

# Sacrificio cortoplacista adaptativo en comparación con metaheurísticas para el TSP

## Adaptive short-term sacrifice in comparison with metaheuristics for the TSP

Jorge Iván Pérez Rave<sup>1</sup> M. Sc. & Gloria Patricia Jaramillo Álvarez<sup>2</sup> Ph. D.

1. Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

2. Facultad de Minas, Departamento de Sistemas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

*ejipr056@udea.edu.co, gpjarami@unal.edu.co*

Recibido para revisión 25 de agosto de 2011, aceptado 18 de octubre de 2011, versión final 14 de noviembre de 2011

**Resumen** — Se desarrollaron dos nuevos métodos heurísticos para el TSP simétrico: el Sacrificio Cortoplacista Adaptativo 2-opt (SCA\_2opt) y una versión mejorada del mismo (SCA\_2\_opt\_r). Estos son fruto del análisis sistémico de la regla de decisión vecino más cercano, a la cual le fue encontrado el arquetipo sistémico “Soluciones contraproducentes”. El SCA se basa en que el viajero empleado en el TSP, renuncie en un momento dado a una ciudad inmediatamente cercana, y se traslade hacia la segunda ciudad más cercana disponible. A partir de este cambio, el viajero continúa con la regla del vecino más cercano. Cada que se realiza el SCA (búsqueda global) se efectúa una búsqueda local 2\_opt. Las dos heurísticas reflejan un desempeño favorable en eficacia y eficiencia, en comparación con diversas metaheurísticas en las categorías: Colonia de hormigas, Algoritmos genéticos, Enfriamiento simulado y otras. Se proporcionan preguntas emergentes que posibilitan mayor comprensión y mejoramiento del trabajo realizado e invitan a continuar integrando elementos de la optimización clásica con el pensamiento sistémico.

**Palabras clave** — Sacrificio cortoplacista adaptativo, TSP, optimización combinatoria, metaheurísticas, pensamiento sistémico.

**Abstract**—We present two new heuristics for the TSP symmetric: the sacrifice short-term adaptive 2-opt (SCA\_2opt) and an improved version (SCA\_2\_opt\_r). These methods are the result of systemic analysis of the decision rule nearest neighbor, to which he was found on systems archetype “Solutions counterproductive.” The SCA is based on the traveler used in the TSP, resign at any time to overnight stop near the city immediately, and moved to the second city nearest available. From this change, the traveler continues with the nearest neighbor rule. Each SCA is performed (global search) a local search is performed 2\_opt. The two heuristics reflect a good performance in efficiency and effectiveness in comparison with various metaheuristics in the categories of ant colonies, genetic algorithms, simulated annealing and other. Emerging questions are provided that enable a greater understanding and improvement of the study. These

questions are also invited to continue integrating elements of classic optimization with systems thinking.

**Keywords** — Adaptive short-term sacrifice, TSP, combinatorial optimization, metaheuristics, systems thinking

### I. INTRODUCCIÓN

El “Problema del Vendedor Viajero” o TSP (Traveling Salesman Problem) se constituye en el problema de prueba para validar nuevos métodos de resolución de problemas tipo NP-hard [1-5]. Este representa un agente para el que se desea conocer ¿cómo debe elaborar su itinerario de forma que visite cada ciudad exactamente una vez, regrese al punto de origen y el coste total sea mínimo? [6]. En [10], fruto de una revisión sistemática de literatura sobre el TSP, se encontró, entre otros, que para trascender el conocimiento actual sobre el tema se requiere introducir nuevos campos de inspiración que incorporen otras perspectivas, posibilitando la creación de nuevos métodos de resolución en la optimización combinatoria. Algunos de los campos de inspiración de los trabajos, sobre el TSP, más citados por la comunidad científica, son: la termodinámica [7-8] y el comportamiento de hormigas reales [9].

Entre los campos de inspiración que prevalecen en el estudio del TSP, la revisión previa [10] mostró ausencia de una disciplina que viene cobrando relevancia en las soluciones organizacionales: el pensamiento sistémico, el cual busca identificar, comprender, describir e intervenir las estructuras de interrelaciones que subyacen en el comportamiento de los sistemas. Esta disciplina es propia del pensamiento “blando” y es referida como una necesidad para abordar problemas sociales, políticos y empresariales [11], siendo por lo mismo demandada como competencia genérica, entre otros, para los profesionales de ingeniería [12-13].

Considerando la relación entre la optimización clásica (“este es lo óptimo”) y el pensamiento sistémico (“depende de la perspectiva, interrelaciones, totalidades”), que en casos se muestra antagónica, este artículo se deriva de un proyecto enfocado en estudiar la resolución del TSP, tomando el pensamiento sistémico como un posible nuevo campo de inspiración para el desarrollo de métodos heurísticos de la optimización combinatoria. Este propósito se ha delimitado al análisis sistémico de la regla de decisión: Vecino más cercano (VMC), la cual es propia del sentido común, que a nivel de algoritmia es destacada por su eficiencia computacional, a costa de un notable deterioro en la respuesta arrojada [14-15]. Ello se debe a que solo se limita a visitar, en cada caso, la ciudad inmediatamente cercana disponible, sin considerar las consecuencias que el agotamiento de las ciudades cercanas genere en las posteriores visitas del viajero; en otras palabras, se fija la mirada en el “árbol”, pero no se considera el “bosque”. Sobre estos comportamientos asistémicos advierten diversas leyes de la quinta disciplina [11], entre ellas: “el camino fácil lleva al mismo lugar”, “causa y efecto están distantes en tiempo y en espacio”, y “los problemas de hoy provienen de las soluciones de ayer”.

Bajo este contexto, y por criterios de extensión, este artículo se enfocó en tres de las cinco preguntas que sistematizaron la pregunta general de investigación, planteada en el proyecto origen del manuscrito [10]. Las tres preguntas son: P.1 ¿Qué estructura sistémica siguen las soluciones arrojadas por la heurística “vecino más cercano” para instancias del TSP simétrico?, P.2 ¿Qué modificaciones de tipo heurístico realizar al algoritmo del “vecino más cercano”, de modo que se consideren los patrones de mejoramiento reflejados en su estructura sistémica, en busca de un punto de apalancamiento que conduzca hacia una mejor garantía de desempeño?, P.3 ¿Cuál es la eficacia y la eficiencia computacional del algoritmo desarrollado, en comparación con metaheurísticas para el TSP?

La comparación se delimitó a metaheurísticas en las categorías: Colonia de hormigas, Algoritmos genéticos, Enfriamiento simulado y otras. Para profundizar en el referencial teórico que soporta lo expuesto en este manuscrito, remítase a [10]. En la sección 2 se presentan los materiales y métodos, la sección 3 ofrece los resultados acompañados de la discusión, la sección 4 trata las conclusiones del estudio y la sección 5 presenta los desafíos futuros, luego vienen los agradecimientos y las referencias de soporte.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### Introducción en el campo de conocimiento sobre el TSP:

No podría aportarse al campo de estudio de interés haciendo a un lado el estado actual del conocimiento sobre el TSP y de sus oportunidades de investigación. Esta etapa posibilitó la familiarización con métodos de resolución, campos de

inspiración, entre otros aspectos. A pesar de haber un producto prioritario (la revisión sistemática de literatura sobre el TSP puede verse en [10]), fruto de esta etapa, es de anotar que la revisión estuvo vigente durante todo el estudio, debido a que, los cuestionamientos y retos que resultaron en las demás etapas a exponer, ameritaron ahondar en aspectos específicos de la literatura. Por ejemplo, en la estructura algorítmica del método de búsqueda local: 2-opt, así como en resultados experimentales de otros estudios, para instancias publicadas en el TSPLib [16].

### Revisión de arquetipos y leyes del pensamiento sistémico:

Se estudiaron las leyes del pensamiento sistémico y los respectivos arquetipos que subyacen en el comportamiento de sistemas complejos. Las fuentes teóricas de apoyo fueron los trabajos de Peter Senge: “La quinta disciplina” y sus diferentes versiones. Esta etapa fue realizada con el fin de fortalecer los saberes sobre el posible campo de inspiración (pensamiento sistémico).

### Análisis del Vecino más cercano (VMC) bajo una

**perspectiva de sistemas:** El comportamiento de las soluciones arrojadas por el VMC para diferentes instancias TSP, se analizó bajo las leyes del pensamiento sistémico. Esto, buscando identificar alguna estructura sistémica subyacente, que posteriormente, mediante la identificación de un patrón de intervención, pudiese inspirar el desarrollo inicial del método heurístico a proponer.

### Diseño y desarrollo del método heurístico a proponer:

Con base en el análisis sistémico efectuado en la etapa anterior al VMC para el TSP y siguiendo el pensamiento lógico: observar, comprender, actuar, mejorar, se procedió con el diseño inicial de la heurística, buscando que a través de un enfoque de punto de apalancamiento, pudiese generarse una alteración leve a la heurística del VMC, en busca de mayor eficacia y manteniendo eficiencia computacional. El hecho considerar un problema NP-hard y al abordarse mediante el paradigma heurístico, aparte de la perspectiva sistémica, ameritó recurrir a elementos de: sentido común, imaginación, creatividad, programación y ciencias básicas. A medida que se progresó en el desarrollo, a través del giro del pensamiento lógico, se construyeron diversas versiones del método a proponer, hasta llegar a un desempeño satisfactorio para ser comparado con otros métodos. La plataforma de programación fue *Visual for applications* en Macros de Excel, atendiendo a la posibilidad de que también sea de utilidad para Pymes.

### Comparación con metaheurísticas:

La información empleada para las comparaciones con metaheurísticas fue recopilada de diversos artículos. Para ello se establecieron las siguientes variables respuesta: costo medio (CM) del tour, mejor costo (MC) encontrado, número de tours (NT) empleados para arrojar el mejor costo, y tiempo medio de cómputo (TM), en segundos. En casos, esto último se complementó con una aproximación a los gigaciclos de procesador (CPC). En total fueron 29 metaheurísticas que sirvieron de base comparativa,

las cuales fueron agrupadas en cuatro categorías, según el procedimiento principal en el que se basaron, así: Colonia de hormigas (AC: 7), Algoritmos genéticos (GA: 12), Enfriamiento simulado (SA: 5) y otros (Programación evolutiva, algoritmo memético, inteligencia de enjambre basada en humanos, Colonia de abejas, etc: 5). Las comparaciones se realizaron de manera independiente para cada categoría y abordaron instancias del TSPLib [16].

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 La regla del VMC más cercano vista desde el pensamiento sistémico

Para facilitar el análisis sistémico, se ha diseñado un caso tipo historieta que en algunos párrafos evita lenguaje técnico, a fin de mostrar la relación con actividades cotidianas, y también, para facilitar una mayor comprensión del mensaje. Dicha historieta surge luego de observar el comportamiento de la solución arrojada por la heurística VMC, incorporada en el WinQSB, a medida que se construye un tour para una instancia TSP de 130 ciudades.

##### Historia de don Pablo [10]:

Suponga que don Pablo ha programado unas vacaciones y cuenta con 337 millones de pesos para visitar 130 ciudades. Para superar la necesidad de que dicho dinero le alcance para su plan vacacional, don Pablo, recurriendo al sentido común, decide seguir la regla del VMC; es decir, desde su ciudad de origen visitará aquella otra ciudad inmediatamente más cercana y así sucesivamente. Cuando don Pablo ha recorrido el 75% de las ciudades programadas a visitar, aún le queda disponible el 67% del dinero que destinó para sus vacaciones (figura 1). Don Pablo está complacido de lo bien que le ha ido respecto al uso dado al dinero, todo se comporta según lo esperado, se siente confiado y afirma constantemente, “esa estrategia que tomé, de visitar el vecino más cercano, sí que da resultado”. Don Pablo continúa colocando en práctica su estrategia, pero cuando ha visitado 122 ciudades observa su billetera y se da cuenta que solo dispone de 101 millones de pesos. Pero ¿cómo es posible?, ¿cómo pudo haber gastado 124 millones de pesos visitando solo 25 ciudades, cuando antes logré visitar 97 ciudades con 112 millones de pesos? Debe haber un error, dice don Pablo. Cuando verifica, el resultado es tal cual (figura 1). Viene, entonces, la preocupación de don Pablo, ya que solo dispone del 30% de su presupuesto inicial, pero luego de analizar, vuelve y se tranquiliza al notar que solo le faltan 8 ciudades por visitar. Y dice, ahora más que nunca es prioritario visitar las ciudades inmediatamente cercanas, es lo más económico posible en los últimos momentos de mis vacaciones. Siempre funcionó antes, debe seguir funcionando, manifiesta con optimismo. La suerte de don Pablo no está a su favor, a medida que visita las demás ciudades y observa su billetera, nota que su dinero se reduce con mayor impacto. Lleno de preocupaciones, se aferra más

a su estrategia del VMC, pero parece que no da resultado. El sistema le está respondiendo con más fuerza. Cuando regresa a casa después de visitar 130 ciudades diferentes, empleando el VMC, debe 91 millones de pesos. Las cosas se salieron de las manos. En este instante reflexiona y con tristeza dice “funcionó antes, por qué no funciona ahora”. Esta historia, cuyos resultados consolidados están en la figura 1, ilustra los insumos necesarios para ahondar en el análisis de la estrategia del VMC desde el pensamiento sistémico.

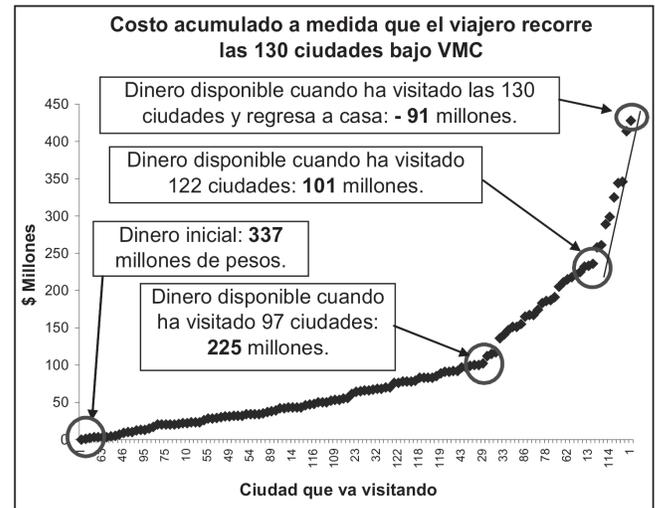


Figura 1. Costo acumulado hasta que visitó las 130 ciudades bajo el VMC. Fuente: [10]

Nótese, en el caso de don Pablo, la aplicación de leyes de la quinta disciplina, como [11]: “Los problemas de hoy derivan de las soluciones de ayer”, “cuanto más se presiona, más presiona el sistema”, “la causa y el efecto no están próximos en el tiempo y en el espacio”, “la cura puede ser peor que la enfermedad” y “el camino fácil lleva al mismo lugar”. Para ver estos análisis con rigurosidad, remítase [10].

#### 3.2 Diseño de la heurística

Considerando otra de las leyes de la quinta disciplina: “Los cambios pequeños pueden producir resultados grandes, pero las zonas de mayor apalancamiento a menudo no son obvias” [11], el diseño de la heurística se enfocó en la búsqueda de un posible punto de apalancamiento que mitigue, en lo mayor posible, las consecuencias de la estrategia del VMC, que aparecen al visitar las últimas ciudades del tour. Así, este punto de palanca corresponde a una pequeña alteración al sistema original: plan vacacional usando el VMC. Lo anterior, sumado a los demás análisis realizados al VMC, empleando bases del pensamiento sistémico, y a las estrategias propias del diseño de heurísticas, como son: creatividad, imaginación, entre otros, han dado lugar a una modificación que se desea probar en el sistema: plan vacacional usando el VMC. Esta alteración se enfoca en que el viajero, ilustrado en don Pablo, cuando se encuentre en una ciudad determinada decida renunciar a trasladarse hacia la inmediatamente cercana, pasando a otra,

a fin de que más adelante, ese aparente sacrificio lo ayude a hacer mejor uso del dinero disponible, quizá regresando al punto de inicio desde una menos lejana. Esta nueva regla se denominará Sacrificio cortoplacista. Pero allí es donde vienen interrogantes ¿de qué magnitud debe ser el sacrificio? y ¿en qué ciudad realizarse? Considerando que el cambio se espera que sea leve y que produzca un efecto importante en el resultado final del sistema, este estudio ahondará esfuerzos en la renuncia a la ciudad inmediatamente cercana, para pasar a la segunda

ciudad inmediatamente cercana, disponible. Así, el Sacrificio cortoplacista a efectuarse será de nivel 2, siendo el de nivel 1 el mismo VMC, ya que visita la primera ciudad más cercana disponible. De nivel 3 sería cuando renuncia para visitar la tercera ciudad más cercana disponible y así sucesivamente. El posible punto de apalancamiento, incorporando en un momento determinado la regla Sacrificio cortoplacista pretende estabilizar la estructura tipo “bola de nieve” (momento 2) que se muestra en la figura 2.

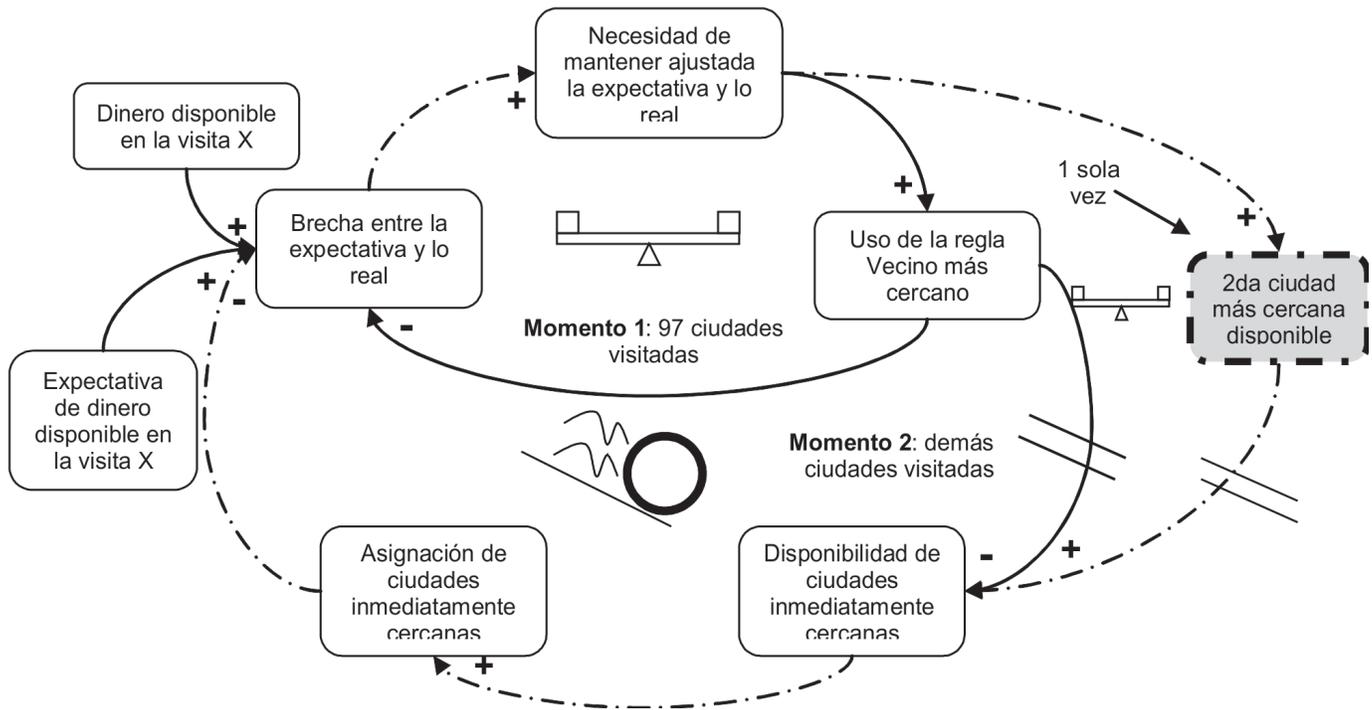


Figura 2. Propuesta estructural, sistémica, para mejorar el desempeño del VMC. Fuente: [10]

Con el uso del Sacrificio cortoplacista en un momento determinado, se espera que más adelante (líneas cortas de retardo temporal) haya más disponibilidad de ciudades inmediatamente cercanas que sirvan para reducir la brecha entre la expectativa de dinero disponible y lo real. Luego de un sacrificio cortoplacista sigue de nuevo la regla del VMC; es decir, el sistema se adapta a su estrategia original. Así, el Sacrificio cortoplacista junto con la adaptación de nuevo a la práctica del VMC, se denominará Sacrificio Cortoplacista Adaptativo (SCA). La adaptación, además de que muestra al sacrificio cortoplacista como un posible punto de apalancamiento (leve cambio con impacto significativo y duradero en el sistema), también representa el principio de la homeostasis de los sistemas: “su capacidad para mantener las condiciones de supervivencia en un ámbito cambiante” [11]. Con este punto de apalancamiento se busca una posible estabilización del impacto de la estrategia del VMC en las últimas ciudades del ciclo vacacional. Esto lo refleja el ciclo compensador que subyace al considerar las relaciones más externas, líneas punteadas (figura 2).

Aparte de considerar, en el diseño, diversos principios del pensamiento sistémico como campo de inspiración, se brindó atención a la tendencia de combinar búsqueda global con local, reflejada en la revisión sistemática de literatura sobre el TSP [10]. Para vincular esta recomendación, cada tour generado con la leve modificación, fruto de cada SCA, será alterado mediante una búsqueda local. Al tratarse de un primer estudio sobre la pertinencia del pensamiento sistémico como posible campo de inspiración para el desarrollo de métodos de optimización combinatoria, no se probará con  $k$  superiores a 2, puesto que [17] y [15] concluyeron que la mejoría en eficacia no justifica el deterioro a nivel de eficiencia.

**Diagrama de flujo:** En la figura 3 se presenta el diagrama de flujo que representa el algoritmo Sacrificio Cortoplacista Adaptativo (SCA). La anotaciones, precedidas del símbolo (‘) se emplean para ilustrar los pasos fundamentales que la componen y facilitar el entendimiento.

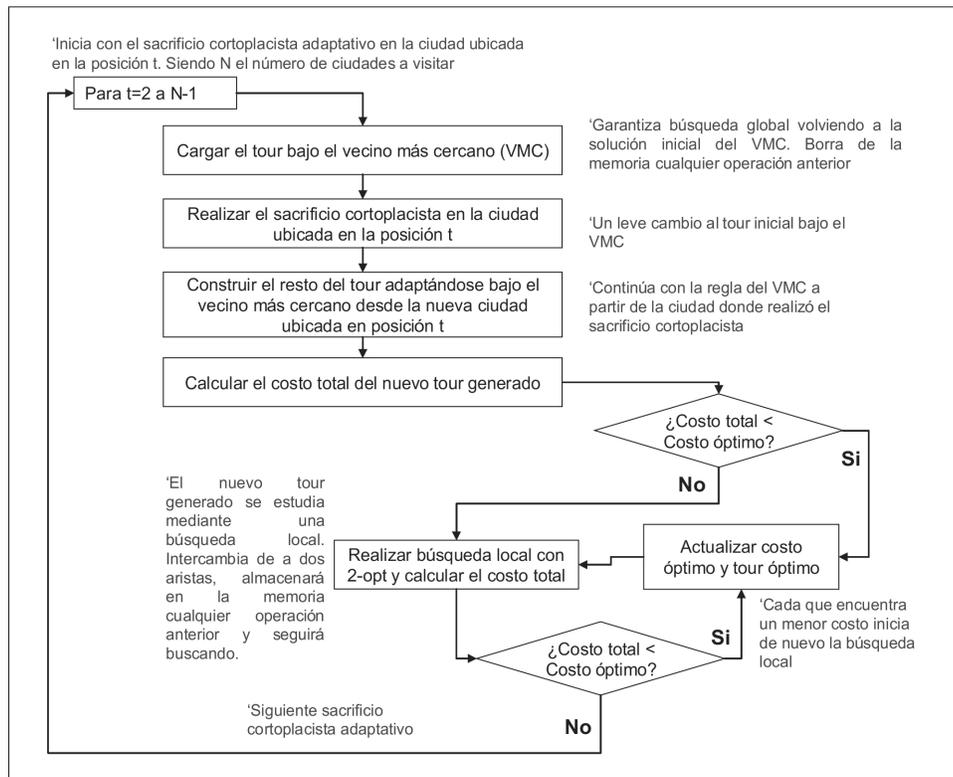


Figura 3. Diagrama de flujo del SCA\_2opt. Fuente: [10]

### Una nueva versión del SCA\_2opt: SCA\_2opt\_r

El  $D_{max}$  es un parámetro del 2-opt que representa la mejora permisible para que valga la pena efectuar el intercambio de un par de aristas. En el 2-opt puro, este parámetro se inicializa en cero (0). Por ejemplo, considere el siguiente mejor tour generado en un momento determinado para una instancia TSP de 5 ciudades: 1 – 3 – 2 – 5 – 4 – 1. Suponga que se desea analizar la pertinencia del intercambio 2-opt entre las aristas (3, 2) y (5, 4). Bajo el 2-opt, dicho intercambio sería así: (3, 5) y (2, 4). Si  $C$  representa el costo de una ruta determinada, el mencionado intercambio tendría sentido siempre y cuando  $(C(3, 5) + C(2, 4)) - (C(3, 2) + C(5, 4)) < D_{max}$ . En otras palabras, solo valdría la pena el intercambio cuando el primer término de la resta ( $(C(3, 5) + C(2, 4))$ ) sea menor que el segundo ( $C(3, 2) + C(5, 4)$ ). No obstante, como en la heurística a proponer el 2-opt está incorporado dentro de cada sacrificio cortoplacista adaptativo; es decir, se efectúa para cada tour, no en todos los casos conviene inicializar el  $D_{max}$  en cero, debido a que llevaría a efectuar intercambios para tours de costo menor que el mejor valor encontrado en un determinado SCA, pero no necesariamente respecto al óptimo guardado hasta ese momento. Por ello, en la heurística diseñada, el  $D_{max}$  se inicializa en cero siempre y cuando cada tour, fruto del SCA mejore la situación global; en caso contrario, el valor inicial es el costo óptimo alojado hasta ese momento ( $costo_{opt}$ ) menos el costo total que genera el tour actual ( $costo_{total}$ ). Esto evita que se generen intercambios para tours que distan considerablemente del mejor costo encontrado

hasta ese entonces; de no hacerlo, llevaría a pérdida de eficiencia computacional. A pesar de lo dicho, es posible que el costo total arrojado por un tour determinado luego del SCA no sea mejor que el alojado hasta ese entonces, pero que al efectuarle intercambios se llegue al final a un mejor resultado. Para estudiar ello, el  $D_{max}$  fue igualado a  $(1+r) \cdot costo_{opt} - costo_{total}$ , siendo  $r \in [0, 1]$  la proporción adicional que se le cargará al mejor costo almacenado hasta ese entonces ( $costo_{opt}$ ), de modo que sea más permisible la decisión de efectuar los intercambios. Por ejemplo, podría establecerse que el  $D_{max}$  considere un 10% (0,1) más del  $costo_{opt}$ .

Dado que el algoritmo propuesto permite explorar diversos valores del parámetro, éstos fueron tanteados bajo ensayo y error para observar el desempeño de la heurística SCA\_2opt [11]. Ante la posibilidad de modificar el parámetro  $r$ , cuando éste sea igual a cero las siglas que representan el método propuesto serán las mismas: SCA\_2opt y, cuando  $r > 0$  se tratará como SCA\_2opt\_r. Esto último generó la idea de comparar el SCA\_2opt y el SCA\_2opt\_r considerando las instancias: Swiss42, Eil51, St70, Eil75, Eil76, Rat99, KroA100, Eil50, KroA150, Krob150, d198, Tsp225 y Pcb442, encontradas en TSPLib [16]. Dicha comparación puede verse en [10], donde se concluye que la modificación del parámetro  $r$  (SCA\_2opt\_r) lleva a un mejor desempeño en términos de eficacia que asumiéndolo como cero (SCA\_2opt), a costa de restar eficiencia computacional.

### 3.3 Comparación con metaheurísticas

Algunos de los estudios referentes presentaron resultados solo para la(s) metaheurística(s) que propone(n); en cambio otros, aparte de ello, ofrecieron resultados de metaheurísticas desarrolladas en otros trabajos, como por ejemplo [18] quienes aparte de sus aportes ACS y ACS+3opt informan sobre resultados de GA, EF y EP, los cuales se deben a desarrollos de otros autores. Para facilitar las comparaciones, los resultados se presentan empleando matrices, cuyas celdas proveen lo siguiente: costo medio (CM), mejor costo encontrado (MC), tiempo medio de CPU (TM), en segundos, y número de tours (NT) que consumió cada método para encontrar dicho mejor costo. En casos las matrices comprenden una celda más, se trata de gigaciclos de computador (CPC), empleado debido a la necesidad de tener una medida que incorpore en cierta medida, no exacta, las diferencias en cuanto a eficiencia computacional, propias de variaciones entre las capacidades de las computadoras empleadas por los diversos autores. Sobre esta variable no se tiene control, pero la multiplicación del TM por la velocidad del procesador brinda una idea aproximada.

Haciendo énfasis en el SCA\_2opt y el SCA\_2opt\_r, el costo medio y el mejor encontrado son los mismos, puesto que dichas heurísticas no tienen ninguna componente aleatoria. Lo cual sí ocurre con la mayoría de las metaheurísticas, entre ellas: Colonia de hormigas, Algoritmos genéticos, entre otros.

A continuación, se presentan los resultados comparativos en cada categoría de metaheurística:

#### Con respecto a Colonia de Hormigas:

Las heurísticas propuestas SCA\_2opt y SCA\_2opt\_r fueron comparadas contra siete métodos cuya base es el comportamiento de hormigas: ACS (Ant Colony System), ACS\_3opt (ACS y se le adiciona el optimizador local 3opt) [18], MNACO (Ant Colony Optimization with multiple nests' cooperation), MMAS (Max-Min Ant System) [19], ACO MP (Ant Colony Optimization maximum method probability), ACO SLR (ACO Single loop randomness) y ACO MLR (Multi loop randomness) [20]. Un aspecto que se consideró importante para procurar que la referenciación tuviese de carácter internacional, fue registrar los países donde se ubican las instituciones de las que formaron parte los autores de los artículos desde donde se extrajo la información. Esto desde luego al momento de la publicación de los mismos y, por tanto, hoy no puede garantizarse que aún continúen en esas instituciones. Así, los resultados de los métodos propuestos se compararon con información de estudios, cuyos autores, en el momento de la publicación, figuraron en instituciones ubicadas en: Bélgica, Suiza, China y USA. En la figura 4 se presentan los resultados para seis instancias ubicadas en el TSPLib [16]. Para los resultados del SCA\_2opt\_r la figura también presenta los valores r que fueron empleados, los cuales no necesariamente son los óptimos, puesto que se trabajó bajo ensayo y error, ya que la optimización de este parámetro se deja como estudio futuro.

| Procesadores |               | Pent 4, 3.06 GHz |           | 0,175 GHz DEC    |                      | Pent 4, 2.4 GHz |                 | Pent 4, 2.8 GHz  |                  |         |           |               |        |       |
|--------------|---------------|------------------|-----------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|---------|-----------|---------------|--------|-------|
| Nº           | País:         |                  | Colombia  |                  | Bélgica y Suiza [18] |                 | China [19]      |                  | USA [20]         |         |           |               |        |       |
|              | Instancia TSP | Valor r          | Variables | SCA_2opt_r       | SCA_2opt             | ACS             | ACS_3opt        | MNACO            | MMAS             | ACO MP  | ACO SLR   | ACO MLR       |        |       |
| 1            | Eiil50        | 0,10             | CM        | <b>430,48</b>    | <b>448,83</b>        | ND              |                 |                  |                  | 513,61  | 471,98    | 462,51        |        |       |
|              |               |                  | MC        | <b>430,48</b>    | 448,83               | <b>425</b>      |                 |                  |                  |         | 513,61    | 460,9         | 453,64 |       |
|              |               |                  | TM        | <b>(0,114)</b>   | <b>(0,098)</b>       | (ND)            |                 |                  |                  |         |           | (10)          | (7)    | (36)  |
|              |               |                  | CPC       | <b>0,34884</b>   | <b>0,29988</b>       | (ND)            |                 |                  |                  |         |           | 28            | 19,6   | 100,8 |
|              |               |                  | NT        | <b>[92]</b>      | <b>[62]</b>          | [1.830]         |                 |                  |                  |         |           | [400]         | [400]  | [400] |
| 2            | Eiil51        | 0,1              | CM        | 436,08           | 449,85               |                 |                 | <b>429,04</b>    | <b>430,06</b>    |         |           |               |        |       |
|              |               |                  | MC        | 436,08           | 449,85               |                 |                 | <b>428,87</b>    | <b>428,98</b>    |         |           |               |        |       |
|              |               |                  | TM        | <b>(0,219)</b>   | <b>(0,109)</b>       |                 |                 |                  |                  | (10,98) | (40)      |               |        |       |
|              |               |                  | CPC       | <b>0,67</b>      | <b>0,33</b>          |                 |                 |                  |                  | 26,35   | 96        |               |        |       |
|              |               |                  | NT        | [186]            | [63]                 |                 |                 |                  |                  | [ND]    | [ND]      |               |        |       |
| 3            | Eiil75        | 0,16             | CM        | <b>560,14</b>    | 588,61               | ND              |                 |                  |                  | 606,75  | 597,96    | <b>572,53</b> |        |       |
|              |               |                  | MC        | <b>560,14</b>    | 588,61               | <b>535</b>      |                 |                  |                  | 606,75  | 585,69    | 566,01        |        |       |
|              |               |                  | TM        | <b>(0,805)</b>   | <b>(0,320)</b>       | (ND)            |                 |                  |                  |         | (17)      | (13)          | (75)   |       |
|              |               |                  | CPC       | <b>2,46</b>      | <b>0,98</b>          | (ND)            |                 |                  |                  |         | 47,60     | 36,40         | 210    |       |
|              |               |                  | NT        | <b>[451]</b>     | <b>[94]</b>          | [3.480]         |                 |                  |                  |         | [400]     | [400]         | [400]  |       |
| 4            | KroA100       | 0,16             | CM        | 22.219,34        | 22.379,4             | ND              |                 | <b>21.288,13</b> | <b>21.342,97</b> | 25.483  | 24.251,0  | 23.898,04     |        |       |
|              |               |                  | MC        | 22.219,34        | 22.379,40            | 21.282          |                 | <b>21.285,40</b> | <b>21.285,40</b> | 25.483  | 24229,9   | 23.531,40     |        |       |
|              |               |                  | TM        | <b>(1,07)</b>    | <b>(0,87)</b>        | (ND)            |                 |                  |                  | (26,88) | (104,8)   | (26)          | (22)   | (130) |
|              |               |                  | CPC       | <b>3,27</b>      | <b>2,66</b>          | (ND)            |                 |                  |                  | 64,51   | 251,52    | 72,80         | 61,60  | 364   |
|              |               |                  | NT        | <b>[206]</b>     | <b>[140]</b>         | [4.820]         |                 |                  |                  | [ND]    | [ND]      | [400]         | [400]  | [400] |
| 5            | d198          | 0,01             | CM        | <b>16.180,53</b> | 16.212               | 16.054          | <b>15.781,7</b> |                  |                  | 18.381  | 18.375,28 | 16.918,76     |        |       |
|              |               |                  | MC        | <b>16.180,53</b> | 16.212               | 15.888          | <b>15.780</b>   |                  |                  | 18.381  | 17.982,90 | 16.752,80     |        |       |
|              |               |                  | TM        | <b>(6,49)</b>    | <b>(6,35)</b>        | (ND)            | (238)           |                  |                  |         | (ND)      | (ND)          | (ND)   |       |
|              |               |                  | CPC       | <b>19,86</b>     | <b>19,43</b>         | (ND)            | 41,65           |                  |                  |         | (ND)      | (ND)          | (ND)   |       |
|              |               |                  | NT        | <b>[246]</b>     | <b>[241]</b>         | [585.000]       | [ND]            |                  |                  |         | [ND]      | [ND]          | [ND]   |       |
| 6            | Pcb442        | 0,13             | CM        | <b>53.287,29</b> | 55.133,8             | <b>51.690</b>   |                 |                  |                  | 71.742  | 69.572,73 | 81.885,64     |        |       |
|              |               |                  | MC        | <b>53.287,29</b> | 55.133,80            | <b>51.268</b>   |                 |                  |                  | 71.742  | 68.519,80 | 61.365,30     |        |       |
|              |               |                  | TM        | (86,87)          | (76,79)              | (ND)            |                 |                  |                  |         | (ND)      | (ND)          | (ND)   |       |
|              |               |                  | CPC       | 265,82           | 234,98               | (ND)            |                 |                  |                  |         | (ND)      | (ND)          | (ND)   |       |
|              |               |                  | NT        | <b>[659]</b>     | <b>[543]</b>         | [595.000]       |                 |                  |                  |         | [ND]      | [ND]          | [ND]   |       |

ND: No detectado. Celdas: CM: costo medio, MC: mejor costo, TM ( ): tiempo medio, CPC: gigaciclos de PC (velocidad de procesador x TM), NT [ ]: nro de tours.

Figura 4. Matriz de datos comparativos en el grupo de Colonia de hormigas. Fuente: [10]

A partir de la información recopilada en la figura 4, para identificar hallazgos con una visión más holística, se contabilizó el número de veces en que los métodos propuestos (SCA\_2opt y SCA\_2opt\_r) superaron, en cada variable de interés a los demás que sirvieron de referentes. Estos resultados fueron consolidados en la tabla 1. Por ejemplo, nótese que para la instancia Eil50, en la variable CM se pudo realizar comparaciones entre 5 métodos (columna métodos sometidos a ensayo), lo que equivale a que cada uno de los métodos propuestos pudo compararse con los otros cuatro (columna métodos con que fue comparado). De este modo, el SCA\_2opt\_r, fruto de las 4 pruebas comparativas que pueden

realizarse en la variable CM, ocupó el primer lugar (columna puesto que ocupó); es decir, arrojó mejor costo medio que los otros cuatro métodos (columna métodos que superó). En el caso del SCA\_2opt, como ocupó el segundo puesto, superó a 3 de los métodos sometidos a ensayo. Esta propuesta para analizar la información consolidada procurando una visión holística, hace viable emplear proporciones de casos exitosos, entendiéndose este último término como el evento de que un método propuesto supere, en determinada variable, al ser comparado con otro. Vale anotar que los resultados comparativos para la variable TM resultaron los mismos que para CPC, por lo que en la tabla 1 y en los análisis se empleó la variable TM.

**Tabla 1.** Posiciones de los métodos propuestos al compararse en el grupo de AC. Fuente: [10]

| Instancia | Variable | Métodos con que fue comparado | Métodos sometidos a ensayo | SCA_2opt_r       |                    | SCA_2opt         |                    |
|-----------|----------|-------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
|           |          |                               |                            | Puesto que ocupó | Métodos que superó | Puesto que ocupó | Métodos que superó |
| Eil50     | CM       | 4                             | 5                          | 1                | 4                  | 2                | 3                  |
|           | MC       | 5                             | 6                          | 2                | 4                  | 3                | 3                  |
|           | TM       | 4                             | 5                          | 2                | 3                  | 1                | 4                  |
|           | NT       | 5                             | 6                          | 2                | 4                  | 1                | 5                  |
| Eil51     | CM       | 3                             | 4                          | 3                | 1                  | 4                | 0                  |
|           | MC       | 3                             | 4                          | 3                | 1                  | 4                | 0                  |
|           | TM       | 3                             | 4                          | 2                | 2                  | 1                | 3                  |
|           | NT       | ----                          | ----                       | ----             | ----               | ----             | ----               |
| Eil75     | CM       | 4                             | 5                          | 1                | 4                  | 3                | 2                  |
|           | MC       | 5                             | 6                          | 2                | 4                  | 5                | 1                  |
|           | TM       | 4                             | 5                          | 2                | 3                  | 1                | 4                  |
|           | NT       | 5                             | 6                          | 2                | 4                  | 1                | 5                  |
| KroA100   | CM       | 6                             | 7                          | 3                | 4                  | 4                | 3                  |
|           | MC       | 7                             | 8                          | 4                | 4                  | 5                | 3                  |
|           | TM       | 6                             | 7                          | 2                | 5                  | 1                | 6                  |
|           | NT       | 5                             | 6                          | 2                | 4                  | 1                | 5                  |
| d198      | CM       | 6                             | 7                          | 3                | 4                  | 4                | 3                  |
|           | MC       | 6                             | 7                          | 3                | 4                  | 4                | 3                  |
|           | TM       | 2                             | 3                          | 2                | 1                  | 1                | 2                  |
|           | NT       | 2                             | 3                          | 2                | 1                  | 1                | 2                  |
| Pcb442    | CM       | 5                             | 6                          | 2                | 4                  | 3                | 3                  |
|           | MC       | 5                             | 6                          | 2                | 4                  | 3                | 3                  |
|           | TM       | ----                          | ----                       | ----             | ----               | ----             | ----               |
|           | NT       | 2                             | 3                          | 2                | 1                  | 1                | 2                  |

CM: costo medio, MC: mejor costo, TM: tiempo medio y NT: tours para llegar al mejor costo

Con base en la tabla 1 pudo calcularse el porcentaje de casos comparativos en los que tanto el SCA\_2opt como el SCA\_2opt\_r superaron a otros métodos (ver tabla 2). Considerando los métodos sometidos a ensayo y aclarando que no representan la totalidad de la población de algoritmos basados en Colonia

de hormigas, los porcentajes de éxito pueden interpretarse como una probabilidad de éxito. Supóngase, una competencia deportiva entre dos personas (ej: ajedrez), las estadísticas expuestas en la tabla 2, se asemejan a la probabilidad de que un contrincante determinado supere al otro al finalizar la prueba.

**Tabla 2.** Porcentaje de éxito de los métodos propuestos al compararse en el grupo de AC. Fuente: [10]

| Variables        | Métodos    | Total de casos comparativos | Total de casos de éxito | % éxito |
|------------------|------------|-----------------------------|-------------------------|---------|
| Costo medio (CM) | SCA_2opt_r | 28                          | 21                      | 75%     |
|                  | SCA_2opt   | 28                          | 14                      | 50%     |
| Mejor costo (MC) | SCA_2opt_r | 31                          | 21                      | 68%     |
|                  | SCA_2opt   | 31                          | 13                      | 42%     |
| Tiempo medio     | SCA_2opt_r | 19                          | 14                      | 74%     |
|                  | SCA_2opt   | 19                          | 19                      | 100%    |
| Número de tours  | SCA_2opt_r | 19                          | 14                      | 74%     |
|                  | SCA_2opt   | 19                          | 19                      | 100%    |

Por ejemplo, nótese en la figura 4 que el SCA\_2opt\_r en ninguna de las comparaciones individuales con el ACS [18] fue vencedor en términos de costo; a su vez, al compararse con los resultados del ACO MLR, en todos los casos arrojó menor costo. Igualmente, no pudo tenerse control experimental respecto a la misma cantidad de información recopilada, por cada método, en cada instancia, lo cual hace inviable generalizar conclusiones fuera del espacio de casos comparativos. Respecto a los métodos que sirvieron de base comparativa, inspirados en Colonia de hormigas, se encontró el que SCA\_2opt\_r se destaca, tanto a nivel de costo medio (75%) como respecto al mejor encontrado (68%); en eficiencia computacional (tiempo, CPC, tours) se refleja la bondad del método para llegar a una respuesta (74% de los casos arrojó menores valores). Respecto a la eficacia del SCA\_2opt (CM: 50% y MC: 43%) no resultó tan favorable como el SCA\_2opt\_r con relación a las metaheurísticas sometidas a ensayo, pertenecientes a esta familia de métodos. No obstante, su eficiencia computacional es superior a la de cualquier otro de los métodos (CM: 100% y NT: 100%). De manera similar se organizó y se procesó la información para

los demás grupos de algoritmos. A continuación, sin redundar en información procedimental, se presentan los resultados.

**Con respecto a Algoritmo genéticos:**

Con relación al grupo de Algoritmos genéticos, las heurísticas propuestas fueron comparadas con 12 métodos, denominados en los estudios de referencia así: GA (Genetic algorithm) [18], AGIV (Algoritmo Genético con Infección Viral) [21], SGA (Simple GA), MDDCGA (Multiple dynamic diversity control GA), DDCGA (Dynamic diversity control GA) [22], AG serial, paralelo y en grupo (Algoritmos genéticos con ejecución serial, en paralelo y en grupo) [23], FRAG\_GA (Fragment GA), IGA (Improved GA), SWAP\_GATSP (Swapping GA for TSP), OX\_SIM (GA con order crossover and simple inversion mutation) [24], En la figura 5 se presenta la matriz de comparaciones entre los métodos propuestos y los relacionados con Algoritmos genéticos. Los autores de los estudios a partir de los cuales se extrajo la información, figuran en dichas publicaciones como miembros de instituciones de los países: Bélgica, Suiza, Brasil, Taiwán y Libia. Esto refleja el carácter internacional de las comparaciones que se realizaron.

| Procesadores |               | Pent 4, 3,06 GHz |        | Colombia        |                 | Bélgica y Suiza [18] | Brasil [21]    | Taiwan [22] |           |           | Brasil [23] |             |          | Libia [24]    |               |          |                 |               |  |
|--------------|---------------|------------------|--------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|----------|---------------|---------------|----------|-----------------|---------------|--|
| Nº           | País          |                  | Variab | SCA_2opt_r      | SCA_2opt        | GA                   | AGIV           | SGA         | MDDCGA    | DDCGA     | AG serial   | AG paralelo | AG grupo | FRAG_GA       | SWAP_GATSP    | OX_SIM   | IGA             |               |  |
|              | Instancia TSP | Valor r          |        |                 |                 |                      |                |             |           |           |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
| 1            | Swiss42       | 0,05             | CM     | <b>1.285</b>    | 1.375           |                      | <b>1.343,6</b> |             |           |           |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
|              |               |                  | MC     | 1.285           | 1.375           |                      | ND             |             |           |           |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
|              |               |                  | TM     | (0,078)         | (0,063)         |                      | (ND)           |             |           |           |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
|              |               |                  | NT     | [72]            | [61]            |                      | [ND]           |             |           |           |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
| 2            | Eil76         | 0,25             | CM     | <b>559,61</b>   | <b>567,01</b>   |                      |                |             |           |           | 591         | 590         | 589      |               |               |          |                 |               |  |
|              |               |                  | MC     | 559,61          | 567,01          |                      |                |             |           |           |             | ND          | ND       | ND            |               |          |                 |               |  |
|              |               |                  | TM     | <b>(1,40)</b>   | <b>(0,352)</b>  |                      |                |             |           |           |             |             | (1.390)  | (790)         | (750)         |          |                 |               |  |
|              |               |                  | CPC    | <b>4,28</b>     | <b>1,08</b>     |                      |                |             |           |           |             |             | 3238,7   | 1840,7        | 1747,5        |          |                 |               |  |
|              |               |                  | NT     | [964]           | [118]           |                      |                |             |           |           |             |             | [ND]     | [ND]          | [ND]          |          |                 |               |  |
| 3            | KroA100       | 0,16             | CM     | 22.219,3        | 22.379,4        | ND                   |                | 27.117,9    | 26.564,6  | 25.739,6  |             |             |          | <b>21.350</b> | 21.900        | 22.670   | <b>21.294,5</b> |               |  |
|              |               |                  | MC     | 22.219,3        | 22.379,4        | 21.761               |                | 25.347,5    | 25.093,1  | 23.924,1  |             |             |          |               | <b>21.282</b> | 21.504   | 22.400          | <b>21.282</b> |  |
|              |               |                  | TM     | (1,07)          | (0,875)         | (ND)                 |                | (ND)        | (ND)      | (ND)      |             |             |          |               | (ND)          | (ND)     | (ND)            | (ND)          |  |
|              |               |                  | NT     | [206]           | [140]           | [103.000]            |                | [ND]        | [ND]      | [ND]      |             |             |          |               | [800]         | [5.000]  | [25.000]        | [454]         |  |
| 4            | KroA150       | 0,19             | CM     | <b>27.999,7</b> | <b>29.076,9</b> |                      |                | 33.495,7    | 33.130,3  | 32.737,0  |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
|              |               |                  | MC     | <b>27.999,7</b> | <b>29.076,9</b> |                      |                | 31.194,2    | 30.338,7  | 30.700,1  |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
|              |               |                  | TM     | (9,78)          | (2,89)          |                      |                | (ND)        | (ND)      | (ND)      |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
|              |               |                  | NT     | [1.023]         | [204]           |                      |                | [ND]        | [ND]      | [ND]      |             |             |          |               |               |          |                 |               |  |
| 5            | d198          | 0,01             | CM     | 16.180,5        | 16.212          | <b>15.780</b>        |                |             |           |           |             |             |          | 15.964        | 16.132        | 18.200   | <b>15.799,3</b> |               |  |
|              |               |                  | MC     | 16.180,5        | 16.212          | ND                   |                |             |           |           |             |             |          |               | <b>15.834</b> | 15.992   | 16.720          | <b>15.781</b> |  |
|              |               |                  | TM     | <b>(6,49)</b>   | <b>(6,35)</b>   | (253)                |                |             |           |           |             |             |          |               | (ND)          | (ND)     | (ND)            | (ND)          |  |
|              |               |                  | NT     | <b>[246]</b>    | <b>[241]</b>    | [ND]                 |                |             |           |           |             |             |          |               | [3.000]       | [7.000]  | [25.000]        | [2.514]       |  |
| 6            | Pcb442        | 0,13             | CM     | 53.287,3        | 55.133,8        |                      |                | 136.426,3   | 112.253,2 | 111.235,2 |             |             |          | <b>51.930</b> | 53.820        | 59.740   | <b>51.208</b>   |               |  |
|              |               |                  | MC     | 53.287,3        | 55.133,8        |                      |                | 125.779     | 104.121   | 103.740   |             |             |          |               | <b>51.104</b> | 52.620   | 53.402          | <b>51.101</b> |  |
|              |               |                  | TM     | (86,87)         | (76,79)         |                      |                | (ND)        | (ND)      | (ND)      |             |             |          |               | (ND)          | (ND)     | (ND)            | (ND)          |  |
|              |               |                  | NT     | <b>[659]</b>    | <b>[543]</b>    |                      |                | [ND]        | [ND]      | [ND]      |             |             |          |               | [8.000]       | [15.000] | [40.000]        | [9.998]       |  |

ND: No detectado. Celdas: CM: costo medio, MC: mejor costo, TM (:): tiempo medio, CPC: gigaciclos de PC (velocidad de procesador x TM), NT []: nro de tours.

Figura 5. Matriz de datos comparativos en el grupo de Algoritmos genéticos. Fuente: [10]

Similar a las comparaciones con métodos basados en Colonia de hormigas, en esta oportunidad también se recurrió al procedimiento de obtención de las proporciones de éxito de los métodos propuestos. A partir de dicho procedimiento, de nuevo

el SCA\_2opt\_r se muestra prometedor en cuando a eficacia y eficiencia. Por ejemplo, en cuanto al costo medio arrojado por los diferentes métodos, de las 34 comparaciones que se establecieron, el SCA\_2opt\_r superó a los demás en el 74%

de los casos, en tanto que el SCA\_2opt en el 50% (esto último es como el evento de lanzar una moneda con probabilidad 0,5). La favorable eficacia del SCA\_2opt\_r es complementada con una notoria eficiencia computacional (porcentaje de éxito en TM ó CPC: 67% y en NT: 87%). Así mismo, al observar la eficiencia computacional del SCA\_2opt, de nuevo es el más ventajoso (menor tiempo, CPC, y menores tours consumidos, 100% de los casos).

#### Con respecto a Enfriamiento simulado:

Para el caso de métodos basados en el Enfriamiento simulado, se logró comparar las heurísticas propuestas contra cinco

métodos. En los estudios de referencia, dichos métodos fueron expuestos con los nombres: SA (Simulated Annealing) [18], CSA (Conventional simulated annealing), TFSA (Temperature Fuzzy SA), TRFSA (Temperature repetition fuzzy SA) [25], PSO-SA (Particle swarm optimization with simulated annealing) [26]. En cuanto a afiliaciones de los autores al momento de la publicación, éstas se refirieron a instituciones en los países: Bélgica, Suiza, República de Korea y China. Las instancias abordadas presentan tamaños que van desde 48 ciudades hasta 76. En la figura 6 se muestra el consolidado de resultados comparativos.

| Nº | País:         |         |        | Colombia         |               | Bélgica y Suiza [18] | República de Korea [25] |           |               | China [26]    |
|----|---------------|---------|--------|------------------|---------------|----------------------|-------------------------|-----------|---------------|---------------|
|    | Instancia TSP | Valor r | Variab | SCA_2opt_r       | SCA_2opt      | SA                   | CSA                     | TFSA      | TRFSA         | PSO-SA        |
| 1  | Att48         | 0,01    | CM     | <b>34.021,18</b> | 34.933        |                      |                         |           |               | <b>34.512</b> |
|    |               |         | MC     | <b>34.021,18</b> | 34.933        |                      |                         |           |               | <b>33.966</b> |
|    |               |         | TM     | (0,078)          | (0,094)       |                      |                         |           |               | (ND)          |
|    |               |         | NT     | [65]             | [66]          |                      |                         |           |               | [ND]          |
| 2  | Eil50         | 0,10    | CM     | 430,48           | 448,83        | ND                   |                         |           |               |               |
|    |               |         | MC     | <b>430,48</b>    | 448,83        | <b>443</b>           |                         |           |               |               |
|    |               |         | TM     | (0,114)          | (0,098)       | (ND)                 |                         |           |               |               |
|    |               |         | NT     | [92]             | [62]          | [68.512]             |                         |           |               |               |
| 3  | Eil51         | 0,1     | CM     | <b>436,08</b>    | <b>449,85</b> |                      | 480,09                  | 477,85    | 480,16        |               |
|    |               |         | MC     | <b>436,08</b>    | 449,85        |                      | <b>449,66</b>           | 453,48    | <b>449,66</b> |               |
|    |               |         | TM     | (0,219)          | (0,109)       |                      | (ND)                    | (ND)      | (ND)          |               |
|    |               |         | NT     | [186]            | [63]          |                      | [136.000]               | [105.000] | [95.588]      |               |
| 4  | Eil75         | 0,16    | CM     | 560,14           | 588,61        | ND                   |                         |           |               |               |
|    |               |         | MC     | <b>560,14</b>    | 588,61        | <b>580</b>           |                         |           |               |               |
|    |               |         | TM     | (0,805)          | (0,320)       | (ND)                 |                         |           |               |               |
|    |               |         | NT     | [451]            | [94]          | [173.250]            |                         |           |               |               |
| 5  | Eil76         | 0,25    | CM     | <b>559,61</b>    | <b>567,01</b> |                      | 649,05                  | 639,86    | 647,22        |               |
|    |               |         | MC     | <b>559,61</b>    | <b>567,01</b> |                      | 613,7                   | 603,68    | 618,03        |               |
|    |               |         | TM     | (1,40)           | (0,352)       |                      | (ND)                    | (ND)      | (ND)          |               |
|    |               |         | NT     | <b>[964]</b>     | <b>[118]</b>  |                      | [204,000]               | [159,000] | [147.550]     |               |

ND: No detectado. Celdas: CM: costo medio, MC: mejor costo, TM (): tiempo medio, NT []: nro de tours.

Figura 6. Matriz de datos comparativos en el grupo de Enfriamiento simulado. Fuente: [10]

Frente a los métodos relacionados con Enfriamiento simulado, que se tomaron de referentes, es destacable cómo el SCA\_2opt\_r los supera en cuanto al costo medio arrojado (100% de los casos) y al mejor costo (93% de los casos), más aún cuando también a nivel de eficiencia computacional es favorable (NT: 67% de los casos). Así mismo, en términos del costo medio, el SCA\_2opt presentó resultados más ventajosos que los demás métodos en el 60% de las comparaciones realizadas, lo que no ocurrió al analizar el mejor costo encontrado, pues la probabilidad de resultar ventajoso es reducida (0,29). De nuevo, la eficiencia computacional de este último método, frente a los demás, es la más satisfactoria (NT: 100% de los casos). Cabe anotar que no se tenían datos suficientes para realizar comparaciones respecto a tiempo medio de cómputo (TM).

#### Con respecto a otras metaheurísticas:

En esta familia de metaheurísticas se agruparon métodos basados en PE (Programación evolutiva) [18], PSO-TS-CO-2opt (Particle swarm optimization based on space transformation combined with chaotic operations and 2-opt local search) [27], REA (Route exchange algorithm; basado en Swarm intelligent) [28], SFLA (Shuffled frog-leaping algorithm; algoritmo memético) [29] y BCO (Bee colony optimization) [30]. Los países relacionados con las instituciones de afiliación de las fuentes de información, son: Bélgica, Suiza, China y Serbia. En la figura 7 se presenta la matriz de costos, tiempos y tours para los diferentes métodos.

| Procesador |               |         | Pent 4, 3,06 GHz |                  |                      | ND         |                  | ND         | IBM 0, 533 GHz |               |
|------------|---------------|---------|------------------|------------------|----------------------|------------|------------------|------------|----------------|---------------|
| Nº         | País:         |         | Colombia         |                  | Bélgica y Suiza [18] | China [27] | China [28]       | China [29] | Serbia [30]    |               |
|            | Instancia TSP | Valor r | Variab           | SCA_2opt_r       | SCA_2opt             | PE         | PSO-TS-CO - 2opt | REA        | SFLA           | BCO           |
| 1          | Burma14       | 0,02    | CM               | <b>30,8</b>      | <b>31,21</b>         |            |                  | 32,77      | <b>30,8</b>    |               |
|            |               |         | MC               | <b>30,8*</b>     | <b>31,21*</b>        |            |                  | 31,88*     | <b>30,8*</b>   |               |
|            |               |         | TM               | <b>(0,00)</b>    | <b>(0,00)</b>        |            |                  | (ND)       | (1,84)         |               |
|            |               |         | NT               | [24]             | [22]                 |            |                  | [ND]       | [ND]           |               |
| 2          | Att48         | 0,01    | CM               | <b>34.021,18</b> | <b>34.933</b>        |            |                  | 35.413     |                |               |
|            |               |         | MC               | <b>34.021,18</b> | <b>34.933</b>        |            |                  | 34.707     |                |               |
|            |               |         | TM               | (0,078)          | (0,094)              |            |                  | (ND)       |                |               |
|            |               |         | NT               | [65]             | [66]                 |            |                  | [ND]       |                |               |
| 3          | Eil50         | 0,10    | CM               | 430,48           | 448,83               | ND         |                  |            |                |               |
|            |               |         | MC               | <b>430,48</b>    | 448,83*              | <b>426</b> |                  |            |                |               |
|            |               |         | TM               | (0,114)          | (0,098)              | (ND)       |                  |            |                |               |
|            |               |         | NT               | [92]             | [62]                 | [100.000]  |                  |            |                |               |
| 4          | Eil51         | 0,1     | CM               | <b>436,08</b>    | 449,85               |            | 440,9            | 455        | <b>436,76</b>  | ND            |
|            |               |         | MC               | 436,08           | 449,85               |            | ND               | 451        | <b>428,87</b>  | <b>428,87</b> |
|            |               |         | TM               | <b>(0,219)</b>   | <b>(0,109)</b>       |            | (30)             | (ND)       | (17,42)        | (29)          |
|            |               |         | CPC              | <b>0,67</b>      | <b>0,33</b>          |            | ND               | (ND)       | 9,28           | 15,46         |
|            |               |         | NT               | [186]            | [63]                 |            | [ND]             | [ND]       | [ND]           | [ND]          |
| 5          | Eil75         | 0,16    | CM               | 560,14           | 588,61               | ND         |                  |            |                |               |
|            |               |         | MC               | <b>560,14</b>    | 588,61               | <b>542</b> |                  |            |                |               |
|            |               |         | TM               | (0,805)          | (0,320)              | (ND)       |                  |            |                |               |
|            |               |         | NT               | [451]            | [94]                 | [325.000]  |                  |            |                |               |

ND: No detectado. Celdas: CM: costo medio, MC: mejor costo, TM ( ): tiempo medio, CPC: gigaciclos de PC (velocidad de procesador x TM), NT [: nro de tours.

Figura 7. Matriz de datos comparativos en el grupo de otras metaheurísticas. Fuente: [10]

Considerando el análisis de proporciones que se viene empleando, de nuevo, se infiere un desempeño favorable del SCA\_2opt\_r en cuanto a eficacia y a eficiencia, superando en costo medio a los demás en el 100% de los casos, bajo un tiempo medio que, en el 83% de los casos comparativos, fue inferior al de los demás. En términos del mejor costo encontrado, la probabilidad de que el SCA\_2opt\_r tenga éxito al contrastarse con uno de los métodos de este grupo, se ubica en 0,62, lo cual no se le atribuye a un evento netamente al azar. El mismo fenómeno respecto al SCA\_2opt se sigue presentando, puesto que se destaca en cuanto a la eficiencia computacional.

Consolidando para los cuatro grupos de metaheurísticas:

En la figura 8 se presenta el comportamiento del porcentaje de éxito de los métodos propuestos cuando se comparan con cada grupo de metaheurísticas. Al observar el porcentaje de éxito para la variable costo medio, se muestra que la balanza de éxito se inclina hacia el SCA\_2opt\_r, siendo más notoria la superioridad respecto a métodos basados en enfriamiento simulado y a la categoría “otros”. Con relación al SCA\_2opt el resultado de dicha comparación se asemeja a un evento dependiente en exclusiva del azar (probabilidad 0,5) en cuanto

a algoritmos genéticos y colonia de hormigas, ya que cuando se compara con enfriamiento simulado, el resultado tiende a verse más favorable para el SCA\_2opt (probabilidad de 0,63). En cambio, cuando este método se compara a la luz de los que pertenecen a la categoría “otros”, las probabilidades de que tenga éxito en cuanto al costo medio son menores (0,33). Para la variable mejor costo (figura 8), la interpretación general de los resultados es similar a la anterior para el SCA\_2opt\_r, que aunque con menor probabilidad de éxito que en el caso del costo medio, aún se muestra que la balanza se inclina hacia el éxito del mismo, siendo más notorio respecto a enfriamiento simulado. Para el caso de SCA\_2opt la posibilidad de éxito cuando se compara con los demás, en términos del mejor costo encontrado se muestra levemente inferior a 0,5 para colonia de hormigas y algoritmos genéticos, pero para enfriamiento simulado y para los “otros”, se ubica cerca del 0,25, lo cual lo coloca e desventaja. Respecto a la eficiencia computacional, en este caso solo se puede hacer uso del número de tours (figura 8), ya que para el tiempo computacional el enfriamiento simulado no presentó datos. Nótese la pertinencia de los dos métodos propuestos.

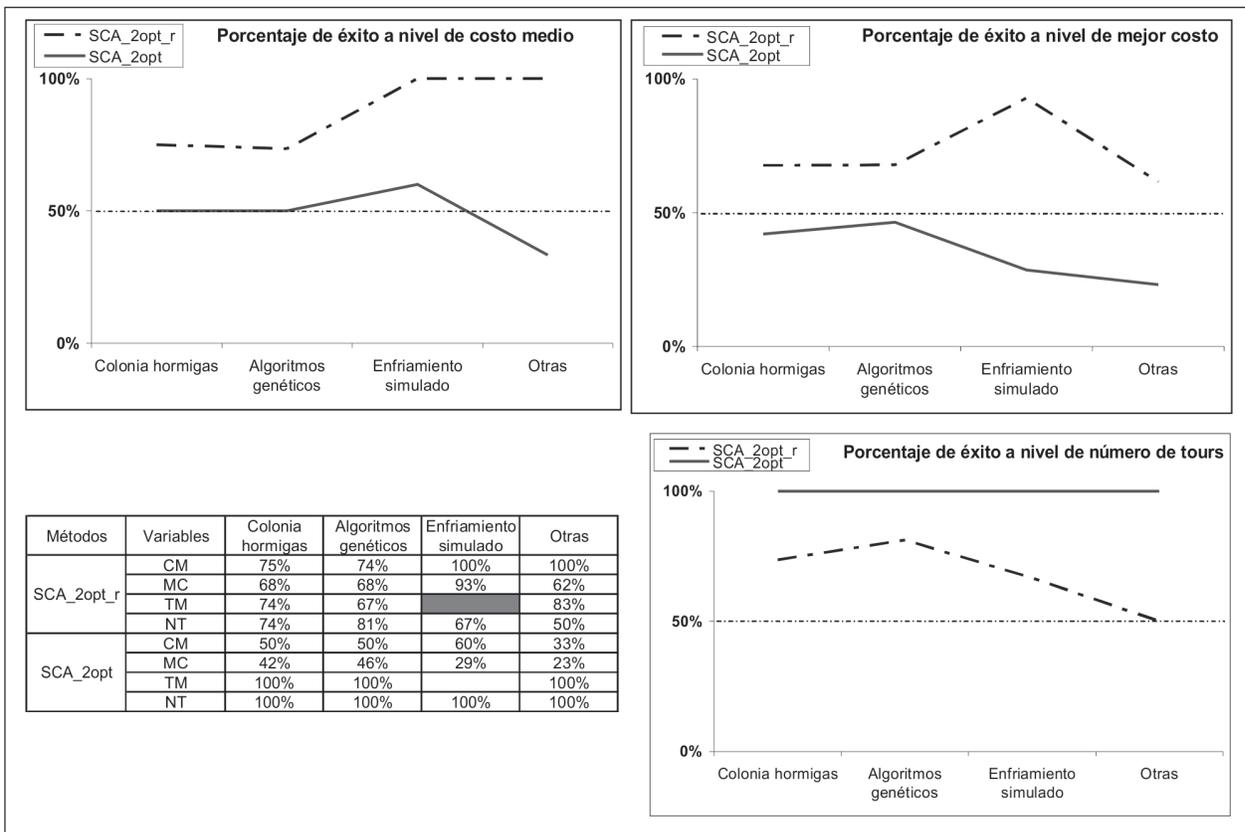


Figura 8. Porcentaje de casos de éxito, en cada grupo de metaheurísticas. Fuente: [10]

#### IV. CONCLUSIONES

El estudio se aventuró a explorar si el pensamiento sistémico puede constituirse en un nuevo campo de inspiración para el desarrollo de nuevos métodos de optimización combinatoria, partiendo del problema referente al introducir nuevos métodos: el TSP. La iniciativa de estudiar el TSP empleando el pensamiento sistémico, partió del análisis de la clásica regla de decisión: VMC. Para esta estrategia de decisión se encontró que sus comportamientos son viables de estudiar desde las leyes de la quinta disciplina, entre ellas: causa y efecto están distantes en tiempo y en espacio, la cura puede ser peor que la enfermedad, las soluciones fáciles llevan al mismo lugar y, el sistema mejora antes de empeorar. La observación de estas leyes del pensamiento sistémico llevó a identificar que en la práctica del VMC, ilustrada en un caso tipo historieta, llamada Don Pablo, subyace el arquetipo sistémico Soluciones rápidas que fallan. Para este tipo de estructura, el estudio se apoyó en otra de las leyes del pensamiento sistémico, consistente en la necesidad de buscar puntos de apalancamiento que mejoren el sistema, los cuales no son obvios. Fruto de esta búsqueda, surgió la estrategia Sacrificio cortoplacista adaptativo, la cual se basa en que a veces es necesario hacer sacrificios en el corto plazo, con el ánimo de que se tenga un futuro mejor. Este heurismo se materializó, desde el punto de vista algorítmico, en el hecho de que en algún

momento de la práctica del VMC, el siguiente desplazamiento no se realice a la ciudad inmediatamente cercana, disponible, sino que se renuncie a ella para trasladarse hacia la segunda más cercana disponible y, a partir de este cambio, se continúe con la tradicional regla VMC. Esta estrategia propuesta, atendiendo a una de las tendencias arrojadas por la revisión de literatura, llevó a complementar el SCA con una búsqueda local: el 2opt.

El método propuesto inicialmente en este estudio: SCA\_2opt condujo, a través de su estudio, a una nueva versión del mismo, el SCA\_2opt\_r. Este último contiene la alteración de uno de los parámetros de la búsqueda local, con posibilidad de variación en un rango de 0 a 1. Los dos métodos propuestos fueron comparados con 29 metaheurísticas en las categorías: Colonia de hormigas, Algoritmos genéticos, Enfriamiento simulado y Otras (Colonia de abejas,...), resultando promisorios en cuanto a eficacia y eficiencia. Cabe destacar que ninguna de las heurísticas propuestas: SCA\_2opt y SCA\_2opt\_r incorporan fenómenos aleatorios, como sí ocurre con la mayoría de las metaheurísticas.

En la comparación de los dos métodos propuestos con las metaheurísticas, las fuentes bibliográficas desde donde se extrajo la información, fueron elaboradas por autores afiliados a instituciones de diversos ámbitos geográficos, entre ellos: USA, Bélgica, Suiza, Brasil, China y República de Korea, permitiendo una referenciación internacional.

En términos globales, el estudio del cual este manuscrito es cuarto producto, se constituye en un primer aporte para emplear el pensamiento sistémico como un pertinente campo de inspiración para el desarrollo de métodos de optimización heurística, ofreciendo evidencia empírica sobre el diseño y desarrollo de un algoritmo heurístico, basado en el análisis sistémico del Vecino más cercano, capaz de arrojar soluciones efectivas para instancias simétricas TSP, tomando como base comparativa, en este caso, metaheurísticas posicionadas en la comunidad académica.

## V. PROYECCIÓN

Se espera que este trabajo también logre inspirar a otros investigadores y estudiantes, a fin de unir esfuerzos para dar respuesta, como mínimo, a las siguientes preguntas de investigación [10]: P.1 ¿Qué valor del parámetro de la búsqueda local  $2_{opt}$  optimiza el desempeño de la heurística SCA\_2opt\_r?, P.2 ¿Qué efecto tiene en el desempeño de los actuales SCA\_2opt y SCA\_2opt\_r, el emplear buscadores locales  $k_{opt}$ , superiores a  $k=2$ ?, P.3 ¿En el SCA, el hecho de trasladar al viajero hacia la  $k$  ciudad inmediatamente más cercana, con  $k$  superiores a 2, tiene un desempeño diferente a realizarlo de acuerdo a la política actual (segunda ciudad disponible, más cercana)?, de ser así, P.4 ¿cuál  $k$  conlleva al mejor desempeño de la heurística? P.5 ¿Existen otras heurísticas cuyo comportamiento sea viable analizar desde el pensamiento sistémico?, de encontrarse, P.6 ¿qué arquetipos sistémicos subyacen en ellas? Por otra parte, en un manuscrito adicional se presentarán los resultados de comparar los métodos propuestos contra heurísticas y metaheurísticas pero desde la teoría multicriterio, considerando el binomio eficacia – eficiencia ante diferentes escenarios de preferencias.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los profesores de la Escuela de Sistemas de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia: Carlos Jaime Franco, Juan David Velásquez, Luis Fernando Moreno, Santiago Arango e Yris Olaya y, de la Universidad de Antioquia, al profesor Carlos Mario Parra, que con sus conocimientos y experiencia impactaron en aspectos formativos que van desde lo técnico hasta lo actitudinal, fundamentales para trascender en la carrera investigativa y precisar y materializar lo que inicialmente fue una intención de estudio.

## REFERENCIAS

- [1] Dantzig, G., Fulkerson, R. y Johnson, S., 1954. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the operations research society of America*. Vol. 2, N. 4, pp. 393-410.
- [2] Álvarez, R., Corberán A. y Tamarit, J., 1985. La combinatoria poliédrica y el problema del viajante. Aplicación al caso de ciento tres ciudades Españolas. *Qüestió*, Vol. 9, N. 3, Sept, pp.199-213.
- [3] Gardel, P., Gómez, O. y Barán, B., 2004. Estudio del espacio de soluciones del problema del cajero viajante. XXX Conferencia Latinoamericana de Informática – CLEI'2004. Arequipa – Perú. <http://www.clei.cl/nuevaweb/cleiversion/2004/es/Wc6d5de4014020.htm>. Leído el 12 de nov. de 2011.
- [4] Nguyen, H., Yoshihara, I., Yamamori, K. y Yasunaga, M., 2007. Implementation of an effective hybrid GA for large-scale traveling salesman problems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 37, N. 1, pp. 92-99.
- [5] Pérez, J., Jaramillo, P., Parra, C. y Moreno, L., 2010. Tetra-Heurística Sistémica para el TSP. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, mayo-agosto. Árica. Vol. 18, N. 2, pp. 187-202.
- [6] Flood, M., 1956. The Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, Vol. 4, pp. 61–75.
- [7] Cerný, V., 1985. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 45, N. 1, pp. 41-51.
- [8] Ohlmann, J. y Thomas, B., 2007. A Compressed-Annealing Heuristic for the Traveling Salesman Problem with Time Windows. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 19, N. 1, pp. 80-90.
- [9] Dorigo, M. y Gambardella, M., 1995. Ant-q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem. In *Proceedings of the Iwelfth International Conference on Machine Learning*. Tahoe City. CA USA, pp. 252-260.
- [10] Pérez, J., 2011. Heurística inspirada en el análisis sistémico del “Vecino más cercano”, para solucionar instancias simétricas TSP, empleando una base comparativa multicriterio. Tesis para optar al título de Magíster en ingeniería de sistemas. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 130p.
- [11] Senge, P., 1998. La Quinta Disciplina. El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje. Ediciones Granica S.A. Buenos Aires, Argentina, 490p.
- [12] Letelier M., López L., Carrasco, R. y Pérez P., 2005. Competencias sustentables para el desempeño profesional en ingeniería. *Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá*, Vol. 13 N. 2, pp. 91-96.
- [13] Distefano, M., Haarth, R. y Iriarte, E., 2006. Modelación de sistemas tecnológicos en la formación básica de los ingenieros. Congreso TAAE año 2006. Universidad Nacional de Cuyo. Argentina. <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv.php?pid=taae:congreso-2006-1119&dsID=S3G03.pdf>. Leído el 12 de nov. De 2011.
- [14] Bentley, J., 1992. Fast algorithms for geometric traveling salesman problems. *ORSA Journal on computing*, Vol. 4, N. 4, pp. 387-411.
- [15] Marti, R., 2003. Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria. *Matemáticas*. Vol. 1, N. 1, pp. 1-60.
- [16] Reinelt, G., 1991. TSPLIB. A traveling salesman problem library. *ORSA journal on computing*, Vol. 3, N. 4, pp. 376-384.
- [17] Golden, B., Bodin, L., Doyle, T. y Stewart, Jr, W., 1980. Approximate traveling salesman algorithms. *Operations research*, Vol. 28, pp. 694-711.
- [18] Dorigo, M. y Gambardella, M., 1997. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 1, N. 1, pp. 53-66.
- [19] Wang, J., y Wang, W., 2008. Research on ACO with Multiple Nests' Cooperation for Narrow TSP. 978-1-4244-2724-6/08/ © 2008 IEEE, pp. 143-147.

- [20] Velayudhan, P., Hill, R., Hiremath, C., y Soneji, H., 2007. Empirical Analysis of Randomness in Ant Colony Optimization Algorithms Applied to the Traveling Salesman Problem. *International Journal of Information Systems for Logistics and Management*. Vol. 2, N. 2, pp. 69-76.
- [21] Batista, A., Figueiredo, J. y Aloise, D., 2005. Um algoritmo genético com infecção viral para o problema do caixeiro viajante. *Revista Publica*, Vol. 1, N. 1, pp. 16-24.
- [22] Chang, P., Huang, W. y Ting, C., 2009. Dynamic diversity control in genetic algorithm for mining unsearched solution space in TSP problems. *Expert Systems with Applications* Vol. 37, pp. 1863–1878.
- [23] Queiros, J., 2009. Uma implementação paralela híbrida para o problema do caixeiro viajante usando algoritmos genéticos, GRASP e aprendizagem por reforço. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pos - graduação em engenharia elétrica da UFRN. Natal, RN, marco. 73p.
- [24] Sallabi, O. y El-Haddad, Y., 2009. An Improved Genetic Algorithm to Solve the Traveling Salesman Problem. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 52, pp. 471-474.
- [25] Jeong, S., Kim, K., y Lee, Y., 2009. The efficient search method of simulated annealing using fuzzy logic controller. *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 7099–7103.
- [26] Fang, L., Chen, P. y Liu, S., 2007. Particle Swarm Optimization with Simulated Annealing for TSP. *Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases*, Corfu Island, Greece, February 16-19, pp. 206-210.
- [27] Zhong, W., Zhang, J., y Chen, W., 2007. A novel discrete particle swarm optimization to solve traveling salesman problem. 2007 *IEEE Congress on evolutionary computation (CEC 2007)*, pp. 3283-3287.
- [28] He, X., Zhu, Y., Hu, H., y Niu, B., 2006. A New Algorithm for TSP Based on Swarm Intelligence. *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control. and Automation*, June 21 - 23, Dalian, China, pp. 3241-3244.
- [29] Luo, X., Yang, Y. y Li, X., 2008. Solving TSP with Shuffled Frog-Leaping Algorithm. *Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. 978-0-7695-3382-7/08 © 2008 IEEE, pp. 228-232.
- [30] Teodorovic, D., 2008. Swarm intelligence systems for transportation engineering: Principles and applications. *Transportation Research Part C*, Vol. 16, N. 6, pp. 651–667.

**125** AÑOS  
1887 - 2012  
Ingeniería con Trabajo y Rectitud



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS