

Cognición de grupo y cognición de enjambre en la solución del problema del agente viajero*

Juan Felipe Martínez Flórez¹
Universidad Antonio Nariño

Recibido: febrero 24 de 2014 - Revisado: mayo 5 de 2014 - Aceptado: julio 14 de 2014

Referencia para citar este artículo: Martínez-Flórez, J. F. (2014). Cognición de grupo y cognición de enjambre en la solución del problema del agente viajero. *Revista Científica Guillermo de Ockham*, 12(1), 9-18

Resumen

En este trabajo se explora la solución colectiva de problemas mediante la comparación del desempeño grupal humano y los algoritmos de inteligencia de enjambres. En el estudio participaron treinta estudiantes universitarios de distintos programas académicos, con edades entre dieciocho y treinta años que fueron asignados en grupos conformados por tres, cinco o siete integrantes. Se utilizó una versión espacial (campo abierto) del problema del agente viajero. El desempeño de los participantes se comparó con la ejecución de algoritmos de inteligencia colectiva de enjambres. Los resultados muestran algunas semejanzas entre la cognición de grupo y la cognición de enjambre en los mecanismos de procesamiento de información, las estrategias de organización colectiva y las pautas de elección o estrategias de consenso.

Palabras clave: Cognición grupal, consenso, cognición de enjambre, resolución colectiva problemas.

Group cognition and swarm cognition in solving the traveling salesman problem

Abstract

In this paper collective problem solving is explored by comparing the human group performance and swarm intelligence algorithms. The study involved thirty university students from different academic programs, aged between eighteen and thirty years were assigned comprised of three, five or seven-member groups. Spatial version (open field) of the traveling salesman problem was used. The participants' performance was compared with the performance of algorithms collective intelligence of swarms. The results show some similarities between cognition and group cognition swarm in the mechanisms of information processing strategies of collective organization and patterns of choice or consensus strategies.

Keywords: Group cognition, consensus, swarm cognition, collective problem solving.

* El presente artículo forma parte del proyecto de investigación *Modelación y simulación de la cognición de grupo y cognición de enjambre: Un estudio empírico*.

1. Psicólogo, Maestría en Psicología Énfasis en Clínica de la Universidad del Valle. Miembro Grupo de Investigación en Clínica Psicología Neuropsicología y Neuropsiquiatría, Universidad del Valle, y Grupo de Investigación *Psicólogos en las Escuelas* Hospital Psiquiátrico Universitario del Valle. Favor dirigir correspondencia a la Calle 15N # 6N-36, piso 2, departamento psicología Universidad Antonio Nariño, Cali-Colombia. E-mail: felipemartinez@uan.edu.co

Introducción

La cognición de enjambre (*swarm cognition*) es un concepto relativamente reciente usado para referirse tanto a las habilidades exhibidas en comportamientos colectivos de organismos en la naturaleza como a los procesos cognitivos grupales (Bonabeau, Dorigo & Theraulaz, 1999; Krause, Ruxton & Krause 2009; Marshall *et al.*, 2009; Passino, Seeley & Visscher, 2004). Este concepto es punto de encuentro hoy en día de diversas disciplinas como las neurociencias cognitivas, la ingeniería, la psicología, la etología, la programación y la inteligencia de enjambres.

Algunos estudios recientes sugieren que la cognición de enjambres y los procesos cognitivos grupales pueden tener algo en común (Trianni, Tuci, Passino & Marshall, 2011; Marshall, Bogacz, Dornhaus, Planqué, Kovacs & Franks, 2009; Krause *et al.*, 2009; Johnson, 2003).

La cognición de enjambre exhibida por grupos de insectos, puede tener relevancia en el estudio de la cognición humana, particularmente en dos procesos: los procesos cognitivos emergentes de interacciones entre unidades funcionales (neuronas) y los procesos de cognición colectiva. Se ha sugerido su potencial en cuestiones como la toma de decisiones, los umbrales de consenso, los mecanismos de decisión y la relación velocidad/precisión en la decisión (Marshall *et al.*, 2009; Newell & Lee, 2011; Seeley, Passino & Visscher, 2008; Trianni, 2008).

En psicología, el estudio de la toma de decisiones se ha abordado lo neuronal, hasta lo individual y de grupo. Específicamente, en el ámbito de toma de decisiones de manera colectiva se han propuesto modelos y teorías sobre la manera como las personas se organizan para alcanzar un consenso y tomar una decisión de manera conjunta.

El esfuerzo por entender los procesos de decisión colectiva ha sobrepasado los límites de la psicología e involucra distintos campos del saber, como matemáticas, sociología y biología comportamental, entre otros. En el siglo XVIII, el matemático Nicolás de Condorcet planteó un primer modelo algorítmico para explicar y predecir la toma de decisiones en colectivo. Condorcet identificó que la toma de una decisión acertada se incrementa en la medida en que un grupo crezca en tamaño. Sin embargo, este teorema requiere que los sujetos tengan información suficiente respecto al problema.

En este trabajo se aborda de manera experimental la toma de decisiones y la solución colectiva de problemas a través de una versión espacial a campo abierto del problema del agente viajero (TSP, por sus siglas en inglés

de *Travelling Salesman Problem*). El objetivo es observar aspectos de la cognición grupal implicados en la toma de decisiones, como umbrales de consenso, mecanismos de decisión y relación velocidad/precisión en la decisión.

Cognición grupal humana y toma de decisiones

A partir del paradigma del procesamiento de la información, los estudios han explorado diversas formas de intercambio de información dentro de los grupos. Se ha encontrado que estos se centran en analizar y sopesar sus acciones con base en la información compartida a expensas de la información no compartida, lo que puede potenciar o hacer decaer su rendimiento de acuerdo con el tipo de información (Greitemeyer & Schulz-Hardt, 2003; Kameda, Takezawa, Tindale & Smith, 2002).

Asimismo, se han podido establecer algunas regularidades en la toma de decisiones grupales. En primer lugar, la información presentada a la apertura de un proceso de discusión tiene más probabilidad de ser usada (Winkler & Larson, 1998). En segundo lugar, en situaciones de información encubierta y de tiempo limitado, la necesidad de llegar a un consenso puede conducir al intercambio de información reducida (Kameda *et al.*, 2002; Kameda & Hastie 1999). En tercer lugar, las personas prefieren recibir y presentar información con la que la mayoría estaría de acuerdo: la información que va en contra de la tendencia del grupo no es tenida en cuenta (Wittenbaum, Hubbell & Zuckerman, 1999). Finalmente, se ha encontrado que los miembros de un grupo tienden a no considerar aquella información incompatible con su preferencia inicial (Chemers, 2000; Greitemeyer & Schulz-Hardt, 2003; Brodbeck, Kerschreiter, Mojzisch & Schulz-Hardt, 2002).

Los grupos son estructuras que comparten representaciones del problema sobre el cual deben operar (Lee & Cummins, 2004). Se define como representación compartida “cualquier concepto, norma, perspectiva, o procedimientos que afecten al grupo, así como al trabajo en común por los miembros del equipo” (van Ginkel & van Knippenberg, 2008, p. 82). La capacidad de un grupo para formar una representación compartida del problema es determinante (van Ginkel & van Knippenberg, 2012). Cuando sus miembros no cuentan con la habilidad de compartir sus representaciones las decisiones pueden ser inadecuadas. La discusión y la toma de decisiones implican más tiempo y más recursos (Yaniv & Kleinberger, 2000).

Los grupos pueden tener capacidades cognitivas más complejas que el simple agregado de procesos cognitivos individuales. Algunos autores sugieren que la cognición grupal es un campo propicio para observar procesos cognitivos emergentes a partir de la autoorganización y la interacción de los agentes que componen el grupo (Goldstone, Jones & Roberts, 2006). En conclusión, bajo ninguna circunstancia la cognición de grupo puede considerarse como la mera suma de representaciones individuales, sino como resultado de las interacciones entre los agentes que a partir de la división de la exigencia cognitiva logran componer un sistema con potencial de procesamiento de información superior a cualquiera de sus componentes por separado.

Algoritmos bioinspirados: optimización por colonia de hormigas

La historia del algoritmo de optimización por colonia de hormigas (ACO, por sus siglas en inglés de *Ant Colony Optimization*) tiene una estrecha relación con el problema del agente viajero. En una primera instancia, su desarrollo estuvo inspirado por la complejidad del problema de optimización de trayectorias del cual se deriva el del agente viajero (Bonabeau, Dorigo & Theraulaz, 1999).

La optimización por colonia de hormigas es un algoritmo basado en el comportamiento social de las hormigas, las cuales usan una forma de comunicación basada en sustancias químicas llamadas feromonas. Estas son arrojadas por el insecto al avanzar por un camino determinado y ejercen gran influencia sobre la acción de las hormigas precedentes, que tienden a seleccionar el camino con mayor concentración.

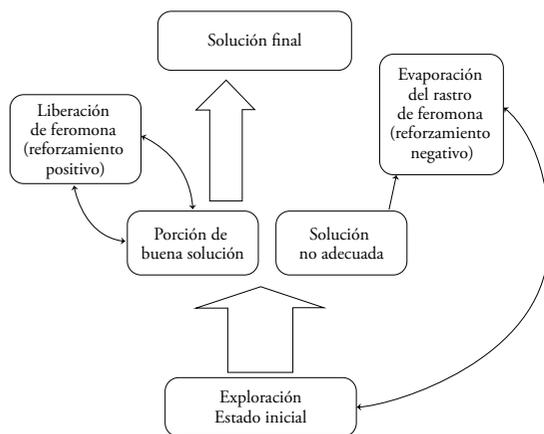


Figura 1
Representación esquemática de la pauta de acción de la búsqueda de soluciones basada en el forrajeo en el algoritmo de hormigas

El algoritmo ACO se basa en el uso del mecanismo de *realimentación positiva* o amplificación (Figura 1). Este mecanismo es análogo al comportamiento de algunas especies de hormigas y otros insectos, en el cual el rastro dejado es rastro seguido. Este mecanismo refuerza porciones de buenas soluciones que contribuyen a una solución óptima global o a reforzar directamente una solución efectiva específica. También se cuenta con un mecanismo de *realimentación negativa*, que consiste en la evaporación del rastro de feromona. Este mecanismo es implementado para evitar convergencias prematuras del algoritmo y el estancamiento en soluciones locales.

Algoritmos bioinspirados: optimización por enjambre de abejas

El algoritmo ABC (por sus siglas en inglés de *Artificial Bee Colony*) alude a un enjambre de abejas y su comportamiento de búsqueda de fuentes de alimento (Karaboga & Akay, 2009; Karaboga, 2010). A diferencia del algoritmo de hormigas en el cual las unidades hacen las mismas labores, en el algoritmo ABC las abejas cumplen diferentes funciones: reclutamiento, observación y exploración.

La labor de una abeja recluta consiste en buscar una fuente de alimento y compartir la información con las abejas observadoras en el “área de danza”. Cuando un número suficiente de abejas se reúne, uno de sus miembros comienza una danza para comunicar la ubicación del alimento y cuando se logra un acuerdo entre las observadoras se hace la elección del lugar y emprenden el vuelo en busca de la nueva fuente de alimento. Las abejas observadoras seleccionan una fuente de alimento a partir de la danza de las abejas reclutas y de esta forma apoyan la elección de la fuente.

En este modelo es posible calcular las posiciones de las abejas en diferentes momentos del tiempo. De igual forma, se identifican diferentes fases de tiempo: evaluación, danzas, exploración, contraste de sitios y selección final. Para el proceso de selección, la evidencia correspondiente a la calidad de cada sitio toma dos formas: la danza para las abejas en la colmena y la danza para las abejas cercanas a la posible fuente de alimento.

El problema del agente viajero

El problema del agente viajero aborda la cuestión de la cognición espacial y la optimización de trayectorias. En términos generales, plantea un número N de ciudades (nodos) distribuidas en un territorio que es necesario

visitar (Figura 2). El objetivo consiste en encontrar una ruta que pase una sola vez por cada ciudad y minimice la distancia recorrida por el viajante. El problema tiene varias versiones y cada una impone reglas propias para su resolución. Algunas de estas reglas exigen el inicio de la respuesta a partir de un nodo de origen específico o demandan el retorno a algún nodo particular después de recorridos todos los demás. Este es un problema clásico en matemáticas y uno de los más estudiados en el terreno de la optimización computacional y más recientemente en las disciplinas de la ciencia cognitiva (Chronicle, MacGregor, Lee, Ormerod & Hughes 2008; Macgregor & Ormerod 1996; Macgregor, Ormerod & Chronicle, 2000; Tenbrick & Weiner, 2009; Vickers, Butavicious, Lee & Medvedev, 2001).

Método

Participantes

Participaron treinta estudiantes universitarios seleccionados de distintas facultades (ingeniería, artes y humanidades), con edades entre dieciocho y treinta años. Los participantes fueron asignados en grupos conformados por tres, cinco o siete integrantes. Se estimó como favorable la variación de tamaño en el número de integrantes con el fin de observar algún tipo de variación en las dinámicas grupales y de toma de decisión que pueda estar mediada por esta cantidad. Algunos estudios sugieren que la participación de los componentes desciende a medida que el número aumenta (Franzoi, 2007; Kravits & Martin, 1986).

Instrumento

Para este estudio se partió del diseño de una versión espacial del problema del agente viajero (TSP). La tarea consiste en trazar la trayectoria de un agente que debe visitar cada ciudad a partir de un número determinado de ciudades en un territorio. El objetivo es encontrar una ruta que pase una sola vez por cada villa y minimice la distancia recorrida.

Esta versión de la tarea ha sido diseñada en la aplicación *Concorde*, programada para la formulación de problemas familiares al TSP y la optimización de trayectorias. La versión espacial del TSP fue diseñada en una escala de 1:100 y cuenta con veinte nodos de distancias asimétricas entre ellos, las cuales oscilan entre cuatro y ocho metros (Figura 2).

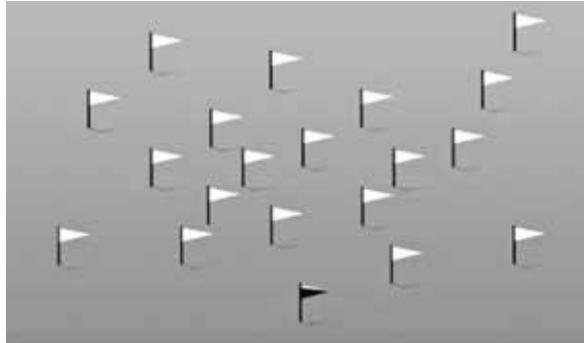


Figura 2

Versión gráfica simplificada no a escala de la tarea que se presentó al grupo de sujetos. Se demarca el punto de inicio por el banderín oscuro.

Los nodos se encontraban distribuidos en un campo de treinta metros por cada lado y estaban representados por banderines de un metro de altura que resaltan formas básicas (triángulo, cuadrado, círculo y estrella) de diferentes colores distribuidos a través del campo.

Procedimiento de aplicación

La aplicación se llevó a cabo en campo abierto, en condiciones óptimas de iluminación natural. Los grupos fueron convocados en sesiones individuales y no tuvieron contacto previo entre ellos. Se presentó a cada uno la tarea bajo la siguiente consigna: “Se tiene este conjunto de lugares distribuidos en este campo. El objetivo es colaborar para encontrar la ruta más corta posible que comience y termine en uno de estos puntos en concreto (banderín rojo), pase una sola vez por cada una de los demás puntos y regrese al punto inicial con el fin de minimizar la distancia recorrida”.

Registro

El registro se llevó a cabo con dos cámaras de video y dos grabadoras de voz. Se programó la ejecución de los dos algoritmos de enjambres para la misma tarea: enjambre de hormigas (ACO y ABC) mediante la aplicación *Matlab*.

Medición

Para calcular la efectividad de los desempeños en la tarea, se compara la distancia recorrida por el grupo con la distancia óptima obtenida a partir de la mejor solución hallada en la aplicación *Concorde* (ochenta y ocho metros). La efectividad del desempeño es descrita a partir de la estimación de un porcentaje de desviación óptima (PAO, por sus siglas en inglés de *Porcentaje Above Optimal*). Este cálculo proviene de la relación entre el desempeño obtenido y el desempeño óptimo, por lo tanto su resultado

es un número mayor que uno, de suerte que cuanto más cerca se encuentre este resultado a uno, el desempeño es más eficiente.

Resultados

La distancia promedio recorrida por el total de los grupos participantes fue de cien metros, el tiempo promedio de ejecución de siete minutos cuarenta y cinco segundos y el puntaje PAO de 12,95. Este rendimiento es ligeramente superior al 10 % y muestra que, en promedio, las distancias trazadas por los grupos sobrepasan en un 12,95 % la longitud más corta posible al solucionar la tarea. No obstante, al observar las ejecuciones específicas de los grupos se encuentra que algunos obtuvieron muy buenos desempeños y sus trayectos no superaron por menos del 10 % la distancia más óptima posible (Tabla 1).

El 100 % de los grupos efectuó un trayecto basado en la estrategia de la “envolvente”, la cual en el 66 % de ellos se vio complementada con mecanismos de inserción de la estrategia del vecino más cercano. Sin embargo, se hizo de una manera arbitraria lo que ocasionó que en los grupos de cinco participantes, el criterio de inserción no permitió optimizar la distancia final recorrida.

En contraste, los grupos con mejor desempeño (3-A y 7-B) muestran un criterio de inserción regional que si bien se basa en una búsqueda local a manera del nodo más cercano, busca conectar todos los nodos de dicha vecindad o región, estrategia que en apariencia alargaría el recorrido local pero disminuye la distancia final.

La decisión de los grupos estuvo ligada a la estrategia usada para la solución de la tarea. Por ejemplo, los grupos 3-A, 3-B, y 7-A lograron un buen desempeño en parte gracias a su organización para tomar la decisión sobre la estrategia por seguir. Al optar por la solución de recorrer segmentos cortos, subdividieron el problema en pequeñas decisiones sobre cada uno de sus movimientos a partir

de la validación de la evidencia disponible. En general, el 50 % de los grupos que tuvieron mejor desempeño se valieron de la evidencia directa como criterio para llevar a cabo elecciones respecto al próximo nodo por conectar. De esta forma, usaron una estrategia de elección basada en microconsensos parciales frente a elegir una trayectoria general del problema.

El 100 % de los grupos se vale de la votación para implementar sus movimientos y el 66 % de ellos opta por la unanimidad en la votación; solo 33 % de los casos elige a partir de la mayoría cuando el consenso unánime no es posible. En comparación, aquellos que eligieron a partir de la unanimidad recorrieron entre un 15 % y un 20 % de distancias más cortas que aquellos que eligieron a partir del criterio de “la mayoría gana”.

El número de participantes dentro del grupo parece haber tenido una influencia en el tiempo tomado para la elaboración del consenso. En los grupos de cinco participantes, el rápido consenso alcanzado fue en detrimento de la calidad de la decisión final. En contraste, en los grupos de siete participantes los consensos más elaborados y que tomaron más tiempo en alcanzarse lograron una solución final de mayor calidad. Los de tres participantes mostraron un balance entre la velocidad de la toma de decisión y su calidad. Lo anterior hace suponer que la evidencia recopilada de manera individual es transformada en la interacción entre los participantes, permitiendo así expandir las capacidades de procesamiento de información.

Resultados algoritmos ACO y ABC

Con los algoritmos de inteligencia de enjambres se llevaron a cabo dos rutinas de simulación, cada una de las cuales se hizo con un número de unidades igual a la mitad de las dimensiones (nodos) del problema (diez) y con un número igual a las dimensiones (nodos) del problema (veinte). Asimismo, se efectuó una tercera rutina con

Tabla 1
Desempeños individuales de cada uno de los grupos en la tarea propuesta

Grupo	Distancia recorrida (metros)	Tiempo total	Tiempo de consenso	Porcentaje de desviación sobre el recorrido óptimo
3-A	94	4: 17	1:54	6,81
3-B	98	5: 01	3: 19	9,01
5-A	109	3: 20	0: 44	23,28
5-B	108	3: 26	0: 55	22,72
7-A	98	10: 30	9: 16	9,01
7-B	94	14: 26	12:13	6,81

un número de cien unidades, dadas las consideraciones básicas del algoritmo abc que señalan dicho número como óptimo necesario para cualquier problema que se aborde con el algoritmo.

Las ejecuciones del algoritmo ACO (Tabla 2) muestran, para la primera rutina, una distancia similar en promedio a las ejecuciones hechas por grupos humanos. Para la segunda rutina, la ejecución logra minimizar la distancia recorrida por cualquiera de los grupos humanos y en la tercera simulación el resultado es igual, aunque se alcanza un número de iteraciones significativamente menor; es decir, el incremento del número de unidades no mostró un mejoramiento en la distancia final recorrida pero sí en el tiempo en alcanzar una solución eficiente. En el algoritmo abc, la diferencia entre grupos de unidades con cantidades semejantes es mínima: tan solo dos metros entre secuencias con diez y veinte unidades respectivamente. Por otra parte, el resultado de la rutina con cien unidades nos muestra el mejor resultado (ochenta y ocho metros), en términos de la distancia final recorrida en comparación tanto con grupos humanos como con los algoritmos de inteligencia de enjambres usados, aunque en relación con las otras secuencias de procesamiento dicha solución se alcanza en un tiempo significativamente mejor.

Cognición de enjambre y cognición grupal en la resolución del problema del agente viajero

En los resultados de los grupos humanos y los algoritmos bioinspirados de inteligencia de enjambres, pueden apreciarse algunas semejanzas. En primer lugar, hay una variación en los resultados de acuerdo con el número de unidades en relación con la distancia y el tiempo en alcanzar la solución. En el algoritmo abc, hay un perfeccionamiento en las soluciones en relación con el incremento

en el número de integrantes, patrón observado en todos los grupos humanos, excepto en el mejoramiento del tiempo tomado en alcanzar la solución. En el algoritmo abc, con pocas unidades se tiende alcanzar más rápidamente un consenso en detrimento de la solución final, patrón observado en grupos de cinco participantes. De igual forma, tanto en la secuencia de mayor número de unidades como en el grupo de mayor número de integrantes el tiempo de consenso se amplía significativamente, pero a su vez la calidad de la solución final aumenta.

Probablemente, este aumento en el tiempo de la solución final en el caso anterior esté relacionado con el mecanismo de elección el algoritmo abc, puesto que requiere un ajuste “democrático” y la estrategia de elección de los grupos de siete participantes se basó en la participación por votación, en la cual se esperaba el acuerdo unánime con el consecuente aumento en el tiempo.

Según las secuencias de procesamiento entre los dos sistemas, podemos profundizar en las pautas de procesamiento colectivo semejantes. Los grupos humanos y los enjambres pueden formar una representación compartida del problema, mantener dicha representación *online* (atención) y usarla para tomar una decisión. Es decir, pueden procesar información y transformarla para solucionar un problema, por lo tanto podría argumentarse que son sistemas con propiedades cognitivas. Pero, ¿qué es un sistema con propiedades cognitivas?

Se afirma que un sistema tiene propiedades cognitivas cuando “conoce algo” (Gershenson, 2004; 2010) y cuenta con la habilidad para representar la información y operar sobre ella: “Juzgar si un sistema conoce o no, es en parte dependiente de quien observa. En lugar de discutir si un sistema es cognitivo o no, es más fructífero distinguir los diferentes tipos de cognición (por ejemplo, humano, animales, biológicos (incluidas plantas y bacterias), sociales,

Tabla 2

Resumen de distancias en metros por parte de los algoritmos en tres rutinas de la tarea. El número de iteraciones hacen referencia al tiempo en términos de ciclos de computación usados por el algoritmo para alcanzar la solución, las iteraciones totales refieren al total de ciclos de ajuste final del algoritmo.

Algoritmo	Rutina I (N=10)	Rutina II (N=20)	Rutina III (N=100)
aco	97 metros	89 metros	89 metros
Iteraciones requeridas	780	310	270
Iteraciones totales	1000	1000	1000
abc	96 metros	94 metros	88 metros
Iteraciones requeridas	233	257	1100
Iteraciones totales	2000	2000	2000

artificiales, de adaptación, sistémica), para compararlos y comprenderlos mejor” (Gershenson 2010, p. 151).

Con base en lo anterior, puede argumentarse que los grupos humanos al igual que los enjambres tienen propiedades cognitivas con posibilidad de ser equiparados al ser sistemas que en primer lugar, generan un proceso cognitivo-computacional al intercambiar y procesar información; en segundo lugar, la información no solo es procesada de manera individual sino que es transformada en interacción entre las unidades; en tercer lugar, las unidades no solo transmiten información sino que también pueden cambiar su papel, lo cual permite el ajuste del sistema; y en cuarto lugar, las interacciones entre las unidades posibilitan la emergencia de habilidades cognitivas complejas que expanden la capacidad de la unidad individual.

En consecuencia, se propone un marco comparativo para los desempeños de grupos humanos y los enjambres al comparar su funcionamiento en: 1) estrategias de organización colectiva; 2) mecanismos de procesamiento de

información; 3) estructura representacional; 4) pautas de elección o estrategias de consenso (Tabla 3).

Los enjambres son sistemas que basan su organización en la autorregulación. En el caso de las hormigas, la autorregulación se expresa en el procedimiento secuencial, basado en la búsqueda de las conexiones locales y los procedimientos de retroalimentación/inhibición. En el caso de las abejas, sucede por la asignación de funciones y la rotación secuencial de las unidades en ellas a medida que se acumulan las iteraciones. Pautas de conducta similares pueden observarse en la ejecución de los grupos humanos.

Por ejemplo, la actuación por turnos observados en algunos grupos (3A, 3B y 7B) puede ser comparada con la rotación secuencial por funciones en las abejas. De acuerdo con esta idea, un participante que propone una acción o una probable solución, es análogo a una abeja que encuentra una solución (fuente de alimento) y la comunica a los demás integrantes que a partir de ahí exploran nuevas opciones u observan la solución propuesta.

Tabla 3
Resumen comparativo entre categorías de los desempeños de grupos humanos y algoritmos de enjambres en la tarea propuesta

Grupo/enjambre	Estrategias de organización colectiva	Mecanismos de procesamiento de información	Estructura representacional	Pautas de elección o estrategias de consenso
3-A	Integrante pionero. Actuación por turnos discusión/persuasión	Retroalimentación/inhibición de porciones de solución	Basado en nodos referentes. Regionalización	Microconsenso parcial (validación de evidencia). Unanimidad
3-B	Integrante pionero. Actuación por turnos discusión/persuasión	Retroalimentación/inhibición de porciones de solución	Representación local/global compartida de la solución	Microconsenso parcial (validación de evidencia). Unanimidad
5-A	Integrante pionero	Comunicación de la estrategia	Representación global compartida de la solución previa a la ejecución	Conformismo informativo (la mayoría gana)
5-B	Integrante pionero	Comunicación de la estrategia	Representación global compartida de la referentes previa a la ejecución	Conformismo normativo (la mayoría gana)
7-A	Líder Regulación por turnos	Retroalimentación/inhibición de porciones de solución	Representación compartida elaborada a partir de liderazgo	Microconsenso parcial (la mayoría gana)
7-B	Autorregulación basada en evidencia discusión/persuasión	Retroalimentación/inhibición de soluciones globales	Representación compartida de regiones de solución previa a la ejecución	Discusión. Solución compartida por todos (unanimidad)
Algoritmo de hormigas	Exploración de soluciones locales	Retroalimentación/inhibición de porciones de solución	Representación de soluciones locales	Micro consenso parcial (rastros feromonales). Unanimidad
Algoritmo de abejas	Exploración de soluciones globales. Rotación secuencial por roles	Retroalimentación/inhibición de soluciones globales	Representación de soluciones globales	Consenso global. La mayoría gana. Unanimidad

De esta forma, una vez que el participante ha expuesto su solución y “consumido” su turno, asumiría un papel pasivo de observación (escucha), una retroalimentación de su solución o explorar una nueva. En esta línea de ideas, el reclutamiento en el enjambre podría ser análogo al proceso de persuasión dentro del grupo, en el cual un participante convence a otro de seguir su opción a partir de su “calidad”.

Los grupos (3A, 3B, 7A, 7B) se valieron de la retroalimentación y la inhibición de información para determinar la información pertinente a la elaboración de la solución. Generalmente, la información presentada por un participante era evaluada por los demás a fin de establecer su aceptación por parte del grupo como válida. Principalmente, se observaron mecanismos de retroalimentación para las dos formas de información: local (porciones de solución) y global (soluciones completas). Estos mecanismos, tanto a nivel global como local exhiben una similitud con los mecanismos usados por los enjambres.

En el caso de las hormigas, el rastro de feromona es un mecanismo de retroalimentación que sirve para reforzar porciones de buena solución y es análogo a la evaluación hecha por el grupo cuando opta por la estrategia de elaboración secuencial. En este caso, un participante robustece con su aprobación la conexión entre dos puntos sugeridos por otro y de esta forma esta es elegida como parte de la solución general. En otras palabras, alude al proceso de elección por microconsenso parcial en el que una porción de solución (tramo entre dos puntos) mostrada por el 66 % de los grupos es muy semejante al proceso de elaboración y decisión mostrado por el enjambre de hormigas.

La retroalimentación de información global la observamos en el enjambre de abejas cuando a partir del reclutamiento, una unidad refuerza una fuente de alimento (solución global) encontrada por otra unidad. Este tipo de retroalimentación global se puede observar en grupos humanos al momento de tomar una decisión “democrática” sobre una solución. En las abejas, la decisión toma forma del reclutamiento para una determinada solución, de tal manera que una solución solo es alcanzada si consigue reclutar a través de las danzas, suficientes unidades para “danzar” en favor de dicha solución (fuente de alimento). Un proceso similar se observa en los grupos con decisiones “democráticas”, que tardaron bastante en lograr un consenso debido a que trabajaron para alcanzar la aprobación unánime en la elección del trazado global.

Discusión

A partir de los resultados puede apreciarse que las estrategias y mecanismos de búsqueda de los grupos humanos, siguen las pautas de búsqueda y estrategias de trayectoria común a los desempeños humanos en versiones espaciales del problema del agente viajero (Tenbrink & Weiner, 2009; Chronicle *et al.*, 2008; Vickers, Lee, Dry & Hughes, 2003).

En cuanto a la comparación planteada en este trabajo, es necesario hacer algunas precisiones. En primer lugar, no se está planteando una comparación *per se*, ni se propone que los sistemas enjambres sean un remplazo teórico de las teorías existentes sobre el comportamiento humano en colectivo. Si bien se ha planteado la comparación, esta se ha hecho dentro del marco de la tarea propuesta y ha atendido los elementos susceptibles de análisis dentro de la tarea. Esta versión del problema del agente viajero cuenta con restricciones específicas y exige la exhibición y privilegio de ciertos procesos cognitivos y no de otros. Con esto en mente, podemos pensar que dentro de esta exigencia específica los desempeños de grupos humanos y algoritmos de enjambres guardan cierta semejanza en términos de las dinámicas de procesamiento de información expuesta por los sistemas presentados.

En segundo lugar, no se busca argumentar ni modelar la conducta humana a partir de algoritmos. Estos modelan el comportamiento de enjambres en la naturaleza y en este sentido el presente trabajo apunta a comparar tres sistemas cognitivos naturales: las colonias de hormigas, de abejas y de humanos, con el fin de explorar semejanzas en la cognición distribuida en diferentes sistemas naturales.

Al argumentar que la conducta cooperativa permitió incrementar el potencial cognitivo del grupo, se cuenta con una tesis de apoyo al considerar los principios básicos de la cognición de enjambre susceptibles de ocurrir en el funcionamiento colectivo de grupos humanos.

La inteligencia de enjambre emerge cuando dos o más individuos independientemente adquieren información que es procesada y combinada a través de la interacción social y proporciona una solución a un problema cognitivo de una manera que sobrepasa la capacidad o rendimiento de individuos aislados (Krause *et al.*, 2011). Algunos de estos planteamientos se observaron en este trabajo al registrar cómo la cognición colectiva y de cooperación activa de los grupos efectivamente sobrepasó el rendimiento en la tarea de grupos en los que la participación activa fue de la minoría.

Si bien en el artículo la atención se centra en el valor potencial de cognición de enjambre, se privilegió el análisis de las interacciones entre las unidades constitutivas de un colectivo en lugar de los procesos matemáticos que subyacen al comportamiento de un enjambre. Después de todo, el mecanismo de procesamiento de la información funda la abstracción matemática una vez que es conocido.

El campo de la cognición de enjambres es aún muy joven. Apenas hace unos años los investigadores han comenzado a explorar el potencial cognitivo de los sistemas de enjambres en el estudio de la cognición y la conducta humana. Aún se debate la manera de implementar estos sistemas y si su potencial radica en asumirlos como modelos teóricos o herramientas metodológicas que permitan ampliar el espectro investigativo (Marshall *et al.*, 2009; Seeley *et al.*, 2008).

En esta línea de ideas, este trabajo constituye una aproximación empírica que retoma los conceptos planteados por Trianni *et al.* (2011) y Krause *et al.* (2011). Se espera que el naciente campo de la cognición de enjambre encuentre un nicho investigativo mediante la exploración de su potencial en la comprensión de las interacciones grupales y las complejas interacciones entre conglomerados de neuronas en el cerebro de los vertebrados.

La ampliación de este espectro experimental debería incluir tareas alternativas al problema del agente viajero que permitan evaluar estos tópicos mediante la evaluación de hipótesis como si, efectivamente, los desempeños grupales –tipo enjambre– podrían ser superiores a los de agentes individuales expertos en la misma tarea. El estudio y entendimiento profundos de los comportamientos colectivos en la naturaleza (y los humanos dentro de ella) no solo nos promete un desarrollo teórico y tecnológico, sino también una vía para entendernos y relacionarnos mejor como sociedades cada vez más multitudinarias y globales.

Agradecimientos

Dedicado al profesor Óscar Sierra-Fitzgerald (QEPD) maestro apreciado por su apoyo y motivación en el estudio de sistemas computacionales aplicados en la investigación en psicología y neuropsicología. A Wilfredo Alfonso Morales integrante del grupo de Investigación Percepción y Sistemas Inteligentes (PSI) de la Universidad del Valle Colombia, compañero visionario que apoyó la realización de las simulaciones requeridas en este trabajo. A Juliana Gudziol y César Matiz por su colaboración en el emplazamiento de la tarea, en el registro de la información y en la representación gráfica de la tarea.

Referencias

- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence, from natural to artificial Systems*. New York: Oxford University Press.
- Brodbeck, F. C., Kerschreiter, R., Mojzisch A., Frey D., & Schulz-Hardt, S. (2002). The dissemination of critical, unshared information in decision-making groups: the effects of pre-discussion dissent. *European Journal of Social Psychology*, 32, 35-56. doi: 10.1002/ejsp.74
- Chemers, M. (2000). Leadership research and theory: A functional integration. *Group Dynamics: Theory, Research, and Practice*, 4(1), 27-43. doi: 10.1037/11089-2699.4.1.27
- Chronicle, E. P., MacGregor, J. N., Lee, M., Ormerod, T. C., & Hughes, P. (2008). Individual Differences in Optimization Problem Solving: Reconciling Conflicting Results. *The Journal of Problem Solving*, 2(1), 41-49. doi: http://dx.doi.org/10.7771/1932-6246.1030
- Gershenson, C. (2010). Computing Networks: A general framework to contrast neural and swarm cognitions. *Paladyn journal of behavioral robotics*, 1(2), 147-153. doi: 10.2478/s13230-010-0015-z
- Gershenson, C. (2004). Cognitive Paradigms: Which One is the Best? *Cognitive Systems Research*, 5(2), 135-156.
- Goldstone, R. L., Jones, A., & Roberts, M. E. (2006). Group path formation. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, Part A, 36, 611-620.
- Greitemeyer, T., & Schulz-Hardt, S. (2003). Preference-consistent evaluation of information in the hidden profile paradigm: beyond group-level explanations for the dominance of shared information in group decisions. *J. Personal. Soc. Psychol.*, 84(2), 322-339. doi: 10.1037/0022-3514.84.2.322
- Johnson, S. (2003). *Sistemas emergentes*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Kameda, T., & Hastie, R. (1999). Social sharedness and adaptation: adaptive group decision heuristics. *Presented at 17th Subj. Probabil., Util., Decis.-Mak. Conf.*, Mannheim, Ger.
- Kameda, T., Takezawa, M., Tindale, R.S. & Smith, C. M. (2002). Social sharing and risk reduction: exploring a computational algorithm for the psychology of windfall gains. *Evolution and Human Behavior*, 23, 11-33.
- Karaboga, D. (2010). Artificial bee colony algorithm. *Scholarpedia*, 5(3), 6915. doi:10.4249/scholarpedia.6915
- Karaboga, D., & Akay, B. (2009). A Survey: Algorithms Simulating Bee Swarm Intelligence. *Artificial Intelligence Review*, 31(1), 68-85.
- Krause, J., Graeme, D. R., & Krause, S. (2009). *Swarm intelligence in animals and Humans*, 25(1), 28-34. doi:10.1016/j.tree.2009.06.016

- Krause, S., James, R., Faria, J. J., Ruxton, G. D., & Krause, J. (2011). Swarm intelligence in humans: diversity can trump ability. *Animal Behaviour*, *81*(5), 941-948. doi: 10.1016/j.anbehav.2010.12.018
- Kravitz, D. A. & Martin, B. (1986). Ringelmann rediscovered: The original article. *Journal of Personality and Social Psychology*, *50*, 936-941.
- Lee, M. D., & Cummins, T. D. R. (2004). Evidence accumulation in decision making: Unifying the “take the best” and the “rational” models. *Psychonomic Bulletin & Review*, *11*(2), 343-352.
- Macgregor, J. N., & Ormerod, T. C. (1996). Human performance on the travelling salesman problem. *Perception & Psychophysics*, *58*(4), 527-539.
- Macgregor, J. N., Ormerod, T. C., & Chronicle, E. (2000). A model of human performance on the traveling salesperson problem. *Memory & Cognition*, *28*(7), 1183-1190.
- Marshall, J. R., Bogacz R., Dornhaus A., Planqué R., Kovacs T. & Franks N. R. (2009). On optimal decision-making in brains and social insect colonies. *Journal of the Royal Society Interface*. doi: 10.1098/rsif.2008.0511
- Newell, B., & Lee, M. (2011). The Right Tool for the Job? Comparing an Evidence Accumulation and a Naïve Strategy Selection Model of Decision Making. *Journal of Behavioral Decision Making*, *40*, 946–956.
- Passino, K. M., Seeley, T. D., & Visscher, P. K., (2004). Quorum sensing during nest-site selection by honey bee swarms. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, *56*, 594-601. doi: 10.1007/s00265-004-0814-5
- Passino, K. M., Seeley, T. D., & Visscher, P. K. (2008). Swarm cognition in honey bees. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, *62*, 401-414.
- Seeley, T. D., Visscher P. K., & Passino K. M. (2008). Group decision making in honey bee swarms. *American Scientist Online*, *94*(3), 1-9.
- Trianni, V. (2008). Swarm Cognition. Workshop ISTC-CNR, Rome Italy.
- Trianni, V. Tuci, E., Passino, K. M., & Marshall, A. R. (2011). Swarm Cognition: an interdisciplinary approach to the study of self-organising biological collectives *Swarm Intell*, *5*, 3–18. doi 10.1007/s11721-010-0050-8
- Van Ginkel, W. P., & van Knippenberg, D. L (2012). Group leadership and shared task representations in decision making groups. *The Leadership Quarterly*, *23*(1), 94-106. doi: 10.1016/j.leaqua.2011.11.008
- Van Ginkel, W. P., & van Knippenberg, D. L. (2008). Group information Elaboration and group decision making: The role of shared task representations. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *13*(4), 265-280. doi: 10.1037/a0016045
- Vickers, D., Butavicius, M., Lee, M. D., & Medvedev, A. (2001). Human performance on visually presented traveling salesman problems. *Psychological Research*, *65*(1), 34-45. doi:10.1007/s004260000031
- Vickers, D., Lee, M. D., Dry, M., & Hughes, P. (2003). The roles of the convex hull and the number of potential intersections in performance on visually presented traveling salesperson problems. *Memory Cognition*, *31*(7), 1094-1104.
- Winkvist, J. R. & Larson JR. (1998). Information pooling: When it impacts group decision making. *Journal of Personality and Social Psychology*, *74*(2), 371-377.
- Wittenbaum, G. M., Hubbell, A. P., & Zuckerman, C. (1999). Mutual enhancement: Toward An understanding of the collective preference for shared information. *Journal of Personality and Social Psychology*, *77*(5), 967-978.
- Yaniv I. & Kleinberger E. (2000). Advice taking in decision-making: Ego-centric discounting and reputation formation. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *83*(2):260-281. doi: 10.1006/obhd.2000.2909