto y que veremos en el último ejemplo.

Los modelos de Helbing-Molnár tomaron como referencia inicial la descripción realizada por la psicóloga Karen Horney⁸⁴ sobre el modo de interacción entre la gente: “moverse hacia los demás”, “alejarse de los demás” y “moverse contra los demás”. Entendiendo el movimiento bien como metáfora o en sentido literal.

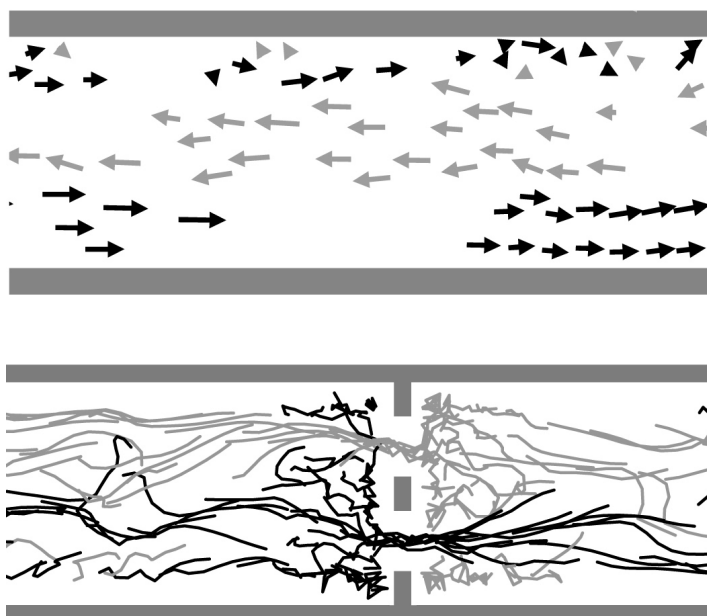


Fig. 10 y 11: Modelo de Helbing-Mólnar para el estudio del tránsito de peatones en una calle estrecha y un pasillo con dos puertas.

Aunque se puede apreciar una cierta dinámica de grupo, estos modelos no tienden a unificar sus movimientos. A diferencia de los *boids* o las moléculas autopropulsadas de Vicsek, estos agentes intentan mantener el movimiento en la dirección deseada y a una velocidad determinada, preservar el espacio personal, evitar los choques y alcanzar su objetivo que puede ser la puerta de salida de un gran centro comercial.

84 Citado en BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, p. 156.

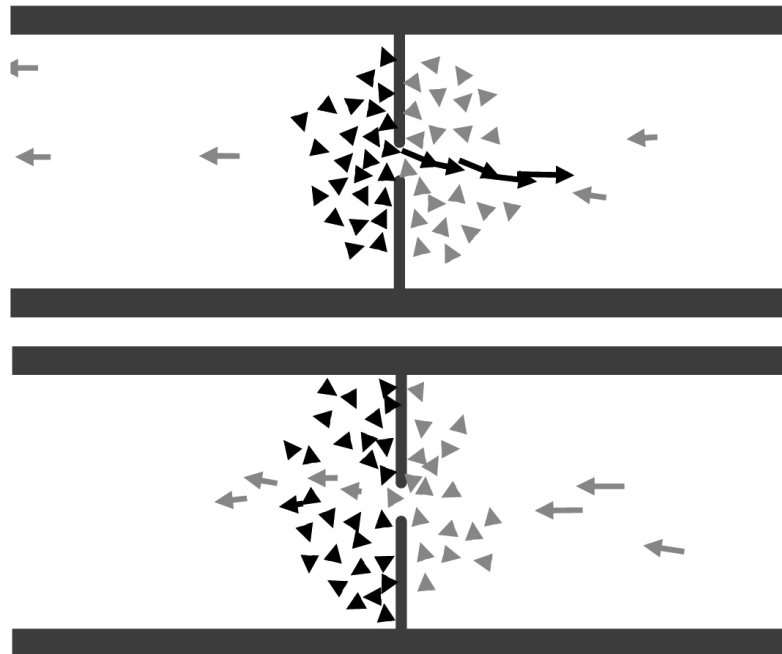


Fig. 12: Modelo de Helbing-Mólnar para el tránsito de peatones de una habitación a otra por una sola puerta.

Existen muchas implementaciones sobre modelos de este tipo aplicadas al tráfico de carreteras, al movimiento de peatones, a la planificación urbana o la evolución de senderos⁸⁵ en espacios abiertos como los jardines. Entre los diferentes casos, destacaremos aquí los estudios sobre las catástrofes provocadas por una conducta irracional de la multitud, tales como la situación de pánico en la evacuación de un local o las avalanchas producidas por el apresuramiento de la masa en ocupar las primeras filas de un concierto. Dirk Helbing y Tamás Vicsek⁸⁶ en 1990, estudiaron este fenómeno con el objetivo de estudiar si es posible predecir el comportamiento de la multitud en situaciones de conducta irracional. Estos modelos contemplaban dos cuestiones fundamentalmente:

85 Op. Cit., pag. 163

86 HELBING, Dirk, FARKAS, Illés, y VICSEK, Tamás: "Simulating dynamical features of escape panic" en *Nature* nº 407, 2000. Texto online: <http://angel.elte.hu/panic> [consultado 06/09/2012]

En primer lugar, cómo interpretar el concepto de pánico en parámetros de dinámica e interacción: a medida que aumenta la sensación de amenaza, los agentes incrementarán su velocidad de desplazamiento y la fuerza de rozamiento o inhibición de la gente por evitar el contacto. Con estas simulaciones se podía visualizar que si la gente intentaba abandonar racionalmente el espacio, con calma y una velocidad moderada (menos de metro y medio por segundo), entonces eran capaces de evacuar la sala. Pero a medida que la gente es presa del pánico, se empieza a producir un incremento inversamente proporcional entre el aumento de velocidad y el tiempo de desalojo, que superado un cierto umbral provoca embotellamiento o atasco en la puerta de salida.

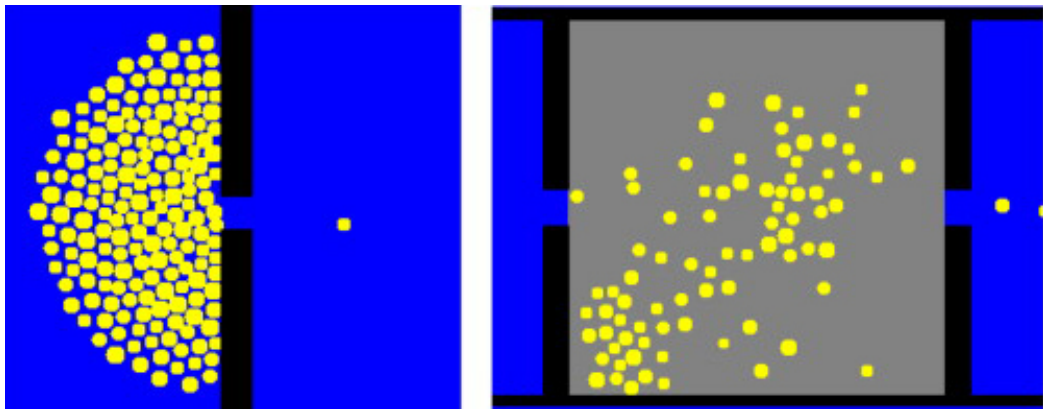


Fig. 13: Modelo de Helbing-Vicsek para la evacuación de un espacio en situación de pánico.

En segundo lugar, una relación entre el comportamiento individual o el comportamiento colectivo de la masa. Helbing y Vicsek introdujeron esta variable en modelos que contemplaban la posibilidad de que existieran diferentes puertas de evacuación. Los resultados obtenidos, demostraron que una cierta tendencia al espíritu gregario podía ser buena, ya que si alguien encuentra una salida, es probable que otros la encontraran. Pero superado cierto umbral de gregarismo, el efecto se invierte y las consecuencias son desastrosas, ya que puede llegar a obstruir una de las salidas si mucha gente empieza a seguir una corriente, mientras otras salidas apenas son usadas o ignoradas.

3.4. SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEJOS (CAS⁸⁷)

*“Learning is not a process of accumulation of representations of the environment; it is a continuous process of transformation of behavior through continuous change in the capacity of the nervous system to synthesize it.”*⁸⁸ (Humberto Maturana)

3.4.1. CÓMO LA ADAPTACIÓN CREA LA COMPLEJIDAD

Según Francis Heylighen⁸⁹, aquello que entendemos por Ciencias de la Complejidad, es lo que John Holland definió como Sistemas Adaptativos Complejos en su publicación *Hidden Order: How adaptation builds complexity*⁹⁰.

La principal aportación de los Sistemas Adaptativos Complejos (CAS) respecto a los modelos computacionales vistos hasta el momento es precisamente su «*adaptabilidad*», entendida en el sentido de capacidad de *aprendizaje* para desarrollar estrategias y tomar decisiones a partir de la acumulación de experiencia. Se trata por tanto de agentes con memoria cuyos patrones de comportamiento se modifican en el transcurso del tiempo.

87 (CAS, *Complex Adaptive Systems*): Utilizaremos las singlas en inglés ya que es la más extendida y facilita la búsqueda de recursos online y bibliográficos.

88 Citado en COLLINS, Dan, “Breeding the Evolutionary: Interactive Emergence in Art and Education” en *4th Annual Digital Arts Symposium: Neural Net{work}*. University of Arizona, Tucson, 2002. Texto online: <http://www.asu.edu/cfa/art/people/faculty/collins/emergence/emergence.htm> [consultado 06/09/2012]

89 HEYLIGHEN, Francis, CILLIERS, Paul, GERSHENSON, Carlos, “Complexity and Philosophy” en BOGG J., y GEYER, R., (ed.) , *Complexity, Science and Society*. Radcliffe, Oxford, 2007.

90 HOLLAND, John H., *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*. Helix Books, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1995.

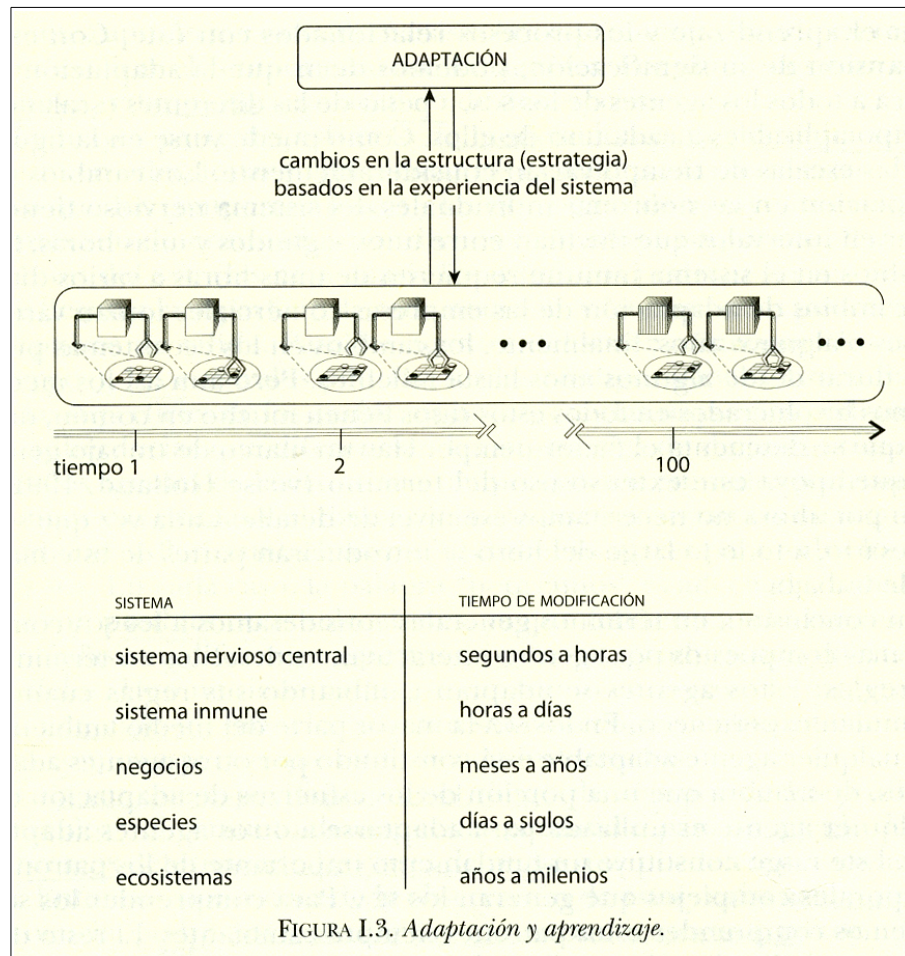


Fig. 14: Adaptación y escala temporal en los CAS. Holland, John H.(1995).

Otra de las propiedades fundamentales es la «*coherencia*» frente a los cambios: las interacciones bidireccionales, donde una partes se influyen a otras recíprocamente, generan un efecto de retroalimentación⁹¹ que permite mantener la coherencia u orden de nivel superior.

Otra propiedad de los CAS no menos importante y que mencionamos en el apartado de propiedades emergentes es el «*efecto amplificador*» o la extrema sensibilidad del sistema a sufrir grandes cambios a nivel global cuando se introduce una pequeña perturbación local.

Holland definirá las habilidades individuales de los agentes según una serie de reglas de estímulo-respuesta. Estas reglas, que hasta el momento las habíamos definido en los modelos anteriores como preferencias de

91 Ver Apartado 2.1.2.

desplazamiento dirigidas a un objetivo, con los CAS adquieren el valor de «*estrategia*», en tanto que permite a los agentes adaptarse y evolucionar dentro de una secuencia temporal.

Aunque estas estrategias tienen una relación directa con la escala temporal,⁹² los mecanismos que las describen son en gran medida comunes. Para ello, Holland describe siete conceptos básicos (cuatro propiedades y tres mecanismos) comunes para cualquier Sistema Adaptativo Complejo:

1. PROPIEDADES:

- Agregación: permite conformar grupos de agentes.
- No-linealidad: no existe una interpolación aritmética de causa-efectos.
- Flujos: permite la transferencia y transformación de recursos e información.
- Diversidad: permite una diferenciación del comportamiento entre unos agentes y otros, y otorga al sistema la propiedad de robustez.

2. MECANISMOS:

- Marbeteado o etiquetado: permite el reconocimiento en la diversidad de agentes.
- Modelos internos: representa el estado de los agentes y las funciones de interacción (*input-output*) con el entorno.
- Bloques de construcción: permite la estructura multi-nivel propia de los sistemas complejos.

Los CAS de Holland son un paradigma clave en el desarrollo e implementación⁹³ de sistemas complejos. Desde su aparición han sido tomados como referente en multitud de estudios basados en el modelado de agen-

92 Mientras que la adaptación de un sistema inmune puede llevar unas horas o días, la adaptación de un ecosistema se puede llegar a contabilizar por siglos o milenios.

93 Holland desarrolló una primera implementación de estos agentes adaptables en el modelo computacional *ECHO*, descrito en HOLLAND, John H., *El orden oculto. De cómo la adaptación crea la Complejidad*. Fondo de Cultura Económica, México, 2004, pp.107-170.

tes. Sus descripciones constituyen una buena guía para aprender a pensar en términos de agente, patrones de interacción, estrategias de aprendizaje y escalas temporales.

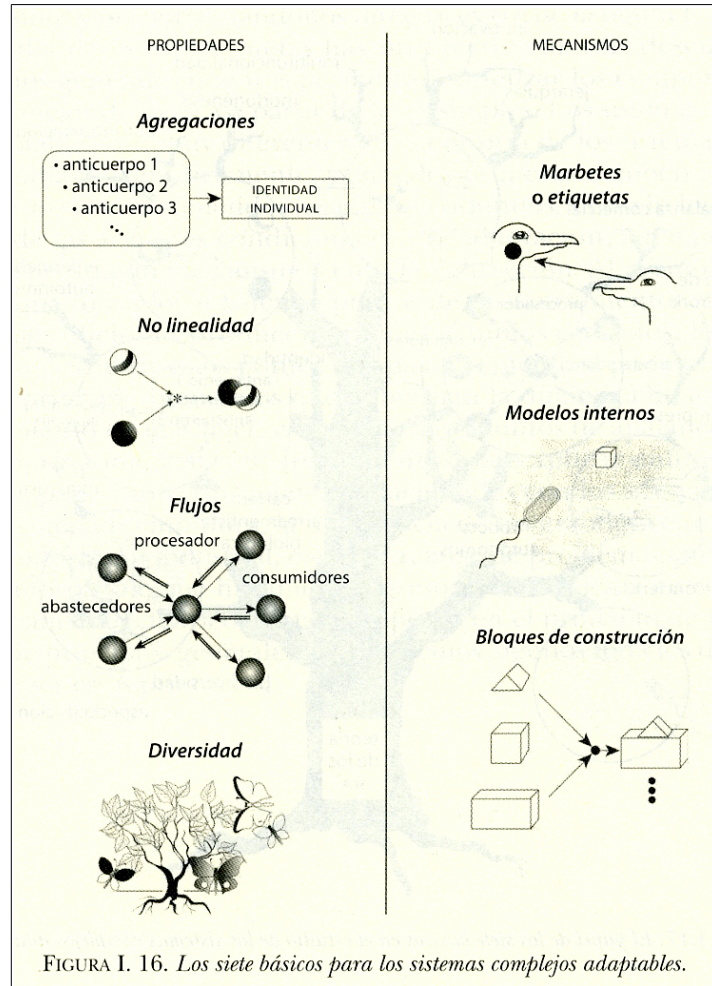


Fig. 15: Los siete Básicos para los CAS. Holland, John H.(1995)

3.4.2. ALGORITMO GENÉTICO

En un entorno complejo, los individuos no están capacitados para analizar una situación y calcular la estrategia que resulte más óptima. Sin embargo, dado que los agentes propuestos por Holland disponen de la capacidad para acumular experiencia, sí que es posible que a lo largo del tiempo puedan aprender nuevas estrategias mediante la evaluación de aquello que resulta más efectivo. Holland desarrolló para estos agentes adapta-

bles una serie de estrategias de optimización o búsqueda de soluciones inspiradas en la evolución biológica y que son conocidas como los Algoritmos Genéticos (AG)⁹⁴.

En la actualidad, estas estrategias para adaptarse y sobrevivir al medio “*natural*”, se han extendido a un amplio campo de investigación en la búsqueda de soluciones óptimas como pueda ser el diseño y control de redes, los motores de búsqueda, la gestión de datos, el análisis, diseño y optimización en los procesos industriales, el modelado de sistemas económicos para la predicción de fluctuaciones de mercado, etc.

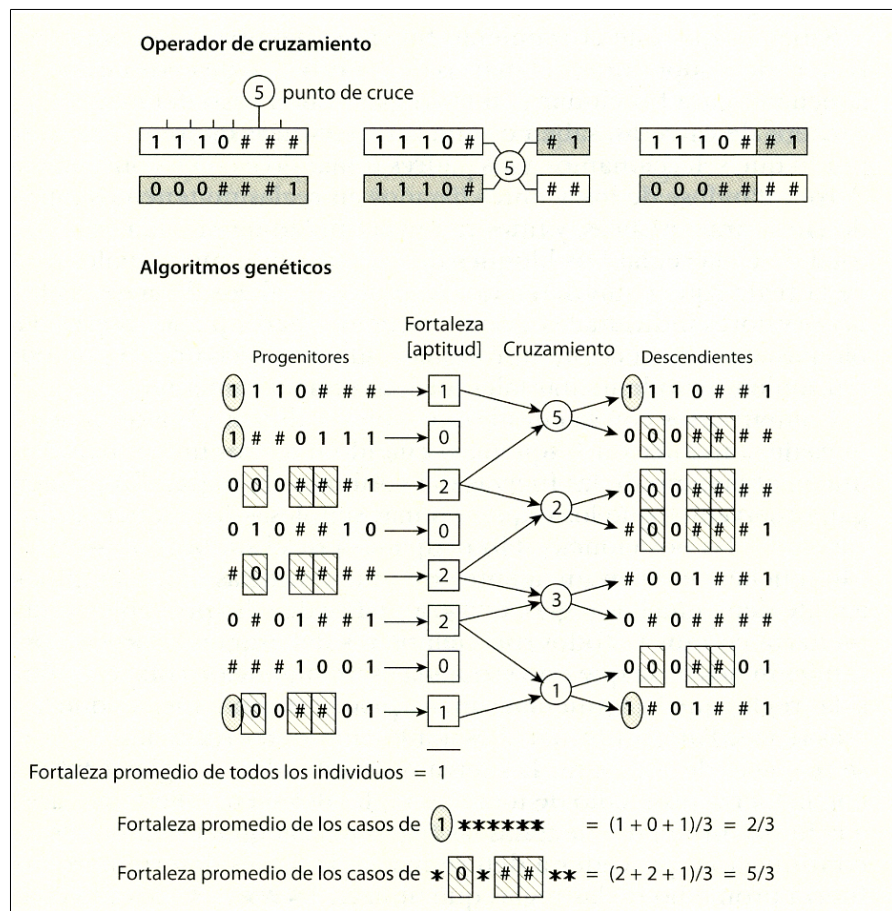


Fig. 16: Cruzamiento y Algoritmos Genéticos en los CAS.
Holland, John H.(1995)

94 op. Cit., pag 84-94.

Los métodos evolutivos requieren básicamente tres características: la reproducción de los individuos más aptos, la herencia de las características más efectivas, y mecanismos genéticos como la mutación o el cruce que permita el descubrimiento de nuevas estrategias. De manera secuencial, podríamos describir la evolución de estrategias proporcionadas por el AG de la siguiente manera:

| |
|---|
| 1. CONDICIONES INICIALES |
| <ul style="list-style-type: none"> - <i>Generar un población inicial aleatoria en un entorno específico.</i> - <i>Especificación genética: una estrategia inicial para cada individuo (cromosoma simulado).</i> |
| 2. INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA. (condición de parada) |
| <ul style="list-style-type: none"> - <i>Interacción de la población para determinar la efectividad de cada individuo.</i> - <i>Interacción con las condiciones del entorno.</i> |
| 3. FUNCIÓN DE APTITUD (FITNESS) |
| <ul style="list-style-type: none"> - <i>Evaluación de la efectividad para cada individuo.</i> - <i>Las estrategias más exitosas tienen mayores posibilidades de “adaptarse” y sobrevivir, mientras que las de menor éxito tenderán a desaparecer.</i> |
| 4. OPERADORES GENÉTICOS |
| <p><i>Determinar qué estrategias heredará la descendencia:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Cruce.</i> - <i>Mutación.</i> |
| 5. GENERACIÓN DE UNA NUEVA POBLACIÓN |
| <ul style="list-style-type: none"> - <i>La nueva población exhibirá patrones de comportamiento cada vez mas parecidos al de los individuos que tuvieron mayor éxito en la generación previa.</i> - <i>Bucle hasta que se cumple nuevamente la condición de parada (punto 2)</i> |

El concepto de AG aunque tiene su origen en los principios de selección natural de las teorías darwinistas, debe ser entendido en la actualidad como una estrategia de optimización llevada a cabo por los agentes dentro de una escala temporal. De igual modo que las máquinas cibernéticas

se van aproximando al objetivo mediante una minimización de errores, en este caso, el proceso se invierte en una maximización de las soluciones más eficientes.

Mediante la implementación del algoritmo genético, se abre una tercera vía⁹⁵ entre el método inductivo y deductivo, que permitirá observar a través de modelos computacionales la complejidad de sistemas en constante evolución, tales como las sociedades artificiales que veremos en el siguiente apartado.

95 MACAL, Charles M., y NORTH, Michael J., "Tutorial on agent-based modeling and simulation" en Kuhl, M., Steiger N., Armstrong F., y Joines, J. (ed.), *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 2005, p.1. Texto online: <http://informatics.org/wsc05papers/prog05.html> [consultado 06/09/2012]

3.5. MODELADO BASADO EN AGENTES (ABM⁹⁶). Aplicación en ecosistemas y sociedades artificiales

En adelante, consideraremos los modelos complejos como sistemas autoorganizados de agentes adaptables capacitados para dar respuesta a los cambios constantes que experimenta dentro de una secuencia temporal. A partir de los principios establecidos por John Holland en los CAS, el Modelado Basado en Agentes (ABM) se ha convertido en la actualidad en el paradigma de computación para sistemas complejos. Entre los diferentes campos de aplicación, citaremos a continuación dos casos de estudio en el desarrollo de ecosistemas sociales.

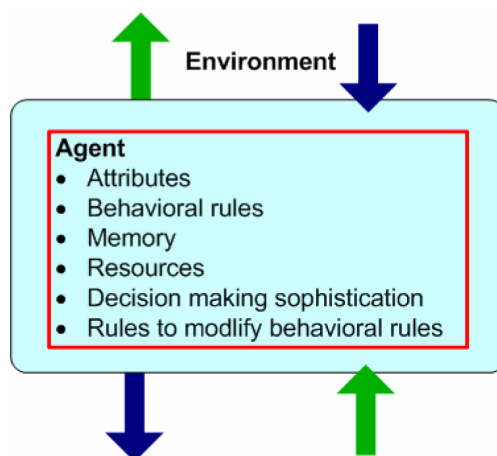


Fig. 17: Interacción Agente-Entorno en los ABM. MACAL, C., y NORTH, M. (2006).

3.5.1. DE LOS MICROMOTIVOS A LA MACROCONDUCTA (*bottom-up*)

*“Todas las actividades parecen coordinarse. Un taxi te lleva al aeropuerto. En el avión te dan de comer queso y mantequilla. Hay refinerías para elaborar el combustible del avión y camiones que lo transportan, asfalto para las pistas, electricidad para las escaleras mecánicas y, lo más importante de todo, pasajeros que quieren volar donde vuelan los aviones”*⁹⁷

⁹⁶ Utilizaremos las siglas en inglés: ABM (*Agent Based Modelling*)

⁹⁷ SCHELLING, Thomas C., *Micromotives and Macrobehavior*. WW. Norton, Nueva York, 1973, p. 20.

En 1978, el politólogo Thomas Schelling (Universidad de Maryland) publicó el libro *Micromotives and Macrobehavior*, considerado como uno de los estudios precursores en el modelado de sistemas sociales. Mientras que la tendencia en la sociología del siglo XX ha sido postular un comportamiento de grupo a priori, la tesis propuesta por Schelling es que dicha conducta colectiva no se puede promediar en términos estadísticos a partir de la psicología individual. Según Schelling, el comportamiento colectivo emerge de la interacción entre los agentes donde existe una relación de interdependencia y causalidad: las decisiones tomadas por unos agentes tienen efectos sobre las decisiones de otros. Es en este punto donde adquieren sentido los modelos computacionales, ya que permitirán observar los fenómenos emergentes de conducta colectiva a partir de la interacción entre los agentes sociales.

Una de las investigaciones más importantes realizadas por Schelling son los modelos de segregación cultural aplicados a estudios demográficos, que permiten visualizar por ejemplo, las causas por las cuales algunas diferencias culturales o ghettos persisten en el tiempo mientras otras se disuelven. Estos modelos se basan en el principio de semejanza o preferencia de los individuos a relacionarse con aquellos que comparten intereses o características comunes. Aunque son modelos en cierta medida limitados, resultan útiles para estudiar procesos de persistencia y homogeneización cultural.

Este tipo de modelos suelen visualizarse mediante un espacio reticular semejante al de los primeros autómatas celulares y donde cada celda representa una región geográfica. A estas regiones se le atribuyen unos rasgos culturales iniciales y la transmisión de los valores se produce mediante reglas de interacción. Se puede observar que en términos generales existe una tendencia a la homogeneización, un efecto de retroalimentación positiva donde las celdas se asemejan cada vez más a medida que se suceden las iteraciones.

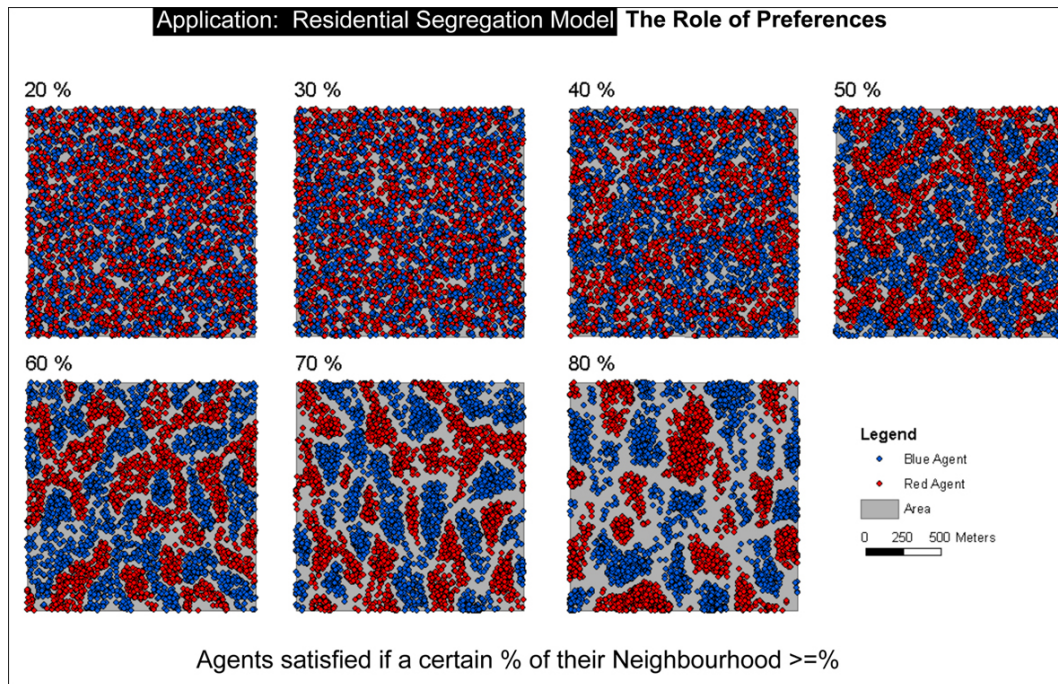


Fig. 18: Modelo de segregación residencial de *Shelling*. Implementación Crooks, A.(2008)

3.5.2. SUGARSCAPE. Laboratorio de sistemas sociales

*“Nuestras normas erigen los acantilados contra los que nos estrella-
mos. Programas informáticos como Sugarscape, pueden ser los fa-
ros, que nos permitan proyectar, si bien toscamente, las consecuen-
cias a largo plazo de ciertas normas”⁹⁸*

Podríamos considerar el ecosistema de *Sugarscape*, desarrollado por Robert Axtell y Joshua Epstein, como un paradigma dentro de los modelos computacionales basados en agentes, ya que su metodología combina aspectos que provienen de muchos campos de investigación, algunos de los cuales hemos visto en la presente investigación: principios de la cibernética como la retroalimentación, los primeros autómatas celulares, física

⁹⁸ AXTELL, Robert, y EPSTEIN, Joshua, *Growing artificial societies. Social Science from the Bottom Up*. The Brookings Institution, Washington, 1996, p.163.

aplicada a la dinámica de sistemas, la adaptabilidad y algoritmos genéticos de Holland, hasta llegar a los modelos de segregación que acabamos de ver con Shelling. Tal y como afirman sus autores, en *Sugarscape*⁹⁹ se combina la dinámica de agentes adaptables con un entorno de simulación basado en autómatas celulares.

En 1996, Robert Axtell y Joshua Epstein publican *Growing artificial societies*, donde presentan el modelo *Sugarscape* como un banco de pruebas multiuso para las teorías sociales: “*Pensamos en nuestro modelo como en un laboratorio de ciencia social (...) Podemos examinar el aumento de la población y las migraciones, el hambre, las epidemias, el desarrollo económico, el comercio, los conflictos y otras cuestiones sociales*”.¹⁰⁰

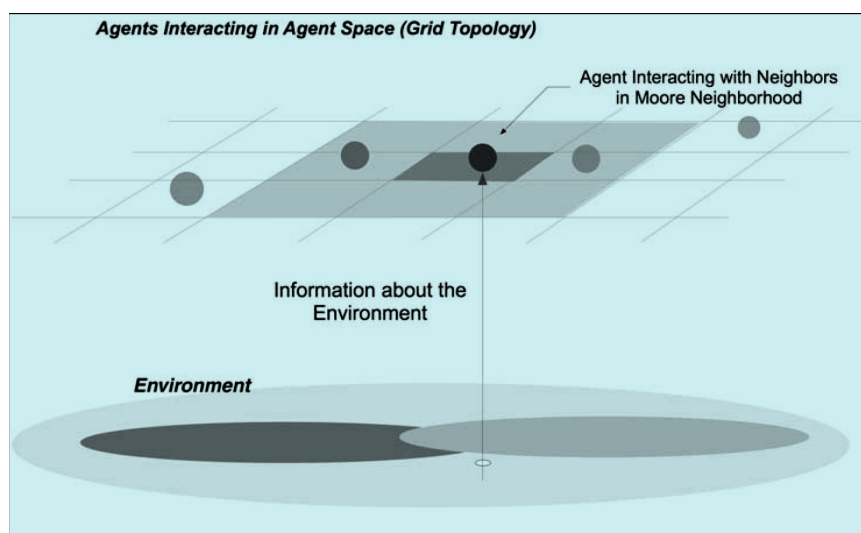


Fig.19: Estructura de un modelo en *Sugarscape*. Epstein&Axtell.(1996).

Básicamente, en *Sugarscape* se puede representar todo tipo de escenario. Los agentes habitan las celdas y tienen el instinto de buscar el azúcar o alimento. Las cañas de azúcar vuelven a crecer al cabo del tiempo. A su vez, los agentes interactúan entre ellos en base a todo tipo de normas que les permiten trabajar, comerciar, luchar, reproducirse, intercambiar

99 Op. Cit., pag. 19.

100 Joshua M. Epstein, citado en PETERSON, I., “The gods of Sugarscape”, en *Science News*, Vol. 150, nº 21, 1996, p. 332. Texto online: http://www.sciencenews.org/sn_arch/11_23_96/bob1.htm [consultado 06/09/2012]

rasgos culturales, etc. En definitiva, el modelo Sugarscape proporciona una buena comprensión sobre como surgen las estructuras sociales, instituciones, costumbres y conductas a partir de la interacción entre agentes.

Su libro *Growing artificial societies* representa una buena guía para la comprensión y el desarrollo de propuestas ecosistemas artificiales. Como veremos en el siguiente apartado, algunos de los proyectos que analizaremos sobre A-Life Art, en cierta medida presentan pautas de comportamiento semejantes al ecosistema *Sugarscape*. Todo dependerá de las características que queramos definir para nuestro sistema artificial.

3.5.3 IMPLEMENTACIÓN ABM

La implementación de los ABM se basa en lenguajes de Programación Orientada a Objetos (OOP), tales como C++, Java o Python. Existe un gran variedad de *frameworks* y librerías de código abierto especializadas en la simulación de ecosistemas sociales. Entre ellas podemos destacar algunas como *Netlogo*¹⁰¹, *MASON*¹⁰², *Swarm*¹⁰³ y *Repast*¹⁰⁴. A excepción de la primera, que cuenta con un lenguaje propio, el resto se basan en lenguaje Java y pueden implementarse en plataformas de desarrollo integral como Eclipse. Al mismo tiempo, los centros de investigación sobre complejidad ofrecen información muy detallada sobre los procedimientos y programación de modelos entre los que destacamos, el Santa Fe Institute (SFI) de Nuevo México,¹⁰⁵ uno de los centros más importantes sobre estudios de complejidad, el Centro de Análisis Espacial Avanzado CASA¹⁰⁶, las publicaciones sobre modelos del centro International Conflict

101 <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> [consultado 06/09/2012]

102 <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/> [consultado 06/09/2012]

103 http://www.swarm.org/index.php/Main_Page [consultado 06/09/2012]

104 <http://repast.sourceforge.net/> [consultado 06/09/2012]

105 <http://www.santafe.edu/> [consultado 06/09/2012]

106 Pertenece a la University College London- UCL.
<http://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/latest/publications> [consultado 06/09/2012]

Research¹⁰⁷ (ETH-Institute of Technology Zurich) o las publicaciones online de *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*¹⁰⁸, editado por Nigel Gilbert .

Consideramos que un estudio detallado de estos frameworks, que cuentan ya con la implementación Java de clases y métodos para el modelado de agentes, puede ser una fuente de recursos técnicos al alcance de aquellos investigadores que estén interesados en el desarrollo de sistemas complejos, y que en la mayoría de los casos en la práctica artística están vinculadas con el concepto de Vida Artificial, denominado comúnmente como A-life Art.

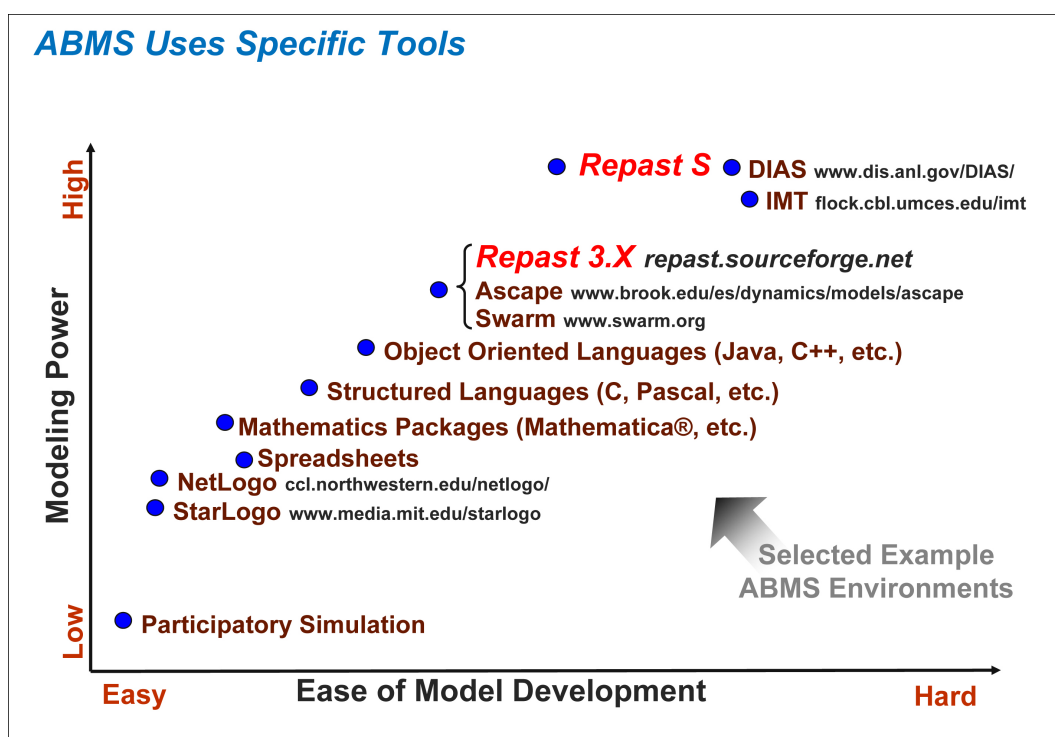


Fig.20: Tabla de softwares ABM, según nivel de dificultad y productividad.

107 <http://www.icr.ethz.ch/teaching/archive/compmodels/ss2004/models> [consultado 06/09/2012]

108 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html> [consultado 06/09/2012]

4. ECOSISTEMAS VIRTUALES EN EL A-LIFE ART

En este apartado realizaremos un análisis de la metodología llevada a cabo en la implementación de ecosistemas virtuales dentro de la disciplina del A-life Art. Consideraremos la importancia de la interacción entre usuario y sistema, definiendo para este contexto el concepto de «*interactividad emergente*». Por una cuestión de extensión, limitaremos el estudio a aquellas propuestas basadas en el diseño interfaces digitales.

4.1. DE LOS MODELOS DE CONTROL A LOS SISTEMAS AUTOORGANIZADOS

Dentro del ámbito artístico, el interés por las teorías de sistemas complejos se remonta a mitad del siglo XX, momento en el que empieza a consolidarse el pensamiento sistémico a través de la cibernética y la Teoría General de los Sistemas (TGS). La interpretación de estas teorías científicas abrirá nuevas perspectivas sobre el concepto de interactividad, produciéndose un desplazamiento del diseño de objetos al diseño de sistemas. Según Dieter Steiner¹⁰⁹, de aquí se derivarán fundamentalmente dos interpretaciones: una primera, el diseño de «*modelos autónomos*» inspirados en la TGS y que tienden hacia la creación de sistemas abiertos y autoorganizados; y una segunda, los «*modelos de control*» que siguen las teorías cibernéticas, basándose en la confrontación humano-máquina y en los principios de control externo.

En la primera dirección, podemos destacar como paradigmáticos los trabajos realizados por Hans Haacke, a los que se refiere ya en término de sistemas¹¹⁰. *Condensation Cubes*¹¹¹ son contenedores de agua que reaccionan a las condiciones atmosféricas externas, generando el ciclo infinito de condensación y precipitación de gotas de agua. Otro ejemplo a destacar sería *Ant-Coop* donde se puede observar el proceso de autoorganización de una colonia de hormigas.

Mientras que este tipo de trabajos se centran normalmente en procesos físicos o biológicos, encontramos en la otra dirección propuestas basadas

109 Citado en WITZGALL, Susanne, "Art as an open system. Complexity and Interaction in Art since 1960" en *Living Systems*. Christa Sommerer & Laurent Mignonneau. ACTAR/Arts Santa Mònica, Barcelona, 2011, p. 31.

110 "Utilizo la palabra sistema exclusivamente para referirme a cosas que no son sistemas en términos de percepción, sino que son entidades físicas, biológicas o sociales". SIEGEL, Jeanne, "An Interview with Hans Haacke," en *Arts Magazine*, Vol. 45, nº 7, 1971, p. 18.

111 "Su comportamiento es comparable al de los organismos vivos que reaccionan de manera flexible a los cambios del entorno". Citado en WITZGALL, Susanne, "Art as an open system. Complexity and Interaction in Art since 1960" en *Living Systems*. Christa Sommerer & Laurent Mignonneau. ACTAR/Arts Santa Mònica, Barcelona, 2011, p. 33.

en el control del sistema a través de una serie de “instrucciones” externas dadas por el usuario, y donde es más o menos previsible la respuesta. Es lo que Jack Burnham denominará como “*cybernetic games*”. Un ejemplo clásico de estos modelos de control es el *CYSP1 (Cybernetic Spatiodynamic Sculpture)* de Nikolas Schöffer, una escultura constructivista que reacciona a los movimientos del usuario o a las condiciones lumínicas del entorno: “*Podemos ver una relación causal entre estímulo y reacción*”.¹¹²

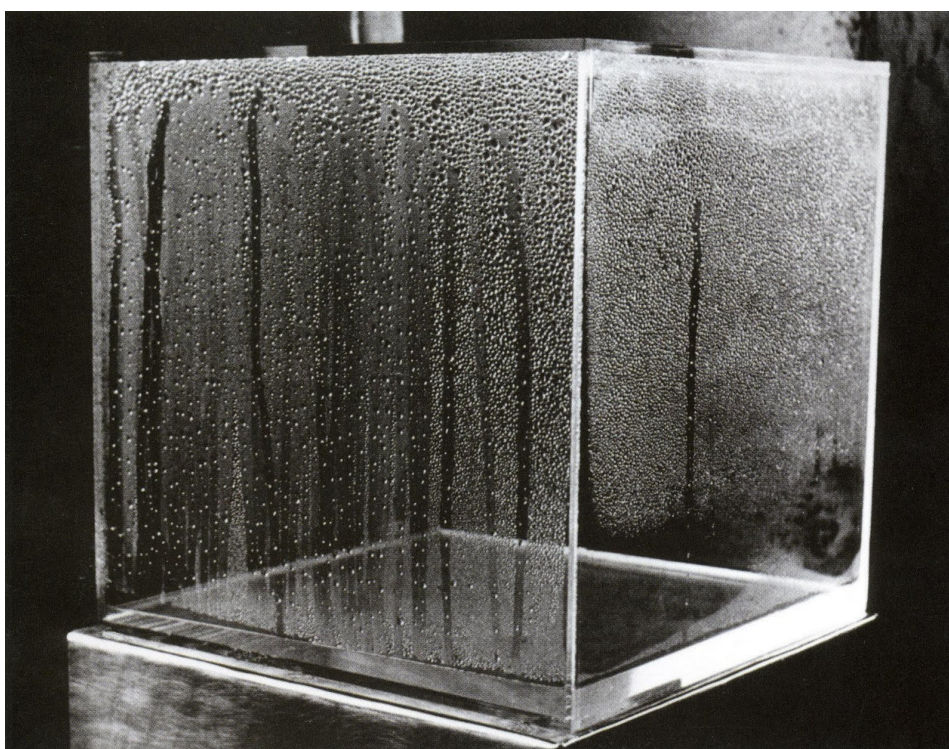


Fig. 21: *Condensation Cubes*. Hackke, Hans. (1962).

Tal y como afirma Susanne Witzgall¹¹³ estos primeros trabajos, ya sean interactivos o reactivos, suelen mostrar mayor interés por el control del sistema que en comprender el propio proceso de autoorganización. Habrá que esperar a finales de la década de los ochenta, con la consolidación de las teorías sobre complejidad y gracias a los avances en computación,

112 BURNHAM, Jack, *Beyond Modern Sculpture: The Effects of Science and Technology on the Sculpture of this Century*. George Braziller, New York, 1969, p. 333.

113 WITZGALL, Susanne, “Art as an open system. Complexity and Interaction in Art since 1960” en *Living Systems*. Christa Sommerer & Laurent Mignonneau. ACTAR/Arts Santa Mònica, Barcelona, 2011, p. 34.

para que se produzca un cambio de perspectiva desde los sistemas de control al desarrollo de sistemas autoorganizados. Todo ello tendrá una influencia directa sobre el concepto de interactividad¹¹⁴ en el arte electrónico, donde el usuario se convierte en parte del sistema gracias a los mecanismos de «*feedback*» (apartado 2.1.2) consiguiendo que ambos se influyan reciprocamente. *Very Nervous System* de David Rockeby (reconocido como pionero del arte interactivo) es un claro ejemplo donde el usuario es un componente del sistema, y sus movimientos causan cambios constantes en el sonido, que a su vez influye en sus propios movimientos:

*“La instalación es un complejo bucle de retroalimentación. La respuesta no es simplemente “negativa” o “positiva”, inhibidora o de refuerzo (...) Ambos se influyen mutuamente hasta que se pierde la noción de control y la relación se convierte en encuentro y participación ”.*¹¹⁵



Fig. 22: *Very Nervous System*. Rockeby, David. (1986-90).

114 Para un recorrido histórico sobre el concepto de interactividad, recomendamos el texto de Dieter Daniels “Strategies of Interactivity”, en SOMMERER, Christa, LAKHMI, C. Jain, y MIGNONNEAU, Laurent,(ed.), *The Art and Science of Interface and Interaction Design*. Studies in Computational Intelligence, Springer, Berlin, 2008.

115 <http://www.davidrokeby.com/vns.html> [consultado 06/09/2012]

4.2 EMERGENCIA Y VIDA ARTIFICIAL

La consideración de sistemas autoorganizados viene reforzada por la aparición de conceptos como el de Vida Artificial, propuesto por el científico Christopher Langton a finales de los años ochenta. El concepto de emergencia será fundamental para el desarrollo de estos sistemas que asemejan los procesos de la vida: *“El concepto clave en la vida artificial es el comportamiento emergente. La vida natural emerge de las interacciones organizadas de un gran número de moléculas no-vivas, sin que exista un control global responsable del comportamiento de sus partes. (...) La vida es el comportamiento que emerge de todas las interacciones locales entre los comportamientos individuales. Es este proceso construido “de abajo hacia arriba”, la determinación local del comportamiento lo que la vida artificial emplea en su aproximación metodológica primaria para la generación de comportamientos que asemejan a la vida.”*¹¹⁶

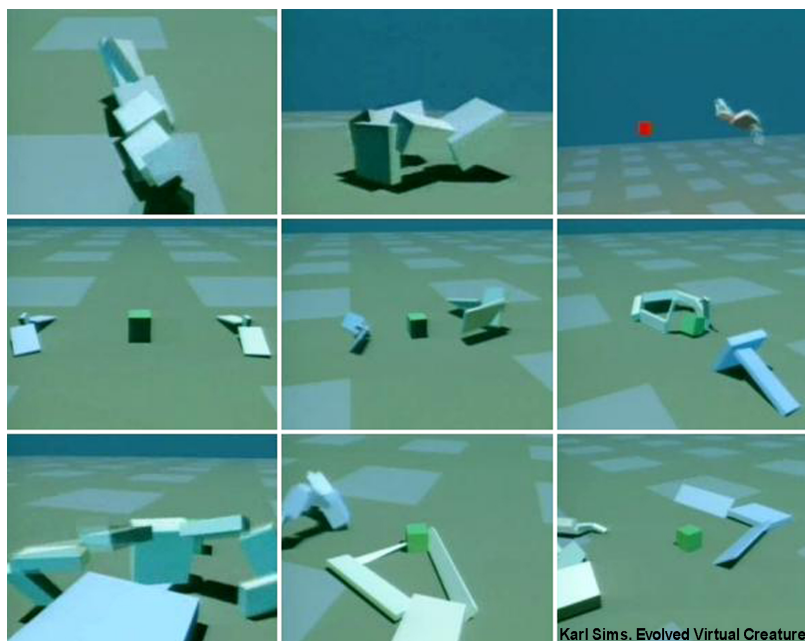


Fig. 23: *Evolved Virtual Creatures*. Sims, Karl. (1994).

116 LANGTON, Christopher G., "Artificial Life" en LANGTON, C., (Ed.), *Artificial Life*. Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.

Así, el concepto de emergencia debe ser entendido más como un proceso que como una propiedad inherente de la materia. La investigadora Mitchell Whitelaw, en su libro *Metacreation*¹¹⁷ dedicado al A-life Art, amplía esta noción definiendo la emergencia mediante una estructura de dos niveles:

- Un nivel local o computacional, donde las interacciones complejas vienen dadas por una serie de normas. Es lo que se denominaría el substrato tecnológico, el hardware y el software.
- Un nivel global, el de la simulación, donde el comportamiento surge como resultado de las interacciones del nivel inferior produciendo patrones novedosos en el tiempo, no reducibles al substrato tecnológico.

Tal y como afirma Whitelaw¹¹⁸, el A-life Art se define en gran medida por una constante evocación a los resultados emergentes del sistema. Muchos de los artistas¹¹⁹ que trabajan en este ámbito, hacen una referencia explícita en sus escritos a esa búsqueda de un comportamiento impredecible, a los efectos de novedad o sorpresa que emergen en los sistemas de vida artificial. Todo ello no debe confundirse con un posicionamiento ingenuo que aspira únicamente a sorprender al usuario en este tipo de obras. Se trata más bien de un posicionamiento ideológico, y si cabe tecnológico, en el que el artista cede parte del control de la obra mediante el diseño de sistemas capaces a su vez de ser «*productores*». En la mayoría de los casos, son proyectos que nacen desde una perspectiva interdisciplinar, muchos de ellos en colaboración con centros de investigación tecnológicos y científicos. Kenneth Rinaldo concibe sus obras como «*sistemas emergentes*», un nuevo paradigma de cambio global, una convergencia interdisciplinar fomentada por la creciente conectividad. “*El principal*

117 WHITELAW, Mitchell, *Metacreation. Art and Artificial Life*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004, p.214.

118 Op. Cit., pag 215.

119 Op. Cit., pag 223. Whitelaw se refiere entre otros, a artistas como John D. Mitchell y Robb E. Lovelles, Jane Prophet, Troy Innocent, Richard Brown, Simon Penny, Mauro Annunziato y Piero Pierucci, etc.

*concepto (...) es la emergencia, la relación entre sistemas sin un controlador central que dirija sus comportamientos*¹²⁰

Llevado a última instancia, el concepto de emergencia podría relacionarse con el propio acto creativo. No se trata tan solo de diseñar sistemas con los que interactuar, sino que estos sistemas sean a su vez productores de información, en lo que Whitelaw ha denominado “*Metacreación*”: “*Crear la creación, la variación, la alteridad*”.¹²¹

Existe todo un campo de desarrollo teórico realizado por artistas que trabajan sobre el concepto de emergencia en el ámbito del A-life Art, y que podría abrir futuras líneas de investigación. Aquí nos limitaremos a nombrar aquellos, que desde la revisión bibliográfica, consideramos más interesantes: Simon Penny¹²², Bill Seaman¹²³, Philip Galanter¹²⁴, Jon McCormack¹²⁵ y Alan Dorin¹²⁶. A estos dos últimos nos referiremos para tratar el tema de Ecosistemas Artificiales, en los apartados 4.4 y 4.5.

120 RINALDO, Kenneth, “The Flock,” en *Leonardo*, Vol 31, n°5, 1998, p. 406.

121 WHITELAW, Mitchell, *Metacreation. Art and Artificial Life*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004, p.226.

122 http://simonpenny.net/texts/texts_toc.html [consultado 06/09/2012]

123 <http://billseaman.com/> [consultado 06/09/2012]

124 <http://philipgalanter.com/research/#online> [consultado 06/09/2012]

125 <http://diotima.infotech.monash.edu.au/~jonmc/sa/> [consultado 06/09/2012]

126 ADORIN, Alan, “A Survey of Virtual Ecosystems in Generative Electronic Art” en, ROMERO, Juan, y MACHADO, Penosual, (Ed.), *The Art of Artificial Evolution*. Natural Computing Series, Springer, Berlin, 2008.

4.3 EMERGENCIA INTERACTIVA

Una consideración fundamental en la producción de este tipo de obras, son los diferentes niveles de interactividad del usuario con el sistema. Mientras que algunos están diseñados como sistemas cerrados, donde la interacción se da únicamente a nivel interno del sistema, en otros casos, se contempla la interacción de un sistema abierto ya sea con el entorno físico, con el usuario, o entre ambos.

Ellen Wagner¹²⁷ define la interacción como “*eventos recíprocos que requieren al menos dos objetos y dos acciones. La interacción ocurre cuando estos objetos y los eventos se influyen mutuamente uno al otro.*”

Los sistemas naturales son productivos, en el sentido de crear nueva información. Para ir más allá de los mecanismos reactivos, es necesario por tanto que el sistema produzca como resultado (*output*) información nueva, no existente o predeterminada en el sistema. A partir de conceptos desarrollados como la Inteligencia Artificial o las redes neuronales, los sistemas pueden aprender nuevos comportamientos y evolucionar sus respuestas, basándose en la información de entrada (*input*) del usuario y en los estímulos del entorno. Con el transcurso del tiempo, ciertas propiedades empiezan a “emerger”, tales como los patrones de autoorganización y regulación. En este sentido, desde una perspectiva del Alife Art podríamos decir, tal y como afirma Dan Collins¹²⁸, que el sistema ideal – o el nivel de máxima interactividad – sería un mecanismo que fuera simultáneamente productor y producto.

Diremos por tanto, que se consiguen altos niveles de interactividad cuando se produce una influencia mutua, de reciprocidad entre el usuario y el sistema. La interactividad a la que aquí nos referimos, particularmente

127 Citado en COLLINS, Dan, “Breeding the Evolutionary: Interactive Emergence in Art and Education” en *4th Annual Digital Arts Symposium: Neural Net{work}*. University of Arizona, Tucson, 2002. Texto online: <http://www.asu.edu/cfa/art/people/faculty/collins/emergence/emergence.htm> [consultado 06/09/2012]

128 Op. Cit.

aquel tipo que aprovecha el comportamiento emergente, requiere que ambas partes, usuario y máquina, participen en un ciclo de retroalimentación productivo y de intercambio. El usuario debe ser capaz de interactuar con el sistema de manera que produzca información, y a su vez éste influya en futuras acciones del usuario. Es lo que Dan Collins ha denominado «*emergencia interactiva*»¹²⁹ y que podría medirse por el grado en que se alcanza este nivel óptimo de reciprocidad, además de la capacidad *productiva* del sistema para generar nuevo contenido, no predecible.

En el apartado tres, analizamos los modelos de computación realizando una distinción entre dos niveles de complejidad: aquellos sistemas que eran capaces o no, de aprender y modificar su conducta como respuesta al entorno. Estableciendo un paralelismo con los diferentes niveles de interactividad respecto al usuario, diríamos que el primer nivel de complejidad se correspondería con sistemas “reactivos”(aunque existan grados de interactividad a nivel interno), y el segundo con un nivel de “máxima interactividad”, donde existe una transferencia de información, un efecto de retroalimentación entre todas las partes del sistema y a su vez con el usuario.

Quede claro, que estas diferencias en cuanto a los niveles de interactividad entre usuario y sistema, no tienen una equivalencia en cuanto a la calidad de los trabajos, sino que depende del tipo de sistema que nos planteemos diseñar, y que mayores grados de interactividad no tienen porqué ser proporcionales a mayores grados de participación del usuario.

Entre los ejemplos de sistemas “reactivos” y altamente participativos, podemos destacar los trabajos pioneros realizados por Golan Levin y Zachary Lieberman, como *Messa di Voce*¹³⁰ y algunos trabajos de Victoria Vesna, como *The Mood Swings*.¹³¹

129 Op. Cit.

130 <http://www.flong.com/projects/messa/> [consultado 06/09/2012]

131 <http://victoriavesna.com/index.php?p=projects&item=4> [consultado 06/09/2012]

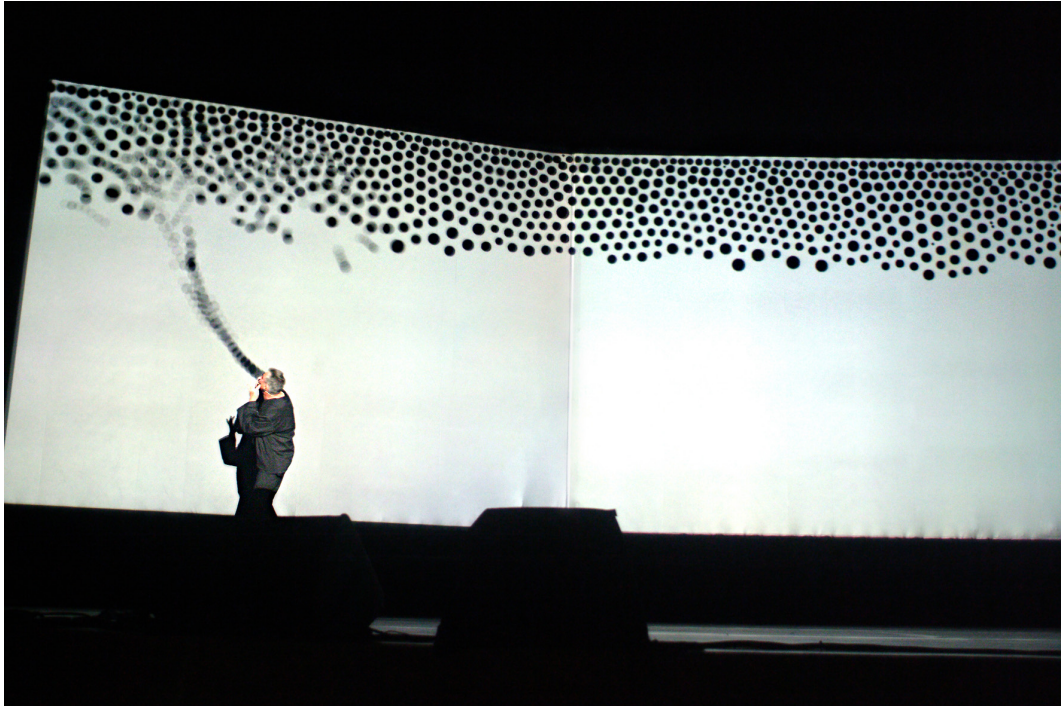


Fig. 24: *Messa di Voce*. Levin, Golan, y Lieberman, Zachary.(2003).



Fig. 25: *The Mood Swings*. Vesna, Victoria.(2006).

En esta línea, podemos encontrar numerosos ejemplos que simulan sistemas de partículas abiertos a la interacción o participación del usuario. Estos sistemas están sujetos a una serie de restricciones en la programación que trata de simular los comportamientos propios de la física¹³²: partículas autopropulsadas, con características de velocidad, aceleración, gravedad, fricción, y que admiten la interacción del usuario como un elemento más del entorno de interacción con el que colisionan, rebotan, etc. De alguna manera, podríamos decir que el usuario entra a formar parte de las leyes físicas que rigen el sistema y su presencia se virtualiza.

Ejemplos más próximos ya a los sistemas de vida artificial, los encontramos en trabajos como *Delicate Boundaries*¹³³ de Chris Sugrue, que simula una colonia de organismos, cuyo comportamiento está condicionado por una preferencia de orientación hacia la presencia del usuario. Resulta sobre todo interesante la relación establecida entre el dispositivo y el entorno físico, rompiendo la barrera que normalmente separa la interfaz digital del usuario. Aunque los agentes interaccionan entre sí y se rigen por unas reglas semejantes a los *Boids*¹³⁴ de Reynolds, podemos considerar que el nivel de interacción con el usuario es “reactivo”, ya que resulta imposible modificar la conducta global del sistema y este actuará siempre de manera más o menos previsible, según un criterio programado que busca la presencia del usuario.

La diferencia entre estos sistemas, y aquellos en los que se producen altos niveles de interactividad, está en que éstos últimos son sistemas provistos de agentes adaptativos, capaces de evolucionar y cambiar el comportamiento en el transcurso del tiempo. Joan Soler-Adillon¹³⁵, en su obra *Digital Babylon* hace referencia a una “interactividad acumulativa”, según

132 A todo este tipo de modelos nos referimos en el apartado 3.3.

133 <http://csugrue.com/delicateboundaries/> [consultado 06/09/2012]

134 Boids, ver apartado 3.2.2.

135 SOLER-ADILLON, Joan, “Emergencia e interactividad: A-Life Art como paradigma para la creación de experiencias de comunicación interactiva” en *Hipertext.net*, nº 8, UPF, 2010. Texto online: http://www.upf.edu/hipertextnet/numero-8/a-life_art.html [consultado 06/09/2012]

se van sucediendo los diferentes periodos evolutivos. La implementación de este tipo de sistemas de Vida Artificial, se consigue mediante técnicas como los algoritmos genéticos que ya vimos con Holland, y se corresponden entre otros, con el diseño de ecosistemas virtuales que veremos a continuación.

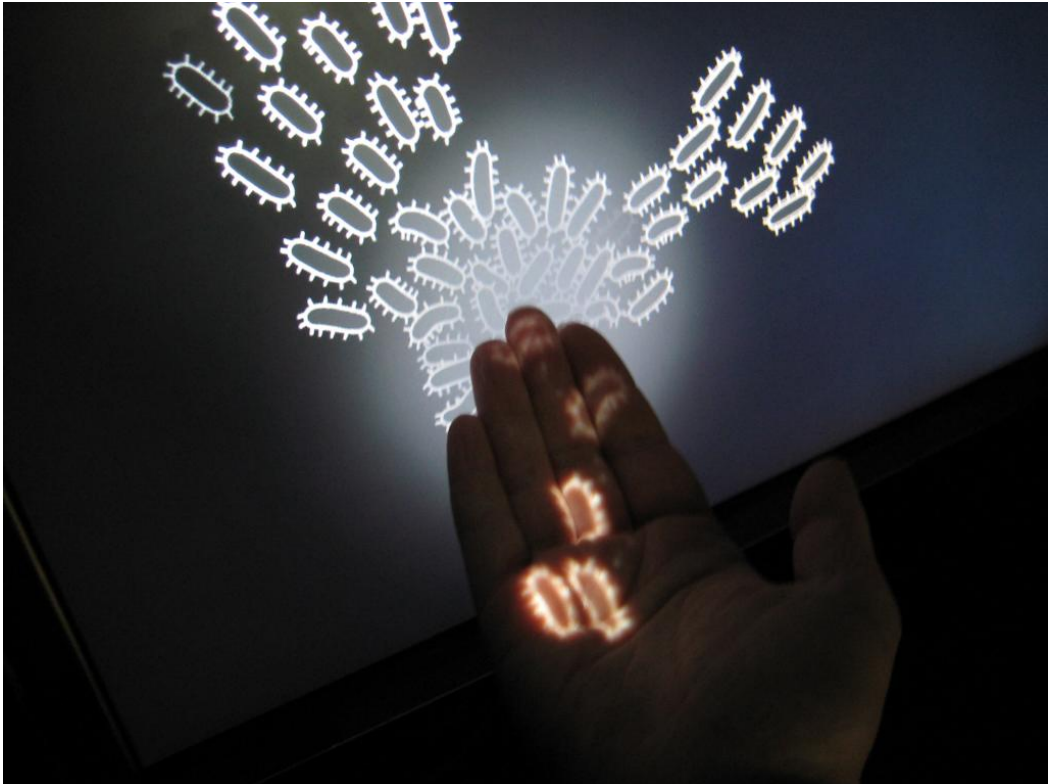


Fig. 26: *Delicate Boundaries*. Sugrue, Chris.(2007).

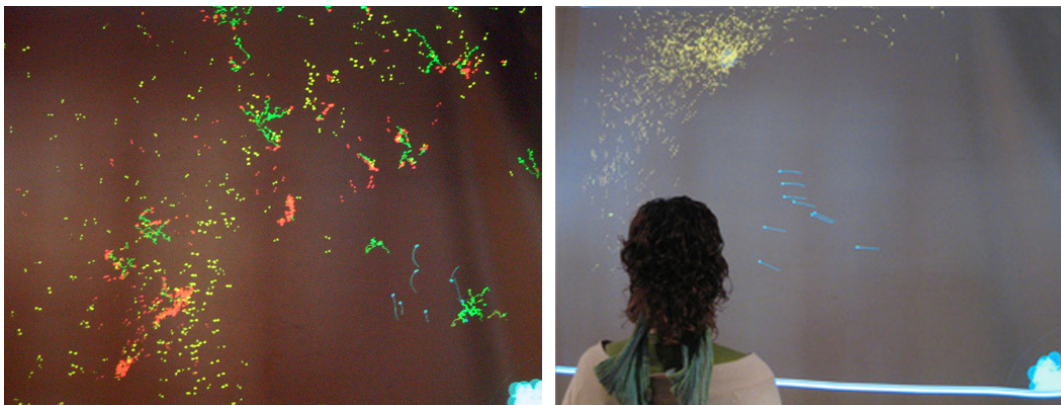


Fig. 27: *Digital Babylon*. Soler-Adillon, Joan. (2005).

4.4. ECOSISTEMAS VIRTUALES COMO PARADIGMA EN EL A-LIFE ART. PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO

Con el término de Ecosistema Artificial nos referiremos al tipo de computación que simula procesos característicos de los ecosistemas biológicos. La implementación de este tipo de simulaciones se realiza mediante el Modelado Basado en Agentes que vimos en el apartado 3.5, que no se limitaba exclusivamente a los sistemas naturales, sino que podía ser extensible a diversas disciplinas como ya vimos. Sin embargo, en el A-life Art, la mayoría de ejemplos que encontramos sobre ecosistemas artificiales hacen referencia a algún tipo de sistema orgánico, más allá de una apariencia naturalista.

De manera resumida, en los ecosistemas artificiales los organismos se desarrollan e interactúan con un entorno físico. Mientras que las micro-interacciones de los agentes están especificadas formalmente en el modelo, las macro-propiedades emergen en la simulación. La Computación Evolutiva opera en una escala temporal, y requiere la implementación de una función de *fitness* o adecuación para evaluar la aptitud relativa de los individuos. El proceso evolutivo resultará de la adaptación de la población al entorno, de manera que los organismos aptos elaborarán características adecuadas a los ambientes cambiantes.

Investigadores como Jon McCormack¹³⁶ y Alan Dorin¹³⁷ consideran el concepto de ecosistema artificial como un paradigma o metodología apropiada para el diseño de sistemas en el ámbito del A-life Art. Considerando los procesos evolutivos como la fuerza impulsora que genera novedad en los sistemas biológicos, McCormack propone aprovechar este potencial sub-

136 <http://diotima.infotech.monash.edu.au/~jonmc/sa/>

137 Alan Dorin, en el texto "*A Survey of Virtual Ecosystems in Generative Electronic Art*", realiza una descripción metodológica de los ecosistemas en el A-life Art, a partir de cuatro propiedades básicas, que ya vimos de manera extensa en el tercer apartado sobre Sistemas Complejos Adaptativos: Coherencia, escala temporal múltiple, producción autónoma de novedad y respuesta a la perturbación. ROMERO, Juan, y MACHADO, Penosual, (Ed.), *The Art of Artificial Evolution*. Natural Computing Series, Springer, Berlin, 2008.

yacente en los fenómenos emergentes y aplicarlo en posibles soluciones al proceso creativo.

Cada uno de estos sistemas son altamente específicos, de manera que resulta difícil analizar las diferentes propuestas artísticas en búsqueda de unas directrices generales sobre una metodología a seguir. Es por ello, que proponemos a continuación unos conceptos básicos¹³⁸ descritos por Jon McCormack para el diseño de ecosistemas artificiales. A su vez, esto nos permitirá analizar posteriormente las obras sobre A-life atendiendo a las características más particulares de cada proyecto, y centrándonos en cuestiones como la interactividad del usuario y la producción de fenómenos emergentes.

1. Los conceptos de genotipo y fenotipo utilizados en los algoritmos evolutivos y que constituyen la base de cada individuo en el modelo.
2. Diversidad: una colección de individuos representa una especie y el sistema puede acoger múltiples e interactuantes especies.
3. El concepto de entorno como un modelo con reglas físicas para la interacción, donde los individuos se mueven y habitan.
4. El concepto de “salud” de cada individuo, como una medida escalable de la aptitud para la supervivencia en el entorno. La salud normalmente se ve afectada por la habilidad del individuo para adquirir recursos del entorno.
5. El concepto de ciclo de vida para cada individuo, donde éste es sometido a estados de desarrollo que pueden afectar sus propiedades, interacciones físicas y comportamiento.

138 McCORMACK, Jon, “Artificial Ecosystems for Creative Discovery”, en THIERENS, D., (Ed.), *Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2007*. Vol. 1, ACM, New York, pp. 301-307.

6. Un modelo de recursos de energía y metabolismo, utilizado por las especies en el entorno para producir las acciones.

7. Para que las poblaciones evolucionen, debe haber algún tipo de presión selectiva, una medida de *fitness* o aptitud: Las especies compiten por unos recursos finitos, las estrategias capaces de explotar eficientemente los recursos tendrán un rango mayor para reproducirse y dominar al resto de la población.

8. En el contexto de la resolución de problemas, las especies individuales pueden representar estrategias de cooperación o conflicto en parte de la solución global.

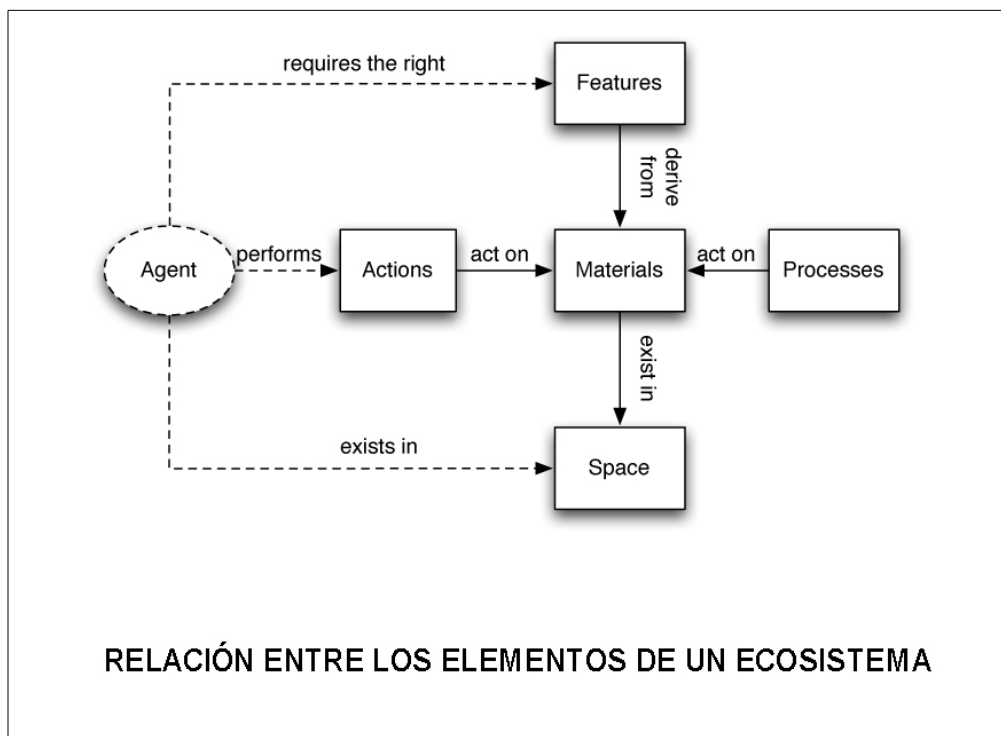


Fig. 28: Modelo para un Ecosistema. McCormack, Jon. (2007).

4.5. REFERENTES ARTÍSTICOS DE ECOSISTEMAS VIRTUALES

Existe un gran número de proyectos artísticos¹³⁹ basados en el concepto de ecosistema artificial, así como implementaciones de software ya sea dentro del ámbito del A-life Art, como en la producción cinematográfica o el desarrollo de video juegos. No es nuestra intención elaborar un listado de todos ellos, sino analizar algunos ejemplos atendiendo a aspectos particulares sobre interactividad y la producción de fenómenos emergentes.

Al principio, el arte generativo se centra sobre todo en la producción de paisajes abstractos o morfologías en constante evolución, mediante el uso de técnicas como los algoritmos genéticos o la recursividad de la geometría fractal. Uno de los científicos influyentes en el primer arte generativo será Richard Dawkins que desarrollará en 1986 el famoso algoritmo *Bio-morphs*, descrito en su libro *Blind Watchmaker*¹⁴⁰ para ilustrar el potencial de la teoría evolucionistas en el diseño de nuevas formas. Entre los artista que llevarán a la práctica estas técnicas podemos destacar los primero trabajos de William Latham,¹⁴¹ mediante su software *Ghosts of sculptures*, así como los trabajos de Karl Sims con su serie *Genetic Images*, mostrado en el Ars Electronica¹⁴² en 1991. Ejemplos más actuales los encontramos en el trabajo de los alemanes Erwin Driessens y Maria Verstappen, *E-volver*¹⁴³ (2006), que utiliza una población de criaturas virtuales del tamaño de un pixel que interaccionan con los colores de su entorno local. El resul-

139 Para una visión ampliada sobre el tema, recomendamos el libro *Metacreation* de Whitelaw sobre A-life Art, así como otros más centrados en aspectos técnicos como son *The Art of Artificial Evolution* de J. Romero y P. Machado, *Design by Evolution* de P. Hingston y L. Barone, así como *Artificial Life Models in Software*, de M. Komosinski y A. Adamatzky. (Ver en apartado Bibliografía).

140 DAWKINS, Richard, *The Blind Watchmaker*. W.W. Norton & Company, Inc., New York, 1986.

141 LATHAM, William, y TODD, Stephen, *Evolutionary Art and Computers*. Academic Press, London, 1992.

142 SIMS, Karl, "Artificial Evolution for Computer Graphics", en *Computer Graphics. ACM SIGGRAPH '91 Conference Proceedings*. Vol. 25, nº 4, Las Vegas, Nevada, 1991, pp. 319-328. Texto online: <http://www.karlsims.com/papers/siggraph91.html> [consultado 06/09/2012]

143 <http://notnot.home.xs4all.nl/E-volverLUMC/E-volverLUMC.html> [consultado 06/09/2012]

tado de esta colección de agentes evolucionando, es un paisaje dinámico que evoca imágenes de satélite de la tierra.

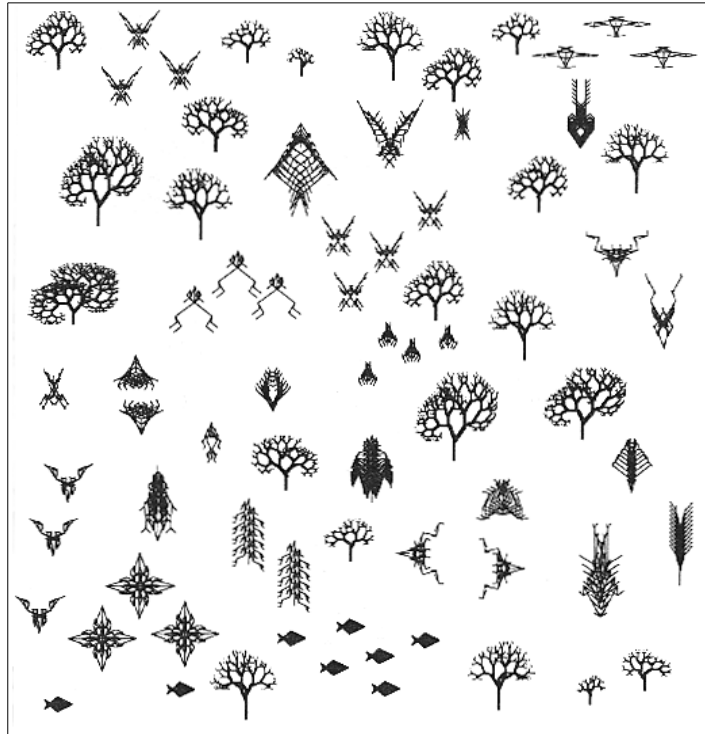


Fig. 29: *Biomorphs*. Dawkins Richard.(1985).



Fig. 30: *Genetic Images*. Sims, Karl. (1993).



Fig. 31: *E-volver*. Driessens y Verstappen. (2006).

A parte de este tipo de paisajes abstractos, la mayoría de los ecosistemas en el A-life Art hacen referencia a algún tipo de sistema natural, entidades que resultan más o menos reconocibles, y que más allá de su apariencia naturalista evocan a algún tipo de células, organismos o criaturas extrañas habitando un entorno virtual. Un ejemplo claro del tipo de comportamientos que presentan estos ecosistemas lo encontramos en *Diseased Squares*¹⁴⁴ de Alan Dorin. Aunque se trata de un modelo autónomo cuyos procesos evolutivos se producen de manera independiente al comportamiento del usuario, exhibe toda una serie de propiedades básicas como las que acabamos de ver en el apartado anterior: los organismos nacen, se desarrollan hasta la madurez, se reproducen, mueren y se descomponen con el tiempo. Con una apariencia visual muy minimalista, los agentes se representan mediante rectángulos y su estado de “salud” se percibe mediante cambios cromáticos y un software de sonido.

Por lo general, la interactividad suele ocupar un papel central en el diseño de ecosistemas artificiales y suele ser determinante en los procesos evolutivos del sistema. La construcción de estos ecosistemas se realiza mediante la analogía establecida entre la estructura biológica y el sistema de computación. La confrontación entre el binomio naturaleza-artificio, entre la realidad física o la realidad virtual es abordada por los artistas de diferentes maneras, ocupando un papel central la interacción con el entorno

144 DORIN, Alan, “A Survey of Virtual Ecosystems in Generative Electronic Art”, en ROMERO, Juan, y MACHADO, Penosual, (Ed.), *The Art of Artificial Evolution*. Natural Computing Series, Springer, Berlin, 2008, pp. 300-302.

físico o el usuario. Pasamos a analizar diferentes maneras de resolver esta confrontación entre vida artificial y su original natural.

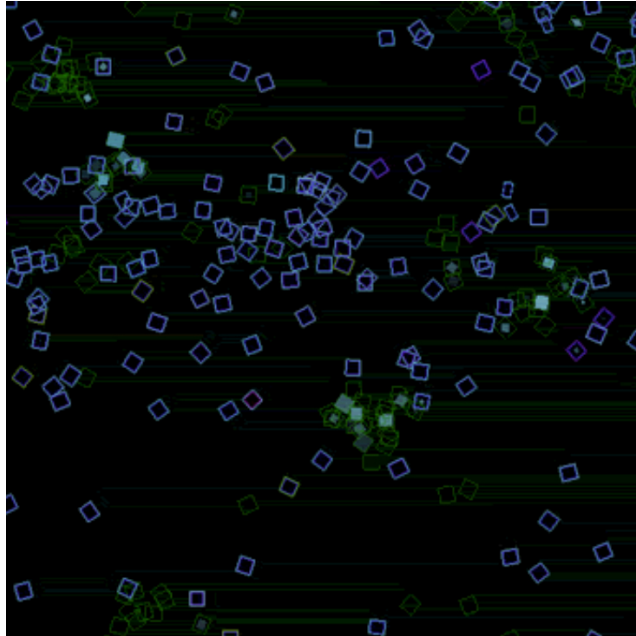


Fig. 32: *Diseased Squares*. Dorin, Alan. (2005).

A-VOLVE

En 1998, los artistas Christa Sommerer y Laurent Mignonneau participaron en un programa de investigación sobre sistemas complejos, en Múnich dirigido por John L. Casti, con el objetivo de crear un punto de encuentro entre las disciplinas de arte y ciencia. En la publicación *Art and Complexity*¹⁴⁵, se reúnen los resultados de dicho programa, donde Sommerer y Mignonneau argumentan de manera detallada la base conceptual de su trabajo a partir de las teorías científicas sobre complejidad.

145 SOMMERER, Christa, y MIGNONNEAU, Laurent, "Modeling Complexity for Interactive Art Works on the Internet", en CASTI, J., y KARLQVIST, A., (Ed.), *Art and Complexity*. Elsevier Science B.V, Amsterdam, 2003, pp 85-107.

Sommerer y Mignonneau son pioneros en introducir el concepto de vida artificial dentro de los proyectos de arte interactivo, donde la interacción con el usuario juega un papel fundamental y la conexión entre lo real y lo virtual se resuelve a través de un cuidado diseño de la interfaz¹⁴⁶: *Plant growing* conecta el crecimiento de plantas virtuales con sus semejantes reales provistas de sensores para interacción; *Phototropy* donde la luz física nutre a los insectos virtuales, o *Life Writer*, donde el texto introducido por el usuario se convierte en el código genético que determina la morfología de las criaturas artificiales.

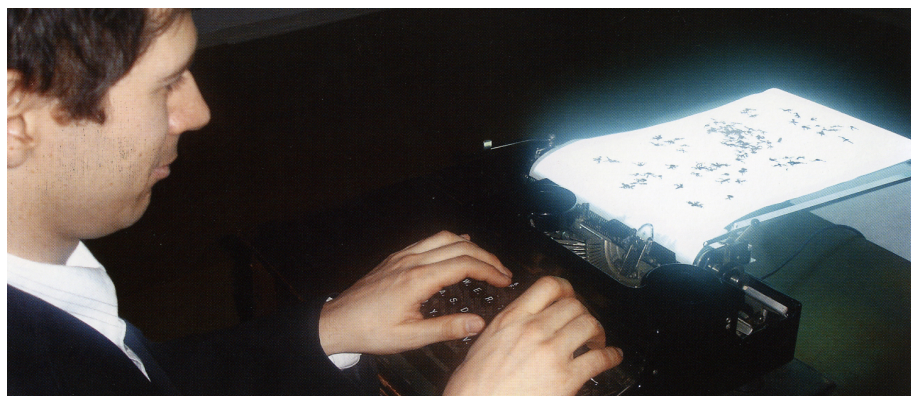


Fig. 33: *Life Writer*. Sommerer, Christa, y Mignonneau, Laurent. (2006).



Fig. 34: *Plant Growing*. Sommerer, Christa, y Mignonneau, Laurent. (1992).

146 SOMMERER, Christa, MIGNONNEAU, Laurent, y STOCKER, Gerfried, *Interactive Art Research*. Springer/Wien, New York, 2009.

Mediante la noción de “*el arte como sistemas vivos*” los artistas consideran su trabajo ya no como la producción de objetos estáticos o interacciones predefinidas, sino como procesos que asemejan la vida y caracterizados por “*las interacciones complejas entre entidades reales y virtuales*”.¹⁴⁷

En 1994, en colaboración con Tom Ray (biólogo y creador del sistema *Tierra*¹⁴⁸), Sommerer y Mignonneau desarrollaron el proyecto *A-volve*, un ecosistema donde los usuarios interactúan con criaturas virtuales en el espacio de un estanque lleno de agua. En un primer nivel de interacción, las criaturas son creadas por el usuario mediante una pantalla táctil, donde la morfología y el color determinarán el código genético que se traduce en la capacidad de moverse y su aptitud para sobrevivir en el ecosistema. Una vez diseñadas, las criaturas son liberadas en el estanque de agua donde el usuario, se convierte en parte del proceso evolutivo. La interacción se produce así en múltiples niveles: creación, interacción humano-criatura, interacción criatura-criatura, interacción humano-humano.



Fig. 34: *A-Volve*. Sommerer, Christa, y Mignonneau, Laurent. (1994).

147 WHITELAW, Mitchell, *Metacreation. Art and Artificial Life*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004, p.192.

148 <http://life.ou.edu/tierra/> [consultado 06/09/2012]

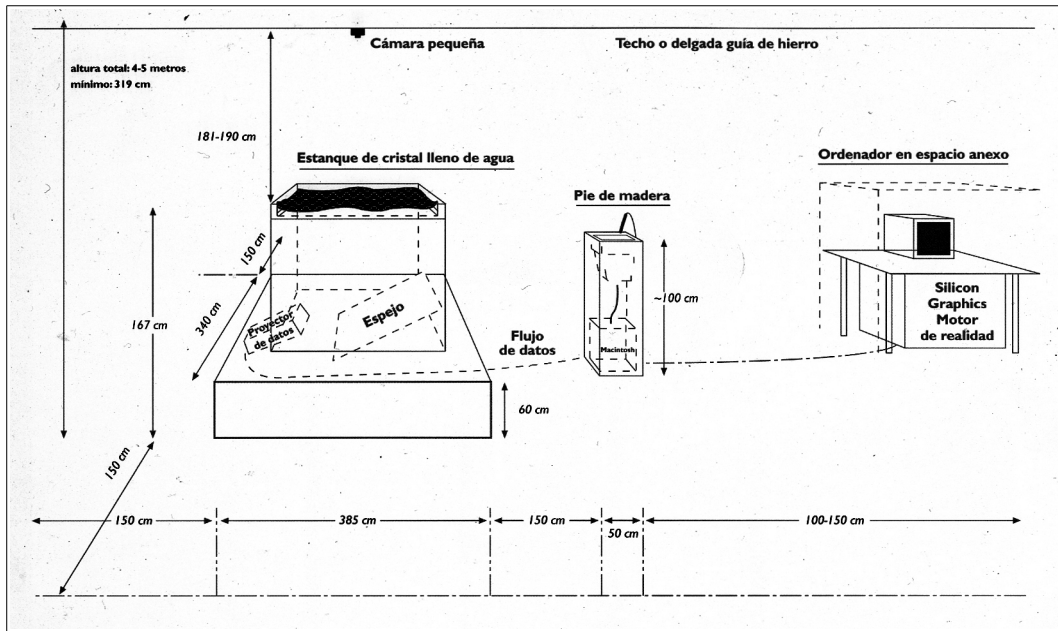


Fig. 35: A-Volve. Diseño de la instalación.

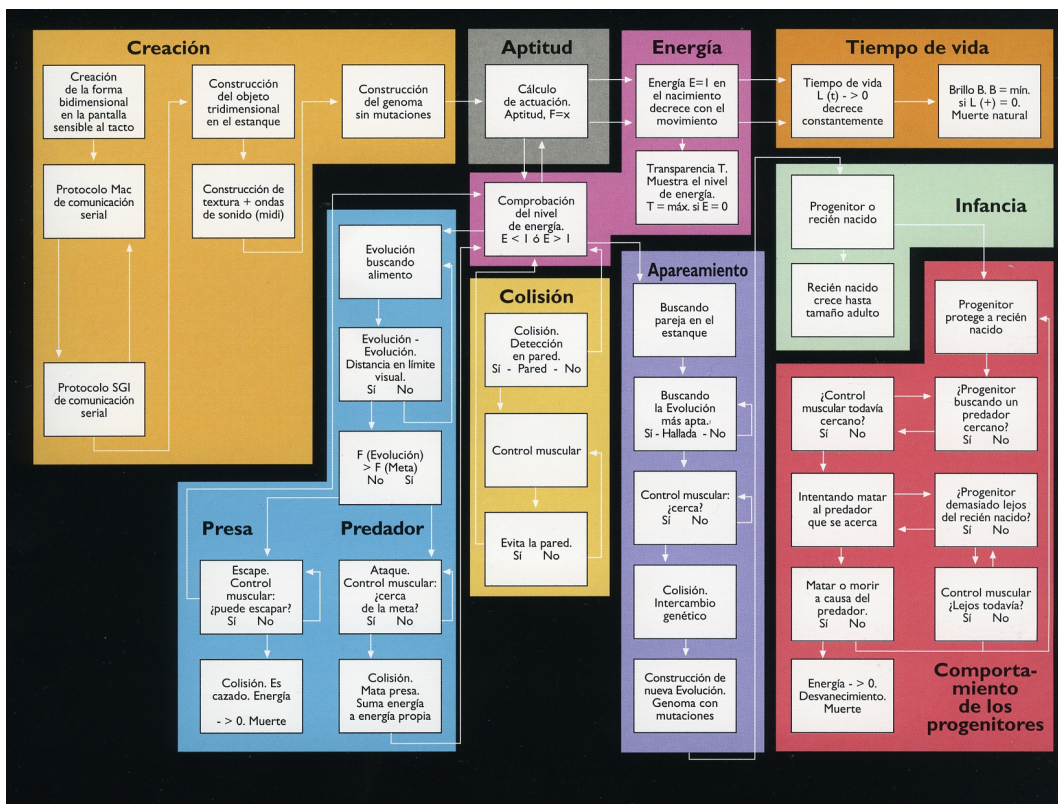


Fig. 36: A-Volve. Diagrama de Programación de Algoritmos Genéticos.

Los artistas consideran el diseño de interacción y la interfaz del usuario (el estanque) como el punto de encuentro entre la realidad y lo virtual, el medio que conecta la vida artificial con su entorno real: “*A-volve es un estanque de criaturas artificiales abierto a las influencias exteriores, reaccionando e interaccionando con su entorno natural y artificial. Las individualidades humanas y las creaciones, así como la evolución artificial son esenciales en el desarrollo de este entorno complejo semejante a la vida, donde le agua funciona como metáfora para el nacimiento y la evolución. A través de todo ello, A-volve reduce los límites entre lo real y lo irreal, conectando la realidad a la no realidad.*”¹⁴⁹

La construcción de este tipo ecosistemas virtuales supone todo un conjunto de modelos y abstracciones que permiten el paso de la biología a la computación. Sin embargo, en trabajos como los de Sommerer y Mignonneau – dada su evidente artificialidad – todo este proceso de codificación y mediación permanecen opacos. El genotipo y fenotipo se convierten en código para llevar a cabo toda una serie de comportamientos y restricciones que conforman la vida artificial. La mayoría de ejemplos que encontramos en el A-life Art se basan en esta dualidad, una realidad artificial dada que evoca de alguna manera a su original natural. Tal y como afirma Whitelaw, “*reconocemos estos sistemas como una abstracción mediatizada de los procesos naturales, pero este punto de mediación pasa desapercibido.*”¹⁵⁰ Ejemplos similares encontramos en *Technosphere*¹⁵¹, un ecosistema online creado por Jane Prophet, donde el usuario también puede crear los agentes, pero en este caso a partir de un catálogo prefijado de componentes.

149 SOMMERER, Christa, MIGNONNEAU, Laurent, y STOCKER, Gerfried, *Interactive Art Research*. Springer/Wien, New York, 2009, p.87.

150 WHITELAW, Mitchell, *Metacreation. Art and Artificial Life*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004, p. 93.

151 *TechnoSphere*, desarrollado por Jane Prophet, Gordon Selley, Rycharde Hawkes, Julian Saunderson, and Andrew Kind. Enlace online al proyecto: <http://www.janepropheet.com/old-website/technoweb.html> [consultado 06/09/2012]

ICONICA

En una dirección completamente opuesta, encontramos otro tipo de propuestas artísticas que rechazan de pleno esta hipotética dualidad entre realidad y simulación, despojando al sistema artificial de cualquier referencia a un supuesto original en la naturaleza. Es el caso por ejemplo de *Iconica*¹⁵², de Troy Innocent, que parte de la idea de que estos ecosistemas forman parte de un substrato tecnológico y son esencialmente una construcción de código. El sistema se inicia con seis categorías elementales: real, sintético, código, abstracto, subconsciente y metafísico. Aunque no tiene ninguna intención de apariencia natural, aprovecha los procedimientos estándar de la genética artificial, como la mutación y reproducción para generar un amplio rango de interacciones complejas. En la capa más compleja, el sistema está provisto de un “lenguaje icónico” que las entidades pueden utilizar para comunicarse entre ellas y con el usuario humano.



Fig. 37: *Iconica*. Innocent, Troy. (1999)

El lenguaje artificial de *Iconica* evidencia que el código es genotipo, fenotipo, lenguaje y comportamiento. En este sentido, *Iconica* es un tipo de inversión de los ecosistemas virtuales que hemos visto en los ejemplos anteriores. En lugar de establecer la analogía del artificio computacional con la naturaleza biológica, intenta describir el estado natural de la computadora, donde lo real y lo natural se desdibuja mediante el artificio.

152 <http://troyinnocent.net/> [consultado 06/09/2012]

EIDEA

Encontramos otros proyectos donde la transición entre el modelo virtual y su análogo real, se intenta resolver conectando el sistema artificial con el espacio físico de exhibición. *EIDEA*¹⁵³ (“Environment for the Interactive Design of Emergent Art”) es un ecosistema desarrollado por John D. Mitchell y Robb E. Lovelles y su comportamiento se basa en un modelo clásico predador/presa, donde las especies compiten y se adaptan entre ellas. Lo más interesante en *EIDEA* es que la generación de su mundo artificial mantiene una conexión con su propio entorno físico. El trabajo utiliza una estación meteorológica que recoge datos sobre la presión atmosférica, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, etc, de manera que cada uno de estos factores influye en el ecosistema virtual: los vientos fuertes interfieren en el vuelo de las aves, la temperatura influye en la biomasa y el metabolismo de las criaturas, sucediéndose periodos de mayor actividad con otros de hibernación. La visualización de este ecosistema, cuenta además con un software de sonido que recoge datos estadísticos del ecosistema virtual, población, nacimiento, muerte.

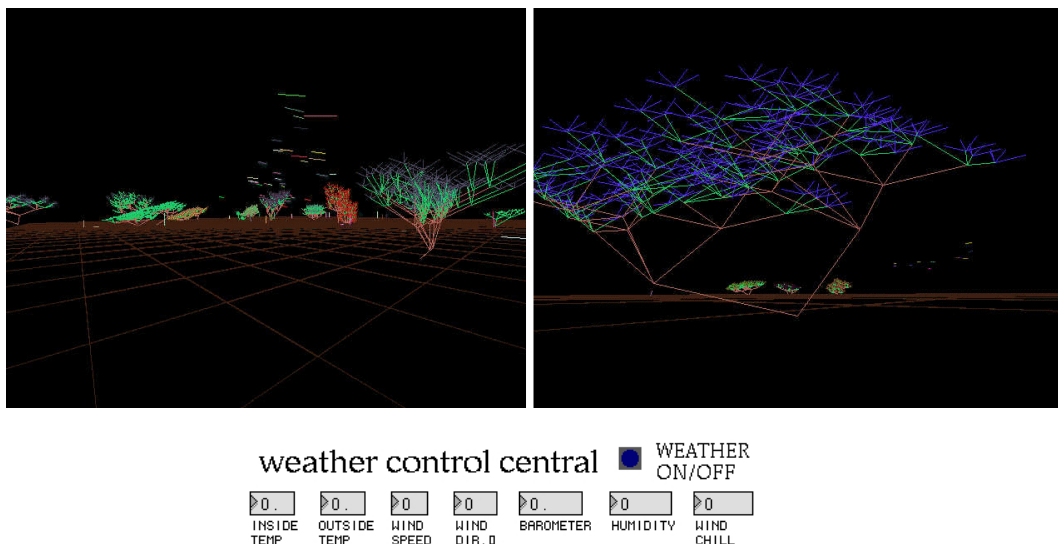


Fig. 38: *EIDEA*. Mitchell, John, y Lovelles, Robb.(1990).

153 <http://www.intelligentstage.com/Projects/eidea.early/eideapaper.html> [consultado 06/09/2012]

Mientras que para Sommerer y Mignonneau, el punto de encuentro está en una interfaz ideal entre el usuario y el sistema computacional, EIDEA crea un punto de intersección entre la simulación y su original, entre la realidad virtual y la física.

EDEN

Mientras que propuestas del tipo que acabamos de ver como *A-volve*, *EIDEA*, o *Iconica* resuelven de diferentes maneras la relación entre el arteficio computacional y la realidad física, otros proyectos, que en nuestra opinión pueden resultar más interesantes, hacen uso de las propiedades emergentes del sistema como el eje que articula la interacción con el usuario. Es lo que Jon McCormack¹⁵⁴ denomina participar en el proceso del “descubrimiento creativo” del sistema.

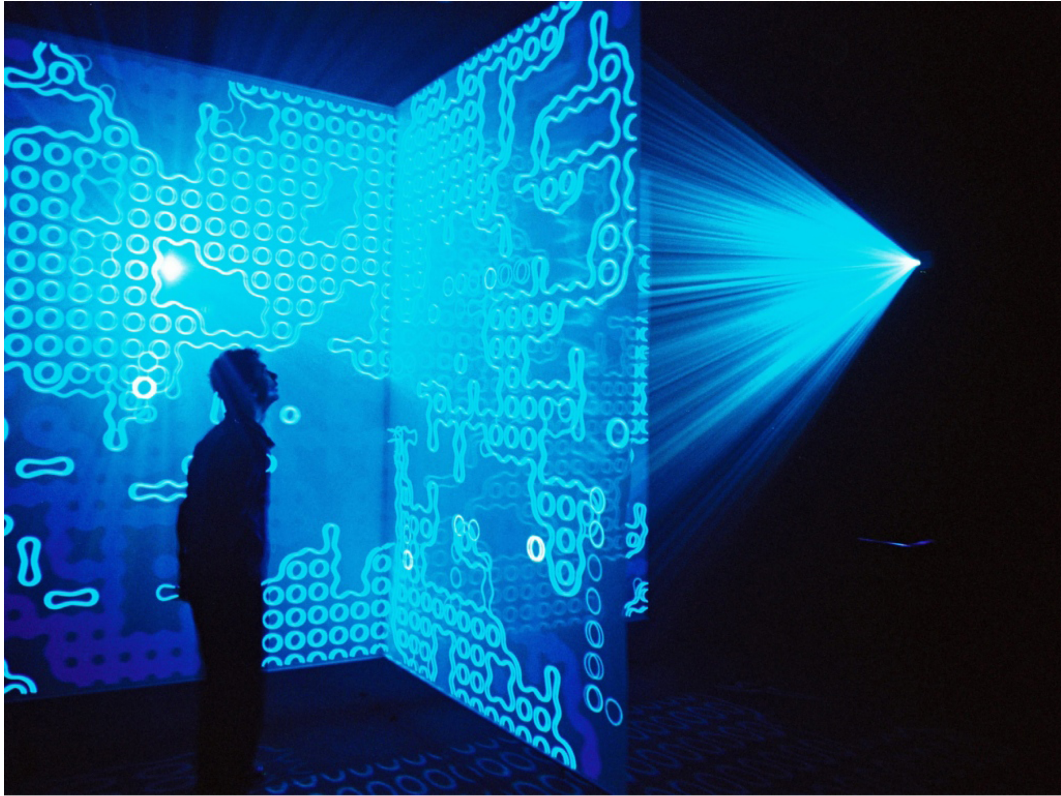
*Eden*¹⁵⁵, de Jon McCormack, es un ecosistema sonoro y visual basado en una distribución clásica de autómatas celulares (apartado 3.2.1). *Eden* sigue muchos de los convencionalismos técnicos para construir un ecosistema artificial. Consta de tres tipos básicos de materia: roca, biomasa y agentes evolutivos. La temperatura local está determinada por la cantidad de biomasa. Los agentes pueden metabolizar la biomasa para convertirla en energía, que les permite llevar a cabo las acciones. Cuando el nivel de energía de un agente cae a cero, muere y desaparece.

Los agentes tienen capacidad para escuchar y emitir sonido, y disponen de sensores¹⁵⁶ y actuadores controlados por un sistema de aprendizaje. Las reglas de comportamiento basadas en la experiencia del pasado, son evaluadas en función de su éxito. De esta manera, las reglas evolucionan a lo largo del periodo de vida del agente, y la descendencia hereda aquellas que resultaron más eficientes para sus antecesores.

154 McCORMACK, Jon, “Artificial Ecosystems for Creative Discovery”, en THIERENS, D., (Ed.), *Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2007*. Vol. 1, ACM, New York, pp. 301-307.

155 Op. Cit.

156 Los sensores de los agentes son ambos, internos (permiten introspección, nivel de energía, salud) y externos (permiten la sensación del entorno).



14

Fig. 39: *Eden*. McCormack, Jon. (2001).

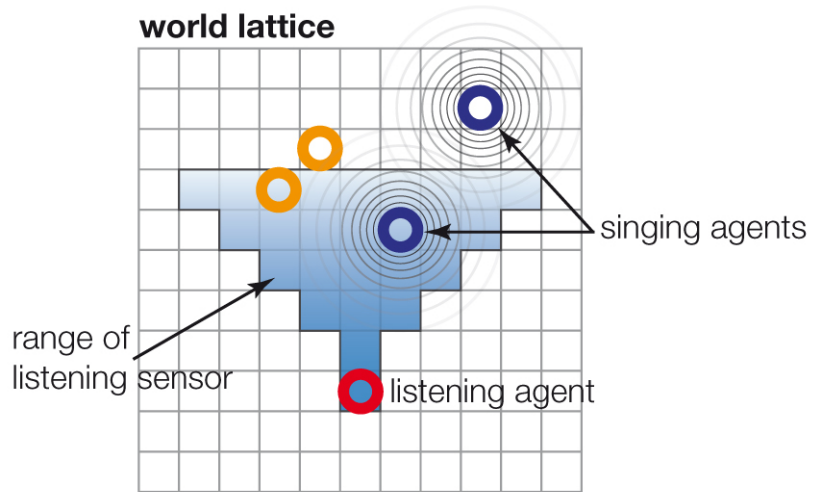


Fig. 40: *Eden*. Diagrama del área de escucha.

Por lo que se refiere a la interacción, la presencia del usuario influye en el crecimiento de la biomasa. A medida que evoluciona el sistema, el sonido emitido por los agentes adquiere un valor de supervivencia. Estos evolucionan realizando sonidos complejos con la intención de mantener el suministro de recursos. Los agentes no tienen conocimiento específico del

usuario en el entorno, sin embargo, mediante la generación de sonido tratan de mantener la presencia del usuario. Este interés se traduce en un suministro más estable de alimento, mejorando su capacidad de supervivencia en el entorno. La respuesta del usuario, posiblemente no intencionada, afecta en la evolución del sistema, aumentando el nivel y diversidad del sonido.

En definitiva, Eden se basa en un ecosistema simbiótico, donde la cuestión fundamental del diseño del sistema son los bucles de retroalimentación que se generan con los recursos del entorno, la relación de causalidad entre biomasa, agentes, y usuario:

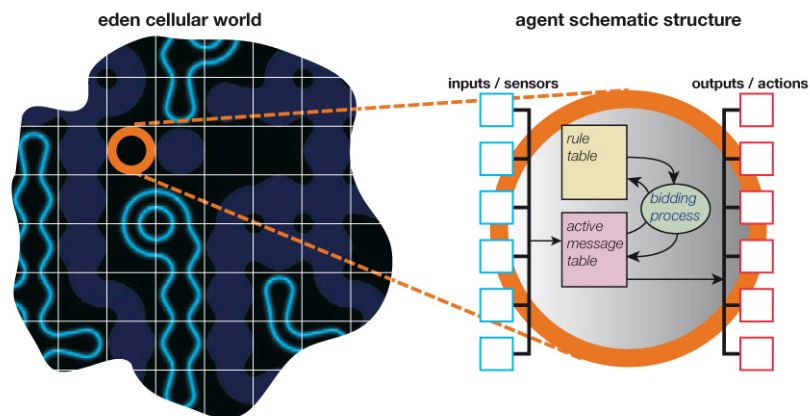


Fig. 41: *Eden*. Matriz celular del espacio y diagrama de la estructura interna de un agente

Según McCormack¹⁵⁷, estos sistemas artificiales muestran las estructuras dinámicas del mundo material recordando los sistemas que subyacen en el nivel inferior. La computadora, más que crear un reemplazo del espacio natural, funciona como una herramienta para entender los procesos reales, haciéndolos explícitos mediante su propia desnaturalización. La cuestión estriba en el diseño del entorno de donde es probable que emerjan las soluciones creativas. Los procesos emergentes determinan la composición del entorno y la interacción entre los elementos. La gran cuestión está en cómo aprovechar este potencial.

157 WHITELAW, Mitchell, *Metacreation. Art and Artificial Life*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004, p. 93.

5. CONCLUSION Y FUTURAS INVESTIGACIONES

A modo de conclusión, presentaremos un prototipo de programación basado en el concepto ecosistema social, retomando una serie de estudios científicos realizados sobre sociedades artificiales. Dado que la mayoría de ejemplos en el A-life Art hacen referencia a algún tipo de sistema biológico, nos pareció un campo de investigación interesante, implementar algunas de las estrategias que son objeto de estudio en el área de las ciencias sociales. Más allá de una adaptación para la “supervivencia”, contemplar estrategias sociales dirigidas a la cooperación, en lo que se viene denominando como inteligencia colectiva¹⁵⁸ o *masa crítica*.

Este prototipo, cuyo objetivo es únicamente una aplicación técnica, experimental, está orientado hacia una futura investigación donde estudiaremos el modelado de sistemas sociales y la posibilidad de implementación en proyectos artísticos, ya sea dentro del ámbito del A-life Art, o más probablemente, hacia el DataBase, estableciendo la hipótesis de “Visualización Emergente de Datos” donde las condiciones que inicializan el sistema provengan de una base de datos real, produciendo una intersección entre la realidad y la simulación del ecosistema.

5.1. PROTOTIPO PARA UN ECOSISTEMA BASADO EN COMPORTAMIENTO SOCIAL

Para la comprensión de modelos como los ecosistemas sociales cabe tener en cuenta dos aspectos fundamentales: En primer lugar las condiciones iniciales, que determinarán la evolución del sistema en una secuencia temporal, y en segundo lugar las estrategias de interacción entre los agentes, que bien pueden representar un individuo, un grupo social o una región geográfica.

158 En el siguiente enlace se puede ver una conferencia de Philip Ball en el CCCB Lab de Barcelona, organizado por la plataforma ZZZINC, para la presentación de #masacrítica, un proyecto de investigación sobre inteligencia colectiva: <http://vimeo.com/11833592> [consultado 06/09/2012].

En las ciencias sociales, la elección de estrategias se basa en los principios de interés y de cooperación sostenida entre agentes. El conflicto entre el interés individual y aquello que resulta conveniente para el grupo representa la forma más básica de lo que los sociólogos denominan «*dilemas sociales*». Desde una perspectiva evolucionista, la cooperación ocuparía el papel central en la competencia y supervivencia de los más aptos. En cierta medida, podríamos afirmar que la coherencia y la manera en que evolucione un sistema dependerá de la elección de estrategias que oscila entre una tendencia hacia la cooperación o la deserción social.

La teoría de Juegos¹⁵⁹ es una rama de la lógica matemática y se ocupa del estudio de estrategias entre oponentes que intentan maximizar sus beneficios y minimizar las pérdidas. Esto constituye un juego de fuerzas antagónicas donde el resultado final vendrá determinado por el conjunto de todas las decisiones tomadas. Mediante la noción de juego (estrategia) se logra establecer una analogía con los conflictos reales que se pueden experimentar en campos como la economía, la política o la guerra preventiva.

Podemos afirmar que la competencia entre agentes sociales se asentará sobre esta noción de conflicto o intereses contrapuestos ¿cómo fomentar entonces estrategias que favorezcan la cooperación entre agentes sociales? Existen numerosos estudios sobre complejidad y cooperación entre los que podemos destacar las investigaciones llevadas a cabo por John H. Holland y el politólogo Robert Axelrod¹⁶⁰ que implementan el algoritmo genético a modelos matemáticos basados en la teoría de juegos.

Para nuestro prototipo experimental nos hemos basado en uno de los paradigmas clásicos sobre dilemas de la teoría de juegos, conocido como “*El Dilema del Prisionero*”¹⁶¹ desarrollado por Merrill Flood y Melvin Dres-

159 En 1944, el matemático John Von Neumann y el economista Oskar Morgenstern publican el libro *Theory of Games and Economic Behavior*. Ver bibliografía.

160 AXELROD, Robert, *La complejidad de la cooperación. Modelos de cooperación y colaboración basados en agentes*. Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires, 2003.

161 POUNDSTONE, William, *El dilema del prisionero*. Alianza, Madrid, 1995.

her en el RAND¹⁶² (Santa Monica, California). El Dilema del prisionero representa la forma más elemental de conflicto entre el bien común y el interés personal. Es un concepto que desde sus inicios ha sido aplicado a multitud de situaciones, que van desde la biología, a la sociología, la economía y la política. De manera breve, se basa en el siguiente supuesto:

Dos atracadores son encarcelados por un delito. Su condena está condicionada a los siguientes supuestos: Los individuos deben tomar una decisión sin saber que hará su compañero. Dado que no existen suficientes pruebas, si los dos acusados callan, ambos serán condenados a una pena leve de 1 año. Si los dos cooperan, la pena será de 2 años para ambos. Pero si uno de los dos aporta las pruebas y el otro se calla, lo traiciona, aquel cumplirá la máxima condena de 3 años mientras el traidor se librará de la condena. En función de esta decisión, los individuos obtendrán una puntuación o recompensa:

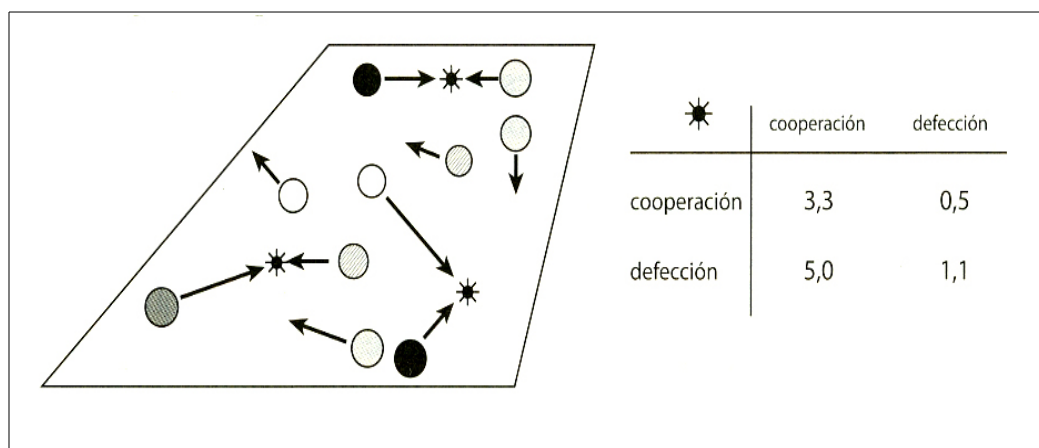


Fig. 42: Matriz de pago y esquema de interacción para El Dilema del Prisionero. Holland, John H.(1995)

162 RAND (Santa Monica, California) era un servicio de inteligencia creado después de la Segunda Guerra Mundial y cuya finalidad era el desarrollo de estrategias de defensa militar.

¿Qué decisión tomar cuando mi interés se contrapone con el de los demás? Otra manera de ejemplificar una caja de dilemas de este tipo, sería un supuesto como el siguiente:

*“Usted y una persona amada son situados en habitaciones separadas provistas de un pulsador. Saben que matarán a ambos a no ser que uno pulse el botón antes de una hora; además, la primera persona que accione el pulsador salvará a la otra, pero morirá inmediatamente. ¿Qué decisión tomaría usted?”*¹⁶³

Así, para nuestro ecosistema social hemos realizado una implementación según diferentes estrategias que pueden adoptar los agentes: Cooperar, Traicionar, Ojo por Ojo¹⁶⁴, y la Mayoría¹⁶⁵. Asumimos la limitación de nuestra propuesta, en el sentido de que las estrategias de los agentes están prefijadas, y no disponen de ningún mecanismo interno que permita a un agente evaluar el resultado de sus acciones para aprender qué estrategia, a lo largo del tiempo, resulta más efectiva.

La interacción entre agentes se da mediante el encuentro en el espacio. momento en el que se inicializa el juego, donde cada agente adoptará una estrategia, obteniendo una puntuación según la matriz de dilemas. Esta recompensa en la cooperación o traición influye sobre la “salud” del agente o su supervivencia en el ecosistema. Al mismo tiempo, cada agente dispone de un algoritmo genético, que mediante «*mutación*» otorga una probabilidad de que su descendencia herede la estrategia de sus progenitores. El objetivo final del prototipo es visualizar en el ecosistema, aquellas estrategias que mejor se adaptan y sobreviven en el tiempo.

La implementación del ecosistema está basado, en la publicación de Daniel Shiffman, *The Nature of the code*¹⁶⁶, que dispone de ejemplos para

163 Op. Cit., p. 12.

164 Numerosos estudios han demostrado que esta sencilla estrategia, ojo por ojo (*Tit for Tat*) resulta ser una de las más exitosas, llegando a poder fomentar la cooperación entre contrarios. Consiste en cooperar la primera vez, y en adelante hacer lo que tu oponente hizo en la ronda anterior.

165 Tomar la decisión de lo que hizo la mayoría en la ronda anterior.

166 SHIFFMAN, Daniel, *The nature of The code*. Libro inédito. Borrador disponible

implementar ecosistemas y algoritmos genéticos en *processing*¹⁶⁷, así como en la revisión de diferentes aplicaciones¹⁶⁸ provenientes del ámbito de las ciencias sociales.

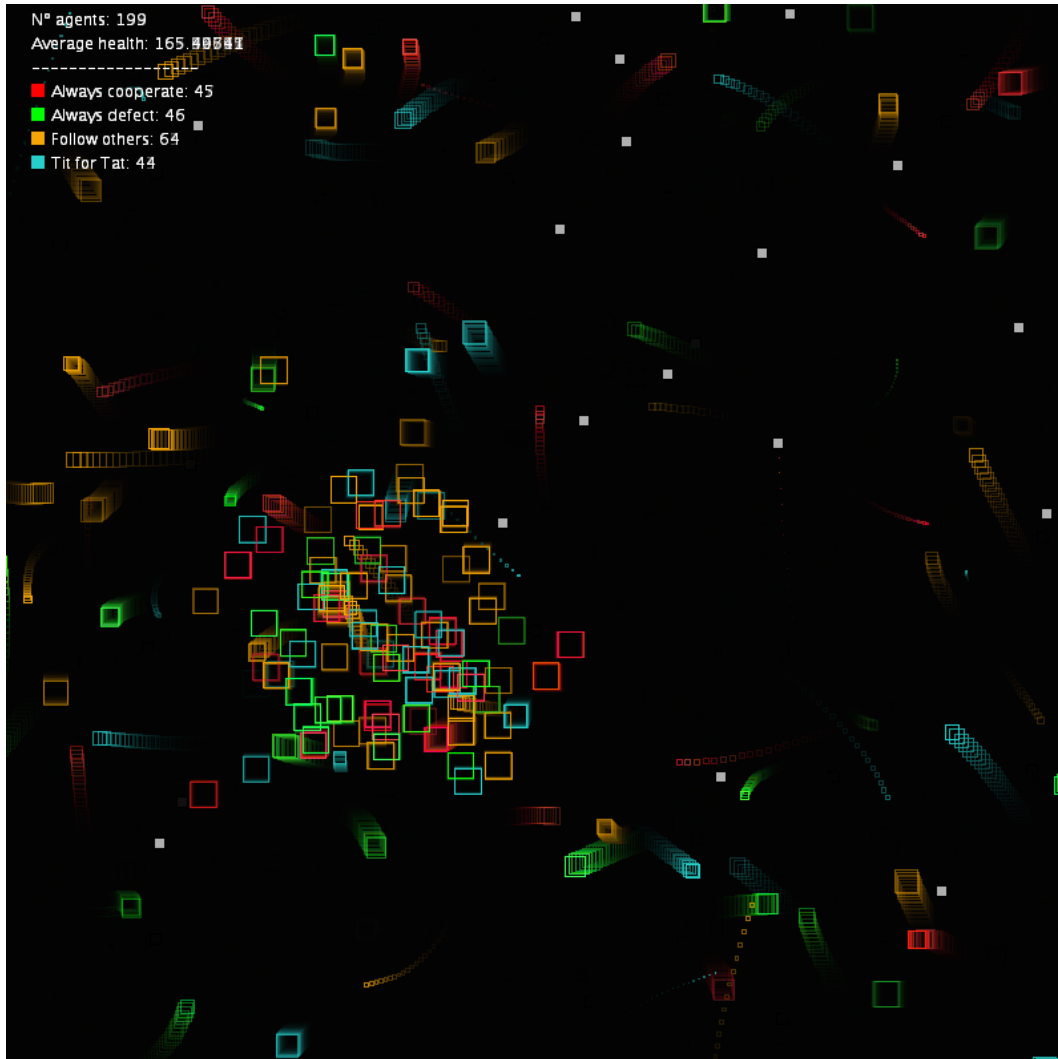


Fig. 43: Prototipo de Ecosistema basado en el Dilema del Prisionero.

online: <http://www.kickstarter.com/projects/shiffman/the-nature-of-code-book-project>
[consultado 06/09/2012]

167 <http://processing.org/>

168 <http://prisonersdilemma.sergehelfrich.eu/>

<http://www-personal.umich.edu/~axe/>

<http://oasis.dit.upm.es/~jantonio/documentos/revistas/teoriajuegos/teoriajuegos.htm>

[consultado 06/09/2012]

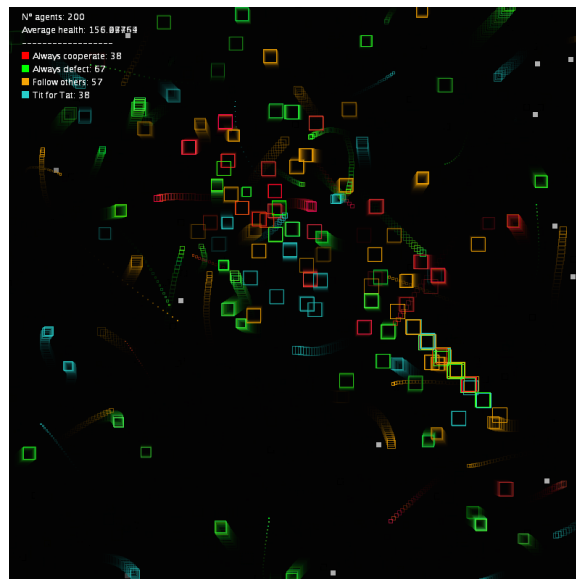
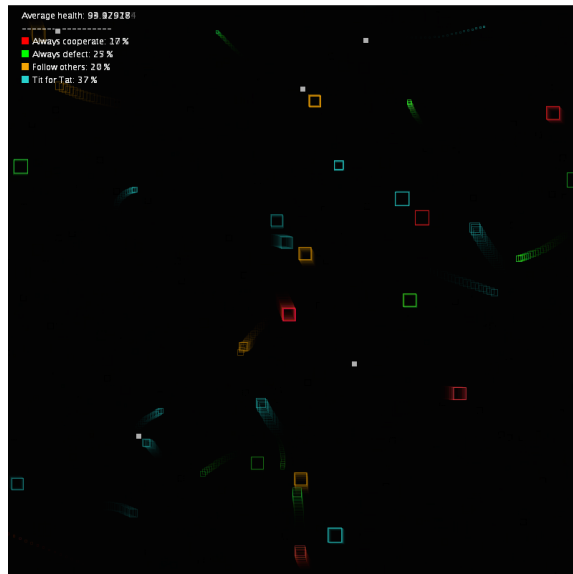


Fig. 44,45: Prototipo Ecosistema.

Para una información más detallada del prototipo, se puede consultar el blog¹⁶⁹ de la investigación, y el CD adjunto, en la carpeta Anexos, donde se encuentra la aplicación y el código fuente.

169 <http://interaccioneslocales.wordpress.com/>

5.2. CRÍTICA A LOS MODELOS COMPUTACIONALES

“El tiempo se bifurca perpetuamente hacia innumerables futuros. En uno de ellos soy su enemigo”¹⁷⁰

La simulación de ecosistemas o sociedades artificiales mediante métodos evolutivos ha constituido una herramienta fundamental para las disciplinas científicas que se ocupan del estudio de fenómenos complejos tales como la segregación cultural en antropología, los sistemas económicos o las alianzas políticas entre países. ¿Es posible a través de estos modelos computacionales predecir la emergencia de fenómenos tales como las crisis financieras? Si bien es muy probable no encontrar respuesta a la utópica pregunta sobre las consecuencias futuras de nuestras decisiones, el estudio de estos procesos emergentes en una escala temporal permite observar la evolución del sistema (ABM) y amplía nuestra capacidad de comprender los fenómenos producidos por un «*comportamiento colectivo*»¹⁷¹.

Vivimos inmersos en un mundo confinado por sistemas altamente fiables: la lavadora se detendrá automáticamente al final del ciclo y no continuará en un bucle infinito, las fachadas que habitamos son suficientemente robustas para evitar que el techo se desplome, si necesito crédito puedo echar mano de mis ahorros ya que el banco los guarda en un sitio seguro, el semáforo se pondrá verde en un futuro no muy lejano y los coches pararán, con lo cual aumentan mis expectativas de vida cada vez que consigo cruzar la calle. Sin embargo, cuando sucede un fenómeno atípico en el sistema para el cual, la probabilidad entre los posibles era mínima, o cuanto menos impredecible, nos encontramos ante lo que Nassim Nicho-

170 BORGES, Jorge L., *El jardín de los senderos que se bifurcan*. Sur, Buenos Aires, 1942, p. 123.

171 BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008.

las Taleb ha llamado el Cisne Negro¹⁷². ¿significa esto que debemos dejar de “confiar” en el sistema? La respuesta probablemente no la encontremos en lo que nuestros políticos promulgan insaciablemente como la solución a la actual crisis financiera: “inyectando confianza a los mercados”. Existe evidentemente un componente, tal y como afirma el econofísico Josep Perelló¹⁷³, sobre la influencia de nuestro estado anímico en la toma de decisiones que puede alcanzar a sistemas tan complejos como el financiero. Sin embargo este tipo de confianza es una respuesta a los efectos, lo cual no invalida la probabilidad de que estos fenómenos vuelvan a suceder. La confianza, como solución a la incertidumbre puede llegar a convertirse en una medida estéril, o contradicción sistémica, para un mundo que se caracteriza precisamente por un estado dinámico alejado del equilibrio.

Si dejamos a un lado los efectos y nos situamos en la perspectiva de las causas, podríamos formular la cuestión en *la confianza de estar más preparados* ante la posible aparición de un cisne negro. Es en este sentido donde la Física de lo social (Philip Ball¹⁷⁴) puede aportar descripciones, que no prescripciones, sobre estos fenómenos para los cuales no estamos preparados. Tal vez una perspectiva de la complejidad nos permita describir una historia no lineal¹⁷⁵ de los acontecimientos: “*si uno empuja al sistema lejos del equilibrio, el número y el tipo de posibles resultados históricos se incrementa considerablemente.*”¹⁷⁶ Existen estudios que mode-

172 NICHOLAS, Nassim, *El cisne negro: el impacto de lo altamente improbable*. Paidós, Barcelona, 2008, (1ª Ed., revisada, 2011).

173 Josep Perelló es responsable del área de ciencia en el centro Arts Santa Mónica (Barcelona) y miembro del consejo editorial de la revista arnodes (UOC) dirigida por Pau Alsina. En la siguiente entrevista, desde una perspectiva de la econofísica, nos habla sobre la influencia de las emociones en la toma de decisiones. <http://www.rtve.es/alacarta/videos/tres14/tres14-josep-perello/480017/> [consultado 06/09/2012].

174 BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008.

175 “La bifurcación introduce la *historia* en la física y la química, un elemento que antiguamente parecía reservado a las ciencias que se ocupan de lo biológico, lo social y los fenómenos culturales”. PRIGOGINE, Ilya, *From being to becoming*. W.H. Freeman, Nueva York, 1980, p. 106.

176 Artículo de Manuel Delanda sobre su libro *Mil años de historia no lineal*, en el siguiente enlace: <http://revistareplicante.com/especiales/mil-anos-de-historia-no->

lan sucesos históricos para comprender no ya lo que pudo suceder, sino aquello que era más probable que sucediera. Se trataría por lo tanto, tal y como propone Niall Ferguson¹⁷⁷, de realizar una “historia contrafactual” que nos permita comprender el pasado.

Concluimos dejando abierto el debate sobre los espacios de posibilidad, retomando una cita de Manuel Delanda a cerca del potencial imaginativo que nos puede ofrecer el uso de modelos computacionales como los que acabamos de ver:

“De alguna manera, el estudio de estos espacios de posibilidad, mas allá de modelos matemáticos, es lo que permiten las simulaciones informáticas. Quizás algún día el uso imaginativo de estas tecnologías de realidad virtual pueda ayudarnos a trazar la estructura de la auténtica virtualidad asociada con las capacidades”¹⁷⁸

[lineal/](#) [consultado 06/09/2012]. Cita bibliográfica: DELANDA, Manuel, *Mil años de historia no lineal*. Gedisa, Barcelona 2012.

177 “Si estrechamos las alternativas históricas, consideramos las más plausibles y sustituimos el enigma del “azar” por el cálculo de probabilidades, resolvemos el dilema de elegir entre un pasado determinista y un número infinito e inmanejable de pasados posibles.” Niall Ferguson, citado en BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, p. 130.

178 DELANDA, Manuel, “Emergencia, causalidad y realismo” en *Artnodes*, nº 9. UOC, 2010, p. 12. Texto Online: http://artnodes.uoc.edu/ojs/index.php/artnodes/article/view/n9_delanda/n9_delanda [consultado 06/09/2012]

5.3. CONCLUSIÓN

Al finalizar nuestra investigación y centrarnos en las conclusiones finales, entendemos que el presente estudio puede plantear algunas preguntas. En primer lugar, la dificultad a la hora de tratar un tema tan controvertido como es el concepto de Complejidad, partiendo de la premisa de que no existe consenso alguno en la elaboración de una teoría consistente, y donde juegan un papel determinante los intereses de las instituciones científicas. En segundo lugar, como abordar el tema desde la perspectiva artística, conscientes de las limitaciones en cuanto a nuestra formación, y sin que ello suponga tratar el tema de manera superficial. Finalmente, cuestionar qué interés pueda tener para el contexto artístico la elaboración de unos contenidos como los que hemos presentado. Intentaremos, brevemente, responder a estas cuestiones.

El objetivo de analizar las principales aportaciones científicas a las teorías de la complejidad, era realizar una especie de “arqueología” sobre los términos que de manera tan frecuente y asumida utilizamos en nuestra práctica artística: diseñar sistemas en base a unos patrones de comportamiento, implementar modelos que reacción a la interacción, crear un feedback entre sistema y usuario para que el sistema “funcione”. Consideramos que un estudio como el realizado, tanto por lo que se refiere a la fundamentación teórica como al análisis detallado de modelos computacionales, contribuye a una mejor comprensión de la terminología y los medios empleados en el desarrollo de proyectos interactivos. Además, como ya adelantamos en la hipótesis de trabajo, consideramos que un estudio de estos modelos resulta una fuente de recursos tanto técnicos como conceptuales, y es por ello que a modo de conclusión realizamos a partir de la misma un prototipo de tales características.

Por otra parte, al analizar la intersección tecnológica entre Arte y Ciencia, (que hemos tratado a través de las metodologías propuestas por artistas en el desarrollo de ecosistemas virtuales) cabe establecer un punto de inflexión entre ambas disciplinas. Mientras que la práctica científica se propone la implementación de un modelo para su posterior validación, en la práctica artística dicha validación tiene como finalidad el resultado de una propuesta creativa donde el campo se abre a múltiples posibilidades. En lo que Jon Mc Cormack¹⁷⁹ ha denominado “descubrimiento creativo”. El test de usuario, que dará validez a la propuesta, en muchas ocasiones es el eje central de los proyectos interactivos, en por ello que nuestro análisis se ha centrado en la manera en que los artistas articulan la interacción entre usuario y sistema. Consideramos que de alguna manera contribuye a reflexionar sobre los procesos de interacción a la hora de diseñar un sistema.

Conocedores ya de las propiedades emergentes que caracterizan los sistemas complejos, y cuyo campo no se limita evidentemente sólo a propuestas relacionadas con el A-Life Art, la cuestión estriba, y aquí suscribo a Pau Alsina¹⁸⁰, en el seminario impartido en el Máster (AVM, 2011), en cómo aprovechar todo el potencial que estas tecnologías ponen a nuestro alcance. Mientras la ciencia se centra en la planificación, resolución y validación del modelo, nosotros podemos dirigir el objetivo hacia múltiples soluciones, inciertas y arriesgadas, pero potencialmente creativas. Finalmente, esperamos que la investigación presentada, contribuya a un acercamiento entre ambas disciplinas, la científica y la artística, en este terreno interdisciplinar en el que nos movemos.

179 McCORMACK, Jon, “Artificial Ecosystems for Creative Discovery”, en THIERENS, D., (Ed.), *Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2007*. Vol. 1, ACM, New York, pp. 301-307.

180 ALSINA, Pau, “Teoría e historia de las artes digitales: una aproximación arqueológica”. Seminario de Profesores invitados, Máster Artes Visuales y Multimedia, UPV, Valencia, 2011. Video online: <http://avm.webs.upv.es/index.php/profesores-invitados/54-video-pau-alsina> [consultado 06/09/2012]

6. BIBLIOGRAFIA

LIBROS Y CATÁLOGOS

- AXELROD, Robert, *La complejidad de la cooperación. Modelos de cooperación y colaboración basados en agentes*. Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires, 2003.
- AXTELL, Robert, y EPSTEIN, Joshua, *Growing artificial societies. Social Science from the Bottom Up*. The Brookings Institution, Washington, 1996.
- BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008.
- BERGSON, Henri, *La evolución creadora*. Espasa-Calpe, Madrid, 1985.
- BERTALANFFY, Ludwig von, *Teoría general de los sistemas*. Fondo de Cultura Económica, México, 1976, (17ª Ed. 2009).
- BORGES, Jorge L., *El jardín de los senderos que se bifurcan*. Sur, Buenos Aires, 1942.
- BROCKMAN, John, y PÁNIKER, Salvador, (ed.), *El nuevo humanismo y las fronteras de la ciencia*. Kairós, Barcelona, 2007.
- BURNHAM, Jack, *Beyond Modern Sculpture: The Effects of Science and Technology on the Sculpture of this Century*. George Braziller, New York, 1969, p. 333.
- CAPRA, Fritjof, *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama, Barcelona, 1998, (2ª Ed. 2010).
- CAPRA, Fritjof, *The Tao of Physics*. Shambhala, Boston, 1975 (3ª Ed. 1991).
- CARIANI, Peter, "Emergence and Artificial Life". En Langton, C., Taylor, C.; Farmer, J. D., Rasmussen, S. (Ed.), *Artificial Life II*. Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 775-789.
- CHEKLAND, Peter, *Systems Thinking, Systems Practice*. John Wiley, Nueva York, 1981.
- DAWKINS, Richard, *The Blind Watchmaker*. W.W. Norton & Company, Inc., New York, 1986.
- DELANDA, Manuel, *Mil años de historia no lineal*. Gedisa, Barcelona 2012.
- DORIN, Alan, "A Survey of Virtual Ecosystems in Generative Electronic Art", en ROMERO, Juan, y MACHADO, Penosual, (Ed.), *The Art of Artificial Evolution*. Natural Computing Series, Springer, Berlin, 2008.
- HINGSTON, Philip F., BARONE, Luigi C., y MICHALEWICZ, Zbigniew,

(Ed.), *Design by Evolution*. Natural Computing Series, Springer, Berlin, 2008.

HOFSTADTER, Douglas R., *Gödel, Escher, Bach*. Tusquets editores, Barcelona, 1987, (9ªEd., 2005).

HOLLAND, John H., *El orden oculto. De cómo la adaptación crea la Complejidad*. Fondo de Cultura Económica, México, 2004.

HOLLAND, John H., *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*. Helix Books, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1995.

JOHNSON, Steven, *Sistemas emergentes. O qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Turner Fondo de Cultura Económica, Madrid, 2003. (reimpresión, 2008).

KOMOSINSKI, Maciej, y ADAMATZKY, Andrew, (Ed.), *Artificial Life Models in Software*. Springer, London, 2009.

KUHN, Thomas S., *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica, México D.F., 1962, (8ªEd., 2004).

LANGTON, Christopher G., "Artificial Life" en LANGTON, C., (Ed.), *Artificial Life*. Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.

LANGTON, Christopher G., (ed.), *Artificial Life: The proceedings of an interdisciplinary workshop on the synthesis and simulation of living systems*. Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.

LATHAM, William, y TODD, Stephen, *Evolutionary Art and Computers*. Academic Press, London, 1992.

MILL, John Stuart, *A System of Logic. Ratiocinative and Inductive*. Longmans, Green, and Co., Londres, 1906.

MORIN, Edgar, *Introducción al pensamiento sistémico*, Gedisa, Barcelona, 1990, (9ª Ed. 2007).

NEUMANN, John von, *The Theory of Self-reproducing Automata*. University of Illinois Press, IL, 1966.

NEUMANN, John von, y MORGENSTERN, Oskar, *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, Nueva Jersey, 1944.

NICHOLAS, Nassim, *El cisne negro: el impacto de lo altamente improbable*. Paidós, Barcelona, 2008, (1ª Ed., revisada, 2011).

PRIGOGINE, Ilya, *From being to becoming*. W.H. Freeman, Nueva York, 1980.

REYNOSO, Carlos, *Complejidad y el Caos. Una exploración antropológica*. Complejidad Humana, Sb, Buenos Aires, Sb, 2006.

- POUNDSTONE, William, *El dilema del prisionero*. Alianza, Madrid, 1995.
- ROMERO, Juan, y MACHADO, Penosual, (Ed.), *The Art of Artificial Evolution*. Natural Computing Series, Springer, Berlin, 2008.
- RUSSELL, B., *The Analysis of Matter*. Allen & Unwin, London, 1927.
- SCHELLING, Thomas C., *Micromotives and Macrobehavior*. WW. Norton, Nueva York, 1973.
- SMITH, Adam, *Teoría de los sentimientos morales*. Edición conmemorativa 70 Aniversario, México, 2004.
- SOMMERER, Christa, LAKHMI, C. Jain, y MIGNONNEAU, Laurent,(ed.), *The Art and Science of Interface and Interaction Design*. Studies in Computational Intelligence, Springer, Berlin, 2008.
- SOMMERER, Christa, MIGNONNEAU, Laurent, y STOCKER, Gerfried, *Interactive Art Research*. Springer/Wien, New York, 2009.
- SOMMERER, Christa, y MIGNONNEAU, Laurent, “Modeling Complexity for Interactive Art Works on the Internet”, en CASTI, J., y KARLQVIST, A., (Ed.), *Art and Complexity*. Elsevier Science B.V, Amsterdam, 2003, pp 85-107.
- WHITELAW, Mitchell, *Metacreation. Art and Artificial Life*. The MIT Press, Cambridge,Massachusetts, 2004.
- WIENER, Norbert, *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*. The Technology Press, MIT, New York, 1948.
- WIENER, Norbert, *The human use of the Human Beings*. Houghton Mifflin, Nueva York, 1950.
- WITZGALL, Susanne, “Art as an open system. Complexity and Interaction in Art since 1960” en *Living Systems. Christa Sommerer & Laurent Mignonneau*. ACTAR/Arts Santa Mònica, Barcelona, 2011.

ARTICULOS

- BARABÁSI, Albert-László y RÉKA, Albert, “Emergence of scaling in random networks”. *Science*, nº 286, 1999, pp.509-512.
- GOLDSTEIN, Jeffrey, “Emergence As a Construct: History and Issues”. En *Emergence*. Vol. 11, 1999, p. 50.
- GONZÁLEZ, Oscar, “Entre modelos y discursos: complejidad y antropología” en *Anales de Antropología*, vol. 41-I, Instituto de

Investigaciones Antropológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.

HEYLIGHEN, Francis, CILLIERS, Paul, GERSHENSON, Carlos, "Complexity and Philosophy" en BOGG J., y GEYER, R., (ed.), *Complexity, Science and Society*. Radcliffe, Oxford, 2007.

LEWES, George H., *Problems of Life and Mind*. Vol. 2., Trübner & Co., 1875.

McCORMACK, Jon, "Artificial Ecosystems for Creative Discovery", en THIERENS, D., (Ed.), *Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2007*. Vol. 1, ACM, New York, pp. 301-307.

MONRO, Gordon, "Emergence and Generative Art" en *Leonardo*. Vol. 42, nº 5, 2009, pp. 446-447.

REYNOLDS, Craig, "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model" en *Computer Graphics*, Vol. 21(4), ACM SIGGRAPH '87 Conference Proceedings, California, 1987, pp. 25-34.

RINALDO, Kenneth, "The Flock," en *Leonardo*, Vol 31, nº5, 1998, p. 406.

SIEGEL, Jeanne, "An Interview with Hans Haacke," en *Arts Magazine*, Vol. 45, nº 7, 1971, p. 18.

WHITELAW, Mitchell, "Tom Ray's Hammer. Emergence and Excess in A-Life Art" en *Leonardo*. Vol. 31, nº 5, MIT Press, 1998, pp. 377-381.

PUBLICACIONES DISPONIBLES ONLINE

ALSINA, P., y PERELLÓ, J., "Arte, cultura y ciencias de la complejidad" en *Artnodes*, nº 9. UOC, 2010. Texto Online:
http://artnodes.uoc.edu/ojs/index.php/artnodes/article/view/n9_nodo_presentacion [consultado 06/09/2012]

ALSINA, Pau, "Arte, Complejidad y Emergencia" en *Sobre la complejidad*. Zehar nº66, Arteleku, Diputación de Gipuzcua. Texto disponible online:
<http://www.arteleku.net/publicaciones/editorial/zehar/66-complejidades/view> [consultado 06/09/2012]

AXELROD, Robert, y HAMILTON, William D., "The Evolution of Cooperation", en *Science*, New Series, Vol. 211, Nº 4489, 1981, AAAS, New York, pp. 1390-1396. Texto online:
<http://www.jstor.org/discover/10.2307/1685895?uid=3737952&uid=2&uid=4&sid=21101204494407> [consultado 06/09/2012].

COLLINS, Dan, "Breeding the Evolutionary: Interactive Emergence in Art and Education" en 4th Annual Digital Arts Symposium: Neural Net{work}. University of Arizona, Tucson, 2002. Texto online:
<http://www.asu.edu/cfa/art/people/faculty/collins/emergence/emergence.htm> [consultado 06/09/2012]

DELANDA, Manuel, "Emergencia, causalidad y realismo" en *Artnodes*, nº 9. UOC, 2010. Texto Online:
http://artnodes.uoc.edu/ojs/index.php/artnodes/article/view/n9_delanda/n9_delanda [consultado 06/09/2012]

DELANDA, Manuel, "Mil años de historia no lineal. Historia y filosofía, de la Edad Media al año 2000". Artículo online:
<http://revistareplicante.com/especiales/mil-anos-de-historia-no-lineal/> [consultado 06/09/2012].

HELBING, Dirk, FARKAS, Illés, y VICSEK, Tamás: "Simulating dynamical features of escape panic" en *Nature* nº 407, 2000. Texto online:
<http://angel.elte.hu/panic> [consultado 06/09/2012]

MACAL, Charles M., y NORTH, Michael J., "Tutorial on agent-based modeling and simulation" en KUHL, M., STEIGER N., ARMSTRONG F., y JOINES, J, (ed.), *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 2005. Texto online: <http://informatics-sim.org/wsc05papers/prog05.html> [consultado 06/09/2012]

PETERSON, I., "The gods of Sugarscape", en *Science News*. Vol. 150, nº 21, 1996, p. 332. Texto online:
http://www.sciencenews.org/sn_arch/11_23_96/bob1.htm [consultado 06/09/2012]

SIMS, Karl, "Artificial Evolution for Computer Graphics", en *Computer Graphics. ACM SIGGRAPH '91 Conference Proceedings*. Vol. 25, nº 4, Las Vegas, Nevada, 1991, pp. 319-328. Texto online:
<http://www.karlsims.com/papers/siggraph91.html> [consultado 06/09/2012]

SOLER-ADILLON, Joan, "Emergencia e interactividad: A-Life Art como paradigma para la creación de experiencias de comunicación interactiva" en *Hipertext.net*. nº 8, UPF, 2010. Texto online:
http://www.upf.edu/hipertextnet/numero-8/a-life_art.html [consultado 06/09/2012]

RECURSOS ONLINE

ALSINA, Pau, "Teoría e historia de las artes digitales: una aproximación arqueológica". Seminario de Profesores invitados, Máster Artes Visuales y Multimedia, UPV, Valencia, 2011. Video online:
<http://avm.webs.upv.es/index.php/profesores-invitados/54-video-pau-alsina> [consultado 06/09/2012]

BALL, Philip, “#MasaCritica”, en <http://vimeo.com/11833592> [consultado 06/09/2012]

DRIESENS, Erwin, y VERSTAPPEN, Maria, “E-volver”, en <http://notnot.home.xs4all.nl/E-volverLUMC/E-volverLUMC.html> [consultado 06/09/2012]

GALANTER, Philip, en <http://philipgalanter.com/research/#online> [consultado 06/09/2012]

HELBING, Dirk, en <http://www.soms.ethz.ch/research/researchhigh> [consultado 06/09/12]

HELBING, Dirk, “Sinergia. Encuentros «nuevas fronterasde la ciencia, el arte y el pensamiento”. Ars Santa Mònica, 2011. Video online: <http://www.youtube.com/watch?v=ceFHWqANGEQ> [consultado 06/09/12]

INNOCENT, Troy, “Iconica”, en <http://troyinnocent.net/> [consultado 06/09/2012]

LEVIN, Golan, y LIEBERMAN, Zach, “Messa di Voce”, en <http://www.flong.com/projects/messa/> [consultado 06/09/2012]

McCORMACK, Jon, en <http://diotima.infotech.monash.edu.au/~jonmc/sa/> [consultado 06/09/2012]

MITCHELL, John D., y LOVELLES, Robb E., “EIDEA”, en <http://www.intelligentstage.com/Projects/eidea.early/eideapaper.html> [consultado 06/09/2012]

ORCA, en <http://gamma.cs.unc.edu/ORCA/> [consultado 06/09/2012]

PENNY, Simon, en http://simonpenny.net/texts/texts_toc.html [consultado 06/09/2012]

PERELLÒ, Josep, “Entrevista en el programa tres14”. RTVE, 17 Abril de 2009. Disponible online: <http://www.rtve.es/alacarta/videos/tres14/tres14-josep-perello/480017/> [consultado 06/09/2012]

PROPHET, Jane, “ TechnoSphere”, en <http://www.janepropheet.com/old-website/technoweb.html> [consultado 06/09/2012]

RAY, Tom, “Tierra”, en <http://life.ou.edu/tierra/> [consultado 06/09/2012]

ROKEBY, David, “Very Nervous system” en <http://www.davidrokeby.com/vns.html> [consultado 06/09/2012]

SEAMAN, Bill, en <http://billseaman.com/> [consultado 06/09/2012]

SUGRUE, Chris, “Delicate Boundaries”, en <http://csugrue.com/delicateboundaries/> [consultado 06/09/2012]

VESNA, Victoria, “The Mood Swings”, en <http://victoriavesna.com/index.php?p=projects&item=4> [consultado 06/09/2012]

RECURSOS TÉCNICOS

AXELROD, Robert, en <http://www-personal.umich.edu/~axe/> [consultado 06/09/2012]

BREVE, en <http://www.spiderland.org/breve/> [consultado 06/09/2012]

HELFRICH, Serge, “The Prisoner’s Dilemma”, en <http://prisonersdilemma.sergehelfrich.eu/> [consultado 06/09/2012]

MASON, en <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/> [consultado 06/09/2012]

MARTÍNEZ, Juan A., “Software Libre: una aproximación desde la Teoría de Juegos” en <http://oasis.dit.upm.es/~jantonio/documentos/revistas/teoriajuegos/teoriajuegos.html> [consultado 06/09/2012]

NETLOGO, en <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> [consultado 06/09/2012]

PROCESSING, en <http://processing.org/> [consultado 06/09/2012]

REYNOLDS, Craig, en <http://www.red3d.com> [consultado 06/09/2012]

REPAST, en <http://repast.sourceforge.net/> [consultado 06/09/2012]

SHIFFMAN, Daniel, “Autonomous Steering Behaviors”, en <http://www.shiffman.net/teaching/nature/steering> [consultado 06/09/12]

SHIFFMAN, Daniel, *The nature of The code*. Libro inédito. Borrador disponible online: <http://www.kickstarter.com/projects/shiffman/the-nature-of-code-book-project> [consultado 06/09/2012]

SWARM, en http://www.swarm.org/index.php/Main_Page [consultado 06/09/2012]

CENTROS DE INVESTIGACIÓN EN COMPLEJIDAD

CASA (UCL) en, <http://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/latest/publications> [consultado 06/09/2012]

ETH-INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, en <http://www.icr.ethz.ch/teaching/archive/compmodels/ss2004/models> [consultado 06/09/2012]

SANTA FE INSTITUTE, en <http://www.santafe.edu/> [consultado 06/09/2012]

JASSS, en, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html> [consultado 06/09/2012]

6.1. INDICE DE ILUSTRACIONES

Fig. 01: “Bucle de retroalimentación”. CAPRA, Fritjof, *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama, Barcelona, 1998, (2ª Ed. 2010), p. 78.

Fig. 02: Visualización de agentes según tipologías espaciales. MACAL, Charles M., y NORTH, Michael J., “Tutorial on agent-based modeling and simulation” en, *Journal of Simulation*. Vol.4, Operational Research Society, 2010, pp151–162. Texto online: <http://www.palgrave-journals.com/jos/index.html> [consultado 06/09/2012]

Fig. 03: Un Agente típico. MACAL, Charles M., y NORTH, Michael J. Op Cit.

Fig. 04: *Game of Life*, Conway, John H. (1960). Reglas y simulación, en <http://www.math.cornell.edu/~lipa/mec/lesson6.html> [consultado 06/09/2012]

Fig. 05: *Boids*. Reynolds, Craig. (1986). Reglas y simulación, <http://www.red3d.com/cwr/boids/> [consultado 06/09/2012]

Fig. 06: Estudio sobre Senderos que se forman espontáneamente en un espacio abierto, Universidad de Stuttgart. Helbing-Molnár. En BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, p. 163

Fig. 07, 08, 09: Análisis de movimiento de peatones (ORCA), en <http://gamma.cs.unc.edu/ORCA/>

Fig. 10 y 11: Modelo de Helbing-Mólnar para el estudio del tránsito de peatones en una calle estrecha y un pasillo con dos puertas. BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, pp.159-161.

Fig. 12: Modelo de Helbing-Mólnar para el tránsito de peatones de una habitación a otra por una sola puerta. BALL, Philip, *Masa crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México, 2008, p.160.

Fig. 13: Modelo de Helbing-Vicsek para la evacuación de un espacio en situación de pánico. En HELBING, Dirk, FARKAS, Illés, y VICSEK, Tamás: “Simulating dynamical features of escape panic” en *Nature* nº 407, 2000. Texto online: <http://angel.elte.hu/panic> [consultado 06/09/2012]

Fig.14: Adaptación y escala temporal en los CAS(1995). HOLLAND, John H., *El orden oculto. De cómo la adaptación crea la Complejidad*. Fondo de Cultura Económica, México, 2004.

- Fig. 15: Los siete Básicos para los CAS. Holland, John H.(1995). Op. Cit.
- Fig. 16: Cruzamiento y Algoritmos Genéticos en los CAS. Holland, John H. (1995). Op. Cit.
- Fig. 17: Interacción Agente-Entorno en los ABM.(2006). MACAL, Charles M., y NORTH, Michael J., "Tutorial on agent-based modeling and simulation" en KUHL, M., STEIGER N., ARMSTRONG F., y JOINES, J, (ed.), Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, 2005.Texto online: <http://informs-sim.org/wsc05papers/prog05.html> [consultado 06/09/2012]
- Fig. 18: Modelo de segregación residencial de Shelling. CROOKS, A.T, "Constructing and Implementing an Agent-Based Model of Residential Segregation through Vector GIS", CASA, Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL-University College London): Working Paper 133, London, UK, 2008. <http://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/latest/publications> [consultado 06/09/2012]
- Fig.19: Estructura de un modelo en *Sugarscape*. Epstein and Axtell, (1996). "Tutorial on agent-based modeling and simulation" en, *Journal of Simulation*. Vol.4, Operational Research Society, 2010, pp151–162. Texto online: <http://www.palgrave-journals.com/jos/index.html> [consultado 06/09/2012]
- Fig.20: Tabla de software para el ABM, según nivel de dificultad. CASA (UCL) en, <http://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/latest/publications> [consultado 06/09/2012]
- Fig. 21: *Condensation Cubes*. Hackke, Hans.(1962).
- Fig. 22: *Very Nervous System*. Rockeby, David. (1986-90). <http://www.davidrokey.com/vns.html> [consultado 06/09/2012]
- Fig. 23: *Evolved Virtual Creatures*. Sims, Karl. (1994). <http://www.karlsims.com/evolved-virtual-creatures.html>
- Fig. 24: *Messa di Voce*. Levin, Golan y Lieberman, Zachary (2003).<http://www.flong.com/projects/messa/> [consultado 06/09/2012]
- Fig. 25: *The Mood Swings*. Vesna, Victoria (2006). <http://victoriavesna.com/index.php?p=projects&item=4> [consultado 06/09/2012]
- Fig. 26: *Delicate Boundaries*. Sugrue, Chris.(2007). <http://csugrue.com/delicateboundaries/> [consultado 06/09/2012]
- Fig. 27: *Digital Babylon*. Soler-Adillon, Joan. (2005). http://www.upf.edu/hipertextnet/numero-8/a-life_art.html
- Fig. 28: Modelo para un ecosistema. McCormack, Jon. (2007). McCORMACK, Jon, "Artificial Ecosystems for Creative Discovery", en THIERENS, D., (Ed.), *Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2007*. Vol. 1, ACM, New York, pp. 301-307.
- Fig. 29: Biomorphs. Dawkins Richard.(1986). DAWKINS, Richard, *The Blind Watchmaker*. W.W. Norton & Company, Inc., New York, 1986.
- Fig. 30: Genetic Images. Sims, Karl. (1993). <http://www.karlsims.com/genetic-images.html>
- Fig. 31: E-volver. Driessens y Verstappen. (2006). <http://notnot.home.xs4all.nl/E-volverLUMC/E-volverLUMC.html>

- Fig. 32: Diseased Squares. Dorin, Alan. (2005). DORIN, Alan, "A Survey of Virtual Ecosystems in Generative Electronic Art", en ROMERO, Juan, y MACHADO, Penosual, (Ed.), *The Art of Artificial Evolution*. Natural Computing Series, Springer, Berlin, 2008.
- Fig. 33: Life Writer. Sommerer, Christa, y Mignonneau, Laurent. (2006). SOMMERER, Christa, MIGNONNEAU, Laurent, y STOCKER, Gerfried, *Interactive Art Research*. Springer/Wien, New York, 2009.
- Fig. 34: Plant Growing. Sommerer, Christa, y Mignonneau, Laurent. (1992). Op Cit.
- Fig. 34: A-Volve. Sommerer, Christa, y Mignonneau, Laurent. (1994). Op. Cit.
- Fig. 35: A-Volve. Diseño de la instalación. Op. Cit.
- Fig. 36: A-Volve. Diagrama de Programación de Algoritmos Genéticos. Op. Cit.
- Fig. 37: Iconica. Innocent, Troy. (1999). <http://troyinnocent.net/> [consultado 06/09/2012]
- Fig. 38: EIDEA. Mitchell, John, y Lovelles, Robb.(1990). <http://www.intelligentstage.com/Projects/eidea.early/eideapaper.html> [consultado 06/09/2012]
- Fig. 39: Eden. McCormack, Jon. (2001). KOMOSINSKI, Maciej, y ADAMATZKY, Andrew, (Ed.), *Artificial Life Models in Software*. Springer, London, 2009.
- Fig. 40: Eden. Diagrama del área de escucha. Op Cit.
- Fig. 41: Eden. Matriz celular del espacio y diagrama de la estructura interna de un agente. Op Cit.
- Fig. 42: Matriz de pago y esquema de interacción para El Dilema del Prisionero. Holland, John H.(1995). HOLLAND, John H., *El orden oculto. De cómo la adaptación crea la Complejidad*. Fondo de Cultura Económica, México, 2004.
- Fig. 43: Prototipo de Ecosistema basado en el Dilema del Prisionero <http://interaccioneslocales.wordpress.com/>
- Fig. 44,45: Prototipo Ecosistema.

