

OPTIMIZACIÓN POR COLONIA DE HORMIGAS: APLICACIONES Y TENDENCIAS

ANT COLONY OPTIMIZATION: APPLICATIONS AND TRENDS

Recibido: 10 de octubre del 2010

Aprobado: 25 de noviembre del 2010

CARLOS ARTURO ROBLES ALGARÍN*

Resumen

Las hormigas se comunican a través de sus feromonas, las cuales son sustancias que les permiten encontrar los caminos más cortos entre su nido y la fuente de alimentos. Esta característica ha sido utilizada para la solución de problemas de optimización que necesiten mejorar sustancialmente los tiempos de cómputo para la solución de una aplicación específica. La optimización por colonia de hormigas (OCH) es un método metaheurístico basado en el comportamiento real de este insecto. Está compuesto por algoritmos utilizados para obtener soluciones a problemas complejos y de optimización en una cantidad razonable de tiempo de cómputo. El artículo presenta una descripción detallada de la teoría de optimización por colonia de hormigas; posteriormente se realiza una revisión de los algoritmos utilizados en la OCH y por último se presentan diversas aplicaciones usadas actualmente que evidencian las bondades de la OCH en los algoritmos de optimización. De igual manera, se describen los nuevos desarrollos teóricos y las tendencias actuales en este campo de investigación.

Palabras clave: colonia, hormigas, optimización.

Abstract

Ants communicate through their pheromones; this is a substance that enables them to find the shortest path between their nest and food source. This feature has been used to solve optimization problems that need to improve computation times substantially to solve a specific application. The ant colony optimization (ACO) is a meta-heuristic method based on the real behavior of ants. It consists of algorithms used to obtain solutions to complex problems in a reasonable amount of computing time. The article presents a detailed description of the theory of ant colony optimization, afterwards, it performs a review of the algorithms used in the ACO and finally it shows various applications currently used to demonstrate the benefits of ACO in optimization algorithms. Likewise, it describes new theoretical developments and current trends in this research field.

Keywords: colony, ants, optimization.

• Cómo citar este artículo: Robles Algarín, C. A. (2010), "Optimización por colonia de hormigas: aplicaciones y tendencias", en *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 6, núm. 10, pp. 83-89.

* Ingeniero Electrónico, estudiante de cuarto semestre de Maestría en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos. Docente de tiempo completo de la Universidad Cooperativa de Colombia y docente catedrático de la Universidad del Magdalena. Correo electrónico: carlosarturo.ing@gmail.com

Introducción

La teoría de optimización por colonia de hormigas o OCH (Ant Colony Optimization, ACO), fue introducida por Marco Dorigo en los inicios de 1990 como herramienta para la solución de problemas de optimización complejos (Dorigo y Gambardella, 1996, p. 3; Dorigo y Blum, 2005, p. 244). La OCH pertenece a la clase de métodos heurísticos, los cuales son algoritmos aproximados utilizados para obtener soluciones lo suficientemente buenas a problemas complejos en una cantidad razonable de tiempo de cómputo.

La fuente de inspiración de la OCH es el comportamiento real de las hormigas. Estos insectos cuando están en búsqueda de la comida inicialmente exploran el área alrededor de su nido de una forma aleatoria. Tan pronto encuentran fuentes de alimentos, evalúan su cantidad y calidad, y llevan alguna parte de esta comida para su nido.

Durante el regreso al nido, las hormigas depositan una sustancia química llamada feromona sobre el camino, la cual servirá de guía futura para que las demás encuentren los alimentos. La cantidad de dicha sustancia depositada dependerá de la cantidad y calidad de los alimentos.

Diferentes estudios han demostrado que la comunicación de las hormigas a través de caminos con feromonas les permite encontrar las rutas más cortas entre su nido y las fuentes de alimentos (Alonso et ál., 2004, p. 4). Esta característica es ampliamente utilizada para la solución de problemas de optimización que necesitan mejorar sustancialmente los tiempos de cómputo para la solución de una aplicación específica.

En este artículo se presenta una descripción detallada de la teoría de optimización por colonia de hormigas, se realiza una revisión de los algoritmos utilizados en ésta y se presentan diversas aplicaciones utilizadas actualmente que evidencian sus bondades en los algoritmos de optimización.

Teoría de colonia de hormigas

La mejor forma para abordar y comprender cómo las hormigas utilizan el camino con la mayor canti-

dad de feromonas (el más corto) para encontrar su alimento es con un caso práctico.

Considérese el ejemplo que se ilustra en la figura 1, en el que las hormigas llegan a un punto en el cual tienen que decidir si giran a la derecha o la izquierda. Como inicialmente no hay presencia de feromonas en los dos caminos alternativos, la elección es realizada aleatoriamente. Se calcula que en promedio la mitad de las hormigas giran a la izquierda y la otra mitad decide girar a la derecha. Lo anterior ocurre tanto para las que se desplazan de izquierda a derecha cuyo nombre empieza con L, y para las que se desplazan de derecha a izquierda cuyo nombre empieza con R.

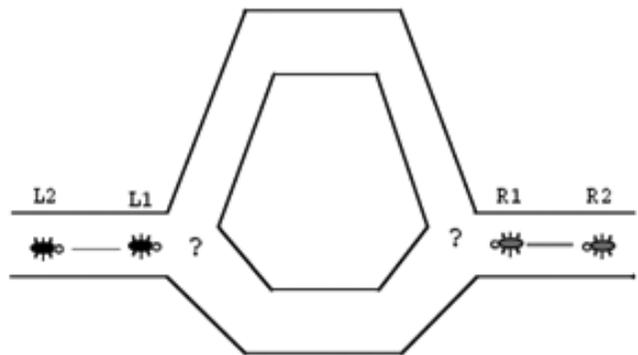


Figura 1. Las hormigas en el punto de decisión

Fuente: Dorigo y Gambardella, 1996

Las figuras 2 y 3 muestran lo que ocurre en los siguientes instantes, suponiendo que todas las hormigas caminan a la misma velocidad. El número de líneas punteadas es proporcional a la cantidad de feromonas que los insectos han depositado en el suelo (Dorigo y Gambardella, 1996, p. 2).

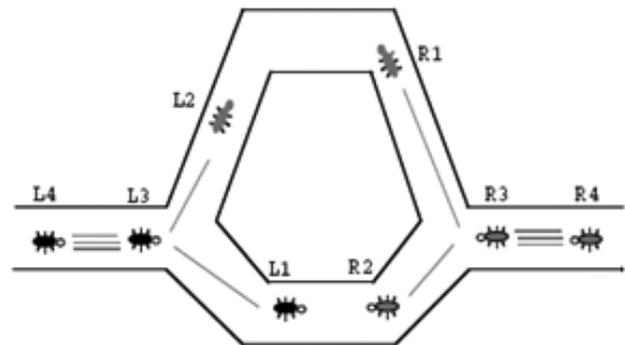


Figura 2. Elección de forma aleatoria entre los caminos inferior y superior

Fuente: Dorigo y Gambardella, 1996

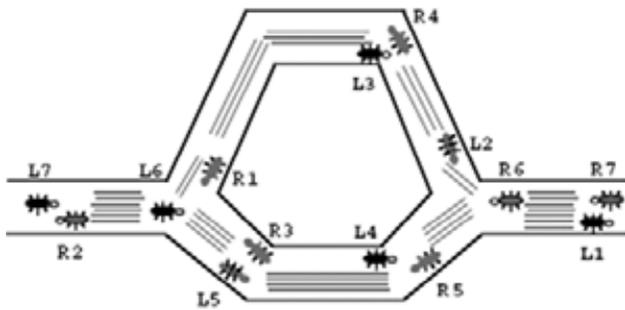


Figura 3. Efectos de la cantidad de hormigas que circulan por cada camino
Fuente: Dorigo y Gambardella, 1996

Como el camino inferior es más corto que el superior, muchas más hormigas transitarán por éste durante el mismo periodo de tiempo. Esto implica que en el camino más corto se acumula más feromona mucho más rápido.

Después de cierto tiempo, la diferencia en la cantidad de feromona en los dos caminos es lo suficientemente grande para influenciar la decisión de las nuevas hormigas que entren a recorrer estas vías (Dorigo y Gambardella, 1996, p. 2) (ver figura 4).

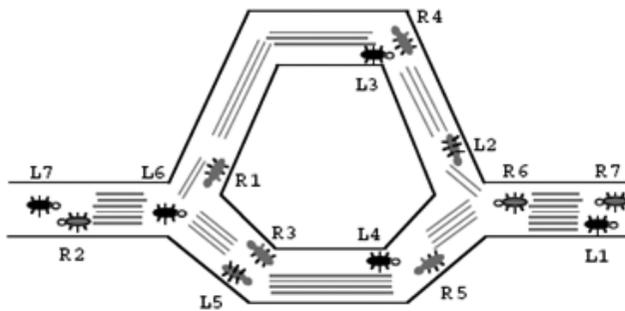


Figura 4. Mayor acumulación de feromonas en el camino más corto
Fuente: Dorigo, 1996, p. 2

Teniendo en cuenta lo anterior las nuevas hormigas que entren al sistema preferirán escoger el camino inferior o más corto puesto que perciben una mayor cantidad de feromona en éste. Dicho fenómeno se incrementa como un efecto de retroalimentación positiva en el cual todas las hormigas utilizarán el camino más corto. Hay que mencionar que si se traslada este comportamiento directamente al PC para diseñar un algoritmo de búsqueda podemos encontrarnos con que éste se quede rápidamente con la estrategia más óptima.

Algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas

Estos algoritmos, que están basados en una colonia de hormigas artificial, son agentes computacionales que trabajan de manera conjunta para poder comunicarse a través de rastros de feromonas artificiales (Coloni, Dorigo y Maniezzo, 1991, p. 3).

Los algoritmos OCH son programas constructivos: en cada iteración del algoritmo cada hormiga construye una solución al problema a través de un grafo. Cada arista representa las posibles opciones que el insecto puede tomar y tiene asociada el siguiente tipo de información:

- *Información heurística*: en ésta se mide la preferencia heurística que tienen las hormigas para moverse de un nodo a otro. El camino recorrido de un nodo a otro es una arista. Esta información no es modificada durante la ejecución del algoritmo.
- Información de los rastros de feromonas artificiales: en ésta se mide la deseabilidad aprendida en el movimiento de un nodo a otro, lo cual busca imitar la feromona real que depositan las hormigas naturales. Este tipo de información es modificada mientras que se ejecuta el algoritmo dependiendo de las soluciones encontradas por los insectos.

La hormiga artificial

Es un agente que intenta construir posibles soluciones computacionales simples a diferentes problemas, para lo cual utiliza información heurística y rastros de feromonas. Es importante tener en cuenta que algunos ejercicios pueden llevar a soluciones inválidas que tienen que ser revisadas (Coloni, Dorigo y Maniezzo, 1992, p. 3).

El método de hormiga artificial tiene las siguientes propiedades:

- Encuentra soluciones válidas con el menor costo.
- Tiene una memoria que almacena información de los caminos recorridos, la cual puede ser utilizada para construir soluciones válidas, evaluar la solución generada y reconstruir el camino que ha seguido la hormiga.
- Posee un estado inicial, el cual corresponde a una secuencia unitaria y una o más condiciones de paradas asociadas.

- Empieza con un estado inicial y se mueve siguiendo estados válidos construyendo así la solución de forma incremental.
- El movimiento sobre un camino se realiza aplicando una regla de transición, la cual es función de los rastros de feromona disponibles de manera local, de los valores heurísticos almacenados en la memoria de la hormiga y de las restricciones del problema a solucionar.
- En cualquier momento del desarrollo del algoritmo se pueden actualizar los rastros de feromonas asociados a cada camino.
- El proceso de realización del algoritmo finaliza cuando se encuentra alguna condición de parada, lo cual ocurre normalmente cuando se alcanzan los objetivos (Maniezzo, Gambardella y De Luigi, 2004, p. 4).

Pasos a tener en cuenta para la solución de un algoritmo por colonización de hormigas

Teniendo en cuenta la teoría antes mencionada, se pueden estructurar un conjunto de pasos sistemáticos que se deben tener en cuenta para la correcta realización del algoritmo basado en OCH:

- Simbolizar el problema con un conjunto de componentes o transiciones a través de un conjunto de grafos con su respectivo peso. Cada uno de estos representa los recorridos hechos por las hormigas para la solución de problemas (Alonso et ál., 2004, p. 12).
- Conocer de forma detallada y minuciosa el problema a solucionar para así poder asignar apropiadamente los rastros de feromona, puesto que esto influye directamente en el tipo de decisión a tomar (Alonso et ál., 2004, p. 13).
- Concretar la preferencia heurística de cada decisión que debe tomar una hormiga mientras que se está construyendo una solución a un problema determinado (Alonso et ál., 2004, p. 13).
- En la medida en que el problema lo permita, se debe implementar una búsqueda local eficiente para problemas de optimización combinatoria complejos. Maniezzo, Gambardella y De Luigi (2004, p. 4) demuestran que el mejor rendimiento se alcanza cuando se complementa con optimizaciones locales.

- Seleccionar un algoritmo OCH específico para así poder aplicarlo al problema a solucionar.
- Refinar los parámetros seleccionados, para lo cual es recomendable utilizar resultados conocidos con anterioridad de otras aplicaciones similares y que han sido exitosos.

Los pasos anteriores brindan una idea general de cómo se puede implementar un algoritmo basado en OCH. Obviamente estos pueden variar de acuerdo con el problema que se pretenda solucionar.

Aplicaciones de la och

Los algoritmos de OCH normalmente son utilizados cuando se presentan problemas no determinísticos, los cuales son aquellos que no pueden ser solucionados por algoritmos con estructura polinomial, por lo que requieren del tipo exponencial (Maniezzo, Gambardella y De Luigi, 2004, p. 9). Para su solución, se hace un conjunto de iteraciones que permiten encontrar respuestas globales y particulares, se agrega un conocimiento heurístico y en algunas ocasiones funciones de probabilidad. Teniendo en cuenta lo anterior, se establece que este tipo de algoritmo por OCH se puede ver como un caso particular de los problemas matemáticos en los cuales se encuentran sólo soluciones globales.

Más específicamente se puede mencionar que las aplicaciones de los algoritmos por optimización por colonia de hormigas son extensas y se ven manifestadas en diferentes campos de aplicación, como: redes neuronales, inteligencia artificial, optimización de funciones numéricas, sistemas difusos, procesamiento de imágenes, control de sistemas, problemas del hombre viajero, enrutamiento de vehículos, líneas de producción de carros, entre otros.

A continuación se referencian algunas de las aplicaciones que se pueden desarrollar utilizando algoritmos basados en OCH.

Optimización para el diseño de circuitos lógicos combinatorios

El diseño de circuitos lógicos combinatorios es una de las áreas de mayor auge en los últimos años, para lo cual tradicionalmente se han empleado métodos clásicos como los mapas de Karnaugh, el álgebra Booleana y el método de Quine-McCluskey.

En la actualidad se están empleando métodos iterativos que cuentan con una amplia eficiencia en la solución de problemas complejos. A este tipo de procedimientos se les conoce como computación evolutiva.

Mendoza García (2001, p. 15) realizó un programa basado en las técnicas por colonización de hormigas, el cual se enmarca dentro de los algoritmos de computación evolutiva, con el fin de optimizar el número de compuertas lógicas que se deben utilizar para implementar un circuito lógico a partir de su tabla de verdad.

Básicamente se exponen diferentes tablas de verdad y se realizan los circuitos lógicos utilizando las técnicas tradicionales de mapas de Karnaugh, el álgebra Booleana, método de Quine-McCluskey, algoritmos genéticos binarios BGA y el procedimiento propuesto por colonización de colonia de hormigas OCH.

Para la tabla 1 enunciada a continuación, la cual representa un circuito lógico de cuatro entradas y una salida, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 2.

Tabla 1. Tabla de verdad de un circuito lógico

Entradas				Salidas	Entradas				Salidas
W	X	Y	Z	F	W	X	Y	Z	F
0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	1	1	0	1	1	0
0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
0	1	1	0	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Fuente: Mendoza García, 2001

Tabla 2. Resultados obtenidos para el diseño de un circuito a partir de 3 métodos

Mapas de Karnaugh	$F = ((Z'X) \oplus (Y'W')) + ((X'Y)(Z \oplus W'))$ 11 compuertas (5 AND, 1 OR, 2XOR, 4NOT)
BGA	$F = (WXY) \oplus ((W+Y) \oplus Z \oplus (X+Y+Z))'$ 10 compuertas (2 AND, 3 OR, 3XOR, 2NOT)
OCH	$F = (((Z+Y)(Y \oplus W)) \oplus ((YZ)+X))'$ 7 compuertas, (2 AND, 2OR, 2XOR, 1NOT)

Fuente: Mendoza García, 2001

Como se puede observar en la tabla 2, los resultados obtenidos por el algoritmo basado en OCH son más eficientes puesto que utilizan menor número de compuertas para la implementación del circuito de la tabla 1. Mendoza García (2001, p. 60) los enuncia y demuestra otros ejemplos en los que se evidencian las bondades de utilizar algoritmos de computación evolutiva en el diseño de circuitos lógicos combinatorios.

El problema del vendedor viajero

Este es un caso particular de los problemas de optimización en el cual las variables a controlar son discretas y las soluciones son un conjunto de permutaciones o series. La principal característica de este tipo de problemas es que la función objetivo es compleja, lo cual los hace ideales para trabajar por OCH (Bianchi, Gambardella y Dorigo, 2002, p. 2), (Dorigo y Gambardella, 1996, p. 4).

Dorigo, en su trabajo de tesis, implementó el primer OCH aplicado al problema del vendedor viajero (Travelling Salesman Problem TSP). Este ejercicio consiste básicamente en un vendedor que inicia su recorrido en una ciudad aleatoria y quiere encontrar siempre el camino más corto para llegar a diferentes ciudades donde tiene clientes por visitar; finalmente, termina el recorrido llegando a la ciudad de la que partió al inicio.

Barcos, Rodríguez y Álvarez (2004, p. 710) y Reinelt (1994, p. 2) presentan ejemplos prácticos de cómo solucionar este tipo de problemas utilizando OCH y se muestran resultados y conclusiones que establecen las ventajas y bondades de este método frente a otros existentes. La ventaja que se obtiene radica en que se encuentra la distancia total más corta que se debe recorrer para visitar las ciudades. Lo anterior se logra realizando una matriz $G=(N,A)$, en la que N representa las ciudades y A las distancias a recorrer. Los rastros de feromona en este caso serían la deseabilidad de visitar una ciudad x después de visitar una ciudad y . De esta forma, se obtiene una función que representa la distancia recorrida y que se puede optimizar mediante un conjunto de permutaciones.

El problema de la mochila

El principal fin del problema de la mochila es hallar un subconjunto de objetos con los cuales se logre maximizar el beneficio que pueden brindar los objetos mientras se satisface la condición de no superar la capacidad de un contenedor, que en este caso es la mochila. La solución a este tipo de problemas se aplica en la asignación de procesos en sistemas distribuidos, en presupuesto de capital, entre otros.

Es importante resaltar que el problema de la mochila puede ser tratado como un multiobjetivo, puesto que por una parte se debe minimizar el peso de los objetos para no sobrepasar la capacidad de la mochila y por otro se debe maximizar la utilidad de los objetos.

Ponce, Padilla y Ochoa (2006, p. 2) presentan un estudio detallado de este tema con simulaciones y resultados obtenidos.

Problemas de enrutamiento de vehículos

Este problema se convierte en una extensión del hombre viajero (TSP). Consiste en vehículos estacionados que tienen que transportar un conjunto de clientes antes de regresar nuevamente al estacionamiento. El objetivo es minimizar el número de vehículos utilizados y la distancia total recorrida. Este planteamiento tiene muchas variaciones que están siendo estudiadas y que han permitido obtener resultados satisfactorios.

Problema de la asignación de horarios

Éste es un problema básico que consiste en la asignación de horarios a un conjunto de personas. Para dicha asignación se deben tener en cuenta los siguientes condicionamientos:

- Los tiempos de cada clase y otras actividades se conocen con anterioridad.
- Ninguna tarea puede ser interrumpida. Cada tarea puede ser representada como un mapa por lo que a cada una le corresponde un nodo. Entonces el objetivo es obtener una función de tareas completas a partir de la función objetivo.

Control inteligente

Los algoritmos que utilizan OCH tienen una amplia aplicación en el control inteligente y automático,

por lo tanto están siendo ampliamente utilizados en esta área.

Muñoz, López y Caicedo (2007, p. 3) presentan una aplicación muy importante en este campo. Se expone un sistema de control adaptativo indirecto para un tanque y además se presenta la asignación de recursos sobre una grilla de temperatura.

El control adaptativo indirecto de un tanque consiste en implementar un algoritmo que permita aprender el modelo de una planta durante la operación de un sistema de control. Normalmente se utiliza un modelo de identificación de la planta parametrizado en el cual el algoritmo basado en OCH realiza la búsqueda de parámetros de éste.

Según lo mencionado en el área de control, se puede concluir que los algoritmos basados en OCH tienen un tipo de inteligencia que los hace efectivos en la solución de problemas relacionados con el control de procesos.

Otras aplicaciones que es bueno mencionar de la optimización por colonia de hormigas son los sistemas de control de la producción, problemas dinámicos y problemas multiobjetivos en general.

Tendencias de la och

Aunque actualmente las OCH están siendo utilizadas en diferentes campos, aún es mucho el camino que falta por recorrer y son muchas las aplicaciones que se pueden desarrollar aplicando esta metaheurística.

La aplicación de algoritmos de colonia de hormigas a problemas de optimización combinatoria y el desarrollo de nuevas y mejores variantes algorítmicas de las OCH son las tendencias actuales en cuanto a investigación en esta área. También se está trabajando en desarrollar aplicaciones basadas en problemas de optimización multiobjetivos y dinámicos.

Por otro lado, en la actualidad se está llevando un trabajo arduo para encontrar procedimientos que permitan mejorar la velocidad de los procesos y las soluciones obtenidas por los algoritmos de OCH. A esto se le conoce como *paralelización de colonias de hormigas*.

Por último, es importante mencionar que hasta el momento los mejores resultados obtenidos con la OCH tienen que ver con los problemas altamente

dinámicos como los de enrutamientos de redes y del TSP.

Conclusiones

Al finalizar este artículo se puede concluir que en la actualidad los algoritmos de optimización por colonia de hormigas son una herramienta bien definida con un buen rendimiento y que se pueden aplicar en diversas áreas enmarcadas dentro de los problemas de optimización complejos.

También queda claro que las nuevas tendencias de los algoritmos por OCH apuntan al mejoramiento continuo de las técnicas existentes y a la investigación de nuevas que permitan optimizar y mejorar los tiempos de cómputo.

Finalmente, es importante resaltar que con este artículo se cumple con el objetivo de presentar un estado del arte de la automatización por colonias de hormigas junto con las innumerables aplicaciones que este método heurístico tiene.

Referencias

- Alonso, S. et ál. (2004), *La metaheurística de optimización basada en colonias de hormigas: modelos y nuevos enfoques*, Granada, Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, E.T.S. Universidad de Granada.
- Barcos, L., Rodríguez, V. y Álvarez, M. J. (2004), *Algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas para la resolución del problema del transporte de carga desde varios orígenes a varios destinos*, Departamento de Organización Industrial Tecnum, Universidad de Navarra, España, V Congreso de Ingeniería del Transporte.
- Bianchi, L. Gambardella, L. M. y Dorigo M. (2002), "An Ant Colony Optimization Approach to the Probabilistic Traveling Salesman Problem" [conferencia], PPSN-VII, Seventh International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, Springer Verlag, Berlin.
- Colorni, A., Dorigo, M. y Maniezzo, V. (1991), "Distributed Optimization by Ant Colonies, Proceedings of ECAL'91" [conferencia], European Conference on Artificial Life, Elsevier Publishing, Amsterdam.
- Colorni, A., Dorigo, M. y Maniezzo, V. (1992), "An investigation of some properties of an 'ant algorithm'" [conferencia], Memories Parallel Problem Solving from Nature Conference, Elsevier Publishing, Bruselas, Bélgica.
- Dorigo, M. Gambardella, L. M. (1996), *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*, Bruselas, Université Libre de Bruxelles.
- Dorigo, M., Maniezzo, V. y Colorni, A. (1996), "The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 26, núm. 1, pp. 1-13.
- Dorigo, M. y Blum, C. (2005), "Ant Colony Optimization Theory: A Survey", en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 344, pp. 243-278.
- Dorigo, M. (2004), "Ant colony optimization web page" [en línea], disponible en: <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/ACO.html>, recuperado: 10 de marzo del 2010.
- Maniezzo, V., Gambardella, L. M. y De Luigi, F. (2004), *Ant Colony Optimization*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 101-117.
- Mendoza García, B. (2001), *Uso del sistema de la colonia de hormigas para optimizar circuitos lógicos combinatorios* [tesis de maestría], Veracruz, Universidad Veracruzana, Maestría en Inteligencia Artificial.
- Muñoz, M., López, J. y Caicedo, E. (2007), *Control inteligente usando optimización por colonia de hormigas*, Cali, Universidad del Valle.
- Ponce, J., Padilla, F. y Ochoa, C. (2006), *Algoritmo de optimización con colonia de hormigas para el problema de la mochila*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Reinelt, G. (1994), *The traveling salesman: computational solutions for TSP applications*, Berlin, Springer-Verlag.