



## Artículo

Inteligencia colectiva: enfoque para el análisis de redes<sup>☆</sup>

Claudia Eugenia Toca Torres\*

Profesora de la Facultad de Finanzas, Gobierno y Relaciones Internacionales de la Universidad Externado de Colombia, Bogotá, Colombia

## INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

## Historia del artículo:

Recibido el 31 de enero de 2013

Aceptado el 20 de enero de 2014

On-line el 20 de marzo de 2014

## Códigos JEL:

M19

## Palabras clave:

Inteligencia colectiva

Autoorganización

Red empresarial

## RESUMEN

La revisión de la literatura anglosajona producida durante los últimos 16 años sobre inteligencia colectiva y otras metaheurísticas permite la construcción del estado del arte de 3 de sus características: autoorganización, flexibilidad y robustez. Dicho recorrido teórico aporta a la comprensión de las posibilidades de aplicación de la inteligencia colectiva no solo en especies sino en niveles de vida superiores como comunidades y ecosistemas. Dado que en el largo plazo la flexibilidad y la robustez emergen de la autoorganización, se sugiere el estudio de los asuntos de esta última característica en redes empresariales (información, comunicación, liderazgo, potencial creativo, pertenencia, autonomía, acción colectiva, cooperación, interacción, libertad y diversidad), así como el análisis de redes soportado en grafos e indicadores.

© 2013 Universidad ICESI. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

## Swarm intelligence: approach to the analysis of networks

## ABSTRACT

By using a review of English literature on Swarm Intelligence and other meta-heuristics over the last sixteen years, the state of the art of three of its features, self-organization, flexibility and robustness, are discussed. This theoretical approach provides an understanding of Swarm Intelligence application not only of a species but also on superior levels of life such as, communities and ecosystems. In the long term, as flexibility and robustness arise from self-organization, research on entrepreneurial network must focus on issues of self-organization (information, communication, leadership, inventive potential, belonging, autonomy, collective action, cooperation, interaction, liberty and diversity), as well as a networking analysis using graphs and indicators.

© 2013 Universidad ICESI. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

## Inteligência colectiva: abordagem para a análise de redes

## RESUMO

A revisão da literatura anglo-saxónica produzida nos últimos 16 anos sobre inteligência colectiva e outra meta-heurísticas, permite a construção do estado de arte de três das suas características: auto-organização, flexibilidade e robustez. O referido percurso teórico leva a compreensão das possibilidades de aplicação da inteligência colectiva não só em espécies mas também em níveis de vida superiores como comunidades e ecossistemas. Dado que a longo prazo, a flexibilidade e a robustez emergem da auto-organização, sugere-se o estudo dos assuntos desta última característica em redes empresariais (informação, comunicação, liderança, potencial criativo, pertença, autonomia, acção colectiva, cooperação, interacção, liberdade e diversidade), assim como a análise de redes suportada em redes e indicadores.

© 2013 Universidad ICESI. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos os direitos reservados.

## JEL classification:

M19

## Keywords:

Swarm intelligence

Self-organization

Entrepreneurial network

## Classificações JEL:

M19

## Palavras-chave:

Inteligência colectiva

Auto-organização

Rede empresarial

<sup>☆</sup> Este artículo se obtiene en el marco del desarrollo de la investigación «Acción e inteligencia colectivas en arreglos institucionales y organizacionales».

\* Autor para correspondencia: Calle 145 A # 13 A – 90, apto 202, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: cleutoto@etb.net.co

## 1. Introducción

Entre las metaheurísticas de mayor uso para estudios organizacionales figuran la optimización basada en colonias de hormigas y la inteligencia de enjambre. La optimización ha llamado la atención y ha sido exitosamente aplicada en diversas situaciones, ya que permite el hallazgo eficiente de soluciones óptimas en un espacio de búsqueda amplio. Bajo inteligencia de enjambre los agentes individuales generan modelos y se autoorganizan mediante interacciones con sus vecinos, es una inteligencia propia de los insectos sociales y de las formas colectivas de existencia y de organización. En colonias de especies sociales (colmenas, cardúmenes y manadas) el trabajo en equipo es ampliamente autoorganizado y coordinado a través de las diferentes interacciones entre individuos. La autoorganización constituye un atributo propio de especies sociales, se refiere a la capacidad —en ausencia de control externo— para generar mejoras en el orden o para producir nuevas formas de organización frente a cambios ambientales.

Dado que no solo las especies pueden ser inteligentes, sino que también en otros niveles de vida como comunidades y ecosistemas existen posibilidades de desarrollar la autoorganización como atributo fundamental de la inteligencia colectiva, el segundo apartado del presente trabajo presenta una revisión de la literatura anglosajona sobre las metaheurísticas y las especies sociales, confirmando las oportunidades de su aplicación en niveles de vida superiores. El tercer apartado presenta la red empresarial como una comunidad social en la que interactúan diferentes especies de empresas. Posteriormente, se presenta el estado del arte de las 3 características de la inteligencia colectiva: autoorganización, flexibilidad y robustez. En el quinto apartado se presentan las principales aplicaciones de la inteligencia colectiva y de otras metaheurísticas para la solución de problemas en empresas (nivel inferior de vida). Dado que en una red empresarial inteligente nuevas formas de organización emergen frente a imprevistos en el entorno, resulta importante identificar los asuntos que contribuyen a su fortalecimiento; por esta razón el último apartado se centra en una reflexión y propuesta para el estudio de la inteligencia colectiva en redes empresariales, bien sea en calidad de comunidades (empresas de la red) o de ecosistemas (empresas de la red y agentes nodales externos).

## 2. Inteligencia de enjambre como metaheurística

Las metaheurísticas se reconocen como métodos diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria; proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando conceptos de la genética, la biología, la inteligencia artificial, las matemáticas, la física y la neurología. Entre las metaheurísticas de mayor uso en los estudios organizacionales figuran los algoritmos genéticos, los algoritmos de búsqueda local con vecindario variable, la optimización aleatoria, la búsqueda local iterativa, la optimización basada en colonias de hormigas y la inteligencia de enjambre (Duarte, Pantrigo y Gallego, 2008).

La «optimización de colonias de abejas» (OCA) es el sistema de inteligencia colectiva donde el agente de bajo nivel es la abeja. Es el nombre otorgado a la conducta de búsqueda colectiva de rastreo de alimento. El sistema de las abejas es un ejemplo típico del trabajo en equipo organizado, de interacción bien coordinada, de coordinación, de división del trabajo, de realización simultánea de tareas, de individuos especializados y de comunicación tejida (Kaur y Goyal, 2011). La «optimización de colonias de hormigas» (OCH) constituye un enfoque reciente para resolver problemas de optimización combinatoria. La fuente de inspiración de la OCH es el rastro de feromonas dejado por las hormigas y la conducta de rastreo de dicho medio de comunicación por parte de las demás

hormigas (Dorigo y Stützle, 2002). El algoritmo de «optimización colectiva de partículas» (OCP) —inspirada en el abastecimiento de las hormigas— ha sido comparado con los algoritmos genéticos para el hallazgo eficiente de soluciones óptimas o cuasióptimas en un espacio de búsqueda amplio. La diferencia más notable radica en que la OCP escoge el sendero de cooperación sobre el de la competencia, en tanto los otros algoritmos evolutivos por lo regular usan alguna forma de aniquilación. La población de OCP es estable y los individuos no son destruidos o creados, sino influenciados por el mejor desempeño de sus vecinos. Esta optimización ha sido desarrollada a partir de la simulación de modelos sociales simplificados, como las manadas de pájaros y los cardúmenes de peces (Kim, 2006). Por tratarse de un concepto simple, de fácil implementación y rápida convergencia, ha llamado la atención y ha sido exitosamente aplicado en diversas situaciones, como la programación de sistemas manufactureros flexibles, el control de voltaje y poder, el entrenamiento de redes neuronales, la asignación de tareas, la selección de proveedores y la estimación para sistemas de distribución de energía (Biswas y Mahapatra, 2008).

Según Bonabeau, Dorigo y Théraulaz (1999), la expresión «inteligencia de enjambre» (*swarm intelligence*) fue usada por primera vez por Gerardo Beni, Suzanne Hackwood y Jing Wang en 1989 en el contexto de los sistemas de robótica celular, donde diversos agentes individuales ocupaban uno o 2 ambientes dimensionales para generar modelos y autoorganizarse mediante interacciones con vecinos cercanos (Bonabeau et al., 1999). Bonabeau et al. (1999) consideran en su momento lo limitado del ámbito de aplicación, por lo que amplían el contexto del trabajo para incluir «cualquier intento por diseñar algoritmos o mecanismos para la solución de problemas, inspirados en la conducta colectiva de colonias de insectos sociales» (Martinoli, 2001, p. 315). La también denominada «inteligencia colectiva» caracteriza a los insectos sociales y a las formas colectivas de existencia y de organización: cardúmenes, manadas, enjambres. Se describe como una conducta que emerge de un grupo de insectos sociales que viven en colonias (hormigas, abejas, avispas y termitas) que siguen reglas simples y no necesitan supervisión. La conducta de enjambre se convierte en inteligencia colectiva cuando un grupo puede usarla para resolver un problema colectivamente, de forma tal que los miembros que forman parte del grupo no lo pueden hacer de forma individual (Fisher, 2009).

Un sistema de inteligencia de enjambre para solucionar problemas exige un conocimiento profundo no solo de las conductas individuales que deben ser implementadas sino también de las interacciones necesarias para producir una conducta global determinada (Bonabeau et al., 1999). La coordinación emerge de las diferentes interacciones entre los individuos de un grupo social, sin importar si dichas interacciones son primitivas, pues en conjunto derivan en soluciones eficientes para problemas difíciles (Bonabeau y Meyer, 2001). Se debe recordar que las interacciones no-lineales entre los componentes de un sistema están presentes en todo sistema ecológico, definido este como el conjunto de organismos junto con los diversos componentes del ambiente con los que están relacionados funcionalmente (Gallopín, 2000).

La inteligencia colectiva emerge de la colaboración y la competencia de varios individuos y del consenso en los procesos decisivos. El asunto más importante es integrar la inteligencia atomizada para solucionar un problema dado, y la colaboración social para buscar un criterio para un grupo de usuarios cuya inteligencia pueda ser integrada. Se asume que existe el estado real del conocimiento del mundo real y los elementos de la colectividad (especie o comunidad) lo reflejan al mismo grado, dada la insuficiencia y la incertidumbre (Thanh, 2008).

Una organización inteligente será la que capture, construya y reserve conocimiento para entenderse a sí misma, entender

su ambiente, productos y servicios, competidores y posibilidades futuras. Es decir, para mantener operaciones en los más altos estándares, construir su futuro, ayudar en el descubrimiento de nuevos productos y servicios, apoyar los riesgos en nuevos campos y eludir fuerzas intrusas de destrucción. Un atributo intrínseco de este tipo de organizaciones es la habilidad para transferir el conocimiento y el *know how* con el fin de soportar su vida productiva y crecimiento durante la creación de valor continuo basado en innovación (Dayyani, 2009).

### 3. Abejas, termitas y hormigas como especies sociales

Los modelos de conducta altamente coordinada y descentralizada (inteligencia colectiva) se aprecian en las colonias cuando intercambian información a través de estigmergia, en los cardúmenes al optar por conductas a partir de la de los vecinos y en las manadas cuando se comunican a través de sonidos de otros pájaros (Jacob et al., 2007). Los insectos sociales exhiben una marcada diversidad en desarrollo, conducta, organización social y ecología, los cuales tienden a variar en la medida que el trabajo se divide. Algunas especies denotan rasgos sociales complejos y formas extremas de plasticidad fenotípica (Smith, Toth, Suarez y Gene, 2008). Son una serie de criaturas complejas, ya que pueden procesar muchas entradas sensoriales, modular su conducta de acuerdo a muchos estímulos y tomar decisiones sobre la base de una gran cantidad de información. La complejidad de un insecto individual resulta insuficiente para explicar la complejidad de una colonia de insectos (Bonabeau et al., 1999).

Las capacidades cognitivas de los insectos sociales son impresionantes. En particular, las abejas han revelado un número de habilidades tradicionalmente atribuidas solo a ciertos vertebrados superiores (palomas, delfines y primates), tales como sucesión del aprendizaje, categorización de objetos, formación de conceptos y una forma simple de conteo. Los comportamientos inteligentes colectivos no dependen de aspectos o factores neuronales sino más bien sensoriales y cognitivos. Cada insecto en una colonia parece tener su propia agenda, e incluso el grupo como un todo parece estar altamente organizado. En apariencia, la integración fluida de actividades individuales no requiere ninguna supervisión. Las abejas construyen series de panales paralelos formando cadenas que inducen un aumento local en la temperatura, y gracias a dicho aumento de temperatura los panales pueden ser moldeados más fácilmente. Cada uno es organizado en anillos concéntricos de polen y miel. Las fuentes de comida son explotadas de acuerdo con la calidad y distancia desde la colmena. Además de la construcción de nidos, las abejas deben identificar especies de flores con altas concentraciones de polen y néctar y con tiempos de manipulación cortos, para lo cual usan claves sensoriales (aromas, colores, tamaños de las flores, etc.) para memorizar su ubicación. Esto revela la importancia de los factores sensoriales y cognitivos, pues son los que afectan la velocidad de las decisiones en la búsqueda de alimento y su interrelación con precisión (Skorupski, Spaethe y Chittka, 2006).

La construcción de nidos de avispas involucra 3 grupos de trabajadores: proveedores de médula, proveedores de agua y constructores. El tamaño de cada grupo es regulado de acuerdo con las necesidades de la colonia expresadas por medio de flujos de información. Algunas especies de termitas construyen nidos más complejos que los de las avispas, compuestos de paredes exteriores rugosas en forma de cono que a menudo tienen nervios visibles que contienen ductos de ventilación. Las cámaras, pilares, espirales y ventilas de las estructuras nidales de las termitas dan cuenta de sus capacidades y de la complejidad y sofisticación de sus construcciones (Bonabeau et al., 1999).

Asombrosamente, las manadas de pájaros, los cardúmenes de peces y los enjambres de abejas o avispas reaccionan de la misma manera y en formas similares. Cuando huyen del peligro se mueven de una manera elegantemente sincronizada y se comportan como si fueran un único animal gigante. No hay un líder que coordine a los demás y les indique cómo reaccionar, por lo que operan de forma descentralizada (Lemouari y Benmohamed, 2008). Un trabajador en un colectivo social puede cumplir diversas tareas a lo largo de su vida, incluyendo el cuidado de la nidada, el mantenimiento del nido, la búsqueda de alimento, el patrullaje del territorio y la defensa del nido. Los trabajadores realizan tanto tareas internas como externas a la colonia, tareas que tienen fuerte correlación con el riesgo de morir, y las tareas internas son mucho más seguras que las tareas externas. Simultáneamente, la edad promedio de los trabajadores realizando una tarea particular aumenta con la distancia tomada desde el centro del nido, es decir, los más jóvenes tienden a realizar tareas seguras como el cuidado de la nidada y los más viejos se dedican a buscar comida y a patrullar. Esta correlación de edad y tarea es conocida como polietismo etario o temporal (Tripet y Nonacs, 2004). En este mismo sentido, al grupo de individuos que se especializa, en cierto grado, en ocupaciones específicas como resultado de la división del trabajo se le reconoce como casta y puede estar asociada con diferencias en edad, anatomía y morfología.

Dugatkin (1997) reconoce a Batra la propuesta en 1996 del término «eusocialidad» para referir el fenómeno de la especialización reproductiva, que se suma a la característica inicialmente atribuida a las castas estériles (Michener, 1969 y 1974, en Dugatkin, 1997). Los insectos eusociales cooperan en la reproducción y dividen la tarea reproductiva (Dugatkin, 1997). La fascinación con los insectos eusociales radica en su complicada organización social y en la cantidad de hipótesis que han sido propuestas para explicar este fenómeno. La eusocialidad reconocida como el cuidado de las crías de una casta reproductiva por parte de una casta trabajadora no reproductiva o menos reproductiva es el nivel más avanzado de vida social en los insectos. Lo anterior implica una alta demanda de altruismo colateral, que es conducta benefactora con otros para garantizar la vida de las crías de los más productivos (Wilson, 2008).

Las colonias, cardúmenes y manadas pueden ser definidos en términos de sistemas complejos adaptativos (SCA), por lo que en ellos se identifican condiciones particulares: número mediano de agentes interactuando, interacción local entre agentes adaptativos —los agentes son inteligentes en la medida que interactúan de acuerdo a reglas— y toma de decisiones basada en información local. Esto implica que en su calidad de sistemas vivos caen en la categoría de SCA en los que, a diferencia de los sistemas complejos, las reglas de interacción para agentes individuales evolucionan y cambian (Andriani y Passiante, 2004).

### 4. Las redes como comunidades sociales

Antes de definir la red empresarial en términos de comunidad social es importante partir de los distintos niveles de vida e identificar su correspondiente arreglo organizacional. En orden ascendente, los niveles de vida incluyen célula, tejido, órgano, sistema, individuo, población, especie, comunidad y ecosistema. Sin embargo, y para efectos de estudiar el entorno organizacional, se considera desde el nivel individuo hasta el nivel máximo.

Partiendo de la idea que una red empresarial puede agruparse en función de la actividad —turismo, por ejemplo—, los distintos niveles de vida serían: individuo, el estudio de un hostel (o un hotel, o una posada campestre o una ecofinca); población, el análisis de todos los hostales (o todos los hoteles o todas las posadas o todas las ecofincas); especie, la investigación con empresas que prestan servicios de alojamiento (o transportadoras, o restaurantes,

o las que ofrecen servicios de recreación y atractivos u operados turísticos). La comunidad, por su parte, implicaría el estudio de todas las empresas que forman parte de la red empresarial de turismo. En el último nivel de vida, el ecosistema exige el estudio de la red empresarial y los nodos con los que establece relación, los cuales pueden estar agrupados en 4 agentes: público (actores gubernamentales), privado (otras empresas y agremiaciones), social (organizaciones del tercer sector) e internacional (organismos y fondos multilaterales). Con esta aclaración a continuación se define la red empresarial en términos de comunidad empresarial o sistema multiagente.

Una red se define como un modelo —relativamente estable y complejo— de relaciones entre múltiples elementos interdependientes y autoorganizados (actores sociales, políticos o económicos) que adicionalmente conforman como un todo un sistema autoorganizado (Morçöl y Wachhaus, 2009). En un sistema complejo, como la red, el modelo de organización es importante y la función del sistema integral depende de cómo están conectados los componentes. La interconexión de muchos componentes especializados faculta al sistema para desarrollar propiedades y especializaciones para interactuar con el entorno. El desempeño del sistema depende del mantenimiento de un esquema coherente de organización, que consiste en un modelo o programa conformado por unidades más pequeñas de modelos o programas (Shafee, 2010). Las redes, al constituir uno de los tantos factores de complejidad organizacional, demandan formas particulares de medición, no solo en el número de interconexiones y tipos, sino en cuanto a la sofisticación de las interconexiones y a la robustez de las interconexiones (Crawley, 2006, en Vesterby, 2008). Implica entonces entender su organización interrelacional, o sea, conocer los componentes básicos y la forma en que crean y mantienen la red como un sistema mayor. Sin embargo, no es suficiente con establecer la cantidad de componentes y relaciones o la cantidad de organización; adicionalmente se debe reconocer el modelo de la organización (Vesterby, 2008).

Si bien no existe una definición unificada, se pueden considerar 3 características importantes para el agente participante en una red: a) autonomía, por lo que el agente puede completar activamente las tareas relacionadas sin interferencia externa; b) adaptabilidad, referida a sus habilidades para percibir y adaptarse al entorno y para estudiarlo, y c) coordinación, que le permite completar de forma conjunta una actividad. La capacidad de un sistema multiagente (una red) no está determinada por un simple agente sino por la inteligencia mostrada por una coordinación mutua entre agentes (Guo y Zhang, 2009). En este sentido, la teoría de la complejidad facilita el estudio de un gran número de actores con patrones de interacciones cambiantes, reconociendo, desde luego, que la deducción de consecuencias en procesos adaptativos poblacionales resulta una labor difícil cuando son muchos los agentes que siguen reglas con efectos no lineales (Axelrod, 2004). Algunas soluciones propuestas en la literatura abordan la complejidad mediante el uso de modelos parciales en diferentes escalas y en diferentes contextos de operación (Meyer, 1997, en Amigoni y Schiaffonati, 2008). El sistema multiagente se concentra, de manera particular, en el desarrollo de estructuras de organización, estrategias para la solución de problemas y mecanismos de cooperación y coordinación para un rango de módulos responsables de la solución de problemas (Chan y Chan, 2004). Los vínculos de cooperación entre agentes pueden dar origen a una red de cooperación o conjunto de 2 o más relaciones entre agentes conectados entre sí, que les permite en conjunto lograr una ventaja competitiva frente a otras redes (Rodríguez y Hernández, 2003, en Ojeda, 2009).

Los problemas de congestión en los que el desempeño del sistema depende del número de agentes ejecutando una acción particular proporcionan un dominio interesante para estudiar la conducta de sistemas multiagente cooperativos. En estas

situaciones, los agentes necesitan aprender a sincronizar sus acciones, más que aprender a realizar acciones particulares (Tumer y Khani, 2009). En los sistemas multiagente, los agentes enfrentan un problema de aprendizaje difícil donde sus acciones son filtradas a través de la acción del grupo; sin embargo, no se debe desconocer que los agentes previamente han sido direccionados hacia una recompensa. Como consecuencia, un agente tiene un amplio periodo de aprendizaje en el que sus acciones se someten a prueba hasta que garanticen la fluidez demandada (Tumer y Khani, 2009). Algunos de los más exitosos trabajos en aprendizaje multiagente se soportan en el conocimiento del dominio: adecuada convergencia de propiedades, apropiada división del trabajo a partir de reglas específicas y seguridad gracias al sistema de recompensas. En estos ejemplos la coordinación del agente es lograda a través del aprovechamiento del conocimiento de la dinámica de sistemas y del énfasis en las interacciones deseables conocidas entre los agentes (Tumer y Agogino, 2009).

El acercamiento al «sistema sensible de agentes estigmérgicos» (SSAE)<sup>1</sup>, constituye otra posibilidad para el análisis de redes; este se trata de una metaheurística que combina el sistema multiagente con una conducta estigmérgica y un nuevo concepto de sensibilidad gradual feromónica de agentes. El SSAE enfatiza un sistema más robusto y flexible, obtenido al considerar que no todos los agentes reaccionan de la misma forma frente a rastros de feromonas. Dichos agentes autónomos reactivos son capaces de interoperar sobre 2 niveles con el fin de solucionar problemas: el de la comunicación directa, por lo que intercambian diferentes tipos de mensajes, y el de la comunicación estigmérgica indirecta, es decir, ostentan la habilidad para producir rastros de feromonas que inciden en decisiones futuras de otros agentes en el sistema. Este sistema garantiza un buen balance entre la búsqueda de explotación y de exploración (Varga, Chira y Dumitrescu, 2009).

En los sistemas complejos como comunidades sociales se identifican 3 elementos comunes: están integrados por múltiples componentes interdependientes (actores o agentes); tienen modelos de relaciones relativamente estables, y están autoorganizados (Morçöl y Wachhaus, 2009). El énfasis en las interacciones dinámicas como la fuente de la autoorganización emergente implica que los SCA pueden además ser examinados en términos de formación de redes, comunicación y aprendizaje (Doak y Karadimitriou, 2007).

Muchos colectivos son dependientes del movimiento, por lo que cualquier estudio debe considerar no solo la presencia de movimiento sino también el grado de coordinación del mismo y si sus miembros son coordinados. Al respecto, cualquier taxonomía de colectivos debería ser complementada con una clasificación adecuada de movimiento colectivo (Wood y Galton, 2009). Dado que ninguna de las especies sociales estudiadas cuenta con un líder que indique lo que tienen que hacer, sus miembros cuentan con habilidades colectivas, de modo que las actuaciones individuales contribuyen a movimientos colectivos exitosos (Miller, 2007). Las redes emergentes descentralizadas y no lineales se han convertido en la razón preferida para explicar y entender resultados sociales. Es la emergencia la que justifica que se presenten distintos fenómenos (Conley, 2009).

Una red empresarial y sus nodos externos puede ser estudiada como una «comunidad de organismos agregados en un entorno abiótico, diferenciado por los tipos de condiciones físicas, de organismos que viven allí y de interacciones que se dan entre los componentes vivos y los abióticos» (Vesterby, 2008, p. 101). Bajo estas circunstancias, las empresas de una misma especie o que

<sup>1</sup> Traducción del autor para *Sensitive Stigmergic Agent System (SSAS)*.

desarrollan una misma actividad dentro de una industria o sector pueden ser parte de una comunidad o red empresarial. Pero si cada especie no garantiza los atributos necesarios, difícilmente la comunidad podrá comportarse como un colectivo inteligente o sistema complejo.

### 5. Autoorganización: atributo de especies y de comunidades

Un análisis del comportamiento de insectos sociales permite identificar como atributos de la inteligencia colectiva la flexibilidad, la robustez y la autoorganización. Es la flexibilidad la que permite que la colonia se adapte rápidamente a un ambiente cambiante; frente a fallas de uno o más individuos del grupo, la robustez garantiza que alguien asuma el desempeño de las funciones de los que fallan, y la autoorganización implica la ausencia de control central y de supervisión local. En el largo plazo, la flexibilidad y la robustez emergen de la autoorganización.

El término «autoorganización» fue planteado por Ilya Prigogine y sus colegas a partir de estudios termodinámicos. La literatura ofrece muchas definiciones de autoorganización, dependiendo del contexto en el que ocurre o es aplicado. En el dominio de la inteligencia de enjambre el término se refiere a aquellos procesos capaces de convocar conductas colectivas, es decir, interacciones múltiples entre individuos y retroalimentación retroactiva positiva y negativa (Lemouari y Benmohamed, 2008). Según los presupuestos desarrollados en torno a la inteligencia colectiva, «si los individuos siguen reglas simples, la conducta grupal resultante puede ser sorprendentemente compleja y extraordinariamente efectiva» (Bonabeau y Meyer, 2001, p. 108). La conducta eficiente de una colonia emerge de la actividad colectiva de individuos que siguen reglas muy básicas. La emergencia es un fenómeno algo negativo encontrado en sistemas complejos, que puede además ser positivamente explotado. La explotación positiva de la emergencia es la autoorganización o proceso por el que un sistema de subunidades interactuando adquiere propiedades cualitativamente nuevas que no pueden ser entendidas como la simple adición de sus contribuciones individuales.

La distinción entre emergencia y autoorganización se desdibuja, y resulta imposible encontrarlos separados. Existen 2 puntos de vista al combinar autoorganización y emergencia: a) considerar la autoorganización como una causa, ubicada en el nivel micro del proceso de emergencia —propiedades emergentes en sistemas complejos que son resultado de un proceso autoorganizado—, y b) considerar la autoorganización como un efecto, una propiedad emergente —emergencia que desemboca en la autoorganización. La autoorganización es cualquier proceso en el sistema con capacidad para enfatizar una mejora en el orden o de producir nueva organización frente a cambios ambientales sin control externo. La emergencia, por su parte, es un fenómeno en el sistema caracterizado por la aparición de una estructura original a nivel macro, generada por la interacción entre partes componentes (Lemouari y Benmohamed, 2008).

La autoorganización es el principal componente de un amplio rango de fenómenos colectivos entre insectos sociales (Bonabeau et al., 1999). Su descubrimiento proporciona herramientas poderosas para transferir conocimiento al campo del diseño de sistemas inteligentes. Sin duda alguna, una colonia de insectos sociales es un sistema descentralizado para la solución de problemas, compuesto por diversos entes sencillos interactuando. En las colonias, los problemas como la búsqueda de alimento, la construcción o la ampliación de un nido, la división eficiente del trabajo, la alimentación eficiente de la nidada, la respuesta a retos externos y la propagación de alarmas son solucionados de una manera flexible y robusta (Bonabeau et al., 1999).

Dada la autoorganización, no es necesario que un sistema sea controlado por un componente central que le determine la conducta de sistema requerida. En su lugar, la conducta colectiva emerge de las interacciones locales de todos los componentes y el sistema global se comporta como un superorganismo de componentes holgadamente conectados que reaccionan de manera inteligente en el ambiente (Rodríguez, Grushin y Reggia, 2007). La ausencia de control figura como una de las características de la autoorganización a la que se suman mejoramiento del orden y adaptación, dinamismo y abandono del equilibrio (Lemouari y Benmohamed, 2008).

La estigmergia, ya referida, se reconoce como otro de los aportes de la conducta de los animales a la autoorganización como característica de la inteligencia colectiva. La estigmergia como forma de comunicación mediada por modificaciones del ambiente ayuda a que las hormigas logren la autoorganización (Dorigo y Stützle, 2004). Esta forma de comunicación ayudó a los investigadores a entender la conexión entre el nivel individual y el de colonia, mostrando que una teoría alternativa podría explicar la paradoja de la coordinación entre los insectos sociales. La estigmergia ofrece un marco estimulante para entender la coordinación y la regulación de actividades colectivas; no obstante, el principal problema es determinar cómo son organizados los estímulos (en tiempo y espacio) para generar modelos coherentes y robustos (Théraulaz y Bonabeau, 1999).

En las colonias de insectos sociales los miembros se comunican directamente entre ellos e indirectamente a través de su ambiente con el único propósito de lograr decisiones y desempeños adecuados. Durante el desarrollo de un trabajo emerge información que puede resultar muy útil para guiar la actividad, y se trata entonces de un sendero descentralizado de flujo de información indirecta (Karsai, 1999). Es así que la estigmergia describe la incidencia en la conducta de efectos ambientales persistentes de conductas previas. Si bien el concepto se identifica en el interior de las especies de animales sociales, es posible ampliarlo a otros dominios e incluso puede ser visto como una explicación de cómo los sistemas simples pueden producir un amplio rango de conductas en apariencia altamente organizadas y coordinadas y de resultados conductuales, simplemente aprovechando las influencias del ambiente (Holland y Melhuish, 1999).

En una red, los agentes cooperantes pueden aumentar la movilidad, la supervivencia, la agudeza sensorial y el flujo de información a través de sistemas integrados multiagente. Bajo esquemas oscilatorios no lineales, los comportamientos básicos como caminatas fortuitas, evasión de obstáculos y seguimiento de luces pueden ser coordinados en un simple robot para lograr conductas más complicadas. No obstante, estas conductas basadas en organizaciones computacionales carecen de una comprensión intuitiva de los problemas y en ocasiones exhiben desempeños impredecibles e indeseables (Kim, 2006). El reto fundamental de cualquier optimización del tráfico autoorganizado es la habilidad para adaptar las rutas de flujos parciales a la situación de flujo global en la red. Si un vínculo está congestionado, una determinada proporción del flujo general puede usar un camino alternativo para alcanzar su destino. El grado de uso de rutas alternativas que pueden denominarse como óptimas depende crucialmente de la capacidad y del peso de los trayectos alternativos disponibles y del flujo global que tiene que ser atendido (Peters, Johansson, Dussutour y Helbing, 2006).

Para terminar este apartado, se puede concluir que las empresas como especies y las redes como comunidades pueden considerarse como SCA, es decir, sistemas dinámicos, abiertos y no lineales. Sistemas que involucran componentes conectados de diversas formas, interactuando seria y paralelamente, así los eventos ocurran secuencial o simultáneamente. Son sistemas capaces de exhibir una autoorganización espontánea que desdibuja los límites entre interno y entorno, con cualidades emergentes que tienden a cubrir

todo el sistema a pesar de su generación a partir de interacciones locales (Taylor, 2001, en Doak y Karadimitriou, 2007).

## 6. Aplicaciones de las metaheurísticas

Los algoritmos de la OCA han sido usados para solucionar ciertos problemas relacionados con rutas de transporte, optimización en ingeniería, diagnóstico de accidentes y programación en talleres (Kaur y Goyal, 2011). Las metaheurísticas han contribuido al diseño de organizaciones más inteligentes y han sido usadas para solucionar el problema básico de la distribución de los productos en los estantes de supermercados; concretamente, Lim, Rodrigues y Zhang (2004) desarrollaron movimientos de vecindario (algoritmos de búsqueda local con vecindario variable) a fin de encontrar aplicaciones en un amplio rango de problemas de distribución en estante. El enfoque de los SCA ha sido exitosamente aplicado por empresas de telecomunicaciones para redireccionar llamadas usando los modelos de conducta de las hormigas. Dicho trabajo utiliza algoritmos genéticos para producir conductas adaptativas. En otro ámbito, han logrado describir cómo la conducta de las hormigas soluciona efectivamente (aunque no óptimamente) el típico problema de los agentes viajeros. Ambos trabajos resaltan un aspecto importante: los SCA no garantizan el mejor resultado posible dada la aleatoriedad y la conducta emergente impredecible. Significa entonces que no es adecuado para todos los dominios de problemas pero su fortaleza reside en su habilidad para producir soluciones aceptables aplicables bajo ciertas circunstancias (Camorlinga y Barkerb, 2006).

Adicional a los métodos novedosos para redes de redireccionamiento de tráfico en sistemas de telecomunicaciones ocupados, la interacción cooperativa de hormigas en actividades de construcción de nidos ha conducido a algoritmos de control más efectivos para grupos de robots. La forma en que los insectos agrupan los muertos de su colonia y clasifican sus larvas ha ayudado a analizar los datos en los bancos. La división del trabajo entre las abejas ha aportado en la racionalización de las líneas de ensamble en las fábricas (Bonabeau y Théraulaz, 2008).

Referente a la inteligencia colectiva, se destacan los estudios que han intentado ubicar en mejor perspectiva, la forma como las organizaciones humanas inteligentes pueden ser estructuradas y administradas de manera más efectiva. Los estudios de este tipo han considerado 4 nuevas perspectivas: la filosofía del *management*, la teoría organizacional, la forma de organización y la estrategia de *management* (Liang, 2004), sumándose la posibilidad del *governance*, o forma superior de *management*, en la empresa bajo condiciones sociales de escasez, adversidad e incertidumbre (Duit y Galaz, 2008). La inteligencia de enjambre ha sido usada en la solución de problemas como la identificación de las rutas más cortas pasando una sola vez por un determinado número de ciudades (problema del agente viajero); la asignación cuadrática para minimizar la distancia total entre múltiples procesos por los que debe pasar una mercancía en una planta de producción, y la optimización de redes para evitar áreas de congestión minimizando demoras. Sobre las bases del problema de programación multitécnica han sido estudiadas las limitaciones de máquinas, herramientas, trabajadores y robots en talleres de producción. Adicionalmente, se ha estudiado el problema de programación en talleres y se ha proporcionado el algoritmo de programación y sus resultados (Guo y Zhang, 2009).

La «interacción cooperativa vía acoplamiento de agentes» ha sido aplicada como técnica para coordinar procesos decisorios en sistemas dispersos, donde las autoridades que deciden y la información se encuentran atomizadas en múltiples organizaciones. El desempeño global es logrado a través de la interacción cooperativa y de compartir información parcial entre las distintas organizaciones. Las agendas para futuras investigaciones incluyen el estudio

de interacciones asíncronas, el diseño de entornos más realistas y otros problemas contextuales (In-Jae y Leon, 2002). Esta misma técnica ha sido usada por los autores para solucionar problemas de programación de una única máquina compartida. Los resultados experimentales sugieren que el algoritmo propuesto puede rendir soluciones cercanas al óptimo tras establecer la viabilidad para diversos escenarios de problemas (In-Jae y Leon, 2005).

Concretamente se reconocen estudios de redes de cadena de suministro tendientes a optimizar procesos decisorios, a establecer secuencias óptimas a lo largo de una cadena y a conocer la ubicación óptima de sus miembros, y desde luego a predecir la conducta colectiva del grupo. En muchas empresas de carga el «sistema de modelación autónomo» (enfoque multiagente) ha sido aplicado en el dominio de la planeación y la programación de órdenes de transporte para la solución de diversos problemas (Fischer, Müller y Pischel, 1996).

En el plano gubernamental, Donald Rumsfeld, Secretario de Defensa del Gobierno de Estados Unidos, visualizó un sistema de defensa nacional modelado a partir de la autoorganización propia de la colonia de hormigas, las redes y los enjambres a fin de lograr una fuerza de combate más pequeña, rápida y tecnológicamente más sofisticada, así como una estructura de comando más estrecha, repentina y flexible (Conley, 2009). Las redes de políticas, por su parte, constituyen un enfoque usado para analizar la relación entre el gobierno y los grupos que regularmente tienen acceso a los procesos decisorios. Los cambios en el proceso y los resultados de políticas públicas en Hong Kong se explican precisamente por la noción de redes de políticas, y explican de igual modo por qué la trayectoria del cambio en algunas áreas puede diferir del modelo general augurado por los cambios en el entorno político (Ng, 2007).

Si bien no se registran aplicaciones del sistema sensible de agentes estigmérgicos (SSAE), Gao, Lou y Yang (2005) descubren que Di Caro y Dorigo usaron la cooperación estigmérgica para optimizar índices de rutas en redes de comunicación; encuentran de igual modo que Krieger et al. también usaron la cooperación estigmérgica para regular la división del trabajo en la sociedad robótica y en el diseño flexible de sistemas robóticos robustos y efectivos. Basados en los principios estigmérgicos, han sido establecidos, de forma preliminar, prototipos en plantas manufactureras para controlar flujos híbridos en la planta (Gao et al., 2005). Es de resaltar que la estigmérgia (o estimergia) se ha vuelto muy popular en los procesos de ensamble de las fábricas. Precisamente, Castelfranchi, Piunti y Ricci (2012) distinguen 2 procesos estigmérgicos fundamentales: a) autoajuste estigmérgico, cuando un agente unilateralmente explota los efectos de las conductas prácticas de otros agentes, registradas en el ambiente para evitar posibles obstáculos o para aprovechar oportunidades; por ejemplo, frente a la conducta de un trabajador de limpiar su puesto de trabajo, un colega entiende que ya terminó su jornada laboral y que ya no puede contar con él, y b) comunicación estigmérgica, que es una forma de comunicación que no explota ningún código compartido entre los agentes sino solo el significado natural de las conductas. Bajo este proceso, las actividades rutinarias compartidas de los trabajadores se soportan en las señales; por ejemplo, en un proceso de ensamble de un electrodoméstico, cuando un operario dispone una pieza en determinado lugar, en cierto modo está indicando a su colega el momento y la coordinación del ensamble.

Retomando los niveles de vida que van desde célula, tejido, órgano, sistema, individuo, población, especie, comunidad hasta ecosistema, y contrastándolos con la anterior revisión teórica, se puede apreciar que el estudio de la inteligencia colectiva no ha superado el nivel de vida correspondiente a individuo. Solo las agencias comerciales y de distribución logran estudios a este nivel; en empresas de telecomunicaciones, fábricas, plantas de producción y empresas de carga se realizan a nivel de sistema. En supermercados, bancos, talleres de producción, secretarías de

defensa y empresas de logística el nivel de vida abordado es órgano. Esta razón motiva trascender al nivel de comunidad y de ecosistema, identificando aquellos elementos que deberán ser tenidos en cuenta para que un colectivo empresarial (red empresarial o red relacionada con sus nodos) actúe de forma inteligente.

## 7. Reflexión y propuesta para el estudio de la inteligencia colectiva en redes empresariales

El estudio de la inteligencia colectiva en redes puede convertirse, en el corto plazo, en uno de los paradigmas para las ciencias sociales en general y particularmente para la administración. El planteamiento teórico presentado al final del primer párrafo del quinto apartado de que en el largo plazo la flexibilidad y la robustez emergente de la autoorganización lleva a centrar cualquier esfuerzo en la exploración de los asuntos de este último atributo. Bajo esta premisa los asuntos de autoorganización que fácilmente pueden ser estudiados mediante reactivos en una red empresarial (comunidad) o en una red y sus nodos (ecosistema) son: información y comunicación; liderazgo y potencial creativo; pertenencia y autonomía; acción colectiva y cooperación; interacción, y libertad y diversidad. Se sugiere, por tanto, la construcción de una escala que, en función de los intercambios propios de la red, indague los asuntos particulares a fin de caracterizar cada asunto. Resulta importante la aplicación de un instrumento para empresarios, otro para empleados y otro para los actores que conforman los nodos de la red (agentes). Para la elaboración de los instrumentos es recomendable tener en cuenta las siguientes claridades de cada asunto de la autoorganización.

Dentro de la información y la comunicación el tema de la confianza entre las empresas de la red demanda atención, especialmente cuando de compartir información se trata. Si bien en las especies inteligentes el liderazgo no existe ya que todos sus miembros están en capacidad de actuar autónomamente sin la indicación u orientación de un líder, es fundamental explorar sobre dicha capacidad. Respecto a pertenencia y autonomía, la tendencia debe ser hacia la eliminación de todo tipo de dependencias para la adecuada realización del trabajo, es decir, investigar si a los empleados se les brinda la posibilidad de atender directa e inmediatamente las solicitudes de clientes o usuarios sin el consentimiento de un jefe.

En este sentido, 2 asuntos importantes a tener en cuenta para la acción colectiva y la cooperación son: pensar en colectivo implica que cuando se tomen decisiones en una empresa se considere el impacto que pudieran tener en las otras empresas de la red, y que la sanción social a quienes no colaboran en la consecución de beneficios colectivos contribuye a la consolidación de una cultura de la cooperación. Las relaciones con los nodos de la red son un asunto fundamental en el tema de la interacción y pueden fortalecerse por la vía de los insumos intercambiados, es decir, información, capacitación, presupuestos, etc. Para el último asunto de la autoorganización, libertad y diversidad es importante el reconocimiento, respeto y conciencia de las diferencias existentes entre los individuos; las diferencias, los desacuerdos y la heterogeneidad en el actuar no son asuntos negativos, sino que, por el contrario, en ciertas situaciones resultan convenientes.

Una vez caracterizada la inteligencia colectiva, se procede al análisis de la red. El análisis de redes es el método analítico y estático mejor conocido en el campo de la configuración geométrica, dada la expresión simplificada de conexión de los entes; entre sus medidas analíticas aceptadas figuran conectividad, accesibilidad y centralidad. Estas medidas permiten la determinación y la descripción estructural de la red con cierta precisión. Las imágenes estáticas de este tipo tienen mérito solo sobre escalas de tiempo donde la configuración puede ser considerada como fija (Cheol-Jae y Akira, 2008).

El análisis puede soportarse en la representación gráfica y en la aplicación de indicadores. La representación gráfica marca las conexiones reales entre las empresas de la red (nodo empresarial) y entre dicho nodo y los demás agentes. Una de las ventajas del análisis de red es que permite conocer las interacciones entre agentes a partir de datos cualitativos a través de un grafo (Velázquez y Aguilar, 2005). La red debe garantizar todos los elementos necesarios para su análisis: nodos, conexiones y flujos de recursos (dinero, información, servicios, decisiones y soluciones). Para la representación gráfica y para la generación de matrices se puede recurrir a cualquier software (por ejemplo, Netdraw y Ucinet). La densidad, la centralidad, la centralización, la intermediación y la cercanía, son algunos de los indicadores aplicados tanto a actores individuales como a la red en general. La densidad representa el grado de conexión entre actores; la centralidad permite identificar el actor al que están directamente unidos los demás; la centralización señala el actor central por estar altamente conectado a la red; la intermediación señala el componente que media en las comunicaciones entre pares de nodos, y la cercanía refleja la capacidad de un agente para alcanzar a los demás de la red (Velázquez y Aguilar, 2005).

## 8. Conclusiones

En una colonia inteligente los miembros son autónomos, no necesitan un líder que les indique el camino a seguir, se orientan hacia la tarea y la comunicación no es necesariamente directa. Estos referentes permiten definir la organización inteligente como aquella donde el control y la supervisión están en manos de sus miembros; que captura, construye y reserva conocimiento para entenderse a sí misma y a su entorno; y que desarrolla constante y consistentemente su base dinámica de conocimiento para después transferirlo. La transferencia de conocimiento es la que determina las competencias esenciales y la ventaja competitiva que a su vez resultan determinantes de la inteligencia de la organización.

Diversos estudios han demostrado la utilidad de la inteligencia colectiva para la optimización de procesos al interior de las empresas. No obstante, también deben considerarse las posibilidades basadas en el enfoque multiagente para optimizar la toma de decisiones en redes políticas y en cadenas de suministro. Las redes implican relaciones y flujos entre diversos agentes interdependientes y autoorganizados. La capacidad de un sistema multiagente no está determinada por un simple agente sino por la inteligencia mostrada por una coordinación mutua entre agentes. El sistema multiagente se concentra en el desarrollo de estructuras de organización, estrategias para la solución de problemas y mecanismos de cooperación y coordinación para un rango de nodos responsables de la solución de problemas.

Una red inteligente será aquella en la que tomen lugar múltiples interacciones entre empresas y una permanente retroalimentación tanto positiva como negativa. Bajo estos referentes, en la inteligencia colectiva se reconocen potencialidades para el análisis de relaciones, interacciones e intermediaciones de una red empresarial con sus nodos externos (ecosistema). En el análisis de una red empresarial, la inteligencia colectiva debe facilitar la identificación de los grados de robustez, flexibilidad y autoorganización; los flujos e interacciones entre miembros de una especie (empresas que prestan servicio de alojamiento) y entre especies (empresas de alojamiento y transportadoras); los niveles de cooperación y colaboración entre sus miembros y entre los distintos nodos (agentes público, social, privado e internacional), y las formas de transferencia del conocimiento, entre otros asuntos. Con los determinantes de la autoorganización identificados, el paso a seguir es el diseño de instrumentos que permitan la caracterización de la inteligencia colectiva en redes empresariales. La información recopilada de la

red puede ser analizada de modo que se identifiquen aquellos asuntos débiles y que demandan acciones para llegar a ser un colectivo inteligente. La red y sus nodos conformarán el denominado ecosistema empresarial, que aunque no se comporte como un colectivo inteligente, siempre podrá realizar esfuerzos para la consolidación de algunos de sus atributos.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

### Bibliografía

- Amigoni, F. y Schiaffonati, V. (2008). A multiagent approach to modelling complex phenomena. *Foundations of Science*, 13, 113–125.
- Andriani, P., & Passiante, G. (Eds.). (2004). *Complexity Theory and the Management of Networks: Proceedings of the Workshop on Organisational Networks as distributed Systems of Knowledge*. Londres: Imperial College Press.
- Axelrod, R. (2004). *La complejidad de la cooperación. Modelos de cooperación y colaboración basados en los agentes*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Biswas, S. y Mahapatra, S. S. (2008). Modified particle swarm optimization for solving machine-loading problems in flexible manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9/10), 931–942.
- Bonabeau, E., Dorigo, M. y Théraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York: Oxford University Press.
- Bonabeau, E. y Meyer, C. (2001). Swarm intelligence: A whole new way to think about business. *Harvard Business Review*, 79(5), 107–114.
- Bonabeau, E. y Théraulaz, G. (2008). Swarm smarts. *Scientific American Special Edition*, 18(1), 40–47.
- Camorlinga, S. y Barker, D. (2006). A complex adaptive system based on squirrels behaviors for distributed resource allocation. *Web Intelligence and Agent Systems: An International Journal*, 4, 1–23.
- Castelfranchi, C., Piunti, M. y Ricci, A. (2012). Aml Systems as agent-based mirror worlds: Brindging humans and agents through stigmergy. In T. Bosse (Ed.), *Agents and Ambient Intelligence*. Amsterdam, NLD: IOS Press.
- Chan, F. T. y Chan, H. K. (2004). A new model for manufacturing supply chain networks: A multiagent approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 218(B), 443–454.
- Cheol-Jae, Y. y Akira, F. (2008). Network based multi agent simulation analysis. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 7(2), 301–308.
- Conley, D. S. (2009). Writing like a flock. *Social Identities*, 15(4), 447–461.
- Dayyani, B. (2009). Structured analytics: The creation of the Intelligent Organization. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 38, 973–988.
- Doak, J. y Karadimitriou, N. (2007). (Re)development complexity and networks: A framework for research. *Urban Studies*, 44(2), 209–229.
- Dorigo, M. y Stützle, T. (2002). The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications and advances. In F. Glover y G. A. Kochenberger (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*. Secaucus, NJ: Kluwer Academic Publishers.
- Dorigo, M. y Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Duarte, A., Pantrigo, J. J. y Gallego, M. (2008). *Meta-heurísticas*. Madrid: Dykinson.
- Dugatkin, L. A. (1997). *Cooperation Among Animals: An Evolutionary Perspective*. Cary, NC: Oxford University Press.
- Duit, A. y Galaz, V. (2008). Governance and complexity. Emerging issues for governance theory. *Governance: An International Journal of Policy, Administration and Institutions*, 21(3), 311–335.
- Fischer, K., Müller, J. P. y Pischel, M. (1996). Cooperative transportation scheduling: An application domain for Distributed Artificial Intelligence DAL. *Applied Artificial Intelligence*, 10, 1–33.
- Fisher, L. (2009). *Perfect Swarm: The Science of Complexity in Everyday Life*. New York: Basic Books.
- Gallopín, G. (2000). Ecología y ambiente. In E. Leff (Ed.), *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*. México D.F.: Siglo XXI.
- Gao, Q., Lou, X. y Yang, S. (2005). Stigmergic cooperation mechanism for shop floor control system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 743–753.
- Guo, Q. y Zhang, M. (2009). Multiagent-based scheduling optimization for Intelligent Manufacturing System. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44, 595–605.
- Holland, O. y Melhuish, C. (1999). Stigmergy, self-organization, and sorting in collective robotics. *Artificial Life*, 5, 173–202.
- In-Jae, J. y Leon, V. J. (2002). Decision-making and cooperative interaction via coupling agents in organizationally distributed systems. *IIE Transactions*, 3, 789–802.
- In-Jae, J. y Leon, V. J. (2005). A single-machine distributed scheduling methodology using cooperative interaction via coupling agents. *IIE Transactions*, 37, 137–152.
- Jacob, C. J., Hushlak, G., Boyd, J. E., Nuytten, P., Sayles, M. y Pilat, M. (2007). *SwarmArt: Interactive Art from Swarm Intelligence*. *Leonardo*, 40(3), 248–254.
- Karsai, I. (1999). Decentralized control of construction behavior in paper wasp: An overview of the stigmergy approach. *Artificial Life*, 5, 117–136.
- Kaur, A. y Goyal, S. (2011). A survey on the applications of bee colony optimization techniques. *International Journal on Computer Science & Engineering*, 3(8), 3037–3046.
- Kim, D. H. (2006). A swarm system design based on a modified particle swarm algorithm for a self-organizing scheme. *Advanced Robotics*, 20(8), 913–932.
- Lemouari, A. y Benmohamed, M. (2008). Self organization and emergence: Overview and examples. *International Review on Computers and Software*, 3(1), 20–30.
- Liang, T. Y. (2004). Intelligence strategy: The evolutionary and co-evolutionary dynamics of intelligent human organizations and their interacting agents. *Human Systems Management*, 23(2), 137–149.
- Lim, A., Rodrigues, B. y Zhang, X. (2004). Metaheuristics with local search techniques for retail shelf-space optimization. *Management Science*, 50(1), 117–131.
- Martinoli, A. (2001). Collective complexity out of individual simplicity. *Artificial Life*, 7, 315–319.
- Miller, P. (2007). Swarm theory. *National Geographic*, 212(1), 1–17.
- Morçöl, G. y Wachhaus, A. (2009). Network and complexity theories: A comparison and prospects for a synthesis. *Administrative Theory & Praxis*, 31(1), 44–58.
- Ng, K. H. (2007). Political context, policy networks and policy change: The complexity of transition in Hong Kong. *The Pacific Review*, 20(1), 101–126.
- Ojeda, G. J. (2009). La cooperación empresarial como estrategia de las pymes del sector ambiental. *Estudios Gerenciales*, 25(10), 39–61.
- Peters, K., Johansson, A., Dussutour, A. y Helbing, D. (2006). Analytical and numerical investigation of ant behavior under crowded conditions. *Advances in Complex Systems*, 9(4), 337–352.
- Rodríguez, A., Grushin, A. y Reggia, J. A. (2007). Swarm Intelligence Systems using guided self-organization form collective problem solving. *Advances in Complex Systems, Supplement*, 10(1), 5–34.
- Shafee, F. (2010). Organization and complexity in a nested hierarchical spin-glass like social space. *Electronic Journal of Theoretical Physics*, 7(24), 93–130.
- Skorupski, P., Spaethe, H. y Chittka, L. (2006). Visual search and decision making in bees: Time, speed and accuracy. *International Journal of Comparative Psychology*, 19, 342–357.
- Smith, Ch. R., Toth, A., Suarez, A. y Gene, E. R. (2008). Genetic and genomic analyses of the division of labour in insect societies. *Nature Reviews Genetics*, 9, 735–748.
- Thanh, N. (2008). Inconsistency of knowledge and collective intelligence. *Cybernetics and Systems: An International Journal*, 39, 542–562.
- Théraulaz, G. y Bonabeau, E. (1999). A brief history of stigmergy. *Artificial Life*, 5, 97–116.
- Tripet, F. y Nonacs, P. (2004). Foraging for work and age-based polyethism: The roles of age and previous experience on task choice in ants. *Ethology*, 110, 863–877.
- Tumer, K. y Agogino, A. (2009). Multiagent learning for black box system reward functions. *Advances in Complex Systems*, 12(4-5), 475–492.
- Tumer, K. y Khani, N. (2009). Learning from actions not taken in multiagent systems. *Advances in Complex Systems*, 12(4-5), 455–473.
- Varga, A., Chira, C. y Dumitrescu, D. (2009). A multi-agent approach to solving dynamic travelling salesman problem. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 1117(1), 189–197.
- Velázquez A., Aguilar N. (2005). Manual introductorio al análisis de redes sociales. México D.F. [consultado 22 Nov 2012]. Disponible en: [http://revista-redes.rediris.es/webredes/talleres/Manual\\_ARS.pdf](http://revista-redes.rediris.es/webredes/talleres/Manual_ARS.pdf)
- Vesterby, V. (2008). Measuring complexity: Things that go wrong and how to get it right. *Emergence: Complexity and Organization*, 10(2), 90–102.
- Wilson, E. O. (2008). One giant leap: How insects achieved altruism and colonial life. *BioScience*, 58(1), 17–25.
- Wood, Z. y Galton, A. (2009). A taxonomy of collective phenomena. *Applied Ontology*, 4, 267–292.