Sistemas Dinámicos como Redes Computacionales de Agentes para la evaluación de sus Propiedades Emergentes

N.J. Fernández[1,2] , J.L. Aguilar[2], C. Gershenson[3] , [4] O. Terán

[1]Laboratorio de Hidroinformática. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Pamplona, Colombia, http://unipamplona.academia.edu/NelsonFernandez, nfernandez@unipamplona.edu.co
[2]Centro de Microelectrónica y Sistemas Distribuidos, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. aguilar@ula.ve
[3] Instituto de Matemáticas Aplicadas y en Sistemas. Centro de Complejidad-C3. Universidad Nacional Autónoma de México, México, http://turing.iimas.unam.mx/~cgg/. cgg@unam.mx
[4] Centro de Simulación y Modelos, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. oteran@ula.ve

RESUMEN

La representación de Sistemas Dinámicos (SD) a partir de la fusión de las teorías multi-agentes y de redes, da pie a la construcción de formalismos de modelación que permiten estudiar propiedades vitales en dichos sistemas, en particular sus capacidades emergentes. Desde este enfoque hibrido, un sistema multi-agentes es visto como una red computacional con rasgos a determinar, tales como su emergencia y su auto-organización, entre otros. En este contexto, este documento presenta una formalización de un SD, al observarlo como una red compleja de interacciones entre nodos, quienes representan agentes y procesos. De manera particular, la dinámica local y global de ésta representación de SD permite reproducir y modelar las propiedades emergentes de Homeostasis, Autopoiésis, Auto-organización y Patrones. Nuestra formalización recoge todos estos aspectos, para hacer una descripción más detallada de, un SD (con un conjunto mayor de propiedades), lo que permite caracterizar a diversos tipos de SD.

ABSTRACT

Dynamical System (DS) representation from multi-agents and network theories fusion is an interesting start point for modeling formalism developing. This hybrid formalism allows the study of critical properties in DS, in particular its emergent properties. This way a multi-agent system is seen as a computing network, with emergent and self-organizing features to be determined. In this context, this paper presents a DS formalizations observed as a complex interaction network among nodes that represents agents and processes. Particularly, the local and global dynamics of this DS formal representation permits the representation and modeling of emergent properties such as Homeostasis, Autopoiesis, Self-organization and Patterns. Our formalization includes all these aspects, to make a more detailed description of a SD (with a larger set of properties), which allows to characterize different types of SD..

Keywords*:* Multi-agents Systems, Self-organizing Systems, Emergence, Homeostasis, Autopoiesis, Patterns.

1. Introducción

El objeto de estudio de muchos sistemas dinámicos *(SD)*, consiste en revelar los mecanismos que soportan su funcionamiento. Tal hecho puede ser posible si se descifran las relaciones entre la dinámica del nivel local y los fenómenos o propiedades que surgen a nivel global. Para tal fin, sus propiedades de auto-organización y emergencia deben ser analizadas.

La modelación basada en sistemas multi-agentes *(SMA)* ha constituido una herramienta computacional adecuada para lograr explicaciones o predicciones sobre fenómenos específicos en sistemas emergentes [PAT08]. No obstante, a pesar que en un *SMA* un agente interactúa localmente con otros y su entorno, guiado por sus metas, existe dificultad en extraer parámetros de tipo global sobre el comportamiento comunitario del sistema. Por su parte, la teoría de redes como extensión de la teoría de grafos, si bien cuenta con las posibilidades que no tienen los *SMA* tales como la representación del flujo de información y las interacciones entre agentes, estructuralmente se pueden ver como sistemas excesivamente simplificados.

Lo anterior puede ser solucionado sí al enfoque de *SMA* se le adicionan las propiedades colectivas que caracterizan los grafos, las cuales han sido ampliadas en la teoría de redes. Algunas de dichas propiedades tienen que ver con las características estructurales de la red, las reglas locales que gobiernan los nodos individuales (que pueden ser usadas para describir *SMA)*, entre otras. De esta manera, se hace posible ver un *SMA* como un conjunto de nodos y aristas interactuantes que conforman una red computacional (*RC*). En términos generales, esta red sería muy similar a la estructura definida por [Ger10] tal que $RC(N, K, a, F)$, donde un conjunto de nodos N están interconectados por un conjunto de aristas K, usadas por un algoritmo a para computar una función F. A nivel operativo, N y K tienen variables internas que determinan sus estados, y funciones que determinan sus cambios de estado. Esta generalización, que ha resultado de gran utilidad para modelar las arquitecturas de redes neuronales, colonias de hormiga, partículas colectivas, entre otras; puede ser un punto de partida y alternativa interesante para la representación de *SD* como redes computacionales de agentes (*RCA*).

No obstante, para describir completamente la dinámica de una *RCA* se requiere ahondar en los detalles de cada componente de la red y sobre su dinámica. El comportamiento global de esta dinámica depende de varios factores como el tipo de nodo, su modelo cognitivo, sus funciones de transición interna, el tipo de información que comparten ellos, entre otros. Desde esta perspectiva, se haría posible descifrar la trama de interacciones entre agentes y profundizar en la forma autónoma como se logran objetivos globales a partir de reglas locales, que podrían evolucionar de simples a complejas [ACH07]. Todo ello considerando, en principio, la auto-organización como método.

Sobre la base de las anteriores consideraciones, este documento propone un conjunto de nociones necesarias para especificar un *SD* como una *RCA* que reproduce sus propiedades emergentes, propiedades que solo pueden ser descritas en una escala superior. El hincapié se hace en las propiedades emergentes de homeostasis (*equilibrio dinámico*) y autopoiésis (*auto-mantenimiento*), que actúan sinérgicamente con la auto-organización (*orden no impuesto*) y la conformación de patrones. El objeto de esta formalización es brindarle a la comunidad científica nuevos elementos formales que sean de utilidad para la representación y caracterización de diversos tipos de *SD* Especialmente, *SD* con variedad de elementos que interactúan en forma no trivial, con intercambio de energía, información y/o materia entre su entorno y ellos. La utilidad de un formalismo como el que se propone en este trabajo, tiene que ver con su capacidad de modelación de sistemas complejos reales (p.e. los sistemas socio-ecológicos). Normalmente la modelación de los mismos, es simplificado bajo formalismos consideran sus propiedades emergentes intrínsecas, por lo que son capaces de reproducir correctamente su dinámica [ASA*08].

Después de una breve referencia sobre trabajos relacionados, este documento presenta los elementos para la representación de un *SD* como una red de interacciones entre agentes. Para tal fin se da una noción base de *SD*. Posteriormente se abordan los aspectos principales de las propiedades emergentes asociadas, y se culmina con la propuesta de trabajos futuros.

2. Trabajos Relacionados

La representación de *SD* con un número mayor de propiedades que faciliten su análisis, es un tema clásico y actual de investigación [BM02]. Propiedades como caos, no linealidad, criticalidad auto-organizada, auto-organización en sistemas fuera del equilibrio, han sido comunes en este campo [BTW88][Stro94]. Por otro lado, en la última década se han realizado importantes aportes en el campo de los sistemas complejos con rasgos de emergencia y auto-organización [CKF*02][Ger07]. También, la modelación conceptual de los procesos de auto-organización, homeostasis y autopoiesis ha sido abordada por [FAO10].

Los *SMA* basados en grafos han sido explorados a partir del concepto de redes causales. Desde ellas se ha podido explicar la emergencia de comportamientos complejos [Wol02]. Recientemente, se han dado avances importantes en el estudio de la auto-organización en redes de tipo adaptativo [GS09]. Por su parte [Ger10], muestra ejemplos de instanciación en redes neurales, algoritmos de partículas de enjambre y colonias de hormigas de una red computacional genérica. Adicionalmente, la especificación formal de los macro y micro-niveles en redes de agentes ha sido abordada por [HM11], quienes han llegado a desarrollar aproximaciones para la cuantificación de la auto-organización y la emergencia.

No obstante los aportes hechos por los trabajos listados, hasta el momento la distinción entre auto-organización, emergencia, complejidad, adaptación y evolución ha constituido una limitante en el estudio de los *SD*. En este sentido, la originalidad del presente trabajo radíca en lograr una caracterización de los procesos emergentes presentes en los SD, y que en conjunto con la conformación de patrones, le da un mayor sentido a lo que por *emergencia* puede ser interpretado.

3. El Sistema Dinámico (SD) como red de interacciones

3.1 Noción Base de *SD*

La noción base de *SD* en la que se fundamenta este manuscrito es la presentada en [FAO10], que expresa lo siguiente:

…"Dado un contexto particular de observación, un SD corresponde con un fenómeno unitario que presenta un conjunto de componentes homogéneos o heterogéneos interconectados. Estos componentes pueden observarse a diversas escalas espacio-temporales y generan, a partir de sus relaciones, diferentes tipos de propiedades, organizaciones, patrones y/o comportamientos propios. Todo ello, con el fin de alcanzar el propósito global que el sistema tiene en sí mismo"…

Esta definición presenta características emergentes subyacentes de auto-organización (A), homeostasis (H) y autopoiésis (A'), que tienen como base la dinámica global de sus componentes. A partir de ello se posibilita observar el *SD* como una red de interacciones, con elementos básicos de los *SD* tradicionales, como cambios y/o evolución de estados en el tiempo a partir de reglas que pueden ser expresadas funcionalmente.

Es importante aclarar que la condición emergente de *AHA'* subyace en que aparecen como producto de la interacción complementaria y dinámica de los elementos del *SD* que, en conjunto, aportan diversos aspectos de lo que emerge. La consecuencia es la consolidación del *SD* como un todo, hecho que define su unidad global.

3.2 Elementos de la red (Grafo) para un SD

El punto central de definir un *SD* como una red de interacciones radica en que tal red constituye una forma interesante de caracterizar su organización y correspondiente estructura. El establecimiento de las relaciones entre sus componentes en el tiempo determina sus conexiones y ensamblajes. En este sentido, un SD puede ser definido como una red interconectada (grafo) de un conjunto N de n elementos, los cuales se corresponden con los nodos de la misma. Un par de nodos (x, y) componen una arista, tal que $\{x,y\}\in SD$. El conjunto de aristas se denomina K.

Entonces, el SD se define, básicamente, como un grafo de estructura (N, K). Cada nodo $i \in N$ representa un elemento Ni, y cada arista $(i, j) \in K$ representa flujo de información entre (Ni, Nj). Los vecinos son elementos (Ni, Nj) unidos por un enlace de información $(i, j) \in K$. La conectividad de la red SD se puede representar por una matriz de adyacencia $N \times N: M(i,j) = \begin{cases} 1, i \rightarrow j \\ 0, i \nrightarrow j \end{cases}$.

Se dice que M contiene la topología de la red y puede contener el "peso" del acoplamiento i,j tal que $M_{ij} \in [0,1]$. No obstante, en una formalización más general, cada elemento de la matriz M puede ser más complejo, conteniendo etiquetas, funciones, etc.

Se destaca que la red SD, a partir de los elementos descritos, tiene la característica general y básica de un SD tradicional, como lo es: el cambio o evolución de su estado en el tiempo en razón a una regla de evolución que lo demarca. Así, desde una base determinista para la red SD, la regla de evolución R, estará dada por $R(q(t), r) \rightarrow q(t+\tau)$, donde q es un estado del conjunto de estados posibles Q, r es un parámetro de la regla y τ es un intervalo de tiempo. Cabe destacar que r tiene uno o más puntos críticos (r_c), el cual, o los cuales, serán entendidos como el valor de r en el que se genera el cambio de estado de q_i a q_j.

Sobre la base de estas consideraciones, a continuación se detallan los elementos del sentido dinámico de la red.

3.3 El Sentido Dinámico de la Red SD

El sentido dinámico de la red, visto como un modelo discreto, estará dado por $SD = (Q, F)$; Donde Q es un conjunto no vacío compuesto de un número finito de estados $q_i \in Q$. Q, también es llamada espacio de todas las configuraciones posibles. En el caso de sistemas continuos, la dinámica se desenvuelve en un espacio de estados. F es una función de transición o de activación global, tal que $F: Q \rightarrow Q$. Igualmente, F corresponde a una familia de funciones, denominadas funciones de activación local de la red (f_i), tal que $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$, donde $F(q_j) = \left(f_1(q_j), \dots, f_n(q_j)\right), \forall q_j \in Q$. Se observa, por tanto, que F está compuesta por funciones puramente locales.

De manera general se puede estimar que la estructura dinámica de la red se dará de acuerdo con la forma en que se combinen los f_i. Así, al tener a "o" como operador tal que $F = f_1 o\, f_2 o, \dots, f_n$, y al considerar que $F = f_1 o\, f_2 \neq F = f_2 o\, f_1$, se puede deducir que de acuerdo como se combinen las funciones parciales se generará un cambio en la función global. Esta condición será un mecanismo básico que le dará a la red mayor adaptabilidad ante los cambios ambientales [GPR*09].

Se destaca que cada estado $q_j \in Q$ caracteriza la configuración global de la red (C), entendida como la descripción completa de la situación en que se encuentra el SD en un momento dado, la cual incluye la topología de la red. Así, C estará representada por su estado actual $q_t \in Q$, y un evento e que genera la transición F. El evento $e \in \Sigma$ que será el pertenece al conjunto de todos los eventos que generan transición en la configuración. Entonces, a partir de un evento e hay una $F(q(t), e)$ que producirá la configuración global en el tiempo siguiente $t+1$ $(q(t+1))$. El evento e corresponde con el punto crítico (r_c) del parámetro r mencionado anteriormente.

Consecuente con lo expuesto, para pasar de una configuración $c(t)$ a $c(t+1)$, cada nodo Ni tendrá su función de transición f_i tal que $F(q(t) \rightarrow q(t+1)) = f_1(q(t)), \dots, f_n(q(t)))$. Para una configuración global $c \in C$ en el tiempo t de la red $(q(t))$, $F(q(t), e)$ dará la configuración global siguiente en el tiempo $t+1$ $(c(t+1))$. Un sistema donde todo estado tiene un sólo sucesor es determinista, mientras que si hay más de un sucesor posible para por lo menos un estado, habrá cierto grado de no determinismo.

3.4 El vecindario y el entorno en la red *SD*.

Como es bien conocido, el vecindario de los nodos Ni en una red SD puede ser representado por su grafo de interacción o conexión. En tanto, el estado q_{Ni} de los Ni en el tiempo t, se representa por $q_{Ni}(t)$. Por poseer Ni un conjunto de vecinos V_i, la evolución del SD estará descrito por la regla $q_{Ni}(t+1) = \mathrm{F}\left(q_{Ni}(t), e,\ q_{Nj}(t) | j \in V_i\right)$, donde $i,j = 1,2, \dots n$ y e será el evento que promueve el cambio de estado.

Otro factor que puede condicionar el estado de los Ni puede corresponder a factores ambientales o del entorno (Ab). Para el caso específico se estima que $Ab(t)$ puede representar influencias de tipo externo o exógenas. La intensidad de la influencia o la probabilidad de interacción de $Ab(t)$ puede ser representada por un parámetro $B \in [0,1]$ [GCT05]. La presencia de B sugiere la actualización de la regla de evolución del SD tal que $q_{Ni}(t+1) = \mathrm{F}\left(q_{Ni}(t), e, B,\ q_{Nj}(t) | j \in V_i\right)$.

Se puede considerar que $Ab(t)$ puede tener efecto sobre la totalidad de los Ni (incidencia global) o sobre Ni determinados (incidencia parcial). Igualmente, si se asumiera en algún caso que la influencia de $Ab(t)$ sobre los Ni sea uniforme, no se podrá asumir que, en el mismo sentido, su respuesta lo sea igual. La respuesta diferencial de los Ni será relativa a la capacidad de auto-regulación (homeostasis) de cada uno de ellos para responder a influencias de $Ab(t)$. Adicionalmente y de ser necesario, B se podría expresar, como un conjunto de influencias específicas $(b_i, \dots b_n)$.

3.5 El Cambio Estructural de la Red y el Cambio en sus Propiedades Topológicas

Conexo a lo anteriormente expuesto, se debe considerar que en la red SD, tanto Ni como K_{ij} pueden cambiar en el tiempo en cuanto a su presencia y ausencia, situación que genera un cambio estructural en la red. En este aspecto, el sentido dinámico del cambio de nodos y aristas de la red SD será $SD = (SD_1, \dots, SD_T)$, correspondiente a la series de tiempo de las redes generadas. Formalmente se tendrá que $N = \cup_t N_t$ y $K = \cup_t K_t$ donde $N_t \subseteq N$ y $K_t \subseteq K$ son un conjunto de nodos y aristas, respectivamente, observados en el tiempo t [HB08]. Se destaca que la aparición o desaparición de nodos y aristas tendrá como fundamento un proceso de auto-organización autopoíesica de base homeostática, características que más adelante se desglosarán. Igualmente, a partir de las trayectorias definidas por parámetros topológicos como el Grado (*Gd*), Coeficiente de Agrupación (*Ca*) y Longitud (*L*) se obtendrá otra característica emergente de la red SD, como lo serán los patrones.

3.6 La naturaleza de de los nodos de la red SD.

Desde el contexto anterior que definió un *SD* como red dinámica de interacciones, se hace necesario ahondar, primeramente, en la naturaleza de los *Ni*. Estos *Ni*, congruentemente con lo expresado, tienen también una naturaleza dinámica, y desde nuestra perspectiva pueden hacer referencia a un proceso o un agente. Es decir, los *Ni* que componen una red *SD* pueden representar tanto entidades como procesos.

Desde la perspectiva de [ZPK00] se puede afirmar que un nodo *Ni*, cuando representa a un proceso tendrá reglas de comportamiento internas y externas. Las primeras estarán definidas por sus variables de estado, funciones de transición, y funciones de avance en el tiempo; y las segundas estarán dadas por el conjunto de salidas. De la misma manera, se debe caracterizar la naturaleza discreta o continua de los nodos, lo que definirá su forma particular de especificación. Por ejemplo, en el caso de sistemas naturales como los socio-ecológicos, procesos como la contaminación o el cambio climático se pueden describir como nodos de la red a través de sistemas de ecuaciones diferenciales de primer orden (*SEDO*) dada su naturaleza continua; en tanto que los procesos de manufacturación industriales, como los que se dan en una fábrica de ensamblado, pueden ser especificados como nodos de la red del tipo discreto, bien sea a través de un sistema de eventos discretos *SED* (*DEVS* en inglés) o de ecuaciones en diferencia (*EED*). Nosotros consideraremos a las *EED* dentro de las *SED*, ya que las *EED* están embebidas en los *SED* según [ZPK00].

A continuación se muestra la estructura matemática de lo que pueden ser procesos tipo *SEDO* y *SED* para el modelo de red *SD* aquí propuesto, sobre la base de [ZPK00] y [DTU05]. Para el primer caso, la estrucutra sería:

$N_{SEDO} =< X_{SEDO}, Y_{SEDO}, \Omega_{SEDO}, Q_{V-SEDO}, f_{SEDO}, f_{s\text{-}SEDO}, \Re >$

Donde:

- N_{SEDO}: Nodo Tipo proceso de naturaleza continua
- X_{SEDO}: Espacio vectorial ($\Re^m$) de las variables de entrada
- Y_{SEDO}: Espacio vectorial ($\Re^p$) de las variables de salida
- Ω_{SEDO}: Conjunto de todos los segmentos de entrada posibles.
- Q_{V-SEDO}: Espacio vectorial ($\Re^n$) de estados accesibles del sistema. $Q_V \in Q^n$
- f_{SEDO}: $Q_V \times X \rightarrow Q_V$, Función de transición o.
- $f_{s\text{-}SEDO}$: $Q_V \rightarrow Y \vee Q_V \times X \rightarrow Y$, función que permite obtener la salida en el tiempo t.

$\Re$: base de tiempo que son los números reales.

El formalismo *SED* tiene la siguiente estructura:

$N_{SED} =< X_{SED}, Q_{SED}, Y_{SED}, f_{SED\text{-}int}, f_{SED\text{-}Ext}, f_{s\text{-}SED}, ta>$

Donde:

- N_{SED}: Nodo Tipo proceso de naturaleza discreta
- X_{SED}: conjunto de eventos externos de entrada,
- Q_{SED}: conjunto de estados, $Q_{SED} \in Q^n$
- Y_{SED}: conjunto de eventos externos de salida
- $f_{SED\text{-}int}$: $Q_{SED} \rightarrow Q_{SED}$ función de transición interna
- $f_{SED\text{-}Ext}$: $Q_{SED} \times X_{SED} \rightarrow Q_{SED}$ función de transición externa, donde: $Q_{SED} = \{(q,t) | q \in Q,\ 0 \leq t \leq ta(q)\}$, t es el tiempo transcurrido desde la última transición. Esta función se ejecuta ante la ocurrencia de eventos externos.
- $f_{s\text{-}SED}$: Q_{SED} ->Y función de salida
- ta: $Q_{SED} \rightarrow \Re^{+}_{0,\infty}$ función de avance en el tiempo, donde $\Re^{+}_{0,\infty}$ es el conjunto de valores positivos reales entre 0 y ∞

Ahora bien, en este modelo también puede haber nodos tipos agentes (N_{Ag}). Para tal fin, un Agente (Ag) será entendido como un sistema computacional situado en un ambiente capaz de tomar acciones autónomas en ese ambiente, con el fin de cumplir sus objetivos de diseño. Los Ags serán considerados inteligentes sí están dotados de formas de representar el conocimiento, mecanismos de razonamiento que les permiten abordar situaciones basados en ese conocimiento, y evolucionar por medio de la experiencia [Wei99].

Los nodos tipo N_{Ag} tendrán una estructura dinámica complementada con algunos elementos propuestos para *SMA* por [Fer99], dada por:

$N_{Ag}=<X, Q_{Ag}, Y, f_{Ag\text{-}int}, f_{Ag\text{-}ext}, f_{est}, ta, CH_{Ag}>$

Donde:

- N_{Ag}: Nodo tipo Ag
- X_{Ag}: conjunto de eventos externos de entrada al Ag. Pueden corresponder a información proveniente desde el Ab (I_{Ab}) o desde otros Ag (I_{Ag}). En algunos casos, el ambiente puede ser modelado también como un Ag.
- Q_{Ag}: conjunto de estados del Ag_i : $Q_{Ag} \in Q^n$
- Y: conjunto de eventos de salida desde el Ag
- $f_{Ag\text{-}int}$: $Q_{Ag} \rightarrow Q_{Ag}$ función de transición interna por la que el Ag cambia de estado. El cambio de estado q_{Ag} se debe a eventos internos que producen a su vez salidas en f_s. Cuenta para la conducta espontánea, cuya aparición la decide de forma autónoma el agente y es usada para un comportamiento proactivo.
- $f_{Ag\text{-}ext}$: $Q_{Ag} \times X \rightarrow Q_{Ag}$ función de transición externa, donde: $Q_{Ag} = \{(q_{Ag}, t | q_{Ag} \in Q_{Ag},\ 0 \leq t \leq ta(q_{Ag})\}$ es el conjunto total de estados, t es el tiempo transcurrido desde la última transición. Especifica la respuesta del Ag a los eventos de entrada. Esta función se desencadena debido a las entradas que pueden llegar en cualquier momento. Cuenta para el comportamiento reactivo a través del uso de influencias físicas.

- f_{est}: $Q_{Ag} \rightarrow Y$ o función de cambio estructural que da cuenta de tales cambios producto de la aparición y desaparición de Nodos y aristas. Es llamada después de cada transición, y sus salidas están asociadas con el Ca y Gd de la red en cada tiempo t.
- *ta*: Q_{Ag} -> $\Re + 0, \infty$ función de avance en el tiempo, donde $\Re + 0,\infty$ es el conjunto de valores positivos reales entre 0 y ∞.
- *Hm:* Capacidad homeostática del Agente, basada en su rango de respuesta a los factores ambientales Ab. Esta condición se definirá más adelante.

En razón que la red *SD* puede contener más de un N_{Ag}, se conformará entonces un *SMA*. En este aspecto, un *SMA* se definirá como un sistema informático compuesto por un grupo de Ags que interactúan entre sí. La interacción busca resolver problemas que vayan más allá de las capacidades individuales o del conocimiento de cada N_{Ag}. De manera formal el *SMA* puede tener las siguientes características:

$$SMA= <W, \Gamma, \Lambda ,Op,Hm\text{-}_{SMA}, rp_{SD\text{-}Ag} , \Delta At,A, E>$$

Donde:

- W es el conjunto de los estados del ambiente (Abq) que rodea a los Ags, representado por las variables de estado del *SD*, así $W = \{w1, \dots wn\}$, donde wi: es variable de estado de Ab.
- Γ_{Ag} es el conjunto de acciones propias de todos los Ags con las que puede generar nuevos eventos y con los que intentan modificar el curso de los eventos que ocurrirán.
- Λ son las leyes que rigen al *SD*. Por medio de ellas se describe cómo el próximo estado es computado, dado el estado previo y un conjunto de influencias.
- Op es un conjunto de operadores del Ag para generar influencias.

En esta misma estructura, las métricas de las propiedades emergentes de la red SD-Ag estarán dadas por (más adelante se detallan sus definiciones):

- $Hm\text{-}_{SMA}$: Capacidad homeostática de la red, producto de la capacidad homeostática de los nodos.
- $rp_{SD\text{-}Ag}$: tasa de reparabilidad autopoíesica, que da cuenta de la integridad del SD-Ag en cuanto a la síntesis y degradación de los Ni y sus K.
- ΔA_t: Medida del cambio en la auto-organización, basada en la capacidad homeostática de la red.
- E= Medida de la emergencia, definida como la síntesis de los procesos de *auto-organización* y la expresión de los patrones Ept. Estos últimos provienen de las trayectorias del coeficiente de agrupamiento Ca y la longitud característica L. Estas propiedades se formalización a continuación.

4. Aspectos Generales y Formales de las Propiedades Emergentes en el SD

4.1 Homeostasis

La homeostasis (Hm), puede ser definida como un mecanismo de auto-regulación, general, que promueve la estabilidad y flexibilidad de la red computacional, en su paso por los múltiples estados de su ciclo adaptativo, sin que se dé su destrucción [FAO10]. Por medio de la homeostasis, la red de agentes hace frente a los cambios, influencias y/o perturbaciones de su ambiente endógeno o exógeno (Ab).

La base del mecanismo homeostático está en el desenvolvimiento del sistema en una zona de viabilidad (Zv), definida por los rangos de respuesta (RX) reflejados en sus nodos y aristas. Como consecuencia de la búsqueda de ese equilibrio, la homeostasis puede generar en la red cambios semipermanentes, como medida a los cambios semipermanentes de Ab.

En una red computacional los procesos de auto-regulación se pueden dar de manera complementaria, tanto de forma activa como pasiva. La auto-regulación activa se puede dar, entre otros, por las diferentes combinaciones de funciones de activación local fi de cada uno de los nodos. La auto-regulación pasiva, entre tanto, estará definida por situaciones como los rangos de tolerancia de la red a la influencia de un factor ambiental.

La zona de viabilidad Zv está en correspondencia con los valores máximos ($Xmax$) y mínimos ($Xmin$) de un factor i de un Ab dado. Este hecho define la respuesta al factor i de Ab, acorde con sus rangos (RX_i). En consecuencia, para cada factor i de Ab, un nodo j de la red tendrá un rango de respuesta resultante de la diferencia de los valores de tolerancia ($\mathrm{RX}_\mathrm{i}^\mathrm{j} = \mathbf{Xmax} - \mathbf{Xmin}$).

Para el caso del rango de respuesta en las aristas este considerará igualmente los valores máximos y mínimos ante el factor y estará denotada por RX'^{j}_{i}.La respuesta global RX_i se dará por el promedio de RX_i^j y RX'^{j}_{i}.

Se estima que la tolerancia (T) a un factor i de Ab puede coincidir, en la mayoría de los casos, con una función gausiana que se distribuye a derecha e izquierda del valor promedio (μ_i) dentro de su RX_i (Fig. 1). La escogencia de tal función se debe a que ella coincide con la respuesta de muchos sistemas complejos como los sistemas socio-ecológicos. No obstante, se pueden usar otros tipos de distribuciones de probabilidad.

El valor de tolerancia (eje Y Fig. 1) para un determinado valor específico X_i del factor Ab_i deberá considerar como parámetros para su cálculo la desviación estándar σ_i, y el promedio μ_i. La función también cuenta con las constantes π y e, como se aprecia a continuación.

$$T(FAb) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(X_i-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Se destaca que dentro de la zona de viabilidad Zv, definida por la función de tolerancia, existe una zona de funcionalidad óptima (ZFO), que corresponderá a una zona cerca a los puntos medios o promedios de cada factor μ_i del Factor i de Ab. Estadísticamente, esta área se encuentra entre $\mu_i \mp 1\sigma_i$.

Si el funcionamiento de la red y/o de sus nodos se diese por fuera de la Zv, la red operará en zonas definidas como críticas (Zc), por lo que se puede dar su fallo extremo o degradación. Esto, en términos de la autopoiésis implica el auto-mantenimiento, evento que sugiere la afectación de la estructura y función en la red. La red deberá compensar este efecto tanto en un sentido homeostático (de auto-regulación), como autopoiesico (de auto-mantenimiento), con el fin de seguir operando.

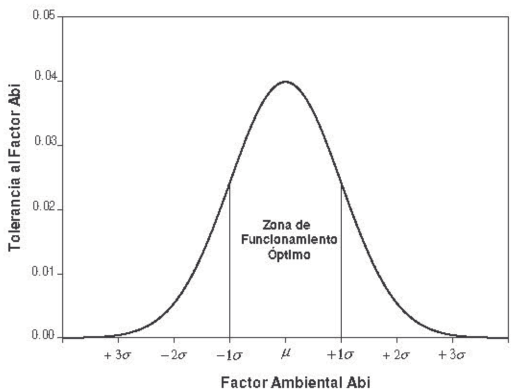

Figura 1 *Zona de viabilidad-Zv y zona de funcionamiento óptimo (ZFO) ante un factor Abi para una red computacional. Los valores del eje x dependen del dominio del factor i.*

De manera general, se puede decir que Hm será una función g de tolerancia a un factor ambiental *Abi* dado,tal que $Hm_i = g(T(Ab_i), RXi)$.

4.2 Autopoiesis

La autopoiesis se refiere a un proceso particular de auto-regulación debido a la degradación de los nodos y/o aristas que componen la estructura de la red [FAO10]. En este sentido, la autopoiesis se soporta en mecanismos homeostáticos específicos enfocados en la constitución de los elementos de la red computacional, y promueve la "producción del sistema" y la "preservación de la estructura" [Iba10]. Por medio de la autopoiesis se establece la capacidad de la red para desarrollar, mantener, producir y restablecer su unidad e identidad, en un nivel dado. Particularmente, este proceso está basado en la hetero y autoreferenciación, hecho que involucra un grado determinado de cognición. La cognición, según [Ger10], se refiere al conocimiento que el sistema tiene de cómo actuar en su ambiente.

En términos generales, se puede estimar que la autopoiesis se corresponde con una función f de auto-mantenimiento (f_a) basado en la combinación de las funciones de activación local f_i , que regula el "desgaste" natural de la red. El desgaste, en el sentido homeostático, es visto como una variante de un factor i de Ab. En consecuencia, el mecanismo de ejecución de la autopoiesis corresponde con el mecanismo general descrito para homeostasis.

La medida del auto-mantenimiento autopoiésico puede ser expresará a través de un balance de masas [Hol07]. Básicamente, para los nodos, la dinámica de su auto-mantenimiento será igual a su síntesis (S) o producción local, menos su degradación local (Dg), de tal manera que $dN/_{dt} = dS/_{dt} - dDg/_{dt}$. Particularmente, la síntesis de los nodos N estará dada por $S = \gamma N$, donde γ será el coeficiente o la razón promedio de síntesis de N.

Por otra parte, la degradación o perdida de N, será proporcional a $D = -\lambda N^g$, donde λ corresponde a la constante de degradación promedio de N. El exponente g, por su parte, es el orden de la degradación (Holzbecher, 2007). La ecuación, por tanto, toma la forma: $dN/_{dt} = \gamma N - \lambda N^g$. Cuando g es de orden 1, la diferencia de los promedios de las tasas de *Síntesis* y *Degradación* en una red es la siguiente: $\frac{dN}{dt} = \gamma N - \lambda N^1 = N(\gamma - \lambda) = Nrp$

Se define así, lo que se puede llamar tasa de reparabilidad de la red (rp), cuyos valores $rp>0$ muestran incremento en la capacidad auto-regenerativa; sí $rp=0$ la capacidad de síntesis se mantiene estable, y sí $rp<0$ la capacidad decrecerá y el sistema evidenciará un proceso de desgaste o degradación.

El anterior razonamiento puede ser instanciado en la síntesis-degradación de las aristas, de tal forma que para una arista *K(i,j)*, con sus correspondientes tasas de síntesis (γ') y degradación (λ'), la ecuación correspondiente será: $\frac{dK}{dt} = \gamma K - \lambda' K^1 = K(\gamma' - \lambda') = Krp'$

Cabe anotar que si bien todos los sistemas autopoiesicos son homeostáticos, todos los sistemas homeostáticos pueden no ser autopoiesicos. Razón por la cual, para los que sí lo son, la formulación de homeostasis incluirá las tasas de reparabilidad rp y rp'.

4.3 Auto-Organización

La auto-organización es un proceso dinámico que materializa la estructura y mantiene la funcionalidad de la red, de manera que pueda cumplir con su objetivo de diseño. Esto se logra a través del mantenimiento de los atributos esenciales de la red, sin la intervención de un control central, en condiciones cambiantes del entorno [FAO10]. Los atributos corresponden a la autonomía, (entendida como la no dependencia de la red de agentes externos para alcanzar su función o meta); la estabilidad (atinente al proceso de mantenimiento del equilibrio en un entorno cambiante); la persistencia (referida al mantenimiento de su funcionalidad); la robustez (explicita en la tolerancia a presiones externas o fallas internas); la flexibilidad (la susceptibilidad de cambiar estructuralmente según las circunstancias o necesidades); y la integridad (que define la unidad del sistema en cuanto al todo, las partes y sus relaciones).

La autoorganización, además de considerar el orden no impuesto, puede considerar los componentes de homeostasis y autopoiesis.

En cuanto al orden en redes computacionales, autores como [GH03] y [HM10] han propuesto una medida sobre la base de la teoría de la información. Desde ella se podría estimar el mayor o menor orden en una red con una configuración determinada. Este orden puede ser valorado desde una perspectiva termodinámica y desde el concepto estadístico de entropía, como se observa a continuación.

$$Hc_t = -\sum_{c \in C} P(c_t) log_2 P(c_t)$$

En una red *SD*, Hc_t será una medida equivalente a la información (en bits) contenida en nodos y aristas, que definen la configuración c de la red en el tiempo t. Se aclara que la configuración c corresponde con la descripción completa en la que se halla la red, en un tiempo determinado. Desde esta base, la medida de información considera una distribución de probabilidad normalizada $P(c_t)$, que equivale a la probabilidad que el sistema esté en una configuración c en un tiempo t [HM10].

Hc_t se mueve en el intervalo [0-1], donde valores cercanos a 0 manifiesta que el sistema requiere poca información para su descripción. Este como es el caso de redes regulares. Entre tanto valores cercanos a 1 indican que la red presenta una irregularidad tal que se requiere gran cantidad de información para la descripción configuración. Redes de pequeño mundo suelen presentar valores intermedios de Hc_t para su descripción hecho característico de los sistemas complejos, los cuales se hallan entre el orden y desorden [EPC12].

Se estima que al sumar el componente homeostático (al cual subyace el autopoiésico), a la media de Hc_t se puede tener una cuantificación del proceso auto-organizante en el tiempo (ΔA_t). Por tanto ΔA_t será una función del cambio de la información ΔHc_t en el paso por diferentes configuraciones $c_o \rightarrow c_1 \rightarrow, \dots, c_n$ y del cambio de la capacidad homeostática (ΔHm) tal que $\Delta A_t = g(\Delta Hc_t, \Delta Hm)$.

4.4 Patrones en la Red Computacional

En el ámbito de estudio de las redes, es bien conocido el uso del coeficiente de agrupación (Ca) y longitud característica (L) como medidas que evidencian las propiedades topológicas de la red, especialmente en redes de pequeño mundo [AB02]. Las redes de pequeño mundo son redes que corresponden con gran cantidad de fenómenos dinámicos complejos dadas sus interacciones relevantes, eventos hallados en sistemas tanto sociales como ecológicos [EPC12]. En redes de pequeño mundo, a Ca grandes siempre le corresponden L pequeños, desde lo observado por [AB02] en un estudio de 17 tipos de redes de este tipo.

Acorde con [WS98], Ca_i se refiere a la fracción media de los vecinos de un nodo i, que a su vez son vecinos entre sí. La expresión para el cálculo local de un nodo i será $Ca_i = \frac{2K_i}{k_i(k_i-1)}$, donde Ki es la fracción de aristas existentes (o vecinos conectados) y k_i el grado del nodo i, entendido como el número de aristas en él. El coeficiente de agrupación global de la red SD será igual al promedio de los nodos.

La longitud característica (L), por su parte, hace referencia a la distancia promedio (número de aristas) entre todos los pares de nodos, y se expresa como: $L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij}$. Donde d_{ij} es la distancia entre los nodos i y j, un hecho que da razón de la estructura de la red SD en cuanto a las interacciones entre nodos. Tales interacciones pueden ser directas o indirectas. Las últimas a través de trayectorias o caminos que comunican a un par de nodos y que tienen una distancia determinada.

Desde el estudio de [AB02] es posible obtener el grado de expresión global (Ept), para las redes de pequeño mundo sobre la base de sus Ca y L promedios (0,411 y 5,2971, respectivamente). Ept es la expresión de los patrones topológicos para una red dada. Los promedios anteriores, pueden ser tomados como característicos o *esperados* (Ca_{esp}, L_{esp}). Por su parte, los valores de Ca y L de la red SD bajo estudio con una configuración determinada, seran definidos como los *observados* (Ca_{obs}, L_{obs}). De esta forma es posible hallar el valores de Ept para la red bajo estudio en términos de probabilidades, a partir del uso de la formula de la distribución Chi-cuadrado. Estos es: $Ept = \frac{(Ca_{obs}-Ca_{esp})^2}{Ca_{esp}} + \frac{(L_{obs}-L_{esp})^2}{L_{esp}}$.

4.5 La Emergencia (E) como función compuesta

Finalmente, sobre la base de los anteriores desarrollos, se estima que la emergencia (E) en una red computacional de agentes será una función compuesta por la auto-organización y la expresión de los patrones que abarcan su carácter cambiante, tal que $E = g(\Delta A_t, \Delta Ept)$.

5. Comentario Final y Trabajos Futuros

En este documento se han presentado los elementos conceptuales y formales que sugieren un enfoque ampliado para el estudio en los SD, desde sus propiedades emergentes de auto-organización, homeostasis y autopoiesis. Sí bien ha sido reconocido que las interacciones locales en *SD* los conducen a su auto-organización, su mecanismo no ha sido suficientemente explicado. Es allí donde la homeostasis y autopoiesis permiten dar un soporte formal a la manera en que sinérgicamente se logra una estructura en equilibrio y auto-sostenible. Dichas propiedades emergentes en conjunto generan patrones estructurales como respuesta a las presiones ambientales.

Por otro lado, hasta ahora el uso de los elementos de las teorías de grafos y redes en la representación de las propiedades emergentes en *SD* se halla en un estado embrionario. De manera que las potencialidades de su uso están por ser determinadas a través de ejemplificaciones. El enfoque aquí expuesto es un punto de partida interesante para la definición de cómo y por qué sucede la emergencia en los *SD*, sobre la base de la auto-organización, la homeostasis, la autopoiesis y los patrones estructurales. En este sentido, la formalización aquí propuesta enriquece las aproximaciones hasta ahora desarrolladas para el estudio de los sistemas emergentes como redes computacionales de agentes. Es de destacar, que el modelo propuesto sobrepasa la visión clásica de las medidas de emergencia y auto-organización basadas en la entropía estadística. A partir de ello, sistemas realeas con rasgos de complejidad podrán ser mejor descritos y analizados, comparativamente con los formalismos previos de baja representatividad.

Trabajos futuros plantean la necesidad de ejemplificar los desarrollos aquí logrados en diversos casos de estudio, de manera que clarifique su utilidad. Al mismo tiempo, se deberá desarrollar una herramienta computacional que facilite su uso en dichos estudios de casos.

6. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los oportunos comentarios de los revisores, que condujeron a mejoras en el manuscrito. Igualmente, se agradece al MSc. Eduar Puerto por sus aportes en diversas discusiones.

Referencias

[AB05] ALBERT, R AND BARABASI A-L. Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.* 74,47 (2002).

[ASA*08] DE ARANZABAL, I., SCHMITZ, M., AGUILERA, P. PINEDA, F. Modelling of landscape changes derived from the dynamics of socio-ecological systems.A case of study in a semiarid Mediterranean landscape. *Ecol. Indic.* 672-675. (2008).

[ACH07] AGUILAR, J., CERRADA, M., HIDROBO, F. A. Methodology to Specify Multiagent Systems, *Lect Notes Comp. Sci.* (4496): 92-101. (2007).

[BM02] BAR-YAM, Y. AND MINAI. A. eds. Unifying Themes in Complex Systems II: (Proc.the 2nd International Conference on Complex Systems, 2002), *Perseus Press.*

[BTW88] BAK, P., TANG, C., WISENFELD, K.. Self-organized criticality. *Phys.Rev. A.* 38: 364–74. (1988).

[CKF*02] CAMAZINE, S., DENEUBOURG, J-L., FRANKS, N., SNEYD, J., ET AL. Self-organization in biological systems. *Princeton University Press.* (2002).

[DTU04] DÁVILA, J., TUCCI, K., UZCÁTEGUI, M. A Multi-Agent Theory for Simulation. (Proc MSO-2005) 287:285–290

[EPC12] ESCALONA-MORAN, M., PAREDES, G. COSENZA, M. Complexity, information transfer and collective behavior in chaotic dynamical networks. *Int. Appl. Mat. Stat.* 26, 58. (2011).

[FAO10] FERNANDEZ, N., AGUILAR, J., TERÁN, O. Conceptual Modeling of Emergent Processes in Dynamics Complex Systems. (Proc. CIMMACS -2010). 75-82.

[Fer99] FERBER, J .Multi-Agent Systems, An introduction to Distributed Artificial Intelligence. *Addison-Wesley.* (1999).

[GCT05] GONZÁLEZ-AVELLA, J.C. COSENZA, M.G. TUCCI, K. Nonequilibrium transition induced by mass media in a model for social influence. *Phys.Rev.* E 72, 065102(R). (2005).

[Ger07] GERSHENSON, C. Design and Control of Self-organizing Systems. *PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium.* (2007).

[Ger10] GERSHENSON, C. Computing Networks: A General Framework to Contrast Neural and Swarm Cognitions, Paladyn, *J. Beha. Robot.* 1(2): 147-153. (2010).

[GH03] GERSHENSON, C. AND HEYLIGHEN, F. When Can We Call a Systems Self-Organizing? *Lect. Notes Artif. Int.* (2801): 606-614. (2003).

[GPR*09] GEORGÉ, J.-P., PEYRUQUEOU, S., RÉGIS, C., GLIZE, P.: Experiencing self-adaptive MAS for real-time decision support systems. In: Demazeau, Y., Pavón, J., Corchado,J., Bajo, J. (eds.) (Proc. PAAMS 2009). *IASC*, (55):302–309. Springer, Berlin.

[GS09] GROSS, T. AND SAYAMA, H. Adaptive Networks. Theory, Models and Applications. *Springer-NECSI.* 1860-0832. P 334. (2009).

[HB08] HABIBA, T. AND Y. BERGER-WOLF. Graph Theoretic Measures for Identifying Effective Blockers of Spreading Processes in Dynamic Networks. (Proc.6th International Workshop on Mining and Learning with Graphs, 2008). Helsinki, Finland..

[HM11] HOLZER, R. AND DE MEER, H. Methods for approximations of quantitative measures in self-organizing systems. (Proc. IWSOS 2011). Vol. 6557, *Lect. Notes Comp. Sci.* 1-15. Springer-Verlag.

[Hol07] HOLZBECHER, E. Environmental Modelign-Using Matlab. Springer. 393 pp. (2007).

[Iba10] IBA, T. An Autopoiestic Systems Theory for Creativity. *Procedia Soc. Behav. Sci.*. 2; 6610-6625. (2010).

[PAT08] PEROZO, N., AGUILAR, J., TERÁN, O. Proposal for a Multiagent Architecture for Self-Organizing Systems (MASOES). *Lect. Notes Comp. Sci.* (5075): 434-439. (2008).

[Stro94] STROGATZ, S. H. Non Linear Dynamics and Chaos, With Applications to Physics,Biology, Chemistry, and Engineering. Perseus Book Group. (1994).

[Wei99] WEISS, G. Multiagent Systems. Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. MIT Press, Cambridge, MA (USA). (1999).

[Wol02] WOLFRAM, S. A New Kind of Science, Wolfram Media.2002.

[WS98] WATTS, D. J., and S. H. STROGATZ, Nature (London) 393,440. (1998).

[ZPK00] ZEIGLER, B. P. PRAEHOFER, H. AND KIM. T. G. Theory of Modeling and Simulation. Academic Press, London, 2nd edition. (2000).