Acta Zoológica Mexicana (n.s.) 20(3): 107-125 (2004)

EXPERIMENTOS EN AUTOORGANIZACIÓN

César E. MOREIRA ARANA[1] , Miguel E. EQUIHUA ZAMORA[2] y José NEGRETE MARTÍNEZ[3]
[1] Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91000, Xalapa, Veracruz, MÉXICO
cema@xal.megared.net.mx
[2] Instituto de Ecología A. C. Km. 2.5, Antigua Carretera a Coatepec Nº 351. Congregación "El Haya", 91070, Xalapa, Veracruz, MÉXICO
equihuam@ecologia.edu.mx
[3] Instituto de Investigaciones Biomédicas UNAM, y Maestría en Inteligencia Artificial, Universidad Veracruzana. Sebastián Camacho No. 5, Zona Centro, 91000, Xalapa, Veracruz, MÉXICO
jnegrete@uv.mx

RESUMEN

Se describe el diseño y los experimentos llevados a cabo con un simulador de un ecosistema sintético de tres componentes (autótrofos, consumidores primarios y consumidores secundarios) por autómatas celulares, de tipo IBM (individual-based model), donde cada agente exhibe su propia singularidad por responder a una serie de etiquetas fijas que se pueden denominar de modo algo laxo “genes”, en tanto que otras de tipo variable definen su estado interno. Este modelo, a modo de “experimento pensado opaco”, se destinó al estudio de la autoorganización, manifestada a través de la aparición y conservación de un orden espontáneo y al análisis de los factores que pudieran desestabilizar dicha estructura. Mientras que el simulador cuenta con un limitado número de interacciones codificadas de corto alcance, su desenvolvimiento exhibe efectos no codificados, de largo alcance, o emergentes, que suponen la presencia de procesos de autoorganización subyacentes.
Palabras Clave: Sistemas complejos, simulación biológica, vida artificial, autómatas celulares, modelos ecológicos.

ABSTRACT

We describe the design and experiments performed with a computing simulation tool representing a synthetic ecosystem with three components (producers, herbivores and predators). This model is a cellular automata, but can be best defined as an individual-based model (IBM), where each agent exhibits its own singularity responding to a series of invariable labels that in an informal way can be named "genes", while other variable labels define their internal status. As an "opaque thought experiment" the model was devoted to the study of self-organization, stated as the emergence and conservation of a spontaneous order and the analysis of the factors that could destabilize this structure. Whereas the simulator count on a limited number of codified short range interactions, its evolution exhibits a long range uncodified emergent effects that are suggestive of the presence of underlying processes of self-organization.
Key Words: Complex systems, biological simulations, artificial life, cellular automata, ecological models.

INTRODUCCIÓN

La autoorganización, una de las características paradigmáticas de los seres vivientes, es el fenómeno mediante el que la complejidad de un sistema se incrementa espontáneamente, sin que tal incremento esté dirigido por el medio o por cualquier otro sistema exterior. Es un proceso de desenvolvimiento de la estructura y funcionamiento del

sistema donde el efecto del entorno es mínimo, al punto que puede ser descartado. Así, en este trabajo se propone que es factible estudiarla, e incluso experimentar con ella, si se dispone de un sistema artificial con similitudes estructurales, en otras palabras isomórfico con el natural que se quiere representar. El artificio es capaz de desplegar fenómenos análogos a los naturales, y por tanto es válido en él postular y explorar hipótesis aplicables a estos. Se entiende, que dicho isomorfismo significa la existencia de una correspondencia entre la representación y el fenómeno natural, no como una analogía superficial, sino como una verdadera homología lógica que, aunque se deba a distintos factores causales, las leyes seguidas por ambos son formalmente idénticas (Bertalanffy 1992, Thompson 1999).

En la actualidad, los modelos inspirados en la biología y las metáforas originadas en este campo, proveen las bases para la comprensión no sólo del mundo viviente, sino incluso de otros procesos que son mucho más convenientemente representados en forma distribuida. En lugar de buscar detrás de cada fenómeno a un agente eficiente que de manera centralizada "dirige" el proceso, se propone que la agregación de numerosos componentes simples, es capaz de producir un comportamiento emergente muy complejo. El caso de los anticuerpos, el vuelo en bandada de las aves, la construcción de un termitero, entre otros, son ejemplos de cómo no siempre es necesario recurrir a un control central que dirija el proceso (Resnick 1994).

Los objetos de estudio del biólogo a diversas escalas, desde aquellos sistemas que conforman a los seres vivos (p. ej. los intrincados mecanismos metabólicos), o los sistemas de los que forman parte (p. ej. los ecosistemas), son estructuras característicamente complejas. También aparecen una serie de peculiaridades como la resistencia al cambio (homeostasis), y la permanencia en el corto plazo que son difíciles de comprender cabalmente desde una perspectiva estática. Un rasgo común es que, lejos de ser cerrados, se trata de sistemas termodinámicamente abiertos, en los que hay un permanente flujo de energía y materia entre el exterior y ellos mismos, cuyos componentes siguen una enmarañada red de relaciones no lineales típicamente sensibles a las condiciones iniciales (Pérez & Moreira 2002). Estos sistemas son capaces de mantenerse en un equilibrio dinámico durante prolongados períodos. También, son notables las posibilidades de adaptación al cambio, permaneciendo aún por aclarar el origen de las fuentes de innovación, posiblemente surgidas desde el interior de sí mismos. Sumado a todo lo anterior, sus procesos pueden implicar áreas geográficas extensas o largos períodos temporales; no hay más que reflexionar por un momento en la distribución de la biodiversidad o en los fenómenos evolutivos.

Si se dispone de los instrumentos adecuados, quedan interesantes interrogantes por esclarecer. En el terreno ecológico podemos citar por ejemplo, la elucidación de los posibles mecanismos que regulan el ensamblaje de las especies para formar comunidades (Connor & Simberloff 1979, Drake 1990, Nee 1990, Wilson 1994, Jansen & Mulder 1999); la fragilidad de los ecosistemas (Gurney & Veitch 2000); y la posible existencia de fenómenos de autoorganización de los ecosistemas de forma independiente, o previa, a los fenómenos evolutivos en el sentido clásico (Kauffman 1993, Depew & Weber 1995), entre muchos otros.

El abordaje de estas cuestiones sin duda no es fácil, especialmente si se sigue un camino analítico donde se profundiza cada vez más en los detalles de cada sistema y no se integran de algún modo en un mecanismo general, por lo que se ha hecho necesaria la búsqueda

de herramientas y enfoques alternativos (Levins 1968). Así, otra de las posibles formas de emprender su acometida es de un modo sintético. Se trata de proceder en un sentido de abajo hacia arriba, en forma constructiva mediante simulaciones. De tal forma, un modelo expresado como un algoritmo y visualizado a través de programas de cómputo, sirve para representar a un sistema viviente o algún sistema complejo cuyo componente fundamental sean los seres vivos.

Un punto favorable de ese enfoque, es que mediante la elaboración de modelos computacionales, aún personas que no son especialmente diestras para las matemáticas, pueden representar procesos que implican un alto nivel de complejidad, como aquellos en los que surgen efectos no codificados expresamente, o dicho en otras palabras, en los que hay emergencia. En la tradición formal, como la matemática ya está dada, se puede hacer uso de ella en una simulación de tal forma que, en última instancia, funciona como una caja negra. Por el contrario, quienes sostienen un enfoque construccionista, suponen que el sujeto debe elaborar su propio instrumento con el fin de comprender todas las variables que lo determinan y tener el control del modelo conceptual que representan (Wilensky 1995). Sin embargo, en este último caso no necesariamente se disponen de todas las ventajas, porque es característico de los sistemas complejos que cuando se los representa, sólo permanecen claras aquellas reglas pertenecientes al modelo, pero existe una relativa opacidad al intentar interpretar las causas que conducen a los fenómenos emergentes.

Esto lleva, como es usual, a cuestionarse sobre la correspondencia de los modelos con la realidad, es decir, a considerar su estatus epistemológico, dado que inevitablemente se trata de simplificaciones que la representan de un modo muy general. Sin embargo, lo que a primera vista parece un defecto pudiera ser una de sus mayores virtudes. Es obvio que ningún modelo, por definición, puede incorporar la enorme multiplicidad de los elementos en juego y sus interacciones, como sucede en un sistema complejo real. Por consiguiente, se está obligado a identificar y tomar en cuenta sólo aquellos aspectos relevantes que permitan extraer la mayor cantidad de información posible con un empleo mínimo de recursos (Bedau 1999).

En una reciente interpretación se postula que las simulaciones pueden ser vistas como un tipo de “experimentos pensados”, que gozan de larga tradición en la física teórica. Si bien, ante la falta de control que existe sobre todos los procesos de la simulación, a diferencia de la -al menos aparentemente- sencillez y diafanidad de los experimentos pensados clásicos, y por la presencia de cierta turbiedad técnica se debería hablar de “experimentos pensados opacos” (Di Paolo *et al.* 2000). Sin embargo, tal opacidad debería ser considerada inherente a este tipo de simulaciones ya que no es posible simultáneamente permitir la emergencia de nuevas propiedades y a la vez comprender todas las interacciones que surgen espontáneamente de un sistema complejo. No hay duda que el aspecto más importante que acerca estos modelos de vida artificial a la vida real, es justamente la emergencia de nuevos comportamientos. Pero ello implica renunciar voluntariamente a su comprensión total, en lo que podríamos ver como una suerte de “principio de incertidumbre”. En la construcción de los modelos no se puede incrementar indefinidamente su transparencia sin perder a la vez los fenómenos emergentes, por lo que es necesario alcanzar una solución de compromiso entre ambos objetivos.

Existen numerosos paradigmas de simulación que tienen diferentes propósitos. Podemos citar, entre otros, el caso de los L-Systems (sistemas de Lindenmeyer) que son apropiados

para modelar el crecimiento vegetal (Haefner 1996); las redes neurales, que se utilizan extensamente en el campo de la inteligencia artificial (Baxter 1992); los algoritmos genéticos, que aprovechan procesos de herencia y variación en la construcción de los algoritmos (Holland 1992, Haefner 1996, Rocha 1995); y los autómatas celulares, cuya mayor aplicación es la comprensión de fenómenos donde tiene especial relevancia la distribución espacial (Wolfram 1984, Silvertown *et al.* 1992, Childress *et al.* 1996, Dunkerley 1997).

Los autómatas celulares presentan numerosas ventajas a la hora de emplearse para modelar fenómenos que suceden a gran escala espacial o en tiempos extensos. El modelo original planteado por Conway (Sigmund 1993) y muchos de los que derivaron de él, en términos estrictos son deterministas, y si bien representan un interesante tema de estudio para las matemáticas poco pueden reflejar la riqueza de interacciones que existen entre los seres vivos. Por esta última razón, algunos de esos modelos se han ido modificando para incorporar el azar, originando otros de tipo estocástico con mejores atributos. Adicionalmente, en los últimos años, se han ido combinando distintos enfoques, de tal suerte que ya es difícil clasificar de modo categórico a estos nuevos tipos de simulaciones. En principio, si se trata de modelar seres vivos, con sus principales características, de modo tal que conserven la individualidad y no se sigan procesos que engloben a conjuntos de ellos, podremos decir que estamos frente a un modelo basado en agentes, en un modelo basado en el individuo o también un IBM por las siglas en inglés de individual-based model (Gross 1996). En tal caso, es posible seguir el destino de cada individuo en el tiempo, integrar muchos niveles jerárquicos característicos de los procesos ecológicos y hacerlos espacialmente explícitos para que representen individuos con relaciones físicas, e incluso que detallen la posible movilidad de los mismos (Huston 1988, Reynolds 1998). Esto último ofrece cierta ventaja sobre los modelos exclusivamente analíticos que, en ocasiones, además de demasiado abstractos simplifican los procesos al extremo de anular las relaciones espaciales, como sucede en el caso de la aplicación de las ecuaciones de Lotka-Volterra a una interacción depredador-presa (Schmitz & Booth 1996, Bedau 1999, Mitchell 2001).

En este trabajo se tuvo el objetivo de crear un sistema que permitiera experimentar con un proceso de autoorganización, recurriendo al paradigma de la vida artificial, por lo que se recurrió al diseño y elaboración de un simulador genérico que pudiera emplearse para la modelación de procesos a mayor escala y que se denominó AUTORG.

La idea medular consistió en situar agentes individuales con un limitado repertorio de comportamientos de muy corto alcance (espacial y temporal), dispuestos en un soporte con las condiciones apropiadas que facultaran el surgimiento de estructuras, o de relaciones complejas de largo alcance (espacial y temporal). El punto de interés fue determinar cuáles son las condiciones que suscitan la aparición de fenómenos de autoorganización, en el entendido de que no se trata de forzar al sistema o de dirigirlo, sino de posibilitar que se manifiesten algunas propiedades emergentes (Rohani *et al*. 1997).

La intención no fue representar algún sistema real en particular, sino crear un mundo artificial en el que aparecieran fenómenos de autoorganización cuyo desenvolvimiento permita aclarar cómo se originan y cuáles son los factores que los influencian. Desde una perspectiva inductivista ingenua pudiera creerse que la ausencia de “datos duros” obtenidos de la realidad convierte a un modelo en un instrumento meramente especulativo. En la

biología incluso hasta los experimentos virtuales computacionales pudieran ser juzgados como algo exótico y posiblemente inútil, como sugieren Mahner y Bunge (2000) al discutir sobre los enfoques fuerte y débil de la vida artificial. Por el contrario, en la física no existe tal prejuicio y los experimentos pensados han sido extensamente empleados, al extremo que para Popper (1992) en algunos casos se ha caído en su abuso. Sin embargo, para el desarrollo de la biología teórica, la elucidación de los mecanismos de autoorganización y los fenómenos de emergencia se requiere un nivel de abstracción y de generalidad que quizá sólo pueda alcanzarse mediante el empleo de modelos de simulación no trivial como el que nos ocupa (Risan 1997).

MATERIAL Y MÉTODOS

DISEÑO DE UN MODELO COMPUTACIONAL

Como la autoorganización de un sistema puede ser revelada a través de la aparición y conservación de un orden espontáneo, ya sea por el surgimiento de nuevos patrones estructurales o de comportamientos no codificados, resulta relevante el análisis de aquellos factores que pudieran sostenerlos o desestabilizarlos. Y por tratarse de fenómenos que se desarrollan tanto en el tiempo como en el espacio, se prefirió el diseño de un simulador que en forma general podría clasificarse como de autómatas celulares bidimensional, pero que quedaría mejor identificado como un modelo estocástico de poliagentes en retícula, o directamente un IBM, porque cada "individuo" exhibe su propia singularidad al responder a una serie de etiquetas fijas que se pueden denominar de un modo algo laxo "genes", mientras que otras de tipo variable definen su "estado interno".

Una descripción muy simplificada consiste en decir que es un "universo cuadrado", constituido por 100 x 100 celdillas de "sustrato", donde "viven" los individuos que se vinculan entre sí con los ocho vecinos inmediatos (denominada técnicamente una relación de vecindad de Moore). En este universo no sólo el espacio está discretizado, también lo está el tiempo, por lo que los cambios ocurridos no se manifiestan de forma continua sino de un ciclo al siguiente, si bien pueden seguirse miles de ellos (Fig. 1). Como puede imaginarse, la complejidad de cómputo crece exponencialmente con el tamaño del universo, y aunque lo ideal sería trabajar con arreglos muy extensos debe ponerse un límite practicable dependiendo de los instrumentos de modelación disponibles.

Formalmente, cada individuo está representado por un número entero largo (en el sentido de los lenguajes de cómputo), donde un conjunto de cinco dígitos invariables asumen el papel de "genes", en este caso: modo de vida, movilidad, longevidad, tono del color, y sensibilidad al sustrato.

El gen "modo de vida" presenta tres alelos posibles: autótrofo, consumidor primario y consumidor secundario, por lo que determina las características básicas de los individuos.

El gen "movilidad" comprende cuatro alelos: sésil, movimiento al azar, movimiento atractor hacia los de su propia "especie" y movimiento repulsor hacia los de su propia "especie".

El gen "longevidad" presenta nueve alelos que limitan la supervivencia del individuo de 10 a 90 ciclos.

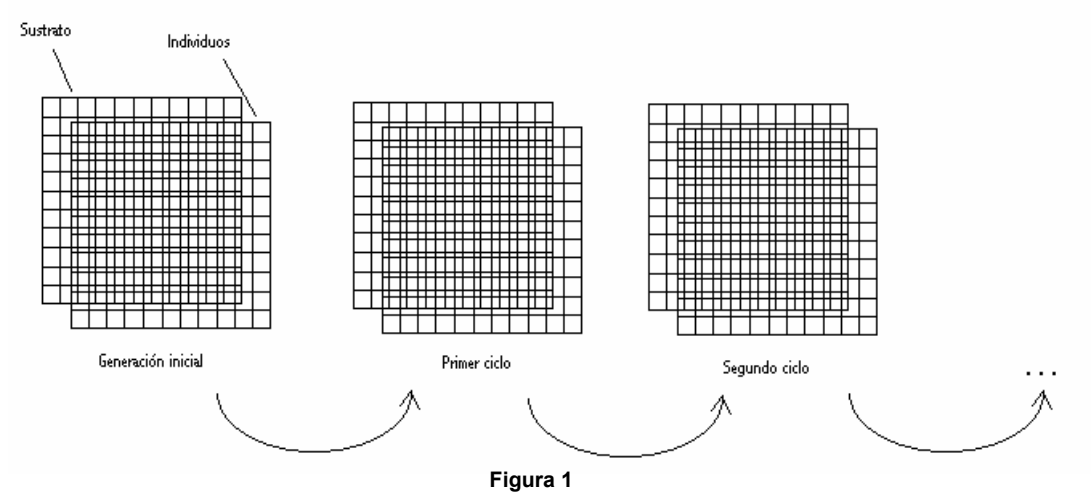


Figura 1
Esquema de la relación entre matríces de sustrato y población en los diferentes ciclos.

El gen “color” cumple una función de distinguir a los distintos grupos de individuos, asignando una gama verde a los autótrofos, de tonos rojizos a los consumidores primarios y de gris a los secundarios.

El gen “sensibilidad a un factor X” presenta cinco alelos: a) migrante (para individuos móviles) hacia donde los valores del sustrato son mayores; b) migrante (para individuos móviles) hacia donde los valores del sustrato son menores; c) supervivencia disminuida; d) fecundidad disminuida; c) fecundidad incrementada.

Los cuatro dígitos adicionales, que pueden variar de un ciclo a otro, señalan el “estado interno” del individuo: su nivel energético y la edad (Fig. 2).

El estado energético es un valor que depende del modo de vida de los individuos, dado que se ha deseado representar de manera muy simplificada la disminución que ocurre en cada nivel trófico. Para los autótrofos, con el transcurso del tiempo su nivel energético se incrementa en diez unidades arbitrarias para cada ciclo. En el caso de los consumidores primarios, obtienen un incremento de siete unidades por cada autótrofo consumido. Mientras que los consumidores secundarios, adquieren cinco unidades por cada individuo consumido (ya sea un consumidor primario o secundario). También el estado energético afecta la reproducción dado que cuanto sea más elevado podrá dejar más propágulos, pero cada hijo disminuye en una unidad el nivel energético del progenitor.

Finalmente, la edad es el número de ciclos que ha logrado sobrevivir el individuo hasta un momento dado.

A pesar que el programa diseñado es largo y complejo, y su descripción exhaustiva resultaría tediosa en razón del manejo de archivos, la operación con arreglos extensos, la presentación gráfica en pantalla, etc., el juego de comportamientos previstos que pueden sufrir los agentes es extremadamente sencillo. En la retícula, se selecciona al azar una posición y se evalúa en primera instancia si hay un individuo, en dicho caso se identifican los alelos que posee para cada uno de los genes (Cuadro 1). También se analizan las posiciones de los ocho individuos vecinos y el valor del sustrato en la misma posición.

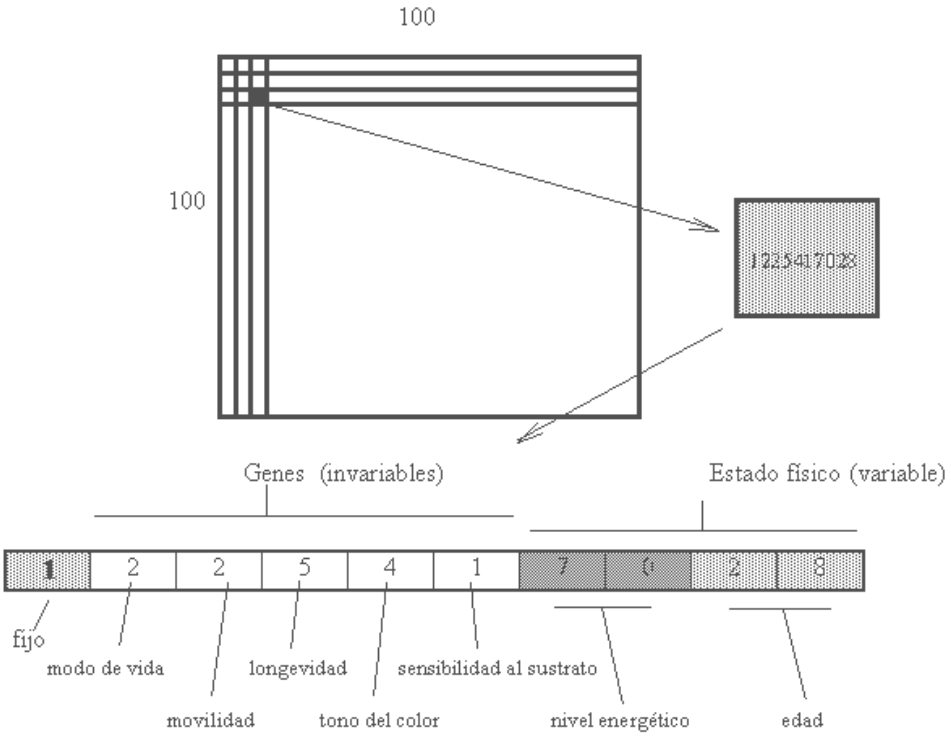


Figura 2
En cada celdilla puede haber un individuo que posee un cierto "genotipo" e indicadores de su estado "interno".

Cuadro 1
Tipos de genes y sus posibles alelos.

	GENES				
Alelos	**Modo de vida**	**Movilidad**	**Longevidad**	**Color**	**Sensicbilidad a un factor "X"**
0	-	-	-		-
1	autótrofo	Sésil	10 ciclos	La gama de color depende tanto del gen del tono de color como del modo de vida: gama verde para autótrofos, gama rojiza para consumidores primarios y gama grisácea para consumidores secundarios.	-
2	Consumidor primario	Al azar	20 ciclos		Migra hacia donde aumenta x
3	Consumidor secundario	Repulsor hacia los de su "especie"	30 ciclos		Migra hacia donde disminuye x
4	-	Atractor hacia los de su "especie"	40 ciclos		X disminuye la supervivencia
5	-	-	50 ciclos		X disminuye la natalidad
6	-	-	60 ciclos		X aumenta la natalidad
7	-	-	70 ciclos		-
8	-	-	80 ciclos		-
9	-	-	90 ciclos		

Las acciones básicas que puede sufrir el agente evaluado, que dependen de sus características individuales (alelos presentes), de su entorno inmediato (vecinos) y del azar, son: sobrevivir o no al siguiente ciclo, moverse, alimentarse, o reproducirse. Queda claro que dichos efectos pueden ser algo más complejos en razón de la historia y la posición de los individuos (por ejemplo, un agente con mucha energía podrá dejar más propágulos que otro con poca), pero se trata de efectos locales o de corto alcance ya que se producen de un ciclo al siguiente y en celdillas vecinas (Fig. 3). Lo interesante es que los efectos mayores, que pudiéramos denominar globales o de largo alcance, son necesariamente emergentes.

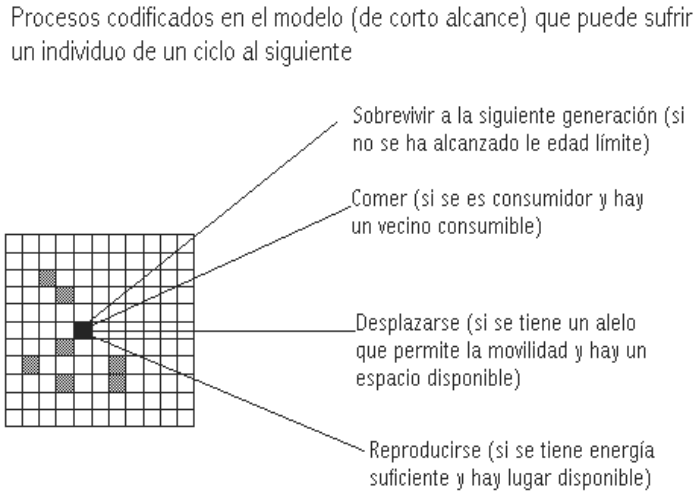


Figura 3
Procesos que puede sufrir un individuo de un ciclo al siguiente y que se hallan codificados en el modelo (de corto alcance).

Adicionalmente se desarrollaron diversos programas auxiliares que permitieron tanto la elaboración de los archivos iniciales, su edición por recorte o pegado, así como el análisis estadístico de los archivos que entrega como salida el propio simulador. Mientras que algunos programas se dedicaron al estudio del registro de cada corrida, otros se emplearon en la exploración de las matrices que a modo de instantánea guardan la posición de los individuos en un momento dado de la corrida. Así, se pudo mapear la distribución de los diversos alelos, definir el número de genotipos presentes y calcular la diversidad en un instante dado.

Cómo clasificar a los individuos

En este modelo se asume que si dos individuos comparten los mismos alelos pertenecen a la misma "especie", independientemente de su estado físico (condición energética y edad) que, como es obvio, puede ser diferente. En discrepancia con otros trabajos, y dado que no se busca caracterizar procesos evolutivos a gran escala, aquí no hay posibilidad de cruzamiento, el juego de genes es único (podría decirse que los individuos son "haploides")

y no hay mutación. Evidentemente, si se estableciera la posibilidad de cruzamiento, como confusamente sucede en otras simulaciones (ver Hraber *et al*. 1997), no tendríamos la representación de distintas "especies" sino de genotipos en competencia.

En el mundo natural, en una misma especie, coexisten individuos con diferentes alelos, pero en este sistema tan simplificado debemos entender que en realidad se están representando algunas entidades que podrían denominarse como "supergenes" o "ecogenes" ya que, por ejemplo, el gen "modo de vida" en un individuo real debería englobar a un muy elevado número de genes diferentes. Por ello, en el presente caso, determina características substancialmente importantes como para definir diferentes grupos. En la naturaleza también se ha postulado la existencia de supergenes, considerándose a éstos como "complejos de genes ligados, que son favorables en ciertas combinaciones y no en otras" surgidos por ejemplo, por la anulación del entrecruzamiento en conjuntos de genes coadaptados (Dobzhansky 1975).

Otros modelos similares

Es interesante notar que se han hallado, con posterioridad al desarrollo del presente trabajo, descripciones de modelos que presentan numerosas similitudes con AUTORG, lo que confirmaría la convergencia que sobre este tema pueden producir la intención de simular los mismos efectos y por enfrentar las mismas restricciones. Sin embargo, sería útil señalar ciertas diferencias de importancia entre algunos de ellos y el presente simulador que evidencia la necesidad de diseñar un modelo propio en lugar de recurrir a uno previamente elaborado.

El modelo denominado ECHO (Hraber *et al*. 1997), cuya concepción se basa en un trabajo de Holland hacia principio de la década de los '90, dio origen al modelo GECKO, descrito por Schmitz y Booth (1996). Aunque la intención de este último trabajo apunta a la investigación sobre cadenas tróficas, aparecen una serie de coincidencias interesantes con AUTORG: la elección de tres niveles tróficos (plantas, herbívoros y carnívoros), el uso de agentes y de un sustrato en un modelo espacialmente explícito, así como algunas similitudes en cuanto al flujo de energía entre los diversos grupos. Pero también presenta numerosos puntos de discrepancia: GECKO en las interacciones básicas codificadas es mucho más complicado que AUTORG. Por ejemplo podemos señalar la modelación de un "costo metabólico" de los agentes, de dos tipos de reproducción (sexual y asexual), la existencia de cuatro cromosomas por individuo, la aparición de diversos comportamientos en los agentes y fundamentalmente de una gran diferencia en la concepción de la distribución espacial, ya que GECKO no recurre a una retícula bidimensional, sino al empleo de un espacio continuo que permite la coexistencia de varios individuos en un mismo sitio, disponiendo a los agentes en forma de anillo unidimensional. Las relaciones entre los diversos sitios se establece mediante la construcción de una lista de "instigadores" y a través del cálculo de las distancias entre los agentes.

A partir de la descripción de las características del modelo, se puede inferir que GECKO es sensiblemente más complejo que AUTORG, aunque como consecuencia de dicha complejidad no se ofrecerían ventajas substantivas para el estudio de la autoorganización, resultando aún más difícil el discernimiento entre los efectos de corto alcance, que forman parte del modelo, de aquellos de largo alcance, no codificados y que se espera resulten de modo emergente.

El trabajo de Hraber *et al.* (1997), donde se describe a ECHO señala también coincidencias y diferencias con AUTORG. En ECHO, el espacio está discretizado en forma de rejilla, pero puede contener a varios agentes. Estos últimos pueden sufrir intercambios, combates o apareamientos, existiendo una transferencia de recursos entre depredadores y presas, no sólo energéticos sino inclusive genéticos. Durante los apareamientos puede producirse mutación, y el entrecruzamientos del material genético con la consiguiente creación de híbridos. De ese modo, como podemos inferir, el resultado completo de tantas interacciones y procesos entre agentes es de una complejidad extrema, lo que incrementa sensiblemente la opacidad del modelo. Incluso en algunos casos se hace difícil distinguir la significación atribuida a algunos efectos codificados, como la posibilidad de intercambio de material genético durante la interacción depredador-presa.

RESULTADOS

EFECTOS EMERGENTES QUE NO SE HALLAN CODIFICADOS EN EL MODELO O DE LARGO ALCANCE

En una primera etapa, luego de ensayar diferentes combinaciones de individuos en distintos escenarios (bases o sustratos), y dado que existe la posibilidad de jugar con cientos de especies diferentes que pueden relacionarse de modo complejo haciendo el trabajo virtualmente interminable, se decidió construir una matriz de cinco mil individuos situados aleatoriamente, con todas las combinaciones de alelos distribuidos al azar. Se determinó poner al estado físico y a la edad en cero, y se eligió una base o sustrato no uniforme (con un gradiente) para que se manifestaran todas las interacciones posibles.

Haciendo correr en numerosas ocasiones el programa AUTORG, se obtuvieron efectos que no estaban previamente codificados por el algoritmo, y que por ende son emergentes. Recordaremos que en el programa, sólo se contemplan comportamientos de los agentes a las casillas vecinas y de una generación a la siguiente. Los procesos que se registran en forma temporal a lo largo de muchas generaciones, y que espacialmente se extienden en áreas grandes, se pueden considerar como efectos de largo alcance (Fig. 4). Podemos señalar principalmente a los agrupamientos y formación de estructuras semicirculares en forma de lúnulas, la disminución en el número de genotipos interactuantes (si se parte de una población muy diversa), la selección de algunos genotipos sobre otros, y el establecimiento de correlaciones en la cantidad de individuos a lo largo del tiempo.

Las salidas del registro de numerosas corridas de una versión temprana de AUTORG, fueron analizadas matemáticamente, con el fin comprobar si el modelo se ajusta a la teoría de la autoorganización en punto crítico de Bak *et al*. (1988). En dicho enfoque, los sistemas dinámicos espacialmente extendidos, presentan dos fenómenos cuya concurrencia requiere una explicación unificadora: una característica temporal como su comportamiento en forma de “ruido parpadeante” (flicker noise), y otra espacial, como es la estructuración en forma fractal. Estos fenómenos corresponden con patrones específicos de distribución de frecuencias que son del tipo $f^{-\beta}$. Con ese fin, otro equipo de trabajo trató como una señal el número de individuos de las poblaciones globales de los tres modos de vida principales (autótrofos, consumidores primarios y consumidores secundarios) del presente modelo. Al obtener su espectro de potencia de las abundancias, efectivamente se demostró que tiene

la forma f -β cuyo exponente estuvo comprendido en un rango entre 1 y 3 (Piotrkowski *et al*. 1999).

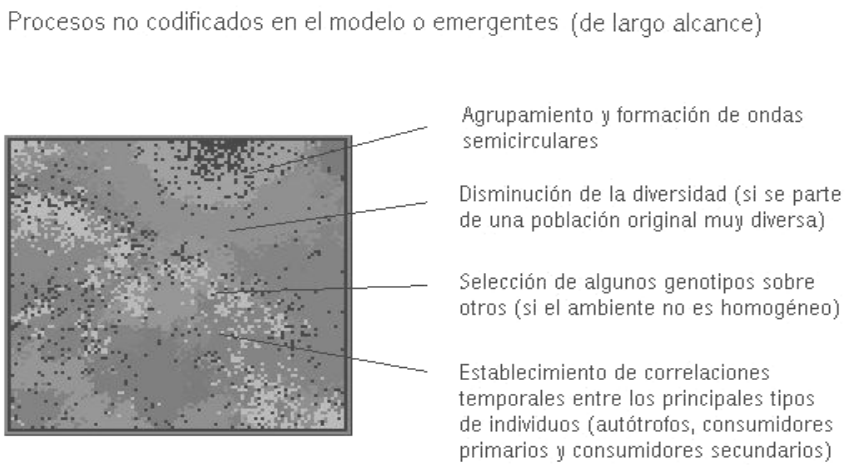


Figura 4
Procesos emergentes que pueden sufrir distintos conjuntos de individuos, que no se hallan codificados en el modelo, se desarrollan a lo largo de muchos ciclos y en zonas extensas (efectos de largo alcance).

Presentación de un ejemplo de corrida

A continuación se exponen algunos resultados obtenidos de un caso en particular que se indicará como ejemplo A. Debe hacerse notar que cada secuencia de eventos de simulación es único e irrepetible, aún en el supuesto de que se parta de los mismos archivos originales de población inicial y de sustrato, porque debido a la gran cantidad de azar incorporado al modelo, no hay posibilidades de que se presenten dos secuencias completas de eventos idénticas. Sin embargo, existe una gran coherencia en los comportamientos resultantes, y existen fenómenos similares e identificables para todas las corridas.

Distribución y formación de estructuras (procesos emergentes con manifestación espacial).

La distribución de los individuos en el archivo original de población inicial es al azar, pero al cabo de algunas decenas de ciclos comienza a manifestarse la aparición de parches de individuos similares, probablemente con el mismo origen, y que por consiguiente comparten el mismo tono de color. Al cabo de algunos cientos de ciclos los grupos se observan más organizados, con la aparición de estructuras en forma de onda o media luna, conformadas por consumidores primarios que se desplazan, alimentándose de los autótrofos y "huyendo" de los consumidores secundarios que parecerían "perseguirlos" (Fig. 5). El significado de estos patrones en forma de lúnula, comunes a numerosos modelos, y sus posibles consecuencias ecológicas, si las tuviera, aún permanece poco claro (Rohani *et al*. 1997).

Sin embargo, pudieran ser vistos como entidades biológicas temporales de un nivel superior al individual, cuya estructuración resulta apropiada para la obtención y transferencia de energía de unos a otros, formando una especie de "polo alimenticio" en el frente de ataque. Finalmente, podría inferirse que la autoorganización alcanzada, parecería conferir ventajas a quienes forman grupos y se "protegen" entre sí.

Debe señalarse, que dichas estructuras se repiten a varias escalas, desde aquellas constituidas por algunos pocos individuos hasta por cientos o aún miles de ellos. En todos los casos son reconocibles características comunes, lo que sugiere la aparición de un arreglo fractal con estructuras autosimilares.

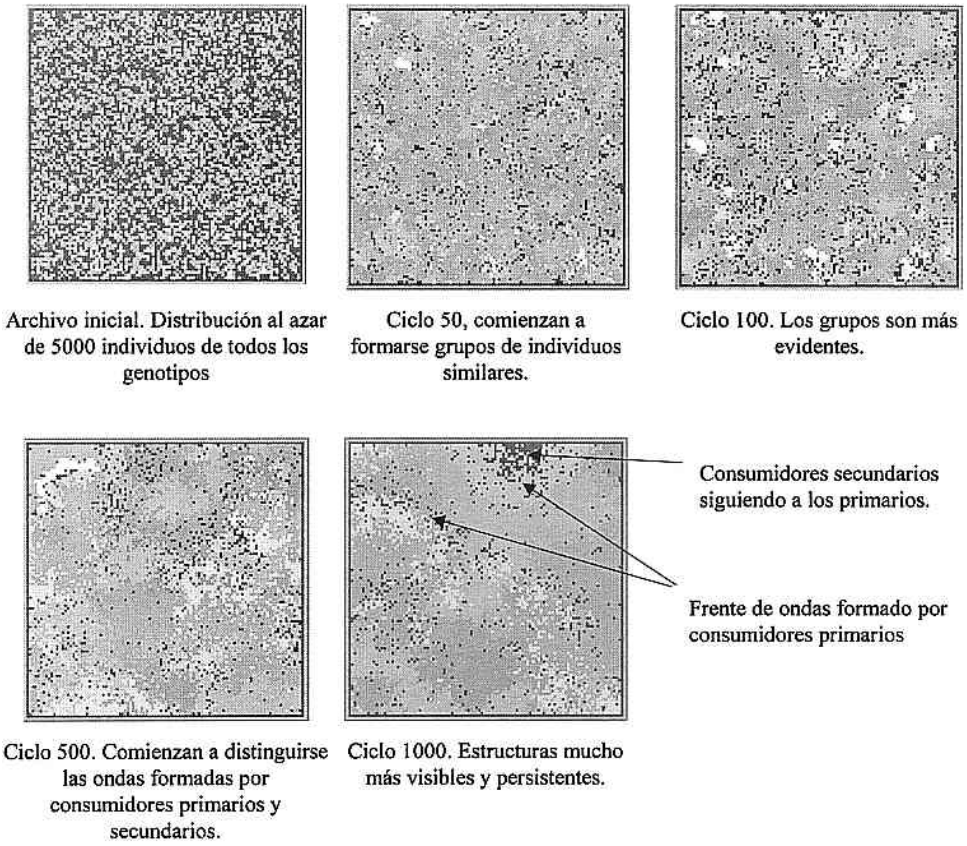


Figura 5
Formación de estructuras características en media luna que se desplazan en forma de ondas.

Suponer cierto valor morfogenético a estas estructuras parecería quedar fuera de la discusión, teniéndose por una mera analogía circunstancial, del mismo modo que el término autómatas celulares no supone necesariamente su empleo como simulador de fenómenos a nivel tisular. Sin embargo, también podría tener esta aplicación. Los aún muy poco aclarados fenómenos que sufre un organismo durante el desarrollo ontogenético reposan

por lo general en teorías de naturaleza instruccionista que postulan la existencia de gradientes morfogenéticos, o la síntesis de substancias con actividad inductora, relacionados con la actividad de un conjunto de genes homeóticos de quienes, en última instancia, depende tanto la diferenciación celular como la morfogénesis. Pero algunas debilidades de estos modelos han propiciado, recientemente, la aparición de un nuevo y controversial abordaje. En esta visión, que podríamos definir como encuadrada en un patrón explicativo de tipo seleccionista (véase Martínez 1997) la expresión de los genes seguiría una pauta aleatoria, lo que no quiere forzosamente significar irrepetible y el caso visto en AUTORG es un buen ejemplo de ello. Además, según este enfoque, la identificación entre las células de un organismo en desarrollo dependería de optimizar tanto su propia multiplicación como la cooperación, al utilizar productos metabólicos de las células vecinas, de un modo análogo al de los individuos en un ecosistema (Kupiec & Sonigo 2000), lo que hace de la aparición de estructuras una consecuencia de la competencia, al modo darwiniano que usualmente se aplica a los organismos, pero en este caso entre poblaciones celulares. En síntesis, lo que busca tal enfoque es proponer que la morfogénesis se produce en un esquema "ecológico" de azar-selección, más que a partir de seguir las instrucciones dictadas por un organizador -de algún modo "exterior"- como sería un rígido programa genético heredado.

EFECTOS SOBRE LAS POBLACIONES DE INDIVIDUOS (PROCESOS EMERGENTES CON MANIFESTACIÓN TEMPORAL)

Relación dinámica entre los principales modos de vida

En el caso que nos ocupa, a partir de los primeros cientos de ciclos se establece una cierta correlación entre los principales modos de vida (correspondiente al ejemplo A en la Fig. 6). Pasada la primera etapa de estabilización se observan oscilaciones periódicas e irregulares en el número de individuos, con un acoplamiento positivo aunque desfasado, entre los consumidores primarios y secundarios. También, se aprecia una relación inversa entre el número de autótrofos y consumidores secundarios que -notablemente- es similar a aquellas en las que se consideran sólo tres especies (por ejemplo, la correspondiente a otra corrida denominada ejemplo B, en la Fig. 7), y esto a pesar de la paulatina disminución de la diversidad sufrida en el primer caso. Pudiera concluirse que en este simulador sólo es relevante el tipo de vida, pero otros efectos que se analizan a continuación parecen señalar lo contrario.

Disminución de la diversidad

Mediante un programa de cómputo auxiliar elaborado con tal fin, se obtuvo un perfil de las especies presentes en el archivo inicial generado al azar, y durante el ciclo 50, 100, 500 y 1000, de una corrida en particular, en este caso correspondiente al ejemplo A (Cuadro 2). Se puede observar una disminución prácticamente exponencial de la diversidad, a medida que transcurren los ciclos, y el incremento correspondiente en el promedio de los individuos del mismo genotipo presente (Fig. 8). Dicho de otro modo, en un principio hay muchos genotipos con pocos individuos de cada uno y con el transcurso de los ciclos hay menos genotipos, integrados por muchos individuos. Sin embargo, en otras corridas, se ha visto que si se inicia con un grupo muy poco diverso, por ejemplo formado por sólo tres especies de cada modo de vida, pueden subsistir muchos miles de ciclos sin extinguirse necesariamente.

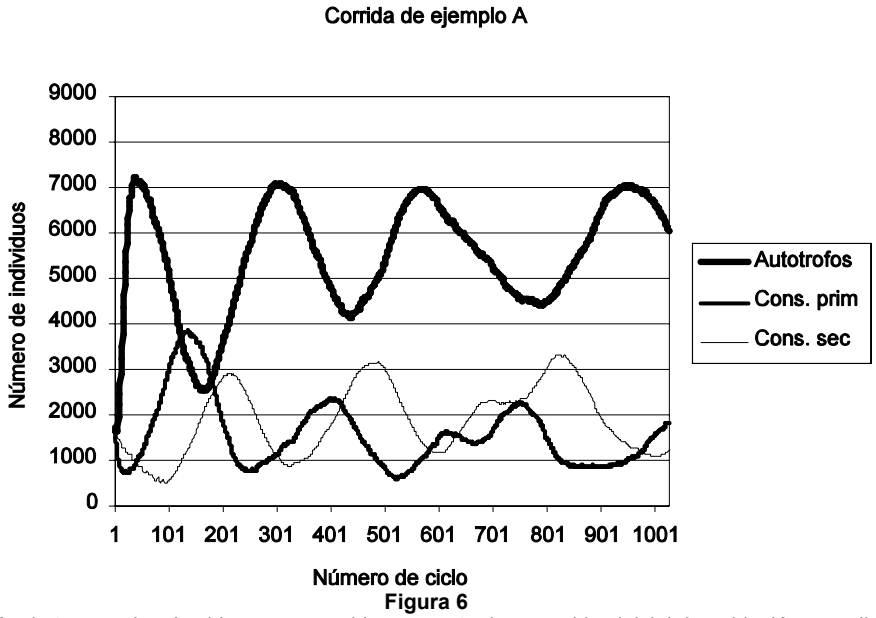


Figura 6
Evolución de tres modos de vida en una corrida que parte de un archivo inicial de población muy diverso.

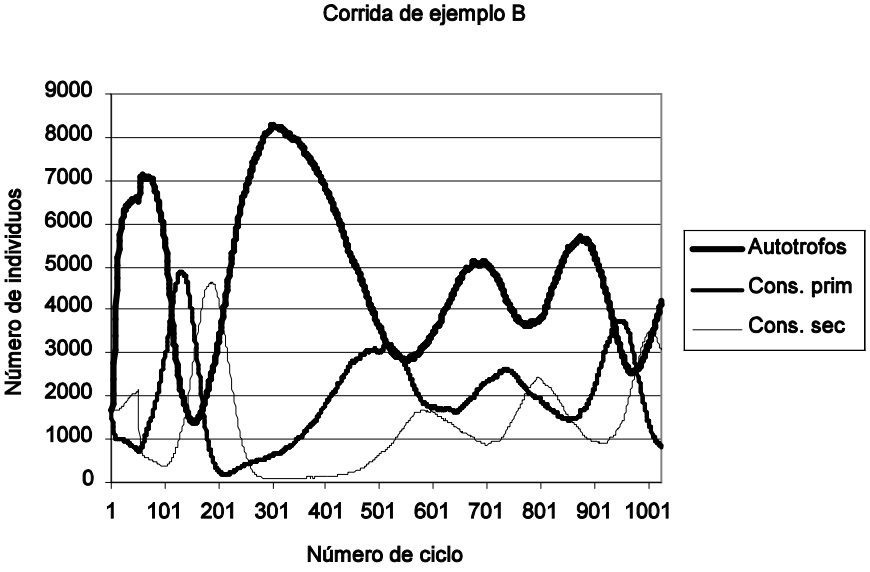


Figura 7
Evolución de los tres modos de vida partiendo de un grupo con solo tres genotipos. Todos comparten 50 ciclos de longevidad, un mismo tono de color y el sustrato aumenta su fecundidad; pero mientras los autótrofos son inmóviles, los consumidores primarios y secundarios se mueven al azar.

Cuadro 2
Tabulación de la evolución de la diversidad en la corrida del Ejemplo A.

Ciclo	Número degenotipos	Promedio de individuos por genotipo
0	3519	142
50	1394	701
100	610	1411
500	76	12143
1000	29	318,79

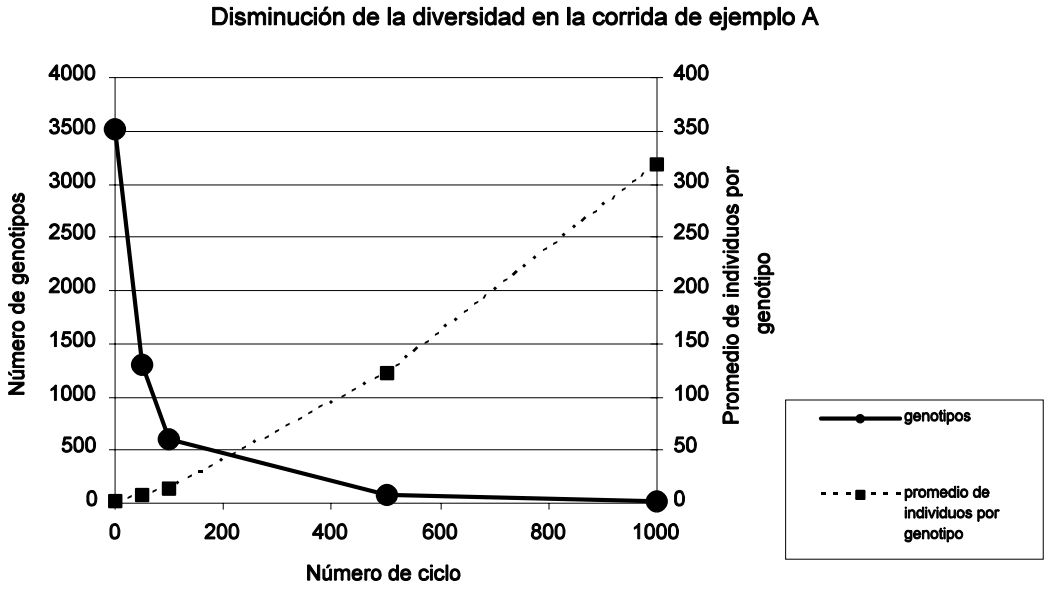


Figura 8
Graficación de la disminución de la diversidad y el aumento en el promedio de individuos por genotipo en la corrida de Ejemplo A.

Selección de especies

En la imagen que se muestra en la Fig. 9, obtenida a partir de un programa auxiliar que mapea la localización de los alelos de cada uno de los genes en particular, puede verse cómo el gen para la sensibilidad a un factor X exhibe, en el archivo original de población, una distribución al azar para todos los alelos posibles. Con el transcurso de la simulación, y dado que el desarrollo de la corrida se produce con una condición ambiental no homogénea, se selecciona paulatinamente el alelo de valor 7 (cuya distribución se puede observar en un tono más claro).

Podemos afirmar que se presenta un fenómeno análogo a la selección natural, porque, al cabo de algunos cientos de ciclos, predominan las especies poseedoras del alelo de tipo 7 (que aumenta la fecundidad donde los valores del gradiente son mayores) del gen para la sensibilidad a un factor X. Por el contrario, ese hecho no se produce si el ambiente tiene un valor uniformemente cero, manteniéndose la diversidad alélica.

Entre otros efectos selectivos interesantes que se han podido observar, es el de un paulatino predominio de los genotipos con longevidad media y grande, con la disminución de aquellos con longevidad pequeña.

Como puede verse, estamos hablando de procesos de autoorganización en los que participan fenómenos comparables a la selección natural o, si se prefiere un término menos comprometido, similares a los de un filtro selectivo. Pero tal filtro, no implica su asociación a un fenómeno evolutivo, dado que en el presente modelo no hay posibilidad de mutación o de recombinación génica, sino a un proceso que, en términos generales, podríamos denominar como de desenvolvimiento. La pregunta que surge es si efectivamente puede demostrarse la existencia de dos niveles de selección: por un lado, de una selección que propicia la autoorganización, y por otro, aquella de un nivel superior que actúa sobre los propios sistemas autoorganizados. Además, queda por aclarar cuál sería su nivel de relación, tema que ha sido discutido por Depew y Weber (1995).

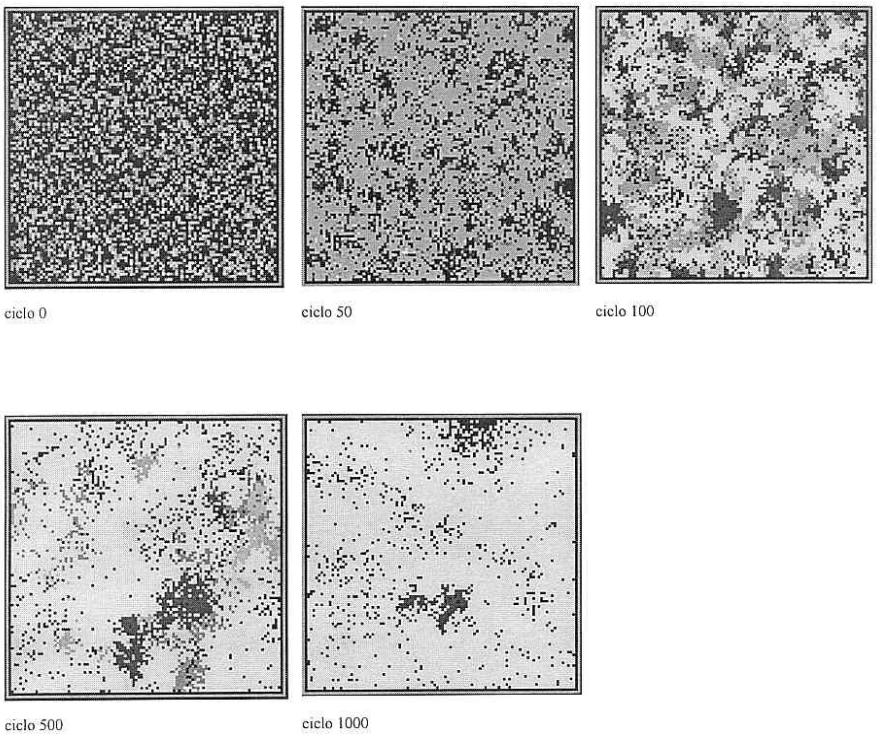


Figura 9
Distribución de los alelos del gen para la sensibilidad a un factor X. Con el tiempo predomina el alelo 7 (visible en tono más claro).

DISCUSIÓN

El desarrollo de un modelo computacional propio es de importancia capital si se desea tener la máxima supervisión sobre la distinción entre los procesos codificados y los emergentes, hecho especialmente destacado si lo que se desea demostrar es la aparición de fenómenos de autoorganización, a pesar de que algunos autores consideren que el esfuerzo de creación de un nuevo mundo artificial equivalga a una repetida reinvención de la rueda y propongan adherirse a un modelo ya probado (Casti 1997). En el caso de haber recurrido a un modelo previamente elaborado nos hubiéramos enfrentado, por un lado, a que la intención básica de su construcción pudo ser distinta a la exploración que nos ocupa; y por otro, a la insuficiencia en su descripción o a la existencia de posibles funciones e interacciones entre agentes que, sin ser relevantes, complican el modelo y lo vuelven aún menos transparente. Nunca se hará bastante énfasis en que un modelo debe necesariamente ser lo más simple posible, en tanto baste para representar el fenómeno deseado.

Sin embargo, la contrastación es relevante ya que las coincidencias entre simulaciones pudieran ser un indicador de fenómenos subyacentes comunes. Así, en el estudio de otros modelos ecológicos de depredador-presa, se ha demostrado la consistencia en la aparición de ondas periódicas, cuya persistencia pareciera ser menor si las oscilaciones son homogéneas que en el caso que se permita la aparición del caos. En todo caso, debido a las dificultades de experimentación con sistemas naturales, el uso de este enfoque permitiría, por ejemplo, inferir la mecánica de la invasión de una plaga a una población de hospederos (Sherratt *et al.* 1997, Sherratt 2001) o las características de la invasión de una especie extraña a una determinada comunidad (Richard & Dean 1998).

En el presente modelo computacional, se pueden inferir algunas características atribuidas a la autoorganización, como es la formación de estructuras fractales, la constitución de relaciones estables, pero dinámicas, entre los componentes del sistema, la persistencia de dichos fenómenos a lo largo del tiempo, y haberse comprobado analíticamente que el espectro de potencia de las señales sigue un patrón de autoorganización en punto crítico. El desenvolvimiento, que puede seguirse desde un punto donde las condiciones iniciales son de un máximo azar hasta un estado "atractor" en que se presenta cierto orden, demuestra efectivamente que se trata de un sistema autoorganizado.

Ello lo hace valioso no sólo como instrumento heurístico en la biología teórica, al ser una encarnación de los experimentos pensados, sino como un instrumento de modelación para la solución de problemas de orden práctico. Ya se han iniciado algunas pruebas preliminares, cuya descripción excede el alcance del presente trabajo, pero que sugieren la conveniencia de su uso para la elucidación de problemas ecológicos. Por ejemplo, cuáles son los principales factores responsables del sostenimiento del orden en un ecosistema natural, qué determina la fragilidad de los ecosistemas (¿presentarán siempre la misma estabilidad a lo largo del tiempo?), cuál es el resultado deletéreo de las perturbaciones, cuál es el efecto del orden de invasión durante el ensamblaje de las comunidades, entre muchos otros.

Visto desde un panorama algo más general, sería posible diseñar "experimentos pensados opacos" cuya intención fuera extraer consecuencias de aplicación general, a

otros sistemas similares o isomórficos con el que se ha desarrollado, incluso no necesariamente bióticos, lo que nos abre una nueva y promisoria área de estudio que podría denominarse biología artificial, cuyo futuro desarrollo aún estamos lejos de imaginar.

LITERATURA CITADA

Bak, P., C. Tang & K. Wiesenfeld. 1988. Self-organized criticality. *Phys. Rev.*, 38(1):264-374.

Baxter, J., 1992. The evolution of learning algorithms for artificial neural networks. Pp. 364-374. *In:* Green, D. and Bossomaier, T. (Eds) *Complex Systems*, IOS Press.

Bedau, M. A. 1999. Can Unrealistic Computer Models Illuminate Theoretical Biology? Pp. 20-23. *In:* Proceedings of the 1999 Genetic and Evolutionary Computation Conference Workshop Program, Orlando, Florida, July 13, 1999, Annie S. Wu, Ed.,

Bertalanffy, L. 1992. *Teoría General de los Sistemas*. Fondo de Cultura Económica. Buenos Aires. 270 pp.

Casti, J. L. 1997. *Would-be Worlds. How Simulation is Changing the Frontiers od Science*. Wiley. U.S.A. 215 pp.

Childress, W. M., E. J. Rykiel Jr., W. Forsythe, Bai-Lian Li & Hsin-i Wu. 1996. Transition rule complexity in grid-based automata models. *Lands. Ecol.* 11(5): 257-266.

Connor, E. F. & D. Simberloff. 1979. The Assembly of Species Communities: Chance or Competition?. *Ecology* 60(6): 1132-1140.

Depew, D. J. & B. Weber. 1995. *Darwinism Evolving. System Dynamics and the Genealogy of Natural Selecction*. MIT Press. Cambridge. Massachusetts. 588 pp.

Di Paolo, E. A., Noble, J. & Bullock, S. 2000. Simulation Models as Opaque Thought Experiments. Pp. 497-506. *In:* Proceedings of the 7th. International Conference on Artificial Life, Bedau, M. (Ed.).

Dobzhansky, T. 1975. *Genética del Proceso Evolutivo*. Extemporáneos. México. 463 pp.

Drake, J. A. 1990. The Mechanics of Community Assembly and Succession. *J. Theor. Biol.* 147: 213-233.

Dunkerley, D. L. 1997. Banded vegetation: survival under drought and grazing pressure based on a simple cellular automaton model. *J. Arid Envir.* 35: 419-428.

Gross, L. J. 1996. Individual-based ecological models for spatially-explicit investigation and computational ecology. http://tiem.utk.edu/~gross/indiv.based.txt

Gurney, W. S. C. & R. Veitch. 2000. Self organization, Scale and Stability in a Spatial Predator-Prey Interaction. *Bull. Mathem. Biol.*, 62: 61-86.

Haefner, J.W. 1996. *Modeling Biological Systems*. Chapman & Hall. N.Y. 473 pp.

Holland, J. 1992. Genetic Algorithms. *Sci. Am.* July, 1992, pp. 44-50.

Hraber, P. T., T. Jones, & S. Forrest.1997. The Ecology of ECHO. *Artificial Life* 3: 165-190.

Huston, M., D. DeAngelis & W. Post. 1988. New Computer Models Unify Ecological Theory. *BioScience* 38 (10): 682-691.

Jansen, V. A. A. & G. S. E. E. Mulder. 1999. Evolving biodiversity. *Ecol. Lett.*, 2: 379-386.

Kauffman, S. 1993. *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press. New York. 645 pp.

Kupiec, J. J. & P. Sonigo. 2000. *Ni Dieu Ni Gène. Pour Une Autre Théorie de L'Hérédité*. Seuil. Paris. 216 pp.

Levins, R. 1968. *Evolution in Changing Environments. Some Theoretical Explorations*. Princeton University Press. 120 pp.

Mahner, M. & Bunge, M. 2000. *Fundamentos de Biofilosofía.* Siglo XXI Editores. México. 421 pp.

Martínez, S. 1997. *De los efectos a las causas. Sobre los patrones de explicación científica*. Paidós. México. 180 pp.

Mitchell, M. & M. Newman. 2001. *Complex Systems Theory and Evolution*. Por aparecer en Encyclopedia of Evolution, M. Pagel (editor), Oxford University Press, New York. Disponible en: http://www.santafe.edu/~mark/pubs.html

Nee, S. 1990. Community Construction. *TREE,* vol. 5, NE 10, pp. 337-340.

Pérez, A. & C. Moreira A. 2002. El papel del desequilibrio en la naturaleza. *Foresta Veracruzana* 4(2): 45-50.

Piotrkovski, R., M. Rapacioli, G. La Mura, J. L. Ferrán, V. Flores, C. E. Moreira Arana, A. Pérez. 1999. Simulación con autómatas celulares y autoorganización. V Congreso Argentino de Física Médica. Mendoza, Argentina. 25-27 de Noviembre de 1999.

Popper, K. R. 1992. *The Logic of Scientific Discovery*. Routledge. U.S.A. 464 pp.

Resnick, M. 1994. Lerning About Life. *Artificial Life*, 1(1-2): 229-241.

Reynolds, C. 1998. *Individual-Based Models*. En: http://hmt.com/cwr/ibm.html.

Richard, W. & J. Dean. 1998. Space invaders: modellin the distribution, impacts and control of alien organisms. *TREE*, 13: 256-258.

Risan, L. 1997. Why are there so few biologists here? Artificial life as a theoretical biology of artistry. *In:* Husbands, P. & Harvey, I. (Eds.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life* (ECAL'97). MIT Press / Bradford Books, Cambridge, MA.

Rocha L. M. 1995. Contextual Genetic Algorithms: Evolving Developmental Rules. Pp. 368-382. *In:* F. Morán, A.Moreno, J.J. Merelo, P. Chacón (Eds). *Advances in Artificial Life.* Springer. Berlin.

Rohani, P., T. J. Lewis, D. Grünbaum & G. D. Ruxton. 1997. Spatial self-organization in ecology: pretty patterns or robust reality? *TREE* 12 (2): 70-74.

Schmitz, O. J. & G. Booth. 1996. Modelling Food Web Complexity: the consequence of individual-based spacially explicit behavioral ecology on trophic interactions. *Evol. Ecol.* 11: 379-398. Disponible en: http://reef.biology.yale.edu:8001/papers/gecko.html.

Sherratt, J. A., B. T. Eagan & M. A. Lewis. 1997. Oscillations an chaos behind predator-prey invasion: mathematical artifact or ecological reality? *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B,* 352, 21-38.

Sherratt, J. A. 2001. Periodic travelling waves in cyclic predator-prey systems. *Ecol. Lett.* 4: 30-37.

Sigmund, K. 1993. *Games of Life. Exploration in ecology, evolution and behaviour.* Oxford University Press. Hong Kong. 225 pp.

Silvertown, J., S. Holtier, J. Johnson & P. Dale. 1992. Cellular automaton models of interespecific competition for space - the effect of pattern on process. *J. Ecol.* 80: 527-534.

Thompson, P. 1999. Le Rôle des Modèles Mathématiques dans la Formalisation des Systèmes Auto-organisés. Pp. 421-438. *In:* Feltz, B., M. Crommelinck y P. Goujon. (Comps.). *Auto-organization et Emergence dans les Sciences de la Vie.* Ousia. Grecia.

Wilensky, U. 1995. Learning probability through building computational models. Proceedings of the Ninteenth International Confereence on the Psycology of Mathematics Education. Recife, Brasil.

Wilson, J. B. 1994. Who makes the assembly rules. *J. Veg. Sci.* 5: 275-278.

Wolfram, S. 1984. Cellular Automata as models of complexity. *Nature*. 311: 419-424.

Recibido: 18 de marzo 2003
Aceptado: 13 de julio 2004