



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Heurística inspirada en el análisis sistémico del “Vecino más cercano”, para solucionar instancias simétricas TSP, empleando una base comparativa multicriterio

Jorge Iván Pérez Rave

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Sistemas
Medellín, Colombia

2011

Heurística inspirada en el análisis sistémico del “Vecino más cercano”, para solucionar instancias simétricas TSP, empleando una base comparativa multicriterio

Jorge Iván Pérez Rave

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Magíster en Ingeniería de Sistemas

Directora:

Ph.D., Gloria Patricia Jaramillo Álvarez

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Sistemas
Medellín, Colombia

2011

Dedicatoria

A mi abuela (Q.E.P.D) y
a mis padres.

Agradecimientos

Se agradece a los profesores de la Escuela de Sistemas de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia: Ph.D. Gloria Patricia Jaramillo, MSc. Luis Fernando Moreno, Ph.D. Jovani Jiménez Builes, Ph.D. Carlos Jaime Franco, Ph.D. Juan David Velásquez, Ph.D. Yris Olaya y Ph.D. Santiago Arango. De la Universidad de Antioquia, a los profesores: MSc. Carlos Mario Parra (Departamento de Ingeniería Industrial) y Ph.D. Oscar Ortega Lobo (Departamento de Ingeniería de Sistemas). Todos ellos, con sus conocimientos y experiencia impactaron en aspectos formativos que van desde lo conceptual y procedimental hasta lo actitudinal, fundamentales para trascender en la carrera investigativa y precisar y materializar lo que inicialmente fue una intención de estudio.

Resumen

Esta tesis aporta evidencia que respalda al pensamiento sistémico como un pertinente campo de inspiración para el desarrollo de nuevos métodos de optimización heurística. Se delimita el alcance a la resolución del TSP simétrico como referente internacional de prueba que es. Se desarrollaron dos métodos: Sacrificio Cortoplacista Adaptativo 2-opt (SCA_2opt) y una versión mejorada (SCA_2_opt_r), los cuales son fruto del análisis sistémico de la regla vecino más cercano, encontrándole el arquetipo “Soluciones contraproducentes”. El SCA se basa en que el viajero renuncie en un momento dado a una ciudad inmediatamente cercana y se traslade hacia la segunda más cercana disponible, luego, 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 resultan prometedoras en el balance entre eficacia y eficiencia en comparación con las heurísticas: vecino más cercano, Inserción más barata y 2-opt, y con 19 metaheurísticas en las categorías: Colonia de hormigas, Algoritmos genéticos, Enfriamiento simulado y Otras.

Palabras clave: Sacrificio cortoplacista adaptativo, heurísticas, TSP, optimización combinatoria, metaheurísticas, pensamiento sistémico.

Tabla de contenido

Dedicatoria.....	5
Agradecimientos.....	7
Resumen	8
Tabla de contenido.....	9
1. Planteamiento del problema	11
1.1 Justificación.....	11
1.2 Preguntas de investigación	16
1.2.1 General.....	16
1.2.2 Específicas.....	16
1.3 Organización de la tesis.....	17
2. Objetivos.....	19
2.1 General.....	19
2.2 Específicos.....	19
3. Revisión de literatura.....	21
3.1 Identificación del espacio literario relevante bajo un método propuesto de revisión sistemática	21
3.1.1 Introducción.....	21
3.1.2 Método de revisión sistemática propuesto	22
3.1.3 Resultados.....	27
3.1.4 Conclusiones.....	33
3.2 Descripción del la literatura-científica relevante.....	34
3.2.1 A lo largo de la historia (P5):	34
3.2.2 En los últimos cinco años (2006-2010) (P6)	36
3.2.3 Tipos de TSP, métodos y campos de inspiración en los estudios más posicionados a través de la historia y entre 2006-2010 (P7-P9).....	39
3.2.4 Conclusiones y discusión	41
4. Materiales y métodos.....	46
4.1 La regla del vecino más cercano vista desde el pensamiento sistémico.....	46
4.1.1 Introducción en el campo de conocimiento sobre el TSP	46
4.1.2 Revisión de arquetipos y leyes del pensamiento sistémico	46

4.1.3 Análisis de la heurística vecino más cercano para el TSP, bajo una perspectiva de sistemas.....	47
4.2 Diseño y desarrollo del método heurístico a proponer	47
4.3 Localización de los métodos de comparación	47
4.4 Experimentación.....	48
4.4.1 Comparación con heurísticas de construcción y de mejoramiento.....	48
4.4.2 Comparación con metaheurísticas	50
4.5 Comparación con heurísticas y metaheurísticas bajo análisis multicriterio	51
5. Resultados y análisis.....	53
5.1 La regla del vecino más cercano vista desde el pensamiento sistémico.....	53
5.2 Método heurístico a proponer.....	63
5.3 Resultados de la experimentación	73
5.3.1 Comparación con heurísticas de construcción y de mejoramiento.....	73
5.3.2 Comparación con metaheurísticas bajo un método propuesto	89
5.4 Análisis multicriterio	104
5.4.1 Comparación entre heurísticas	106
5.4.2 Comparación entre metaheurísticas.....	111
6. Conclusiones.....	117
7. Desafíos futuros.....	122
Referencias	123
Anexos.....	133
Anexo 1. Código de la heurística vecino más cercano	133
Anexo 2. Código 2_opt incorporado en el SCA.....	135
Anexo 3. Matriz de datos experimentales de heurísticas.....	137

1. Planteamiento del problema

1.1 Justificación

El avance de la optimización combinatoria ha dependido, entre otros, de los esfuerzos por aportar respuestas al “Problema del Vendedor Viajero” o TSP (Traveling Salesman Problem), siendo calificado como una referencia “obligada” para validar los nuevos métodos de resolución de problemas tipo NP-hard (Dantzig, Fulkerson y Jhonson, 1954; Álvarez, Corberán y Tamarit, 1985; Boese, Kahng y Muddu, 1994; Johnson y McGeoch, 1997; Marti, 2003; Gardel, Gómez y Barán, 2004; Nguyen, et al. 2007; Pérez, et al. 2010).

En términos generales, este problema representa un agente para el que se desea responder la siguiente pregunta ¿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? (Flood, 1956).

El TSP merece el calificativo de “problema complejo de resolver”, o en términos científicos “NP-hard” (Lenstra y Rinnooy, 1981), lo que se traduce en la inexistencia de un algoritmo que encuentre la solución en un tiempo polinomial (Papadimitriou, 1977; Marti, 2003); es así que cuando las ciudades a visitar por este viajero se acrecientan, la obtención de la solución óptima, explorando todas las posibilidades en las computadoras actuales, tomaría tanto tiempo que podría representar generaciones humanas. De ahí la necesidad de emplear algoritmos heurísticos o metaheurísticos, buscando un balance entre eficacia y eficiencia, dependiendo de los intereses y necesidades del decisor.

La literatura sobre el TSP, valiendo citar a: Álvarez, Corberán y Tamarit (1985), Laporte (1992), Boese, Kahng y Muddu (1994), Johnson y McGeoch (1997), Marti (2003), Nguyen, et al. (2007) y Pérez, et al. (2010), refleja consenso en que las motivaciones hacia el mismo

se deben, desde el punto de vista teórico, a su sencilla comprensión y formulación, y al reto que representa por su complejidad de resolución y, desde el punto de vista práctico, a que puede aplicarse directamente o como subproblema en casos manufactureros y de servicios.

Para deducir las condiciones actuales y las oportunidades de investigación alrededor del TSP, se realizó una revisión sistemática de literatura. Según Torgerson (2003), la principal diferencia entre este tipo de revisión y la tradicional, es la capacidad para identificar toda la evidencia disponible de una manera sistemática y replicable; además de que es una investigación basada en evidencia, libre de sesgos de inclusión/exclusión de estudios (Oxman y Guyatt, 1993; Kitchenham, 2004, Oermann y Hays, 2011), siendo hoy día el enfoque para construir conocimiento teórico, que más atención ha recibido por parte de la comunidad académica (Shiull, Singer y Sjoberg, 2008).

Los resultados de dicha revisión sistemática, que pueden verse en el capítulo 3, han evidenciado que los esfuerzos de la comunidad científica para aportar respuestas al TSP, a través del desarrollo de métodos de optimización combinatoria, continúan vigentes. Esto debido a que a pesar de los avances en el tema y ante los complejos problemas reales de la sociedad vigente, en campos como electrónica, producción y logística, aún se tienen oportunidades de mejora para los métodos actuales, en cuanto al balance entre eficacia (respuesta arrojada) y eficiencia (tiempo de cómputo), que ameritan más búsqueda por parte de la comunidad académica. Ello puede corroborarse observando la tendencia creciente, de los trabajos académicos en el estudio del TSP, que se plasma en el capítulo 3, figura 4.

Otro aspecto a destacar, fruto de la revisión sistemática, fue el deducir que para avanzar alrededor del estado actual del conocimiento en el TSP, hay tendencia a generar híbridos de los métodos de resolución existentes; en tanto que, para mover las puntas actuales de conocimiento hacia esferas desconocidas, se requiere algo aún más complejo, puesto que su origen amerita introducir nuevos campos de inspiración, que introduzcan 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 (recocido simulado: Cerny, 1985; Ohlmann y Thomas, 2007) y la evolución biológica (algoritmos genéticos: Carter y Ragsdale, 2006; Nguyen, et al. 2007).

Otro reciente campo de inspiración, presente en los estudios más posicionados sobre el TSP, se debe a Dorigo y Gambardella (1995), los cuales, a pesar de que en su momento existían variedad de métodos consolidados, deciden romper paradigmas y emplear, entre otros, su creatividad y saber, introduciéndose en el comportamiento de las hormigas reales y aventurándose a probar, en el TSP, la representación algorítmica del mismo. Esta iniciativa generó una innovación en el ramo, al desarrollarse el actualmente posicionado Sistema de Colonia de Hormigas, que una vez compartido con la comunidad científica, evidenciando resultados más favorables que otros métodos, comienza una corriente de seguidores (Stuetzle y Hoos, 1997; Duan y Yu, 2007), llevándolo hoy día a versiones mejoradas que impactan los campos logísticos, manufactureros, electrónicos, entre otros. Esto ilustra viabilidad y pertinencia de contribuir al avance teórico de la optimización combinatoria y a los problemas organizacionales que de ella se derivan, más aún, considerando los rápidos cambios y desarrollos tecnológicos inmersos en la sociedad vigente.

Dentro de los campos de inspiración que prevalecen en el estudio del TSP, la revisión sistemática de literatura mostró ausencia de una disciplina que en los últimos años 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 (Senge, 2005), siendo por lo mismo demandada como competencia genérica, entre otros, para los profesionales de ingeniería (Ferrer, 1998; Letelier, et al. 2005; Distefano, Haarth, Iriarte, 2006).

Considerando la relación entre optimización clásica y pensamiento sistémico, que en casos puede verse antagónica, debido al contraste entre “ésta es la solución óptima” versus “depende de la perspectiva, interrelaciones, totalidades”, esta tesis pretende estudiar la resolución de problemas de optimización combinatoria, tomando el pensamiento sistémico como un posible nuevo campo de inspiración, empleando la regla de decisión: vecino más cercano, como primer objeto de análisis para validar la pertinencia de esta perspectiva, a través del desarrollo de un nuevo método de resolución. La elección de dicha regla de decisión se debe a que es un método clásico en el TSP y es comúnmente utilizado como inicio de otros algoritmos más robustos (Jünger, Reinelt y Rinaldi, 1995; Liu, 2007), al cual no se le ha dado una interpretación desde las leyes del pensamiento sistémico. Esto puede ser pertinente, debido a que la regla del vecino más cercano es una acción propia del sentido común, que a nivel de algoritmia es destacada por su eficiencia computacional, pero a costa de un notable deterioro en la respuesta arrojada (Bentley, 1992; Marti, 2003). Ello se debe a que dicha regla solo se enfoca en visitar, en cada caso, la ciudad inmediatamente cercana disponible, sin considerar las consecuencias que el agotamiento de las ciudades cercanas disponibles 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 (Senge, 1998), entre ellas: “el camino fácil lleva al mismo lugar”, “la conducta mejora antes de empeorar”, “causa y efecto están distantes en tiempo y en espacio” y “los problemas de hoy provienen de las soluciones de ayer”.

Bajo este contexto, la brecha de conocimiento que se pretende saldar con esta tesis, se ilustra en la figura 1, construida con base en los principales resultados de la revisión sistemática de literatura (capítulo 3).

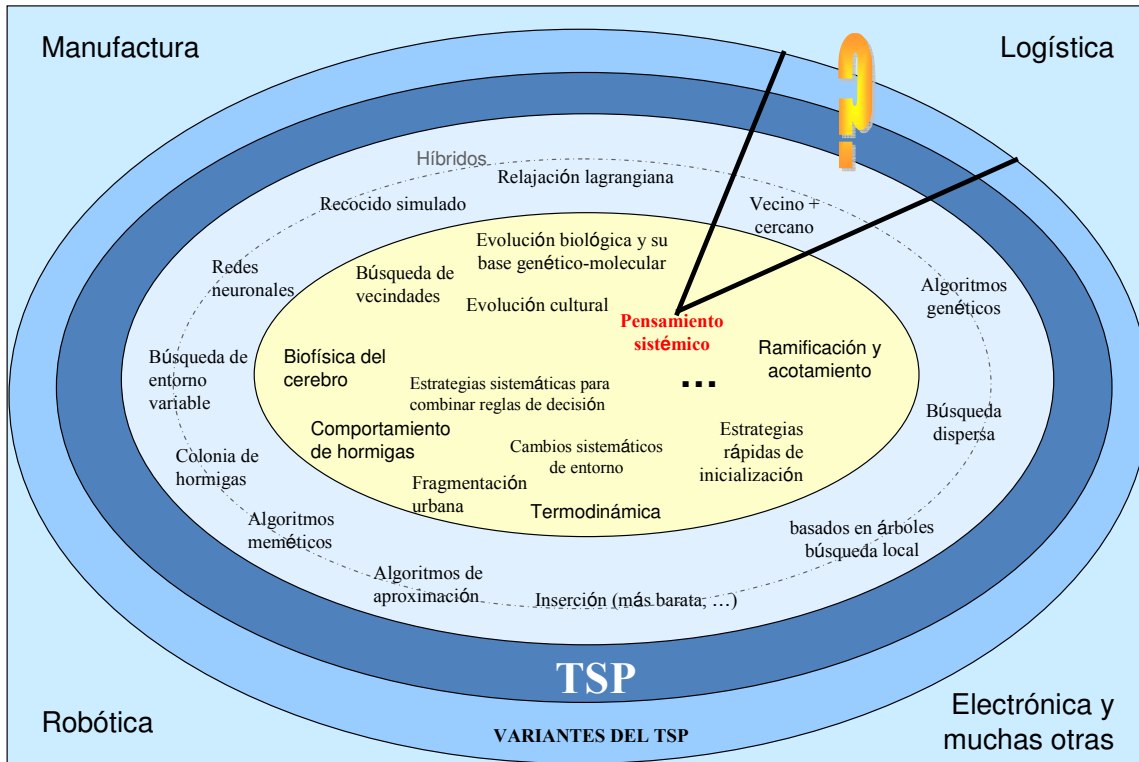


Figura 1. Representación de la brecha de conocimiento. Fuente: elaboración propia.

La figura 1 tiene en el centro aquellos elementos que han movido las puntas actuales de conocimiento sobre el TSP. Estos se constituyen en los campos de inspiración para el avance en la optimización combinatoria. Así, por ejemplo, primero viene el campo de inspiración, que trata de incorporarse en forma de método de resolución (siguiente franja desde el centro hasta el exterior), luego se prueba en el TSP como referente clásico y si tiene éxito trasciende hacia diversos campos organizacionales y, además, comienza el auge de generar híbridos con otros métodos existentes. Por ejemplo, considere al campo de inspiración en el comportamiento de las hormigas, que ha dado lugar al método de optimización Colonia de hormigas. Este fue probado inicialmente en el TSP y, evidenciando su favorable desempeño en comparación con otros métodos, hoy se ha aplicado a otro tipo de problemas de la optimización combinatoria y ha dado lugar a híbridos incorporando otros métodos existentes. Esta tesis, entonces, ubica al pensamiento sistémico, delimitando a las recomendaciones y leyes de la quinta disciplina, como posible

campo de inspiración. Puede verse en la figura 1, que se iniciará analizando el vecino más cercano, surgiendo el interrogante de si esta estrategia investigativa permite generar conocimiento novedoso y útil para la comunidad académica y empresarial.

Delimitando aún más el trabajo, esta tesis se enfoca tanto en instancias simples y complejas del TSP simétrico, en el cual los arcos presentan distancias euclidianas entre nodos i, j , ($d(i,j) = d(j,i)$) (Gardel, Gómez y Barán, 2004).

Para contribuir a la apropiación de conocimiento socialmente útil, se busca que la heurística a desarrollar sea viable de emplearse en las PYMES, por ello, teniendo presente las dificultades de estas empresas para desarrollar algoritmos, comprar software y contar con personal calificado en estos temas (Soto, 2004), la plataforma Visual Basic con Macros de Excel se ha elegido como el entorno de programación más indicado. Esto debido a la presencia de elementos básicos del office (Excel, Word, Power Point) en estas empresas.

1.2 Preguntas de investigación

1.2.1 General

¿Un algoritmo heurístico inspirado en el análisis sistémico del “Vecino más cercano”, es capaz de arrojar soluciones efectivas para instancias simétricas TSP, tomando como base comparativa de carácter multicriterio, heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales?

1.2.2 Específicas

Recurriendo a los aportes de Fantova (2003) y Morgan (1990) para el término sistematización, la anterior pregunta es viable estructurarla en sus componentes relevantes, para facilitar el estudio de los fenómenos o experiencias que subyacen en ella, redundando

en la producción de conocimiento. Por ello, bajo el conocimiento del autor, la anterior pregunta de investigación se ha sistematizado en cuatro específicas, que juntas forman un todo:

¿Qué estructuras sistémicas siguen las soluciones arrojadas por la heurística “Vecino más cercano” para instancias del TSP simétrico?

¿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?

¿Cuál es la eficacia y la eficiencia computacional del algoritmo desarrollado, en comparación con heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales, bajo pruebas con instancias de diferentes tamaños del TSP simétrico?

¿Qué posición que ocupa el algoritmo desarrollado respecto a heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales, bajo análisis multicriterio con factores: eficacia y eficiencia?

1.3 Organización de la tesis

Ya expuesto el planteamiento del problema, en el capítulo 2 de esta tesis se ofrecen los objetivos. El capítulo 3 expone la revisión de literatura empleando un procedimiento de revisión sistemática extrapolado desde los campos de la salud y de recientes aproximaciones a la ingeniería de software. El capítulo 4 trata los materiales y métodos seguidos para cumplir con los objetivos de la tesis y, en consecuencia, saldar las preguntas de investigación. El capítulo 5 se enfoca en los resultados y discusión de los mismos, el capítulo 6 contiene el recuento general de las principales conclusiones arrojadas por esta

tesis. Luego, en el capítulo 7 se comparte con la comunidad académica una serie de desafíos futuros, enmarcados en seis preguntas de investigación, abiertas a la fecha como resultado de esta tesis. Finalmente se presenta la referenciación bibliográfica y, seguido, los anexos pertinentes.

2. Objetivos

Consecuentes con las preguntas de investigación, los objetivos de la tesis se formulan de tal manera que deban brindar respuesta a cada una de ellas, así:

2.1 General

Construir un algoritmo heurístico inspirado en el análisis sistémico del “Vecino más cercano”, capaz de arrojar soluciones efectivas para instancias simétricas TSP, tomando como base comparativa de carácter multicriterio, heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales.

2.2 Específicos

Identificar las posibles estructuras sistémicas que siguen las soluciones arrojadas por la heurística “Vecino más cercano” para el TSP simétrico.

Identificar 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.

Estimar la eficacia y la eficiencia computacional del algoritmo desarrollado, en comparación con heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales, bajo pruebas con instancias de diferentes tamaños del TSP simétrico.

Determinar la posición que ocupa el algoritmo desarrollado respecto a heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales, bajo análisis multicriterio con factores: eficacia y eficiencia.

3. Revisión de literatura

3.1 Identificación del espacio literario relevante bajo un método propuesto de revisión sistemática

3.1.1 Introducción

Este apartado tiene como objetivo identificar el espacio literario que reúne el estado actual y los avances en dicho campo de conocimiento, pero bajo un método propuesto, aporte indirecto de esta tesis, soportado en revisión sistemática, extrapolado desde los campos de la salud (Davis, et al. 1995; Staples y Niazi, 2007) y desde algunas recientes experiencias en ingeniería de software (Staples y Niazi, 2007; Kitchenham, et al. 2009). La revisión sistemática de literatura tiene la capacidad de identificar toda la evidencia disponible de una manera sistemática y replicable (Torgerson, 2003). Es una investigación basada en evidencia, libre de sesgos de inclusión/exclusión de estudios (Oxman y Guyatt 1993; Kitchenham, 2004, Oermann y Hays 2011) y hoy día es el enfoque para construir conocimiento teórico, que más atención ha recibido por parte de la comunidad académica (Shiull, Singer y Sjoberg 2008).

Sobre este tipo de revisión, se resalta que de los 17.898 documentos encontrados en Scopus®, considerando el año del primer reporte (1.954) hasta el 15-02-2011, bajo el término “systematic review” (delimitado al título), sólo el 1,2% pertenece a las áreas: ingeniería, ciencias de la computación y ciencias de la decisión, mientras no más que el campo de la medicina arroja 15.682 documentos (87,6%). Esto deduce oportunidades de hacer contribuciones significativas y novedosas hacia otras disciplinas.

El procedimiento a proponer se apoya en el método científico, posibilitando

reproducibilidad en cualquier otro ámbito y escala temporal, así como trascender la tradicional búsqueda informal para descubrir las fuentes del conocimiento en auge, eliminando inexactitud en la extracción del “saber” determinante y, además, propiciando eficiencia a los investigadores o estudiantes en formación. El despliegue de este método provee un espacio literario que no puede dejar de lado ningún investigador atraído hacia el TSP, y con ello, se espera servir de base para el desarrollo de nuevos proyectos de investigación, bien sea tratando el TSP como eje central o como subproblema, en los ámbitos de pregrado, maestría y doctorado.

Así, bajo el método a exponer en este apartado, se busca responder al siguiente interrogante: ¿Cuál es el espacio literario que reúne el estado actual y los avances en el TSP?

Dicha pregunta puede sistematizarse a través de las siguientes:

P.1 ¿Qué tan importante continúa siendo el estudio del TSP?

P.2 ¿Cuáles son los estudios que tratan el TSP como eje central, más posicionados en la comunidad académica a lo largo de la historia? (TOP 10)

P.3 ¿Cuáles son las publicaciones sobre el TSP como eje central, que actualmente (2006-2010) marcan los avances en el tema? (TOP 10)

P.4 ¿Qué tanto, el espacio literario identificado bajo el método propuesto, representa al conjunto de estudios más posicionados sobre el TSP?

3.1.2 Método de revisión sistemática propuesto

El procedimiento empleado para responder a las preguntas de investigación expuestas consta de seis etapas, empleando, como materiales e insumos, información proveniente de la base de datos www.scopus.com, la cual es considerada como uno de los principales

navegadores científicos de la Web (Codina, 2005). En la figura 2 se muestran las etapas que conforman el método propuesto.

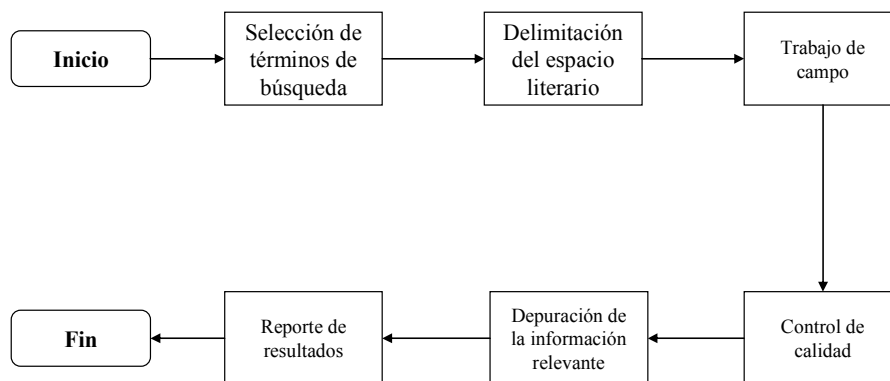


Figura 2. Etapas del método propuesto de revisión sistemática

A continuación, se presenta el detalle procedimental de cada una de las etapas:

Etapa 1. Selección de los términos de búsqueda: se inició con el reconocimiento del tema, explorando en buscadores típicos como www.scholar.google.com algunas palabras relacionadas con el TSP; esto abordó la consulta de diversos artículos en los campos: palabras clave y referencias. Igualmente, se recurrió al campo de “Keywords” del Scopus® como recurso de apoyo. Como producto de esta fase inicial de identificación, los términos “traveling salesman problem”, “travelling salesman problem”, “traveling salesperson problem” y “travelling salesperson problem”, se consideraron lo suficientemente “blindados” a temas que no tuviesen que ver con el interés del equipo de investigación.

Etapa 2. Delimitación del espacio de búsqueda: basados en el potencial de los mapas mentales, se construyó un mapa de delimitación del espacio de búsqueda, que incorpora, bajo una estructura de orden lógico, lo siguiente: tipos de documentos, términos de búsqueda, áreas abordadas, lugares de búsqueda, periodos de análisis y preguntas de investigación. Dicho mapa se expone en la figura 3.

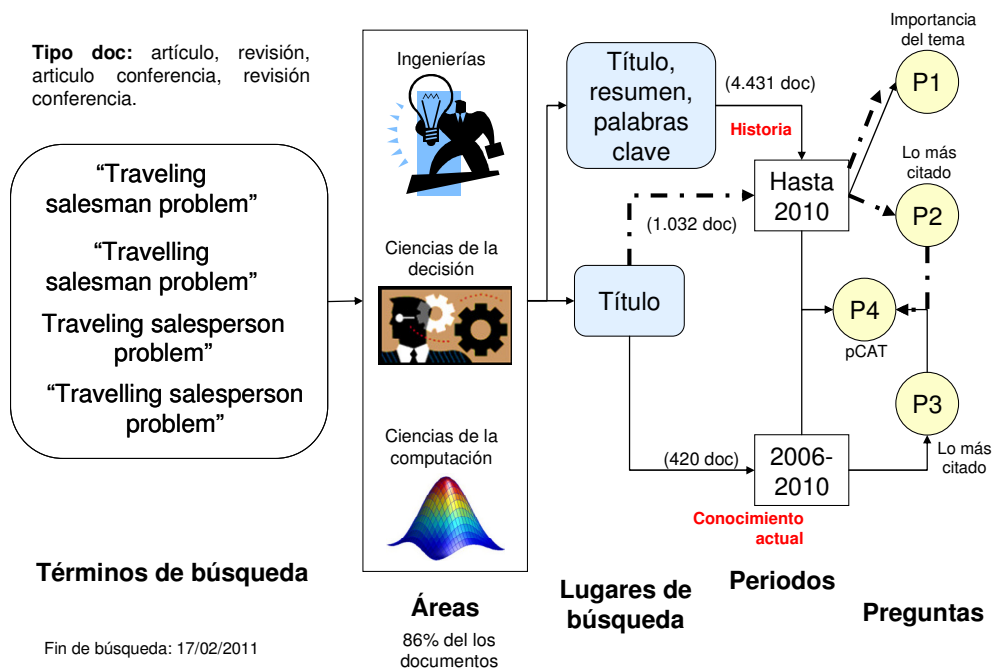


Figura 3. Mapa de delimitación del espacio de búsqueda.

Como se observa en la figura 3, se contemplaron los cuatro términos, propios del TSP, seleccionados en la etapa 1. Además, procurando considerar la mayor parte del espacio literario, la búsqueda se enfocó en: artículos, revisiones de tema, publicaciones de conferencias y revisiones producto de conferencias. Este espacio luego fue delimitado a las áreas más relacionadas con la investigación de operaciones, que forman parte del TOP 5 que más presenta documentación sobre el tema: Ingenierías, Ciencias de la computación y Ciencias de la decisión. También, se incorporaron dos lugares de búsqueda, por separado, el primero correspondió a la triada título-resumen-palabras_clave, el cual permite encontrar documentos donde el TSP es tratado bien sea como eje central de la publicación o como subproblema, el segundo fue delimitado solo al título, a fin de garantizar que el TSP fuese eje central del trabajo realizado. Además de lo anterior, el espacio de búsqueda se restringió a dos periodos; el primero fue desde el reporte del primer documento en Scopus® (bajo los términos de búsqueda), hasta el 2010 y, el segundo, considerando los lapsos de vigencia de los estados del arte, se enfocó en 2006-2010.

Etapa 3. Trabajo de campo: bajo el mencionado algoritmo de búsqueda, las tres áreas elegidas representaron en promedio el 86% de la población de documentos. El corte de la búsqueda fue hecho al 17 de febrero de 2011. A continuación, para cada pregunta de investigación, se comenta su importancia y se detalla la búsqueda realizada: P1 es importante para identificar con evidencia objetiva, qué tanto el tema escogido, en este caso el TSP, goza de vigencia en el ámbito científico. Por lo que el análisis comprendió el comportamiento histórico de las publicaciones sobre el TSP desde que se encontró el primer documento en la base de datos hasta el 2010, tanto a nivel de la triada título-resumen-palabras_clave (4.431 documentos), como siendo eje central del trabajo (sólo en título: 1.032 documentos). Para P.2 se siguió el algoritmo anterior, pero sólo se consideraron publicaciones donde el TSP fuese eje central (exclusivo al título), como se observa en la figura 3; la importancia de esta pregunta radica en la necesidad de dar a conocer al investigador o estudiante, las fuentes que sin restricción de tiempo de inicio hasta la fecha (2010), esperando que algunas de ellas sean antiguas, aún están posicionadas en la comunidad científica, inspirando nuevos avances en el TSP. En otras palabras, podrían representar presuposiciones consideradas hoy día como verdaderas, que han prevalecido a través del tiempo, además de conocer de primera mano los orígenes y bases del tema. Producto de esta búsqueda, se extrajeron los 10 documentos que más han sido citados por la comunidad científica, caracterizados según: jerarquía, título, autor(es), año de publicación, revista, tipo de documento y número de citas. P.3 es fundamental para que el interesado en el TSP conozca el espacio literario que actualmente marca los avances en dicho tema, los cuales se han realizado sobre la base actual de la tecnología y de otras dimensiones de la sociedad vigente. En estas fuentes subyace el saber referente al estado del arte, con tradicional actualización cada cinco años. Fruto de esta búsqueda, se extrajo el TOP 10 de los artículos que más han sido citados por la comunidad científica, caracterizados según: jerarquía, título, autor(es), año de publicación, revista, tipo de documento y citas. P4 es importante para obtener evidencia cuantitativa sobre qué tanto el espacio literario identificado representan lo “poco vital”, para lo cual se propuso una medida basada en proporciones, que en este estudio ha sido denominada *pCAT* (Porcentaje de Citaciones Atribuidas al TOP). Los insumos empleados para calcular dicho

porcentaje ameritaron la extracción y tabulación, una por una, del número de citas atribuido a cada registro de la población de documentos.

Etapa 4. Control de calidad de la información: a fin de garantizar el “blindaje” de las preguntas de búsqueda elegidas y la pertinencia de los espacios de búsqueda, se llevó a cabo una exploración de control de calidad. En esta, de manera aleatoria, cada vez que se ejecutaba un espacio de búsqueda determinado, se verificaba el título y el resumen del 10% de los documentos arrojados, a fin de garantizar que se trataba del objeto de interés. Además de ello, todos los documentos incluidos en los TOP fueron revisados en cuanto a la pertinencia del tema. En caso de encontrar algún resultado que no correspondiese, se actualizarían las variables respuesta observadas y se incrementaría la muestra a 30%. Luego de verificar el título y resumen de 123 documentos (10% de 1.032 más 20 de los TOP), en la primera prueba todos se referían al tema objeto de estudio, no siendo necesario llegar al 30% de cada espacio de búsqueda, lo cual refuerza la pertinencia de los términos de búsqueda seleccionados en la etapa 1.

En caso de que en la primera etapa no sea posible obtener términos de búsqueda lo suficientemente específicos y exclusivos para un tema determinado, se recomienda seguir un muestreo con más profundidad. Como ejemplo de un término de búsqueda no adecuado, considere que está interesado en identificar el espacio literario relevante sobre la calidad del servicio, pero bajo el enfoque de percepciones y/o expectativas del cliente. Un término que podría considerarse es “quality of service”, pero no sería correcto, ya que no es exclusivo para el tema de interés; esto se debe a que dicho término se asocia comúnmente a “QoS”, bajo un enfoque hacia indicadores “duros”, propios del conjunto de tecnologías que garantizan la continuidad en la transmisión de información en un tiempo dado.

Etapa 5. Depuración de la información relevante: se procedió a extraer las referencias y demás información necesaria para dar respuestas concretas a cada una de las preguntas de investigación. Para ello, todas las tabulaciones se realizaron en Excel, aprovechando

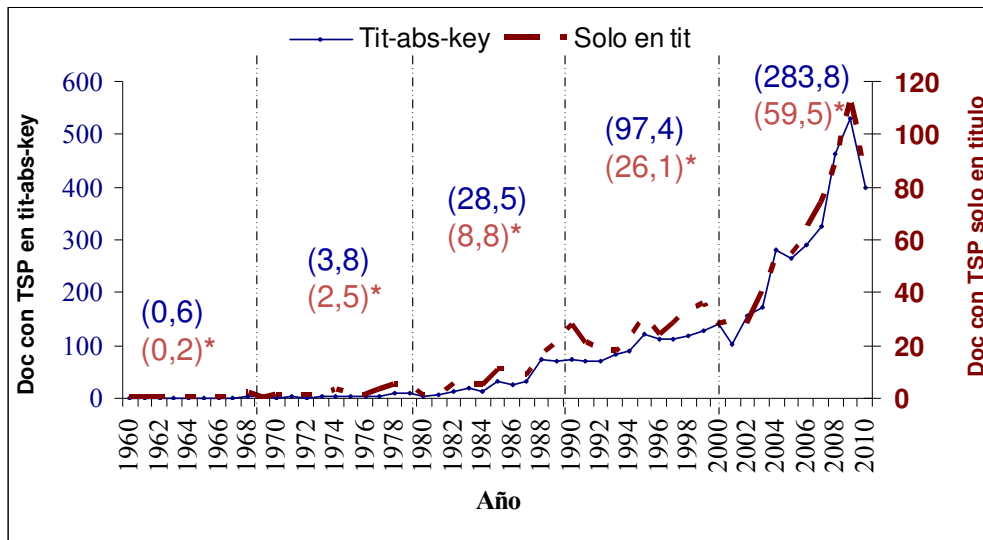
además para el TOP de artículos, la opción de generar bibliografía, incorporada en Scopus®.

Etapa 6. Reporte de resultados: se generó una gráfica de tendencias para apoyar el análisis y responder P1, para P2 y P3 se construyeron tablas en Excel, incorporando diversos campos de caracterización y, para saldar P4, también en forma de tabla, se registraron los resultados del pCAT.

3.1.3 Resultados

P1. ¿Qué tan importante continúa siendo el estudio del TSP?

Entre 1960-2010, al corte de la consulta en Scopus® (17/02/2011) se encontraron 4.431 publicaciones que cumplen con los criterios de la búsqueda en título-resumen-palabras_clave y, dando exclusividad solo al título, la población de documentos encontrada fue de 1.032. En la figura 4 se muestra la tendencia de publicación sobre el tema, permitiendo deducir la importancia y el auge que el TSP viene tomando en la comunidad académica, presentando una tendencia creciente en el número de publicaciones desde la década del 60', con un promedio de 0,6 documentos hasta 1969 y de 283,8 en la última década.



(,): promedio artículos/año con TSP en título, abstract y keywords

(,)*: promedio artículos/año con TSP sólo en título

Figura 4. Publicación de artículos sobre el TSP a nivel general y como eje central

Este comportamiento también se nota respecto al TSP como eje principal, puesto que delimitando el espacio sólo al título, en la figura 4 se muestra un promedio de 0,2 publicaciones hasta 1969, en comparación con 59,5 en el último decenio. Cabe destacar el incremento de publicaciones que se vivió en el 2009, enfatizando para la búsqueda solo en título, la cual pasó drásticamente de un promedio de 81 documentos, considerando los dos años anteriores (2007 y 2008), a 112 publicaciones, regresando luego en el año 2010 a 84 trabajos. Todo lo anterior representa evidencia objetiva de que el TSP es un campo de investigación vigente.

P2. ¿Cuáles son los estudios que tratan el TSP como eje central, más posicionados en la comunidad académica a lo largo de la historia? (TOP 10)

Como se muestra en la tabla 1, el TOP lo encabeza Dorigo y Gambardella, (1997), con un artículo de 1997 (1.946 citaciones), el cual aborda el TSP introduciendo el Sistema de Colonia de Hormigas.

Tabla 1. TOP 10 de publicaciones del TSP como eje central, más citadas en la historia

Pos	Título	Autor(es)	Año	Revista	Tipo	Citas
1	Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem	Dorigo, M., Gambardella, L.	1997	IEEE Transactions on Evolutionary Computation	Article	1.946
2	Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm	Cerný, V.	1985	Journal of Optimization Theory and Applications	Article	635
3	TSPLIB. A traveling salesman problem library	Reinelt, G.	1991	ORSA journal on computing	Article	443
4	The traveling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II	Held, M., Karp, R.	1971	Mathematical Programming	Article	161
5	MAX-MIN Ant System and local search for the traveling salesman problem	Stuetzle, T., Hoos, H.	1997	Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC	Conference Paper	154
6	Fast algorithms for geometric traveling salesman problems	Bentley, J.	1992	ORSA journal on computing	Article	128
7	Self-organizing feature maps and the travelling salesman problem	Angéniol, B., de La Croix V., Le Texier, J.	1988	Neural Networks	Article	107
8	The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms	Laporte, G.	1992	European Journal of Operational Research	Article	98
9	Applying evolutionary programming to selected traveling salesman problems	Fogel, D.	1993	Cybernetics and Systems	Article	97
10	Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators	Larrañaga, P., Kuijpers, C., Murga, R., Inza, I., Dizdarevic, S.	1999	Artificial Intelligence Review	Article	96

El segundo lugar lo ocupa un artículo de Cerný (1985), que desde el campo termodinámico enfoca el TSP (635 citas), y a quien se le atribuye como uno de los proponentes del Recocido simulado. En tercer lugar se presenta la librería del TSP, publicada por Reinelt (1991), que reúne variedad de instancias que han servido de insumos para pruebas con nuevos desarrollos (443 citas). La fuente que cierra este TOP, bajo la autoría de Larrañaga, et al. (1999) (96 citas), hace una revisión de los diversos intentos de resolver el TSP con Algoritmos genéticos, presentando operadores de cruce y de mutación con diferentes representaciones. Entre las 10 publicaciones más reconocidas, un artículo de conferencia ocupa el quinto lugar, de autores Stuetzle y Hoos (1997), (154 citas), quienes proponen una variante del sistema de colonia de hormigas, incorporando Max-Min.

A pesar de encontrar trabajos en el TOP 10, que van desde 1971 hasta 1999, no necesariamente los más antiguos son los más citados, lo que refleja el factor contribución, como una de las principales fuentes de diferenciación.

P.3 ¿Cuáles son las publicaciones sobre el TSP como eje central, que actualmente (2006-2010) marcan los avances en el tema? (TOP 10)

Como se expone en la tabla 2, este listado lo encabeza una publicación tipo revisión sobre el múltiple vendedor viajero, una extensión del TSP clásico (48 citaciones); dicho estudio fue realizado por Bektas (2006), perteneciente al Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Baskent en Turkía y publicado en la revista Omega. La posición número 10 está asignada a Duan y Yu (2007), (13 citaciones) quienes aportan un artículo de conferencia, en el que combinan Colonia de Hormigas con Algoritmos meméticos para aportar a la resolución del TSP.

Tabla 2. TOP 10 de publicaciones del TSP como eje central, más citadas entre 2006-2010

Pos	Título	Autor(es)	Año	Revista	Tipo	Citas
1	The multiple traveling salesman problem: An overview of formulations and solution procedures	Bektas, T.	2006	Omega	Review	48
2	A random-key genetic algorithm for the generalized traveling salesman problem	Snyder, L., Daskin, M.	2006	European Journal of Operational Research	Article	46
3	Implementation of an effective hybrid GA for large-scale traveling salesman problems	Nguyen, H., Yoshihara, I., Yamamori, K., Yasunaga, M.	2007	IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics	Article	32
4	A hybrid scatter search for the probabilistic traveling salesman problem	Liu, Y.	2007	Computers and Operations Research	Article	23
5	A new approach to solving the multiple traveling salesperson problem using genetic algorithms	Carter, A., Ragsdale, C.	2006	European Journal of Operational Research	Article	21
6	Variable neighborhood search for the pickup and delivery traveling salesman problem with LIFO loading	Carrabs, F., Cordeau, J., Laporte, G.	2007	INFORMS Journal on Computing	Article	18
7	A Compressed-Annealing Heuristic for the Traveling Salesman Problem with Time Windows	Ohlmann, J., Thomas, B.	2007	INFORMS Journal on Computing	Article	16
8	Aggregation for the probabilistic traveling salesman problem	Campbell, A.	2006	Computers and Operations Research	Article	15
9	Traveling salesperson problems for the Dubins vehicle	Savla, K., Frazzoli, E., Bullo, F.	2008	IEEE Transactions on Automatic Control	Article	14
10	Hybrid ant colony optimization using memetic algorithm for traveling salesman problem	Duan, H., Yu, X.	2007	Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Approximate Dynamic Programming and Reinforcement Learning, ADPRL 2007	Conference Paper	13

Para efectos de benchmarking, a continuación, en el orden de posición expuesto en la tabla 2, se nombran las instituciones de afiliación de los demás autores del TOP 10, arrojadas por el Scopus®: Pos 2: *Lehigh University* (Estados Unidos), Pos 3: *University of Miyazaki*, (Japón) - *University of Tsukuba* (Japón), Pos 4: *National Chi Nan University No. 1* (Taiwán), Pos 5: *Radford University* (Estados Unidos), *Pamplin College of Business* (Estados Unidos), Pos 6: *Università di Salerno* (Italia), *Center for Research on Transportation, HEC Montréal* (Canadá), Pos 7: *University of Iowa* (Estados Unidos), Pos 7: *University of Iowa* (Estados Unidos), Pos 9: *Massachusetts Institute of Technology* (Estados Unidos), Pos 10: *Beihang University* (China), *Chinese Academy of Sciences* (China).

P.4 ¿Qué tanto, el espacio literario identificado bajo el método propuesto, representa al conjunto de estudios más posicionados sobre el TSP?

En la tabla 3 se responde a esta pregunta, ilustrando el cálculo y el resultado del pCAT (porcentaje de citas atribuidas al TOP), para cada uno de los espacios literarios abordados.

Tabla 3. Representatividad del espacio literario identificado

Espacio literario	Población de documentos	Número de documentos en los TOP	Porcentaje de documentos en los TOP	Población de citas	Número de citas en los TOP	pCAT
Entre 2006-2010	420	10	<u>2,4%</u>	802	246	<u>31%</u>
A través de la historia (1968-2010)	1.032	10	<u>1,0%</u>	6.075	3.865	<u>64%</u>
Total documentos (1968-2010)	1.032*	20	<u>1,9%</u>	6.075**	4.111***	<u>68%</u>

*Incluye los 420 documentos de 2006-2010; **contiene las 802 citas de 2006-2010.

*** Es la suma de las citas de cada TOP, ya que son mutuamente excluyentes.

Como puede verse en la tabla 3, el TOP 10 de los estudios sobre el TSP como eje central, más citados a lo largo de la historia, representa solo el 1% del total de documentos, pero a él se le atribuye el 64% de las citas dadas por la comunidad académica. Con relación al 2006-2010, los documentos que conforman el TOP representan el 2,4% del total de publicaciones y reúnen el 31% de las citas. A nivel global, considerando el periodo desde el reporte del primer documento, en Scopus®, sobre el TSP como eje central (año 1968) hasta 2010, los 20 documentos que conforman los TOP de interés (1,9% de la población), representan el 68% de las citas dadas por la comunidad científica para este tema, como eje central. El incremento al 68% se debe a que las 802 citas entre 2006-2010 ya están contadas en las 6.075 que se deben a 1.968-2.010, pero las 3.865 citas y las 246 son mutuamente excluyentes, puesto que pertenecen en exclusiva a los documentos de los TOP, todos ellos diferentes.

3.1.4 Conclusiones

Se presenta una contextualización del TSP, que comenta de manera general su clásica definición, importancia y aplicaciones. Esto con el fin de orientar al lector que inicia su interés en el TSP como posible campo de investigación, bien sea a nivel de pregrado o posgrado. Este refuerzo también es útil como material de apoyo para estudiantes de cursos introductorios a la optimización combinatoria, dado que el TSP constituye uno de los problemas más relevantes, estudiados y aún vigentes en este ramo. Luego de contextualizar en el tema, el trabajo enfatiza en la necesidad de orientar al estudiante o investigador que va a profundizar en el estudio del TSP, de modo que identifique con criterios de eficiencia, objetividad y reproducibilidad procedimental, el espacio de búsqueda más pertinente sobre el tema, descartando información que no está debidamente posicionada en la comunidad científica y, que por tanto, desvía de las fuentes en las que subyacen las puntas del conocimiento que permanece vigente. Para ello, se expone, siguiendo la línea de la revisión sistemática de literatura, un procedimiento reproducible en cualquier otro ámbito o espacio temporal, que ofrece mayores garantías que la tradicional búsqueda informal de literatura, en el sentido del acceso a información de calidad, oportuna para el momento, pertinente para el campo de estudio y debidamente aceptada y posicionada en la comunidad científica. En ese sentido, el procedimiento propuesto en este artículo, el cual fue extrapolado básicamente desde los campos de la salud, muestra en su primer caso de aplicación, que con solo el 1,9% de la población de los estudios que tratan el TSP como eje central, se abordó el 68% del total de citas que la comunidad científica ha dado a dicho tema, lo cual aporta primeras evidencias empíricas del nivel de efectividad que se le atribuye.

En términos específicos, la aplicación del método propuesto destaca un espacio literario sobre el TSP, que lleva a conocer la importancia actual del tema de estudio, y luego, llega a la literatura más posicionada a través del tiempo y entre 2006-2010. La aplicación del método expuesto en este artículo, posibilita que los estudiantes e investigadores interesados en el TSP, con una vigencia que podría considerar los próximos cinco años, se introduzcan de una vez en la lectura y en el análisis del “saber” científico más posicionado sobre el

TSP, acorde a los criterios de búsqueda. Ello, con el fin de ganar eficiencia y tener garantías de que la información a la que se está llegando goza de la calidad y del reconocimiento y aceptación por parte de la comunidad académica. Del mismo modo, las preguntas de investigación saldadas constituyen opciones interesantes que, entre otras, no deberían faltar en actos de defensas de tesis de pregrado o posgrado en el tema.

3.2 Descripción de la literatura-científica relevante

A continuación se profundiza en el espacio literario-científico relevante sobre el TSP, específicamente buscando responder a preguntas emergentes del apartado anterior:

(P.5) ¿De qué trata el Top 10 de las publicaciones más citadas a lo largo de la historia, que abordan como eje central el TSP?, (P.6) ¿de qué trata el Top 10 de las publicaciones que actualmente (2006-2010) marcan los avances en el estudio del TSP como eje central?, (P.7) ¿qué tipos de TSP han sido abordados en los estudios más posicionados sobre el tema a través de la historia y entre 2006-2010?, (P.8) ¿qué métodos de resolución han sido empleados en los estudios más posicionados sobre el TSP? Y (P.9) ¿qué campos han inspirado los métodos de resolución empleados en los estudios más posicionados sobre el TSP?

3.2.1 A lo largo de la historia (P5):

Held y Karp (1971) exponen un procedimiento, tipo ramificación y acotamiento, el cual parte del estudio de la relación entre el TSP y el problema de árbol de mínima expansión. Junto con un primer estudio en 1970, este segundo trabajo introduce la relajación

lagrangiana y fue probada en instancias de hasta 64 ciudades. Cerny (1985) propone la resolución de problemas de optimización combinatoria a través de una analogía con el campo de la termodinámica, lo cual es probado en el TSP, generando aleatoriamente permutaciones de las estaciones del viajero con una probabilidad en función del tamaño de la ruta. Este trabajo, no atribuyéndosele como único proponente, introduce el actualmente denominado, Recocido simulado, obteniendo resultados satisfactorios en varios ejemplos de hasta 200 ciudades, donde en casos se acercan al óptimo y en otros, lo haya.

Angeniol, et al. (1988) presenta un algoritmo para abordar el TSP, el cual está basado en los mapas autoorganizados de Kohonen. Esta red neuronal es probada en instancias de hasta 1000 ciudades, encontrando resultados satisfactorios en un tiempo computacional razonable (20 minutos). Por otra parte, Laporte (1991) expone una recopilación de algunos de los principales algoritmos exactos y aproximados para el TSP. Entre los algoritmos exactos trata aquellos basados en la formulación de programación lineal entera y en árboles generadores. Entre los algoritmos de aproximación, trata heurísticas de construcción como el vecino más Cercano o como las inserciones (más cercana, más barata,...), también heurísticas de mejoramiento, como el k-opt y finalmente, heurísticas combinadas. Reinelt (1991) comparte con la comunidad la librería TSP (TSPLIB), exponiéndola como una colección de problemas del agente viajero, cuyo fin es proporcionar a los investigadores de todo el mundo, una amplia gama de instancias TSP de diversas fuentes y propiedades, agregando para cada problema su descripción y límites, y haciendo además, referencia a las pruebas de cómputo realizadas para algunos de los problemas.

Bentley (1992) analiza diversos métodos rápidos de resolución del TSP, entre ellos: vecino más cercano, inserción más lejana, heurísticas basadas en árboles y optimizadores locales (2-opt, 2H-opt, 3-opt). Los implementa y los compara computacionalmente a nivel de: eficiencia, robustez y la función que siguen. Los tres optimizadores locales son incorporados en los demás métodos, a fin de analizar sus comportamientos. Destaca la eficiencia práctica de: vecino más cercano, múltiples fragmentos, partición recursiva rápida y, de incorporar 2-opt y 2H-opt en múltiples fragmentos, los cuales son probados en una

instancia de un millón de ciudades. Fogel (1993) destaca la inspiración en la evolución natural para el diseño de algoritmos de optimización de búsqueda estocástica, entre ellos, la programación evolutiva. Ésta, la prueba en diversas instancias del TSP, obteniendo en tres de los casos (30, 50 y 75 ciudades), resultados iguales o mejores que los reportados en ese entonces; en otro de los casos, conformado por 1000 ciudades, la solución supera en un 5% al óptimo esperado. Dorigo y Gambardella (1997) introducen el Sistema de Colonia de Hormigas (ACS por sus siglas en inglés) y lo prueban para solucionar instancias TSP. En este trabajo muestran que ACS supera a otros algoritmos inspirados en la naturaleza, como Recocido simulado, Algoritmos genéticos y Programación evolutiva (compara con resultados, entre otros, de Fogel, 1993). Además, prueban una versión aumentada del ACS con un procedimiento de búsqueda local 3-opt, arrojando resultados satisfactorios en el TSP.

Stuetzle y Hoos (1997) introducen el Sistema de Hormigas Max-Min, una extensión que mejora la estructura básica del ACS, la cual es probada en TSP de hasta 783 ciudades; igualmente, muestran que el método propuesto puede ser mejorado con un procedimiento de búsqueda local tipo k-opt, orientando dicha búsqueda hacia regiones prometedoras mediante la generación de buenos recorridos iniciales. Larrañaga, et al. (1999) hacen una revisión de los diferentes intentos para resolver el TSP con Algoritmos genéticos. Presentan operadores de cruce y de mutación con diferentes representaciones, entre ellas: binaria, ordinal, adyacencia y matricial. Los autores también comparan la efectividad de los operadores, empleando un algoritmo genético apoyado en principios del GENITOR (Whitley, Starkweather y Fuquay 1989), probando hasta para 48 ciudades.

3.2.2 En los últimos cinco años (2006-2010) (P6)

Bektas (2006) presenta una revisión del m-TSP (Multiple Traveling Salesman Problem), el cual consta de $m > 1$ vendedores para visitar $n > m$ locaciones, las cuales deben ser visitadas una sola vez, minimizando el recorrido o coste total. Trata la definición, formulaciones,

aplicaciones y métodos de resolución. Carter y Ragsdale (2006) tratan el m-TSP mediante algoritmos genéticos, probando un nuevo cromosoma no estándar (“Two-part chromosome”). Comparando el desempeño computacional de su propuesta con enfoques convencionales de estudios previos con cromosomas estándar, encuentran en algunos casos mejores soluciones para el m-TSP, con instancias hasta de 150 ciudades. Snyder y Daskin, (2006) tratan el problema del vendedor viajero generalizado (GTSP), en el que existen clusters o grupos predefinidos y el viajero debe visitar al menos un nodo en cada cluster, minimizando el costo total del viaje. Presentan una heurística que combina algoritmos genéticos de llaves aleatorias con una búsqueda local. Para 41 problemas de prueba con distancias simétricas y hasta 442 nodos, encuentran el valor óptimo en la mayoría de los casos, y en los demás, las soluciones estuvieron dentro del 1% del óptimo, con una eficiencia computacional dentro de los 10 segundos. Concluyen que la heurística propuesta es competitiva en calidad y eficiencia, en comparación con otros métodos de solución (cuatro heurísticas y un algoritmo exacto con instancias del TSPLIB). Campell (2006) se orienta hacia el PTSP (problema del vendedor viajero probabilístico); en éste caso, solo un subconjunto de clientes potenciales deben ser visitados, siendo el número de clientes a visitar una variable aleatoria. Ante la dificultad de resolver esta variante para instancias de tamaños propios de casos reales, una de las alternativas es asignar clientes a regiones y resolver para una instancia más reducida. Es así que la forma de dividir a los clientes y la escala necesaria para representar razonablemente la función objetivo, es el interrogante que abordaron los autores. Presenta resultados computacionales en problemas de hasta 1000 ciudades, donde las probabilidades de visitar a los clientes son bajas y el tiempo computacional disponible es reducido; es decir, juega un papel preponderante la eficiencia computacional. Manifiestan que la agregación de clientes en regiones puede proporcionar estimaciones cercanas al objetivo de manera rápida y, resolver el primer problema (reducido), puede conducir a soluciones satisfactorias a menor costo.

Nguyen, et al. (2007) hacen una implementación de un algoritmo genético con participación de un método de búsqueda local basado en la heurística LK (Lin y Kernighan, 1973) para encontrar soluciones de alta calidad en instancias TSP de gran escala. Los

resultados experimentales muestran que, en ese entonces, el método propuesto por los autores funcionó con mayor eficacia y eficiencia que el LKH (Helsgaun, 1998), uno de los más destacados en la resolución del TSP. Además, prueban el método para encontrar una respuesta (al 2 de junio de 2003) para una instancia de TSPLIB que presenta 1'904.711 ciudades. Liu (2007) se enfoca en el PTSP. Desarrolla un algoritmo de búsqueda dispersa híbrido, que incorpora, entre otros, la regla del vecino más cercano, aceptación por umbrales y el operador de recombinación de bordes (ER). Destacan la potencialidad de la propuesta para resolver problemas de gran tamaño, mostrando que la incorporación del umbral de aceptación dentro de la búsqueda dispersa favorece la eficiencia del procedimiento manteniendo la calidad de la solución. Carrabs, et al (2007) se enfocan en el TSPPDL, Problema del vendedor viajero con recogida y entrega de mercancía y restricciones de carga y descarga LIFO (últimas en entrar, primeras en salir). Para referir a este problema es necesario describir el “Traveling Salesman Problem with Pickup and Delivery” (TSPPD), que consiste en determinar el recorrido de longitud mínima que se requiere para que un solo vehículo, con capacidad de carga limitada, satisfaga los requerimientos de los clientes, a los cuales debe recogerles la mercancía en un determinado sitio de origen, para su posterior entrega en el sitio de destino; la política óptima debe satisfacer las restricciones de capacidad de carga limitada del vehículo y las de precedencia entre origen y destino. En el TSPPDL se agregan restricciones de precedencia que incorporan la política LIFO al cargar y extraer la mercancía. Proponen tres nuevos operadores de búsqueda local, los cuales se incorporan a la heurística de búsqueda de entorno variable, probando el rendimiento del algoritmo con instancias adaptadas de TSPLIB, obteniendo resultados satisfactorios en eficiencia y eficacia en comparación con el método de prueba: tipo búsqueda entorno variable descendente (VND) de (Cassani y Righini, 2004).

Ohlmann y Thomas (2007) orientan sus esfuerzos hacia el TSPTW (Travelling Salesman Problem with Windows Time), en el cual deben considerarse restricciones de tiempo para las visitas a los clientes, llevando a que cada ciudad deba ser visitada en un tiempo determinado, no permitiéndose llegar después de dicho instante; igualmente, si el viajero

llega antes, debe esperar que se cumpla el tiempo preestablecido. Usan una variante del Recocido simulado, denominada *Compressed-Annealing*, la cual relaja las restricciones de ventanas de tiempo e incorpora un método de penalización de variable asociado al concepto de presión. Bajo instancias de hasta 200 ciudades, el método propuesto resulta satisfactorio en la mayoría de los casos. Duan y Yu (2007) resaltan la robustez de la optimización bajo Colonia de Hormigas y su facilidad para integrarse con otros métodos. Los autores combinan ACS con Algoritmos meméticos. Al final proponen un nuevo enfoque y lo prueban para un TSP de 51 ciudades, mostrando eficacia y viabilidad práctica.

Savla, et al. (2008) hacen una aproximación del TSP a la robótica, enfocados en el enrutamiento de un vehículo tipo Dubins; tal caso es denominado por los autores como DTSP. Destacan que el TSP y sus variaciones continúan atrayendo esfuerzos de diferentes disciplinas, como son: matemáticas, ciencias de la computación e investigación de operaciones. El DTSP es similar al TSP, puesto que el vehículo debe visitar una serie de puntos, una sola vez cada uno y regresar al origen, pero con la característica de que deben considerarse restricciones asociadas a las trayectorias de curvatura, que sigue el vehículo, delimitadas en el plano. Proponen, entre otros, un algoritmo llamado “Alternating Algorithm”, al cual incorporan dentro de la categoría de “algoritmo de aproximación de factor constante”. Profundización es este tipo de procedimientos puede encontrarse en (Vazirani, 2001).

3.2.3 Tipos de TSP, métodos y campos de inspiración en los estudios más posicionados a través de la historia y entre 2006-2010 (P7-P9)

Partiendo de la tabla 4, los 10 estudios más posicionados sobre el TSP a través de la historia, cuyos periodos de publicación oscilan entre 1971 y 1999, han abordado el TSP original. Respecto a 2006-2010, dos de los 10 documentos que forman parte del Top 10 de lo más citado, abordan el TSP original, en tanto que los demás se enfocan en las siguientes variaciones: PTSP (dos estudios), m-TSP (dos estudios), TSPDL (un estudio), TSPTW (un

estudio) y DTSP (un estudio) y GTSP (un estudio). Así mismo, también en la tabla 4 pueden verse los métodos empleados en los trabajos objeto de análisis y, a raíz de ello y, se ha hecho un esfuerzo por deducir los campos de inspiración, valiendo mencionar: evolución biológica y su base genético-molecular, comportamiento de hormigas reales, búsqueda de vecindades, estrategias sistemáticas para combinar reglas de decisión, y cambios sistemáticos de entorno.

Tabla 4. Tipos de TSP, métodos y enfoques empleados

Autores	Año	Tipo	Método(s) basado(s) en:	Campo de inspiración:	Tamaño máx probado
Held, M. y Karp, R.	1971	TSP	Relajación lagrangiana	Ramificación y acotamiento	64
Cerny, V.	1985	TSP	Recocido simulado, Método de Montecarlo	Termodinámica	200
Angeniol, B., de La Croix, V. y Le Texier, J.	1988	TSP	Mapas autoorganizados de Kohonen, Red neuronal	Biofísica del cerebro	1000
Laporte, G.	1991	TSP	N/A	N/A	N/A
Reinelt, G.	1991	TSP	N/A	N/A	N/A
Bentley, J.	1992	TSP	Inserción (vecino más cercano, ...), basados en árboles y búsqueda local (2-opt, 2H-opt, 3-opt)	Estrategias rápidas de inicialización y búsqueda de vecindades	1000000
Fogel, D.	1993	TSP	Programación evolutiva	Evolución biológica	1000
Dorigo, M. y Gambardella, L.	1997	TSP	Sistema de Colonia de Hormigas, 3-opt (Búsqueda local)	Comportamiento de hormigas reales y búsqueda de vecindades	1577
Stuetzle, T. y Hoos, H.	1997	TSP	Sistema de Hormigas Max-Min, 2-opt, 3-opt (Búsqueda local)	Comportamiento de hormigas reales y búsqueda de vecindades	783
Larrañaga, P. et al.	1999	TSP	Algoritmos genéticos. GENITOR	Evolución biológica y su base genético-molecular	48
Bektas, T.	2006	m-TSP	N/A	N/A	N/A

Carter, A. y Ragsdale, C.	2006	m-TSP	Algoritmos genéticos	Evolución biológica y su base genético-molecular	150
Snyder, L y Daskin, M.	2006	GTSP	Algoritmos genéticos y 2-opt (Búsqueda local)	Evolución biológica y su base genético-molecular; búsqueda de vecindades	442
Campell, A.	2006	PTSP	Segregación de clientes y resolución del problema reducido.	Fragmentación urbana	1000
Nguyen, H., et al.	2007	TSP	Algoritmos genéticos, LK (Búsqueda local)	Evolución biológica y su base genético-molecular, búsqueda de vecindades	1904711
Liu, Y.	2007	PTSP	Búsqueda dispersa híbrido. Con búsqueda local (aceptación por umbrales)	Métodos evolutivos (Estrategias sistemáticas para combinar reglas de decisión), búsqueda de vecindades	100
Carrabs, F., Cordeau, J. y Laporte, G.	2007	TSPPDL	Búsqueda de entorno variable y operadores de búsqueda local	Cambios sistemáticos de entorno dentro de una búsqueda de vecindades	721
Ohlmann, J. y Thomas, B.	2007	TSPTW	Variante del Recocido simulado: (Compressed annealing).	Recocido del acero, Métodos de penalización	200
Duan, H. y Yu, X.	2007	TSP	Sistema de Colonia de Hormigas y Algoritmos meméticos	Comportamiento de hormigas reales y Evolución cultural de los individuos	51
Savla, K., Frazzoli, E. y Bullo, F.	2008	DTSP	<i>Alternating Algorithm</i> . Algoritmo de aproximación de factor constante	Solución óptima del TSP simétrico. Algoritmos de aproximación	N/A

3.2.4 Conclusiones y discusión

El TSP ocupa un papel crucial en la investigación de operaciones, tanto a nivel teórico como aplicado, siendo dicho problema reconocido por su complejidad de resolución, sencilla formulación y prueba de validación inicial de nuevos avances algorítmicos en la optimización combinatoria (Angéniol, De La Croix y Le Texier, 1988; Laporte, 1992;

Boese, Kahng y Muddu, 1994; Johnson y McGeoch, 1997; Marti, 2003; Pérez, et al. 2010). Esta primera prueba posibilita luego trascender hacia otros problemas, como ocurrió con la relajación lagrangiana, con el branch and bound (Álvarez, Corberán y Tamarit, 1985) y con el modelo inicial de Colonia de Hormigas (Dorigo y Gambardella, 1995). Los principales métodos para aportar respuestas al TSP pueden dividirse en: algoritmos heurísticos, de enumeración implícita y metaheurísticas. Entre las heurísticas clásicas para el TSP están las de construcción: vecino más cercano, de inserción (más lejana, más cercana,...) y las de mejoramiento: k-opt, LK y LKH; respecto a métodos de enumeración implícita, están los algoritmos tipo Branch and bound. Entre las metaheurísticas de los estudios más posicionados para el TSP están: Algoritmos genéticos, Sistema colonia de hormigas, Búsqueda dispersa, Búsqueda de entorno variable, Recocido simulado.

En Savla, Frazzoli y Bullo (2008) se menciona el término “algoritmo aproximado de factor constante”, respecto a éste, es de destacar que en algunos estudios no se distingue entre “algoritmos aproximados” y los “algoritmos heurísticos”, mientras que en otros sí lo hacen. Partiendo de los que diferencian dicha agrupación, se menciona que una heurística, a pesar de ser eficiente desde el punto de vista práctico, no tiene una medida teórica de la calidad del algoritmo ni del tiempo de ejecución, en tanto que los aproximados llegan, en un tiempo polinomial, a una respuesta cercana a la óptima, pero teniendo certeza de qué tan lejos de ella se encuentran (Montoya,. Paternina y Frein, 2002; Verschae, 2008; Schaeffer, 2009). Entre los que no diferencian sobre la mencionada clasificación, están: (Ríos y Bard, 2000; Vélez y Montoya, 2007; Quevedo y Ríos, 2010).

A través del tiempo y en los últimos cinco años (2006-2010), se nota una tendencia hacia la combinación de las fortalezas de diferentes métodos, dando lugar a híbridos de las metaheurísticas, las cuales arrojan resultados satisfactorios en términos de eficacia y eficiencia computacional, siendo algunas de las combinaciones realizadas: Sistema de Colonia de Hormigas con k-opt (Dorigo y Gambardella, 1997; Stuetzle y Hoos, 1997) y con Algoritmos meméticos (Duan y Yu, 2007); también, los Algoritmos genéticos con LK (Nguyen, et al. 2007) y con k-opt (Snyder y Daskin, 2006), así como la combinación de la

metaheurística de búsqueda dispersa con la búsqueda local (aceptación por umbrales) (Liu, 2007). A pesar de la antigüedad de algunos optimizadores locales, éstos aún prevalecen, en los mecanismos académicos para aportar al TSP y sus variantes, empleándolos para combinar enfoques de búsqueda global con perspectivas locales, notándose el 2-opt como uno de los más empleados. Entre los principales campos de inspiración de dichos métodos de resolución del TSP, se encuentran: la evolución biológica y su base genético molecular, el comportamiento de hormigas reales, la fragmentación urbana, la termodinámica (recocido del acero), los cambios sistemáticos de entorno, la evolución cultural de los individuos, la evolución de las estrategias sistemáticas para combinar reglas de decisión y la búsqueda de vecindades.

Desde 1954, se ha incrementado la efectividad de los métodos desarrollados para resolver problemas TSP cada vez de mayor tamaño. Por ejemplo, Dantzig, et al. (1954) resolvieron para 49 ciudades, Held y Karp (1971) para 64 ciudades, Padberg y Rinaldi (1987) aportaron respuesta a una instancia de 2392 ciudades y en el 2004 ya se conocía respuesta a 24.978 ciudades (Applegate, et al. 2006). El TSP de mayor tamaño resuelto hasta la fecha ha sido para una instancia de 85.900 ciudades (Applegate, et al. 2006), denominada pla85.900 en el dominio público TSPLIB. En dicha librería también se dispone de problemas de mayores tamaños, con la mejor solución encontrada.

A medida que se avanza en el desarrollo de nuevos métodos de resolución para el TSP y, a su vez, se resuelven instancias cada vez más complejas, el probar la efectividad de dichos métodos a través de instancias de grandes tamaños no parece ser un requisito para los trabajos futuros, puesto que en los estudios analizados, se encuentran experimentos válidos empleando instancias de tamaño máximo, no necesariamente crecientes a través del tiempo: 1577 ciudades (Dorigo y Gambardella, 1997), 48 ciudades (Larrañaga, et al. 1999), 51 ciudades (Duan y Yu, 2007), 100 ciudades (Carrabs, Cordeau y Laporte, 2007) y 1'904.711 ciudades (Nguyen, et al. 2007). Respecto a dichas pruebas computacionales, se destaca el aporte del TSPLIB (Reinelt, 1991), prevaleciendo como una fuente de información de amplio uso en los estudios más posicionados, vital para realizar comparaciones entre los

métodos existentes, facilitar validaciones de las nuevas propuestas y posibilitar el reconocimiento de las contribuciones más destacadas.

A pesar de los avances en el tema, el TSP aún prevalece como un importante campo de conocimiento, puesto que además del caso original, que como se ha evidenciado, aún constituye un atractivo para la comunidad académica, se destacan también en los estudios más posicionados, seis de sus variantes: m-TSP, PTSP, TSPPDL, TSPTW, GTSP y DTSP. Es así que el desarrollar nuevos métodos para aportar respuestas satisfactorias al TSP, contribuye no solo al progreso académico, sino también a un significativo avance en el desempeño de las organizaciones industriales y de servicios, cuyo modo de operación se relaciona directamente o en parte con la estructura de este problema (González y Ríos, 1999).

A partir de lo expuesto, se nota la oportunidad de contribuir al desarrollo de nuevos métodos para aportar respuestas al TSP, explorando nuevos enfoques de inspiración que lleven a progresos híbridos, como es la tendencia, y con ello, brindar elementos teóricos y prácticos que sirvan de guía para avanzar en otros problemas de rigor académico, propios de la optimización combinatoria, así como en casos prácticos directamente relacionados con el TSP o actuando éste como subproblema.

Entre los campos de inspiración de los métodos de resolución del TSP, hay ausencia de una disciplina que en los últimos años viene cobrando relevancia en las soluciones organizacionales: el pensamiento sistémico, conocido también como “la quinta disciplina”. Entre las definiciones para este constructo vale mencionar: "orientación conceptual general interesada en las interrelaciones entre las partes y sus relaciones con un todo funcional" (Trochim, et al. 2006), “marco conceptual para la solución de problemas que tiene en cuenta las totalidades. La resolución de problemas de esta manera implica un patrón de búsqueda para mejorar la comprensión y capacidad de respuesta al problema” (Rubenstein, et al. 2001), "significa comprender y describir las fuerzas y las interrelaciones que dan forma al comportamiento del sistema” (Bahill y Gissing 1998), y “Supone que la mayor

parte de nuestra forma de pensar, experimentar, practicar e instituir están interrelacionados e interconectados" (Werhane, 2002).

El pensamiento sistémico es una necesidad y tendencia en los métodos de análisis y solución de problemas sociales, políticos y empresariales (Senge, 2005) y, además, hace parte de las competencias genéricas exigidas para los profesionales de ingeniería (Ferrer, 1998; Letelier, et al. 2005; Distefano, Haarth, Iriarte, 2006). Analizar el pensamiento sistémico como posible campo de inspiración para el desarrollo de nuevos métodos de optimización combinatoria se constituye en una oportunidad de investigación, que como se mencionó, pretende saldarse en esta tesis.

Este apartado, se constituye la descripción y el análisis de los estudios sobre el TSP como eje central, más posicionados a través de la historia y entre 2006-2010, los cuales, representando solo el 1,9% del total de documentos, reúnen el 68% de todas las citas dadas por comunidad académica a dicho tema, bajo el método de revisión sistemática propuesto en Pérez, Jaramillo y Velásquez (en prensa). De ahí la importancia para estudiantes e investigadores, que deseen iniciar nuevas contribuciones para el avance en dicho campo de conocimiento.

4. Materiales y métodos

4.1 La regla del vecino más cercano vista desde el pensamiento sistémico

4.1.1 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 (capítulo 3), fruto de esta etapa, es de anotar que la revisión estuvo vigente durante todo el desarrollo de la tesis, 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 resultados experimentales de otros estudios, para instancias publicadas en el TSPLib.

4.1.2 Revisión de arquetipos y leyes del pensamiento sistémico

En esta etapa 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 campo de inspiración, cuya pertinencia para la optimización combinatoria, se desea analizar en esta tesis.

4.1.3 Análisis de la heurística vecino más cercano para el TSP, bajo una perspectiva de sistemas

El comportamiento de las soluciones arrojadas por el vecino más cercano 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.

4.2 Diseño y desarrollo del método heurístico a proponer

Con base en el análisis sistémico efectuado en la etapa anterior al vecino más cercano (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, fue preciso 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 uno que reflejara 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.

4.3 Localización de los métodos de comparación

En esta fase se buscaron resultados de métodos que, en el marco de heurísticas de construcción, de mejoramiento y de metaheurísticas poblacionales, acorde con los objetivos

del proyecto, sirvieran de base comparativa para analizar el desempeño del método a proponer. Así, los métodos de comparación fueron de dos tipos. El primer tipo partió de la localización de un software libre que incorporó algunos de los métodos de interés y, por tanto, hizo viable llevar a cabo un diseño experimental con diferentes instancias. Dicho software fue el clásico WinQSB. Este incorpora, entre otras, las siguientes heurísticas de construcción: vecino más cercano e inserción más barata; también una de mejoramiento: 2-opt. Así, bastó generar instancias del TSP en forma de matrices simétricas y luego, se ejecutó la resolución por cada uno de los métodos citados. El otro tipo de comparación (metaheurísticas) se realizó con base en resultados plasmados en artículos que proponen variedad de métodos probados en el TSP. En esta categoría, se trabajó con instancias popularizadas, localizadas en TSPLib.

4.4 Experimentación

4.4.1 Comparación con heurísticas de construcción y de mejoramiento

- **Diseño experimental puro:** Una vez culminada la heurística, se buscó determinar si existe diferencia, en términos de eficacia (costo del tour) y de eficiencia (tiempo de cómputo en segundos), entre el método propuesto y los referentes; de ser así, conocer con cuál o con cuáles de ellos se presentan diferencias. Así mismo, fue de interés conocer si existe alguna interacción entre el factor método y la complejidad del TSP, esta última en términos del tamaño de las instancias. Para cumplir con los objetivos de esta fase se empleó un diseño factorial AxB con dos observaciones de cada experimento (Montgomery, 2004). Bajo este diseño, “A” correspondió al método y “B” a la cantidad de ciudades. Los niveles de los factores “A” y de “B” se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Factores y sus niveles

Factores	Niveles	Descripción
A (método)	4	Propuesto
		Vecino más cercano (VMC)
		Inserción más barata (IMB)
		2-opt (2opt WQSB)
B (tamaño de la instancia TSP)	10	10, 20, 30, 40, 50, ... 100

Para este caso se emplearon dos diseños factoriales, cuya diferencia entre ambos, es que uno posee como variable respuesta el tiempo de cómputo, en segundos, y el otro, el costo total del tour TSP arrojado por cada algoritmo.

Para la experimentación, de cada tamaño de ciudad se generaron dos instancias diferentes del TSP, cuyos datos de costos provienen de una distribución uniforme entre 0 y 100 construida a partir de la función de números pseudoaleatorios del Excel. De este modo, cada método se probó dos veces en cada ciudad, recopilando el costo del tour arrojado por cada uno, y el tiempo de cómputo consumido en un computador Intel(R) Pentium 4 de CPU 3.06GHz, 1 Gb de RAM. Esta etapa metodológica consumió: $10 \times 4 \times 2 = 80$ experimentaciones. Cada una de las observaciones del experimento factorial pueden representarse mediante el siguiente modelo:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde $i=1, 2, \dots, 4$ (Método); $j=10, 20, 30, \dots, 100$ (cantidad de ciudades); y $k=1, 2$ (observaciones)

De este modo, y_{ijk} representa la respuesta arrojada (costo y similar cuando se trabaja con tiempo computacional) por el i -ésimo método cuando es probado con una instancia del TSP de j ciudades en la k -ésima observación del experimento. μ hace alusión al efecto medio global, τ_i es el efecto que ejerce el nivel i -ésimo del factor método y β_j equivale al efecto

del nivel j -ésimo del factor cantidad de ciudades. Así mismo, $(\tau\beta)_{ij}$ corresponde al efecto de la interacción entre los factores A y B, y finalmente, ε_{ijk} es el error aleatorio.

Generados los experimentos, mediante el Statgraphics 5.1 se procedió a realizar la prueba de análisis de varianza para el modelo de efectos fijos, a fin de determinar si existe diferencia o no entre los métodos sometidos a ensayo, tanto en tiempos de cómputo como en costo total del tour. Igualmente, esta prueba se aplicó para analizar el efecto del factor tamaño de las ciudades y para la interacción AxB. De comprobarse existencia de diferencias, se procedió a aplicar la prueba de rangos múltiples de Duncan, a fin de identificar entre qué niveles de los factores específicos existen diferencias.

4.4.2 Comparación con metaheurísticas

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. En la tabla 6 se presentan los estudios que posibilitaron extraer información de interés para posteriormente realizar las comparaciones.

Tabla 6. Fuentes de información para realizar las comparaciones respecto al desempeño de los métodos propuestos

Estudios	Localización de las instituciones de afiliación de los autores	Denominaciones de los métodos* con posibilidad de extraer resultados	Estudios	Localización de las instituciones de afiliación de los autores	Denominaciones de los métodos* con posibilidad de extraer resultados
Dorigo y Gambardella (1997)	Bélgica y Suiza	ACS (Ant Colony System), GA (Genetic Algorithm), EP (Evolutive Programming), SA (Simulated Annealing), ACS-3-opt	Sallabi y El-Haddad (2009)	Libia	Algoritmos genéticos: FRAG_GA, SWAP_GATSP, OX_SIM AND IGA
He, Zhu, Hechun y Ben (2006)	China	New Algorithm Based on Swarm Intelligence: Route Exchange Algorithm	Queiros dos Santos (2009)	Brasil	AG serie, AG paralelo, AG en grupo
Luo, Yang y Li (2008)	China	Shuffled frog-leaping algorithm (SFLA). Algoritmos meméticos	Fang, Chen y Liu (2007)	China	PSO (Particle Swarm Optimization) -SA
Wang y Wang (2008)	China	ACO (Ant Colony Optimization) with multiple nests' cooperation (MNACO), Max-Min Ant System(MMAS)	Batista, Figueiredo y Aloise (2005)	Brasil	AGIV (Algoritmo Genético con Infección Viral)
Teodorovic (2008)	Serbia	Bee Colony Optimization (BCO)	Velayudhan, Hill, Hiremath y Soneji (2007)	USA	ACO bajo 3 métodos: Maximum method probability, Single loop randomness, Multi loop randomness
Jeong, Kim y Lee (2009)	República de Korea	Simulated annealing using fuzzy logic controller. Conventional Simulated Annealing (CSA, TFSA, TRFSA)	Zhong, Zhang y Chen (2007)	China	PSO-TS-CO - 2opt
Chang, Huang y Ting (2009)	Taiwan	Algoritmos genéticos: SGA, Dynamic diversity control genetic algorithms (DDCGA), Multiple dynamic diversity control GA (MDDCGA)			

*Algunos son desarrollos de dichos autores, otros son citados por ellos y tomados para compararse

4.5 Comparación con heurísticas y metaheurísticas bajo análisis multicriterio

Esta etapa partió del estudio de diversos métodos de análisis multicriterio, y en general, de la teoría de este ramo, a fin de seleccionar los procedimientos a utilizar para la comparación de la heurística propuesta con otras, ya no observando de manera independiente eficacia y eficiencia, sino como un binomio. Es de anotar que, aparte de estos dos factores, intervienen aspectos blandos deseables en una metaheurística: sencillez, precisión, coherencia y robustez, amigabilidad e innovación (Hansen y Mladenovic, 2003), pero la subjetividad que puede generar la evaluación de estos aspectos blandos, para todas las alternativas de algoritmos a someter a ensayo, puede restar confiabilidad a los resultados.

Por ello, el análisis multicriterio se enfocó en el estudio de dos binomios: eficacia (costo) vs eficiencia (tiempo segundos) y, de eficacia (costo) vs eficiencia (número de tours para llegar al mejor valor encontrado). El análisis multicriterio se realizó por separado, primero abordando heurísticas, y luego, se pasó a una escala más retadora, comparando el método propuesto contra metaheurísticas.

5. Resultados y análisis

5.1 La regla del vecino más cercano vista desde el pensamiento sistémico

5.1.1 Historia de don Pablo

Para facilitar el entendimiento del análisis sistémico, se ha diseñado un caso tipo historieta que, en algunos párrafos, elude lenguaje técnico, a fin de mostrar la relación con actividades cotidianas y también, para facilitar una mejor comprensión del mensaje.

Suponga que don Pablo ha programado unas vacaciones y en ellas 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 vecino más cercano; 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. Esto se muestra en la figura 5, la cual fue construida luego de aplicar el vecino más cercano a una instancia de 130 ciudades, usando el WinQSB y procesando los datos en Excel.

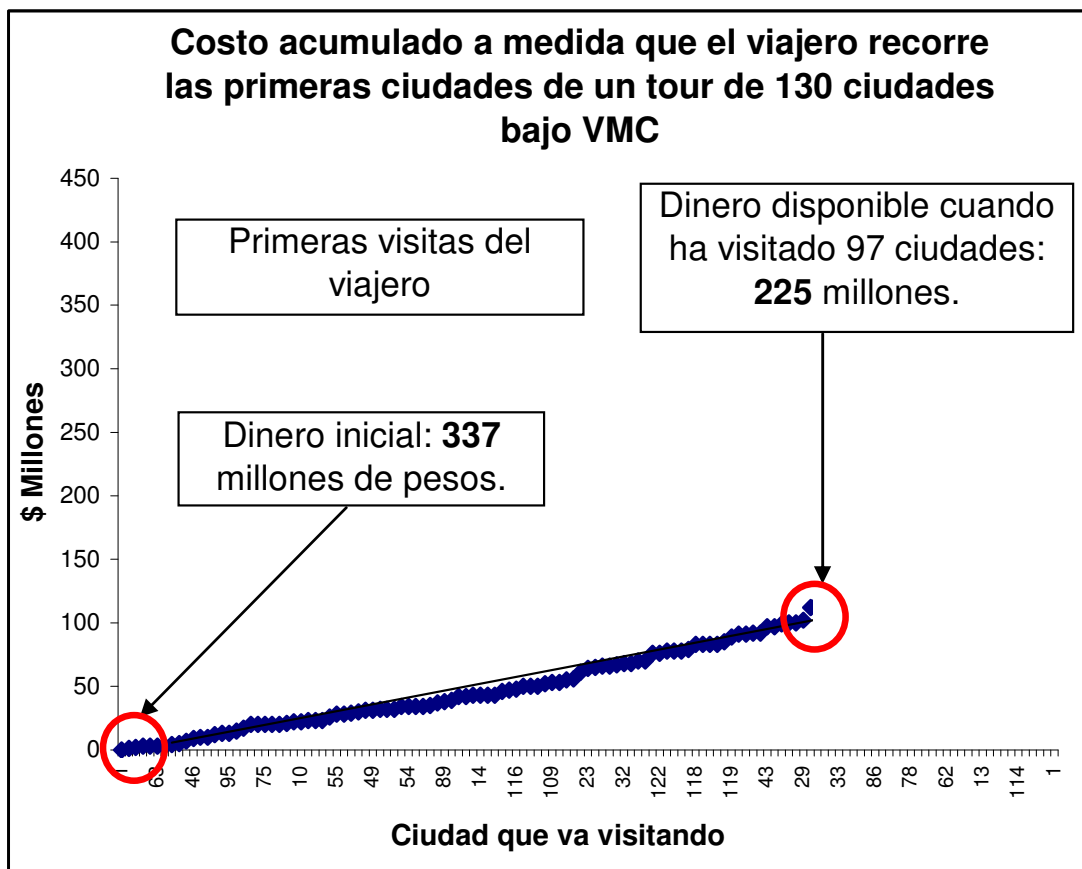


Figura 5. Comportamiento del costo acumulado hasta visitar 97 ciudades, de las 130 requeridas, bajo la estrategia VMC. Fuente: elaboración propia.

Don Pablo está complacido de lo bien que le ha ido respecto al uso que ha dado al dinero, todo se comporta según lo esperado, él 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. Pero efectivamente, cuando verifica, el resultado es tal cual. Esto puede verse en la figura 6.

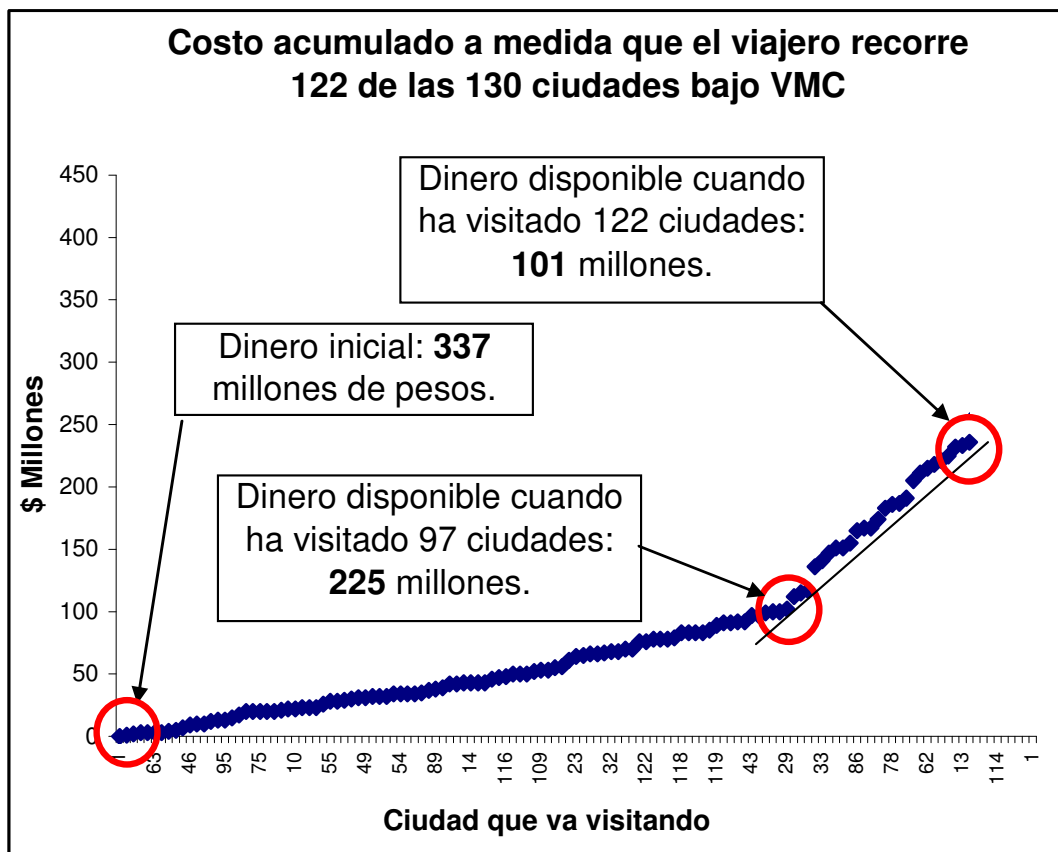


Figura 6. Comportamiento del costo acumulado hasta visitar 122 ciudades, de las 130 requeridas, bajo la estrategia VMC. Fuente: elaboración propia.

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 vecino más cercano, 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 su estrategia del vecino más cercano, 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 pueden verse en la figura 7, ilustra los insumos y hechos necesarios para ahondar en el análisis de la estrategia del vecino más cercano desde el pensamiento sistémico.

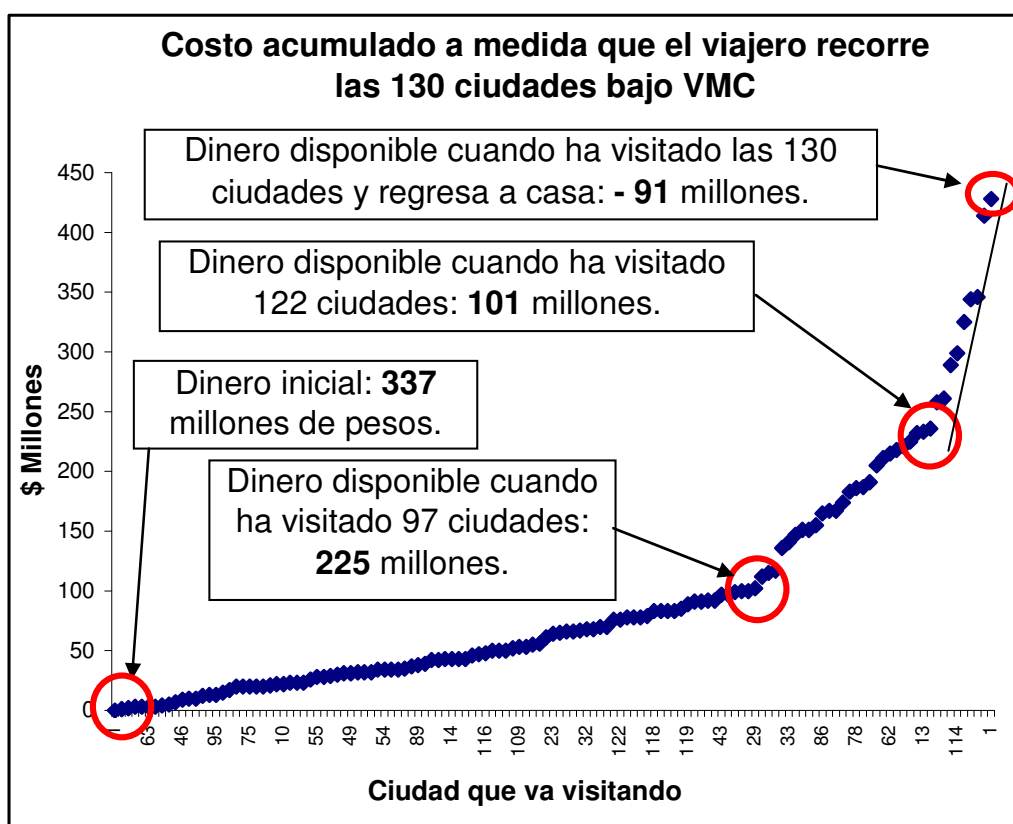


Figura 7. Comportamiento del costo acumulado hasta que visitó las 130 requeridas bajo la estrategia VMC. Fuente: elaboración propia.

Aparte la instancia empleada para ilustrar el caso de don Pablo, este mismo comportamiento prevalece en otras instancias, a excepción de aquella idealizada donde todas las ciudades son equidistantes, lo cual no es viable de encontrar en la realidad. Para

probar ello se observó el comportamiento del costo acumulado a medida que se construyeron tours para otras instancias mediante la regla del VMC. En la figura 8 se presentan los resultados para instancia de tamaño: 28, 129 y 141 ciudades.

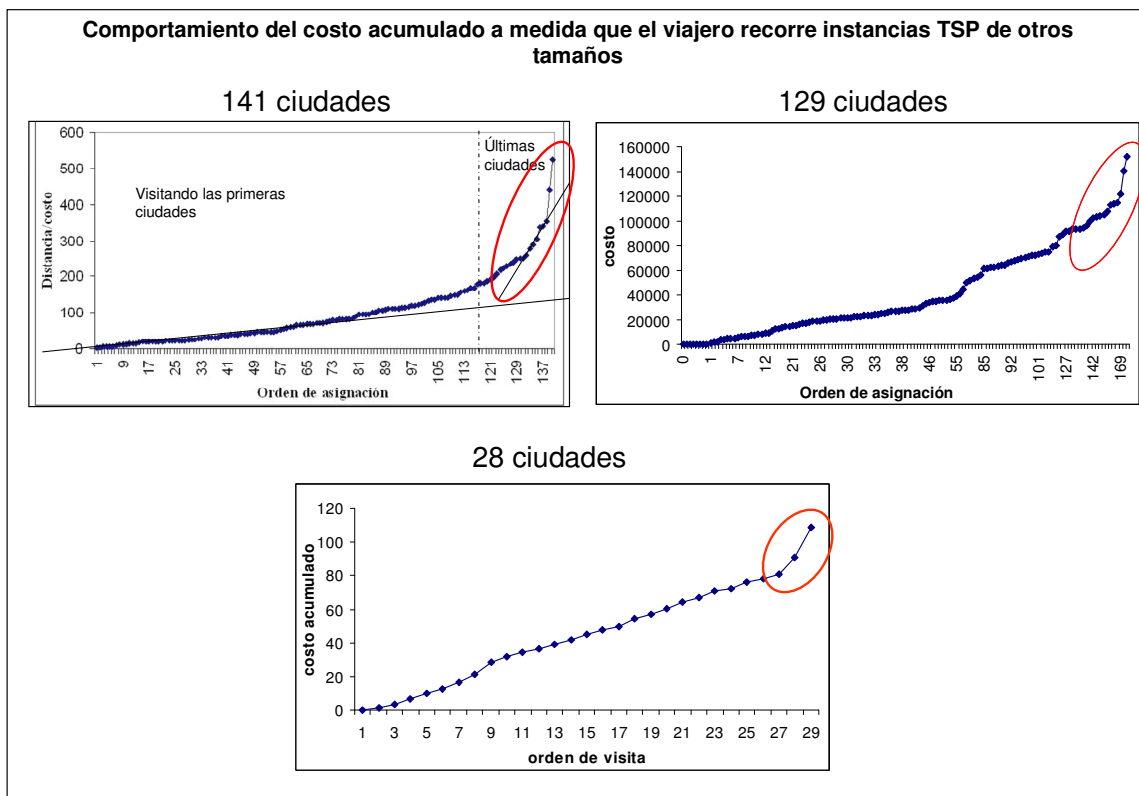


Figura 8. Comportamiento del costo acumulado para otras instancias TSP bajo la estrategia VMC. Fuente: elaboración propia.

Al observar los comportamientos presentes en las figuras 7 y 8, podría pensarse, a priori, que todas las reglas, materializadas en heurísticas, arrojan resultados desfavorables al visitar las últimas ciudades o cuando debe regresar a la de origen. No obstante, dicho comportamiento no puede generalizarse. Para ilustrar ello se realizaron pruebas con la heurística 2-opt incorporada en el software WinQSB para la misma instancia de 130 ciudades. El costo total encontrado al ejecutarlo fue menor (337 millones) que bajo la regla del vecino más cercano (428 millones). Pero ¿cómo fue el comportamiento del costo

acumulado a medida que don Pablo pasó por cada ciudad, hasta llegar a visitar las 130 ciudades y regresar? Véase el comportamiento en la figura 9.



Figura 9. Comportamiento del costo acumulado hasta que visitó las 130 requeridas empleando la estrategia 2opt del WinQSB. Fuente: elaboración propia.

Nótese en dicha figura, que el comportamiento del costo acumulado con el uso del 2_opt del WinQSB no presenta evidencia de cambios diversos a medida que se construye el tour, como sí ocurrió con el uso de la regla del vecino más cercano (figura 7). Por tanto, no puede generalizarse que lo plasmado en la figura 7 se presente para todo tipo de regla heurística.

¿Qué subyace, entonces, en el comportamiento del sistema: programa vacacional de don Pablo? Véase a continuación un posible análisis:

5.1.2 El caso de Don Pablo visto desde algunas leyes del pensamiento sistémico

- **“Los problemas de hoy derivan de las soluciones de ayer” (Senge, 1998, pp.77-78):** Peter Senge inicia esta primera ley de la quinta disciplina refiriéndose a que “a menudo nos desconcierta la causa de nuestros problemas, cuando solo necesitamos examinar nuestras propias soluciones a otros problemas en el pasado” (1998). Antes de que don Pablo ejecutara el plan vacacional de 130 ciudades, el problema, enfocado en realizar un tour que le saliera lo más económico posible, le buscó una aparente solución inicial. Cada que llegaba a una ciudad disfrutaba de ella y luego se desplazaba hacia la vecina más cercana y, así sucesivamente, cada que se enfrentaba a la pregunta ¿qué ciudad visitar?, empleaba aquella solución que le ha venido funcionando. No obstante, como pudo verse en el caso, la práctica continua de esta solución se ha constituido en la causa del problema que hoy don Pablo enfrenta, y es precisamente todo lo contrario a lo que deseaba lograr. Luego de que ha visitado las 130 ciudades, es más, generando sospecha desde que visitó 97 ciudades, ha concluido que aquella solución que funcionó antes, fue contraproducente, llevándolo a deber en la actualidad 91 millones de pesos. El caso de don Pablo precisamente refleja cómo la solución del ayer (uso continuo de la regla del vecino más cercano) es la generadora del problema al que hoy debe hacerle frente (deuda de 91 millones de pesos).

- **“Cuanto más se presiona, más presiona el sistema” (Senge, 1998; pp. 78-80):** Para esta segunda ley del pensamiento sistémico, Peter Senge la ilustra con ejemplos como: “cuanto más trabajaba, más trabajo había”, o cuando una firma comenzaba a tener un producto que perdía mercado, más se inclinaba hacia el mercadeo del mismo. En poco tiempo parecía volver al control, pero pasado un momento el sistema pedía más acciones. Esta situación refleja una realimentación compensadora. En el caso de don Pablo, vuelve el modelo mental: siempre funcionó antes, entonces debe seguir

funcionando. Cuando el dinero se iba consumiendo de manera más acelerada, más necesidad sentía don Pablo de tomar acciones drásticas para mitigar el aparente consumo exagerado, y se veía tentado a visitar ciudades inmediatamente cercanas disponibles. El presionaba cada vez con más fuerza después de haber visitado 97 ciudades, pero el sistema presionaba aún más.

- **“El camino fácil lleva al mismo lugar” (Senge, 1998; pp. 81-82):** “Si la solución fuera visible u obvia para todos, tal vez ya la hubieran encontrado”. Don Pablo sigue la solución más obvia, haciendo alarde de su sentido común. Senge habla de lemas como “necesitamos un martillo más grande”. Esto es fruto de una visión miope, lo cual caracteriza a la práctica del vecino más cercano. Solo le preocupa el instante inmediato; mira el árbol siguiente pero descuida el bosque, la inmediatez, la simplicidad, la actitud de “activista”: aquel sujeto que observa los hechos y saltándose el paso de comprender, pasa directamente a la acción, tapando huecos constantemente. De acuerdo a esta ley del pensamiento sistémico, no podría esperarse más de la alternativa de don Pablo.

- **“La cura puede ser peor que la enfermedad” (Senge, 1998; pp. 82-83):** La enfermedad que podría asociársele al caso de don Pablo es la necesidad de que el dinero disponible le alcance para todo su plan vacacional. Al principio, él puede decidir si en lugar de efectuar el plan vacacional regresa el dinero, y no corre el riesgo de deber nada, pero encuentra una solución, la estrategia del vecino más cercano y la implementa, prueba quizá solo visitando cinco ciudades y la “cura” le funciona. Debido a ello, decide emplear esa “cura” durante todo el plan vacacional y, antes, cuando la enfermedad solo era la necesidad de vacacionar con el dinero disponible y no sabía como hacerlo, hoy día no solo se gastó el dinero disponible, sino que además, quedó debiendo 91 millones de pesos más, y ya la enfermedad se le ha traducido en ¿cómo pagar tan abundante cantidad?

- **“La causa y el efecto no están próximos en el tiempo y en el espacio” (Senge, 1998; pp. 84-85):** Los síntomas de agotamiento del dinero disponible, fruto de la acción de

ejecutar el vecino más cercano desde el inicio, no pudieron notarse sino hasta que don Pablo llegó a la ciudad 98 en adelante. La acción ocurrió en la primera ciudad que visitó, pero ese efecto dominó, solo comenzó a ser visible luego de haber disfrutado de sus vacaciones en 97 ciudades, siendo aún más notorio el efecto al tener que regresar a su ciudad de origen. Don Pablo obvió ello, simplemente se preocupó por probar la acción del vecino más cercano desde una ciudad y evaluó sus resultados y, al notar que iba bien, concluyó que el efecto que estaba generando era satisfactorio, ya que no consideró esta ley del pensamiento sistémico.

- **“Los cambios pequeños pueden producir resultados grandes, pero las zonas de mayor apalancamiento a menudo no son obvias” (Senge, 1998; pp. 85-86):** Según Peter Senge, “el pensamiento sistémico enseña que los actos pequeños y bien focalizado, a veces producen mejoras significativas y duraderas si se realizan en el sitio apropiado”. De acuerdo con ello, a la práctica del vecino más cercano, empleada por don Pablo, sería preciso realizarle una leve alteración, tipo apalancamiento en un punto crucial. Esto podría asociarse a que en una ciudad determinada don Pablo no se desplace hacia la inmediatamente cercana, disponible, sino a otra, con el fin de que ese leve cambio lo lleve a un mejor resultado al final de su ciclo vacacional. Lo complejo es saber en qué ciudad debe realizar esta alteración de su práctica y de qué magnitud debe ser el cambio (¿pasar a qué otra ciudad?).

5.1.3 El arquetipo sistémico que subyace en el caso de Don Pablo

En el caso de don Pablo puede verse que subyace el arquetipo sistémico expuesto en la figura 10.

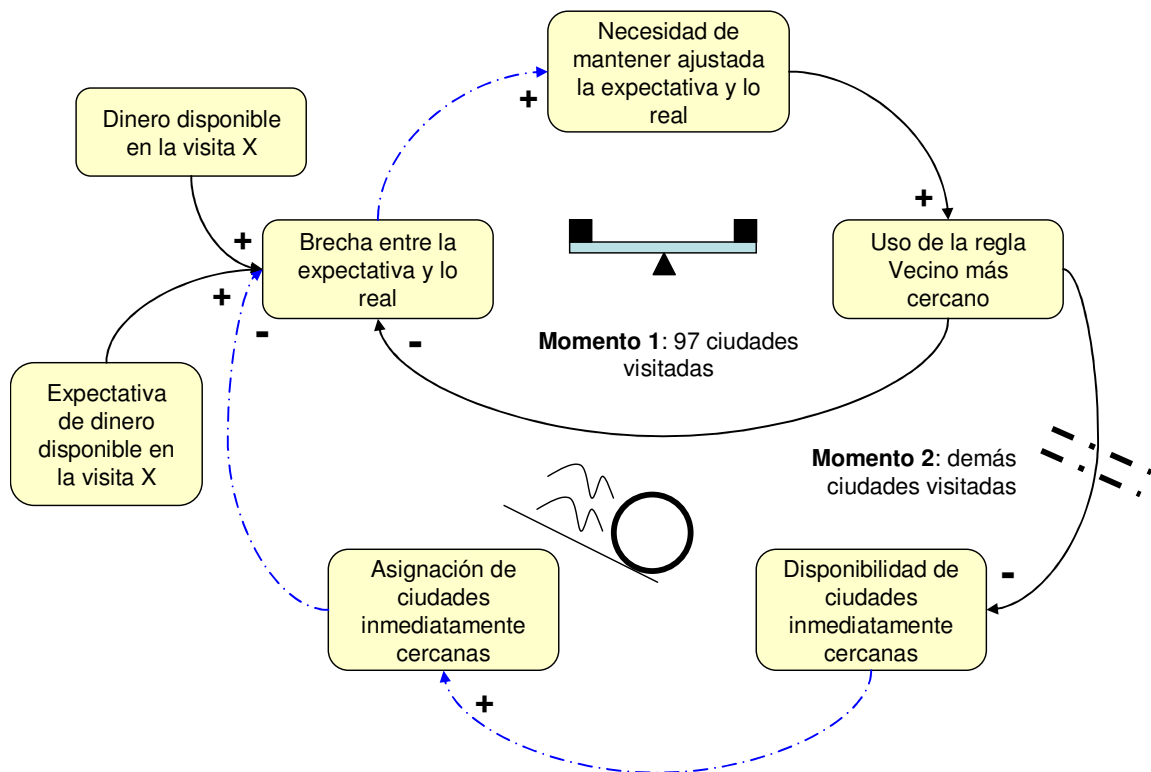


Figura 10. Arquetipo sistémico de la estrategia del VMC

Este arquetipo corresponde al que Senge (1998) llama “soluciones contraproducentes”. Se interpreta de la siguiente manera. Don Pablo, en su modelo mental, a medida que visita cada ciudad espera tener una cantidad de dinero disponible. Durante las primeras visitas y hasta pasear por 97 ciudades, observa el estado de la brecha entre lo que el espera y lo que realmente está obteniendo y, como esta brecha en los primeros instantes de sus vacaciones se asemeja a cero, entonces siente cada vez más necesidad de mantener casi exactos lo deseado y lo real, en términos del dinero disponible. Esto lo conduce a seguir empleando su estrategia estrella “vecino más cercano” y continúa el ciclo compensador (balanza), teniendo la sensación de que todo está controlado y que será inevitable que logre cumplir su ciclo vacacional con el dinero disponible. Es más, podría hasta pensar que le sobrará dinero si las cosas siguen como le han marchado hasta ahora. Lo descrito hace referencia a un momento del tiempo que se llamará: momento 1, y aborda desde que inicia el ciclo vacacional hasta que ha visitado 97 ciudades. Viene ahora el momento 2: instante en que

comienza a vacacionar en las demás ciudades. Allí, la ejecución constante de la estrategia del vecino más cercano por parte de don Pablo, ha llevado a que la disponibilidad de ciudades inmediatamente cercanas a visitar comience a agotarse, por lo cual no tendrá más remedio que desplazarse hacia la siguiente más cercana, que aún no ha visitado; no obstante, ésta puede ubicarse bastante lejos de donde se encuentra. Ello repercutirá en una mayor brecha entre lo que espera y lo que está observando en la realidad. Preocupado por la situación, pues cada vez nota que a pesar de sus esfuerzos constantes de “lo más cercano”, los buenos resultados no se están viendo. El sistema está respondiendo con más fuerza debido al ciclo de retroalimentación reforzadora (bola de nieve).

De acuerdo con Senge (1998; p.475), este tipo de estructura contiene una solución eficaz en el corto plazo, que en el caso de don Pablo se asocia con el momento 1, pero que tiene consecuencias imprevistas en el largo plazo (momento 2), que generan más necesidad de la misma solución. El principio administrativo recomendado para abordar esta estructura es “no descuides el largo plazo. De ser posible no recurras a soluciones de corto plazo, o úsalas solo para ganar tiempo mientras trabajas en un remedio duradero”. Senge, (1998; p. 475).

A este punto de la tesis se ha saldado el primer objetivo específico, aportando respuestas a la primera pregunta específica de investigación: ¿Qué estructuras sistémicas siguen las soluciones arrojadas por la heurística vecino más cercano para instancias del TSP simétrico?

5.2 Método heurístico a proponer

5.2.1 Diseño de la heurística

A raíz del análisis sistémico realizado al comportamiento de la heurística vecino más cercano para el TSP, tratado a través del caso de don Pablo, 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 vecino más cercano, que aparecen al visitar las últimas ciudades del tour. Así, este punto de apalancamiento corresponde a una pequeña alteración al sistema original: plan vacacional usando el vecino más cercano. Esto debido a una de las leyes del pensamiento sistémico: “los cambios pequeños pueden producir resultados grandes, pero las zonas de mayor apalancamiento a menudo no son obvias”.

Lo anterior, sumado a los demás análisis realizados al vecino más cercano, 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 vecino más cercano.

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, esta tesis ahondará esfuerzos en la renuncia a la ciudad inmediatamente cercana, para pasar a la segunda ciudad inmediatamente cercana, disponible. Así, el Sacrificio cortoplacista a efectuar en esta tesis será de nivel 2, siendo el de nivel 1 el mismo vecino más cercano, 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 del sistema, tal como se muestra en la figura 11.

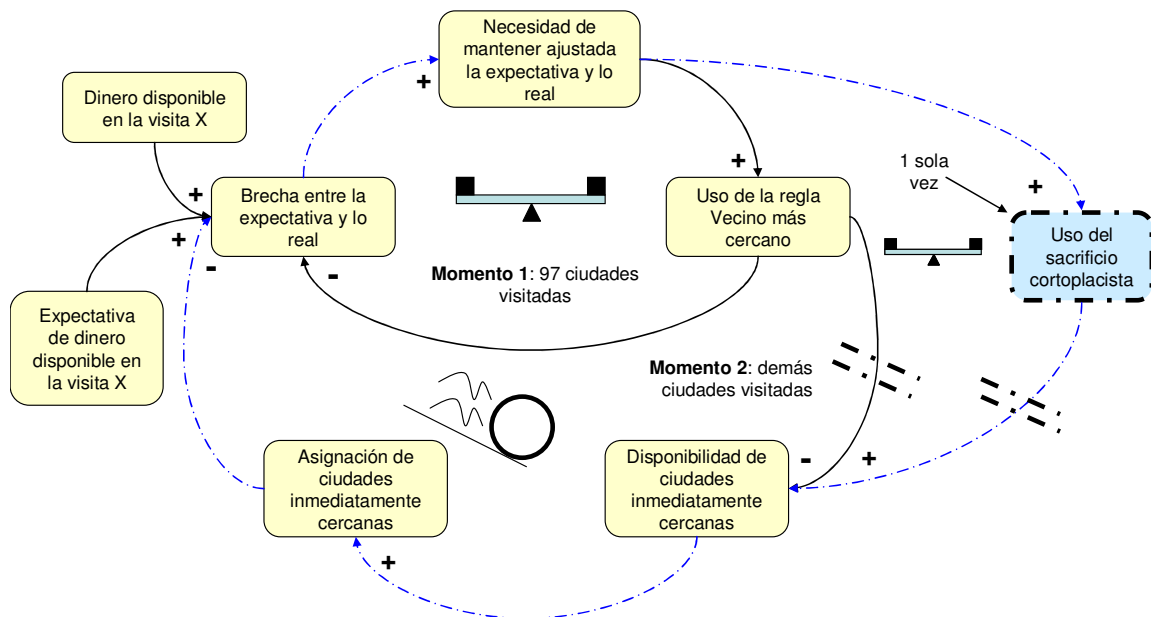


Figura 11. Propuesta estructural, sistémica, para mejorar el desempeño que subyace en la estrategia del VMC

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 el dinero disponible esperado y el real.

Luego de un sacrificio cortoplacista se sigue de nuevo con la regla del vecino más cercano; es decir, el sistema se adapta a su estrategia original. Así, el Sacrificio cortoplacista junto con la adaptación de nuevo a la práctica del vecino más cercano, 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” (Senge, 1998). Con este punto de apalancamiento se busca una posible estabilización del impacto de la estrategia del vecino más cercano en las últimas ciudades

del ciclo vacacional. Esto lo refleja el ciclo compensador que subyace al considerar las relaciones más externas, coloreadas de azul (figura 11).

Para una mejor ilustración, a nivel de las iteraciones que representa el Sacrificio cortoplacista adaptativo, y partiendo de una instancia TSP de cinco ciudades (tabla 7), considere el ejemplo expuesto en la figura 12.

Tabla 7. Ejemplo de instancia TSP de cinco ciudades

Ciudad	1	2	3	4	5
1	0	3	2	4	1
2	3	0	2	1	4
3	2	2	0	3	6
4	4	1	3	0	2
5	1	4	6	2	0

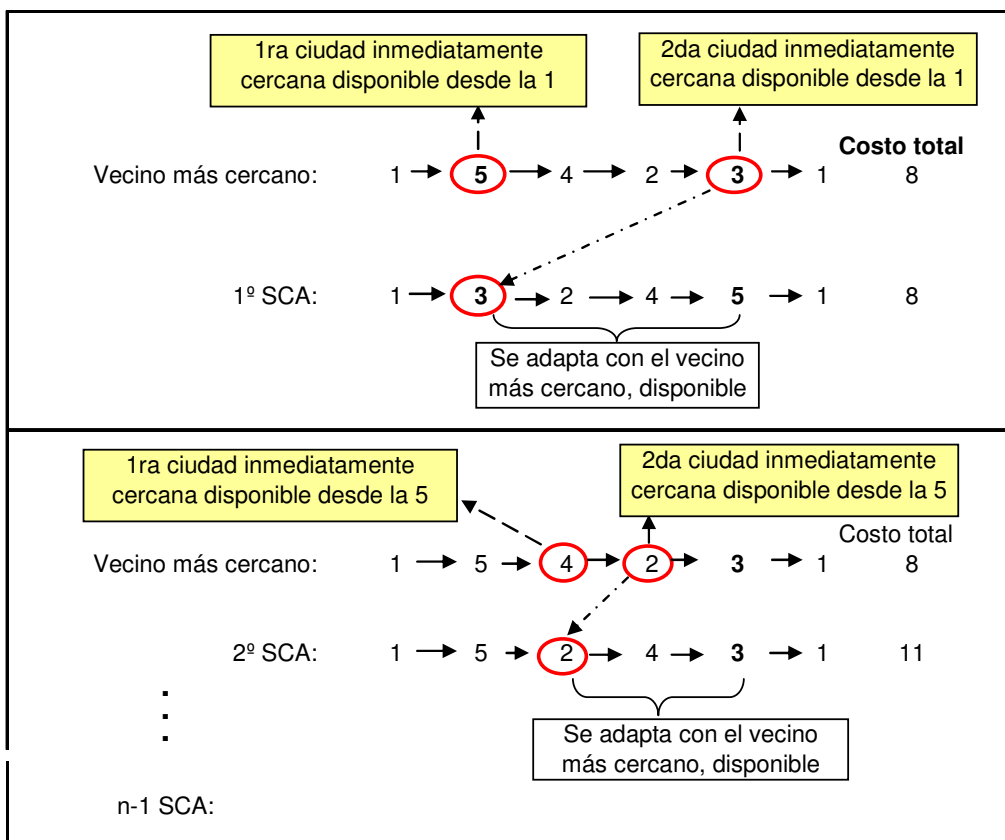


Figura 12. Ilustración del SCA para una instancia TSP de cinco ciudades

Como se observa en la figura 12, se parte de la solución arrojada por el vecino más cercano, luego se realiza el primer sacrificio cortoplacista: se renuncia a la ciudad 5 (inmediatamente cercana desde la 1) para visitar la segunda más cercana disponible (ciudad 3) y, a partir de la ciudad 3, se aplica de nuevo la regla del vecino más cercano. Este nuevo tour (1-3-2-4-5-1) dio como resultado el mismo costo del vecino más cercano (8). Para generar el siguiente tour, se regresa al construido bajo el vecino más cercano, a fin de garantizar que la búsqueda sea global. Apoyados en Berbiela (1998) y aplicado al presente contexto, este tipo de búsqueda significa que, antes de generar el nuevo el tour, se borra de la memoria cualquier operación previa hecha en el sistema, a fin de buscar y generar otra nueva mejor solución. Así, se dejan fijas las ciudades 1 y 5, y se realiza el sacrificio desde la ciudad 5. No se visitará la primera más cercana disponible, sino la siguiente (2). A partir de la ciudad 2 se aplica de nuevo la regla del vecino más cercano y así sucesivamente. Al final, si n es el tamaño de la instancia TSP, en este caso 5 ciudades, se realizarán $n-1$ sacrificios cortoplacistas adaptativos. Es decir, con esta heurística se tendrán $n-1$ nuevos tours para analizar.

Nótese el pequeño cambio que se está incorporando al comportamiento del sistema: plan vacacional bajo el vecino más cercano. Esta leve modificación se busca que permita encontrar en qué ciudad debería realizarse el sacrificio cortoplacista adaptativo, con el ánimo de que quizá mejore el desempeño final del sistema ilustrado.

Observe que antes de iniciar cada SCA, se retoma la solución de inicio arrojada por el vecino más cercano. Esto, desde el punto de vista de la optimización combinatoria, y como se mencionó, constituye una búsqueda global, lo cual es pertinente para evitar el encierro en óptimos locales.

No obstante, aparte de considerar, en el diseño, diversos principios del pensamiento sistémico como campo de inspiración, no conviene dejar de lado las recomendaciones fundamentales arrojadas por la revisión literaria del TSP. La primera fue que para mover las puntas actuales de conocimiento hacia esferas desconocidas, es preciso incorporar

nuevos campos de inspiración, lo cual ya se atendió. La otra arrojó que, para avanzar alrededor del conocimiento actual es preciso generar híbridos de los métodos existentes, presentándose una tendencia a combinar búsqueda global con la local.

Para vincular esta última recomendación, cada tour generado con la leve modificación, fruto de cada SCA, será alterado mediante una búsqueda local. Para ello, la revisión literaria (capítulo 3) mostró como principales optimizadores locales el 2-opt y el 3-opt. 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 Golden, et al. (1980) y Marti, (2003) concluyeron que para ello el aumento en el tiempo computacional no justifica la eficacia en la respuesta.

5.2.2 Programación de la heurística

— **Diagrama de flujo:** En la figura 13 se presenta la estructura general, en forma de diagrama de flujo, que representa el algoritmo Sacrificio Cortoplacista Adaptativo (SCA). Las anotaciones, precedidas del símbolo (‘) se emplean para ilustrar los pasos fundamentales que la componen y facilitar el entendimiento.

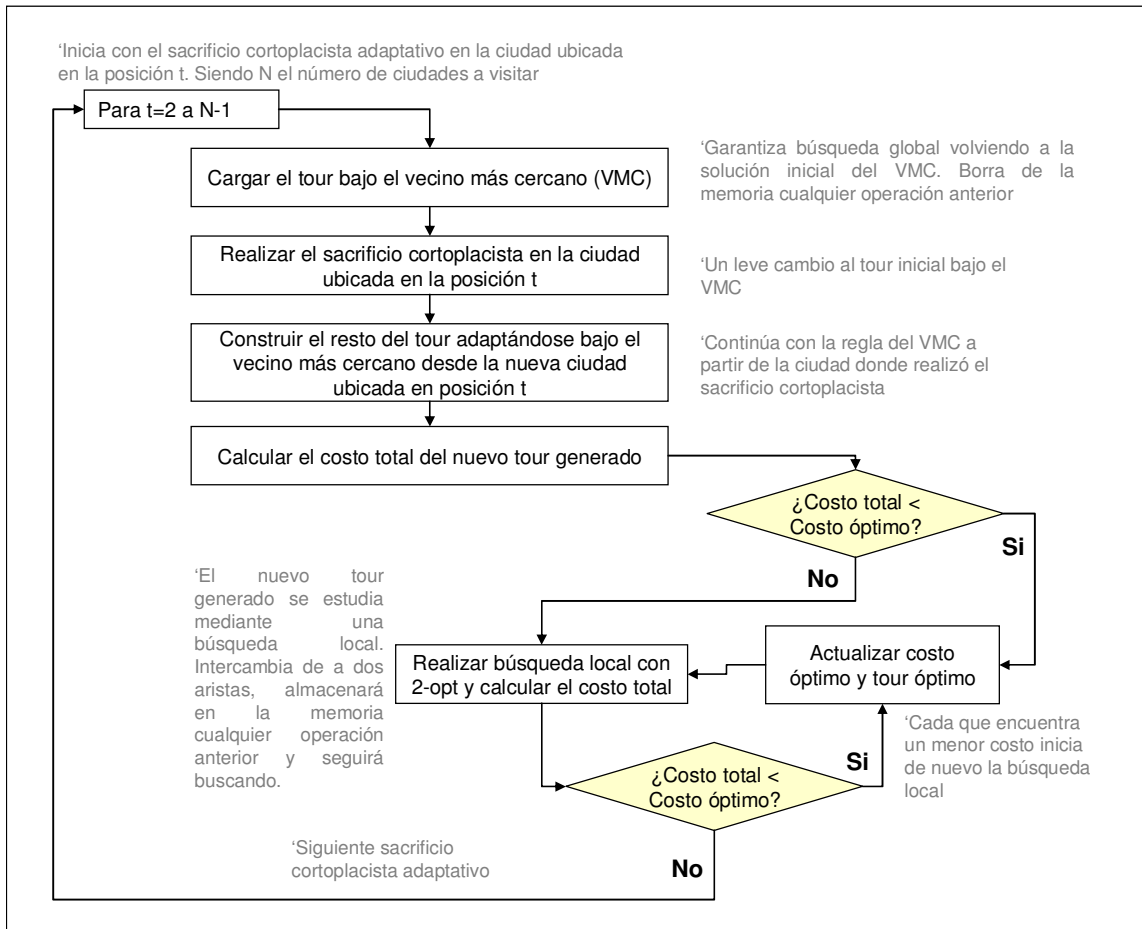


Figura 13. Diagrama de flujo del SCA_2opt

La programación del algoritmo fue realizado en *Visual Basis for Applications*, en el entorno de Macros de Excel. A continuación se presenta tal cual:

— **Pseudocódigo:**

Sub Sacrificio_Cortoplacista_adaptativo()

For t = 2 To Nro - 1

'Carga la ruta arrojada por el VMC para mantener la búsqueda global

For l = 1 To Nro

ciudad(l) = id_menor(l)

Next l

'Inicia el t-ésimo sacrificio costoplacista

For i = t To Nro - 1

cost_menor2 = 1E+39

For j = i To Nro - 1

If ruta(ciudad(i - 1), ciudad(j + 1)) < cost_menor2 Then

cost_menor2 = ruta(ciudad(i - 1), ciudad(j + 1))

'Cambia por la segunda ciudad inmediatamente cercana disponible

'Luego realiza el movimiento adaptativo bajo la misma regla del vecino más cercano

aux = ciudad(i)

ciudad(i) = ciudad(j + 1)

ciudad(j + 1) = aux

End If

Next j

Next i

'Calcula el costo del nuevo tour generado

For l = 1 To Nro - 1

costo_ruta(l) = ruta(ciudad(l), ciudad(l + 1))

Next l

regreso = ruta(ciudad(l), 1)

costo_total = 0

costo_total = costo_total + regreso

For i = 1 To Nro - 1

costo_total = costo_total + costo_ruta(i)

Next i

'Actualiza si encuentra un costo menor

tours = tours + 1

If costo_total < costo_opt Then

costo_opt = costo_total

For l = 1 To Nro

id_opt(l) = ciudad(l)

```

Next l
'Dmax es un parámetro para la búsqueda local 2-opt
Dmax = 0
Else
Dmax = costo_opt - costo_total
End If
'Invoca la búsqueda local 2-opt. Dentro de ella, si encuentra un costo menor actualiza el
óptimo
Call Dos_opt
'Siguiente sacrificio cortoplacista
Next t
End Sub

```

En los anexos 1-2 puede verse el código del vecino más cercano y del 2-opt.

- **Interfaz de usuario:** La interfaz contiene dos hojas, en una de ellas las instancias TSP pueden insertarse como matrices, y en la otra, bajo coordenadas cartesianas. En la primera hoja se imprimen los resultados: costo del tour, tours generados, tiempo de cómputo, ruta a seguir. Se tiene un parámetro de entrada: el tamaño de la matriz o de la instancia. Para ejecutar el algoritmo basta dar clic en el botón de acción “Run”. Dicha interfaz se ilustra en la figura 14.

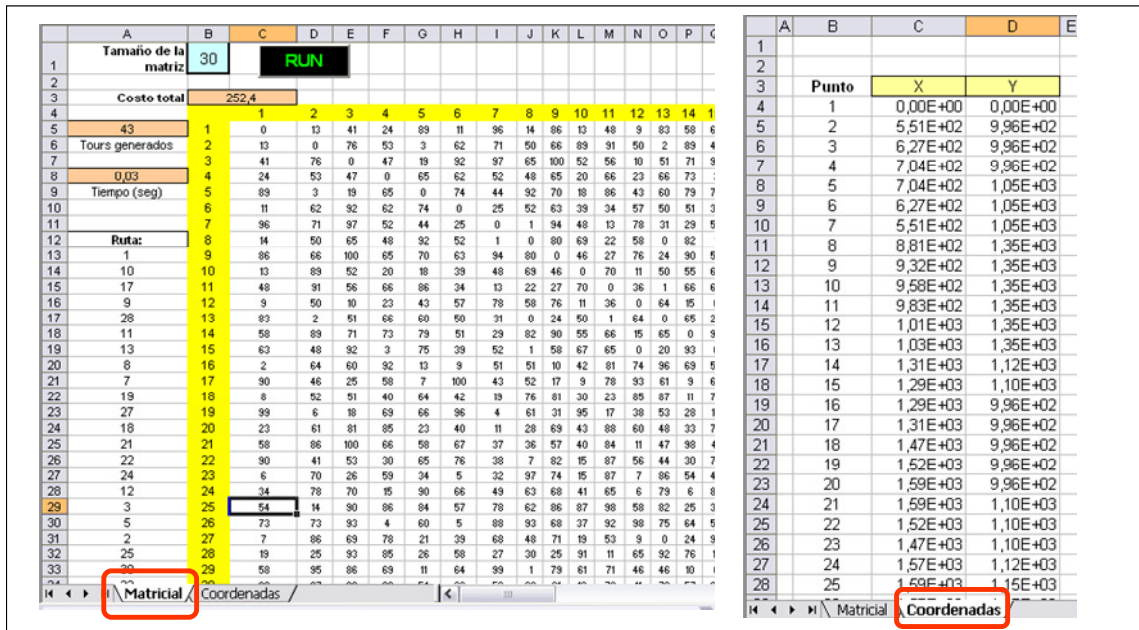


Figura 14. Interfaz de usuario del SCA_2opt

5.2.3 Aplicación de la heurística propuesta al caso de don Pablo

Recuérdese que con la heurística propuesta se pretende estabilizar el comportamiento de “bola de nieve” que subyace en el caso de don Pablo en las últimas ciudades que visita. Al aplicar esta heurística a la instancia de 130 ciudades, se nota el ciclo de balance al final del recorrido del viajero. Esto se evidencia en la figura 15, la cual muestra en la parte superior el escenario de recurrir a la estrategia del VMC, que permite obtener un costo total de 428 millones de pesos para esta instancia. Asimismo, en la parte inferior se muestra el comportamiento del costo total acumulado al aplicar la heurística propuesta, obteniendo un costo de 298 millones de pesos. Obsérvese cómo se estabiliza la curva del costo total acumulado a medida que se construye el tour completo bajo el uso del SCA_2opt.

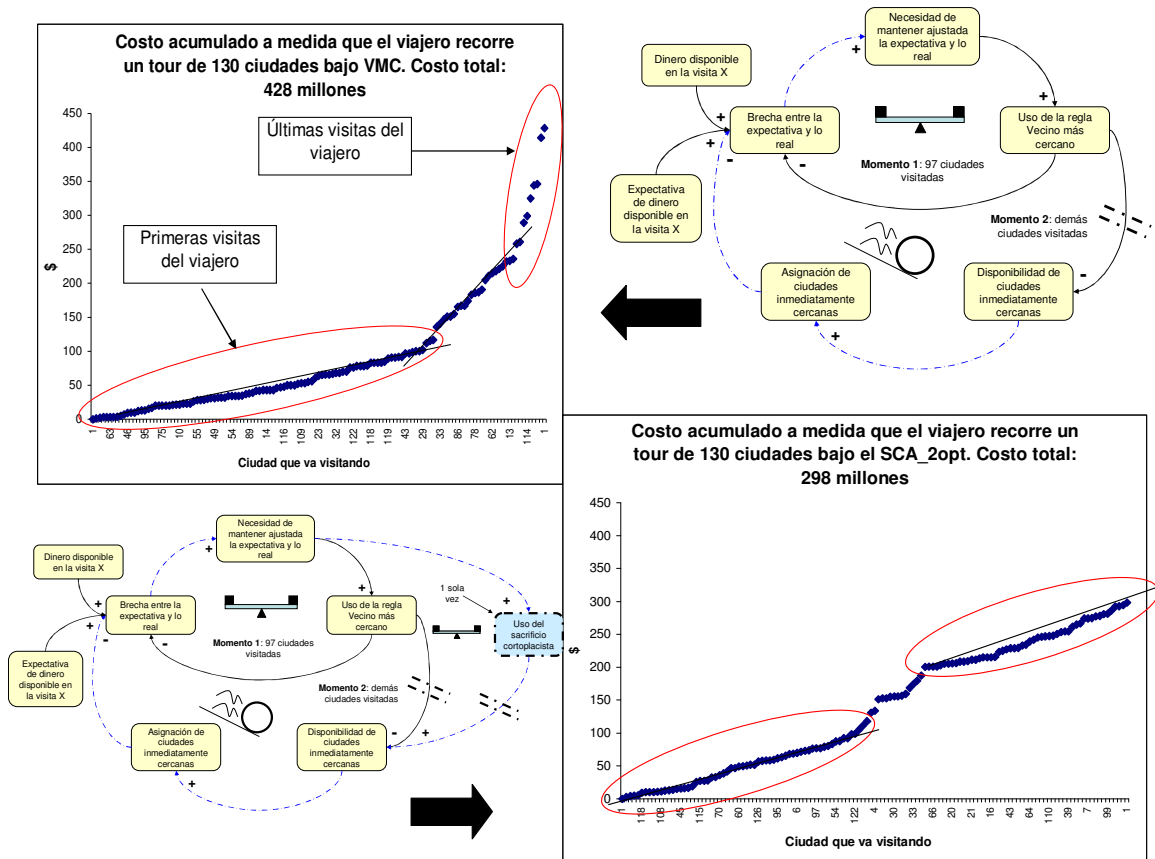


Figura 15. Efecto del SCA_2opt en el costo total acumulado a medida que se construye el tour de 130 ciudades empleado en el caso de don Pablo.

5.3 Resultados de la experimentación

5.3.1 Comparación con heurísticas de construcción y de mejoramiento

— Eficacia (costo) del SCA_2opt con relación a VMC, IMB y 2_opt WQSB:

Al ejecutar la prueba de análisis de varianza para corroborar si existen diferencias estadísticamente significativas entre método de interés con relación a la eficacia, se obtuvo un valor p de cero en dicho factor (ver tabla 8). Esto significa que no todos los métodos son considerados equivalentes en la variable respuesta costos (eficacia). Del mismo modo, era

de esperarse la existencia de diferencias en el factor tamaño de la instancia y su efecto pudo corroborarse también en esta prueba. Así, al incluirlo como un factor más, permitió aislar del método la variabilidad atribuida a las instancias. No se encontró interacción significativa entre método e instancia.

Tabla 8. Análisis de la Varianza para Costo - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Método	433145,0	3	144382,0	52,72	0,0000
B:Instancia_ciudad	552037,0	9	61337,5	22,40	0,0000
INTERACCIONES					
AB	115913,0	27	4293,07	1,57	0,0963
RESIDUOS	109550,0	40	2738,76		
TOTAL (CORREGIDO)	1,21065E6	79			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

En la figura 16 se presenta la gráfica de medias para la eficacia (costos) según el método, a un 95% de confianza.

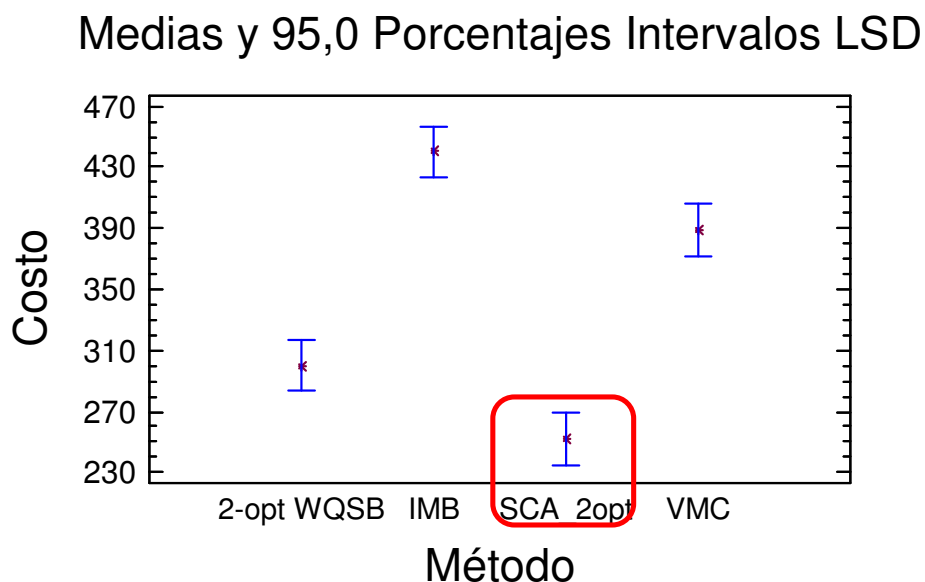


Figura 16. Gráfico de medias para el costo arrojado por las heurísticas

Nótese en la figura 16, que el método más eficaz fue la heurística propuesta SCA_2opt, con un costo promedio de 252. Seguido está el 2-opt incorporado en el WinQSB (300). Con resultados más distantes se encuentran el vecino más cercano (389) y la inserción más barata (440), ambos incorporados en el citado software. Las diferencias visuales se hacen más notables en la figura 17, la cual ilustra el comportamiento del costo medio de los tours TSP según diferentes tamaños de las instancias, destacándose la supremacía en eficacia del método propuesto SCA_2opt en comparación con los demás sometidos a prueba.

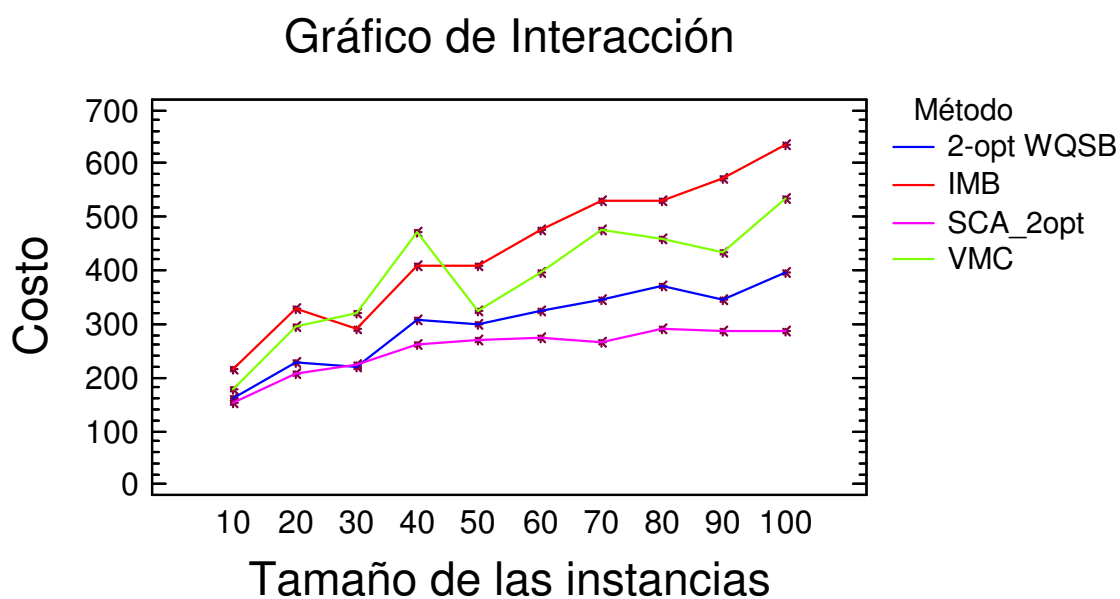


Figura 17. Costo arrojado por las heurísticas para diferentes instancias TSP

Para corroborar estadísticamente, qué métodos son los que difieren en términos de eficacia, y poder soportar el análisis visual, se corrió la prueba de rangos múltiples de Duncan. En la tabla 9 se muestran dichos resultados, siendo concluyente que los métodos sometidos a prueba no son homogéneos.

Tabla 9. Contraste Múltiple de Rangos para Costo según Método

Método: 95,0 porcentaje Duncan				
Método	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
SCA_2opt	20	252,145	11,702	X
2-opt WQSB	20	300,3	11,702	X
VMC	20	388,9	11,702	X
IMB	20	440,45	11,702	X

Se destaca, entonces, que el método propuesto supera en eficacia a los otros tres sometidos a ensayo y que dicho desempeño se debe, en este caso, al análisis sistémico como campo de inspiración. Pero ¿cómo será el comportamiento del SCA_2opt en cuanto a la eficiencia computacional?, es lo que a continuación se procede a responder.

— **Eficiencia (tiempo computacional seg) del SCA_2opt con relación a VMC, IMB y 2_opt WQSB:**

Respecto a la eficiencia, medida en tiempo computacional, en segundos, se encontró que los niveles de los factores método e instancias difieren significativamente, con un valor-p de 0.000. Esto también aplica para la interacción método-tamaño de las instancias, como puede corroborarse en la tabla 10. En otras palabras, hay evidencia para soportar el hecho de que, en términos de tiempo computacional, no todos los métodos presentan el mismo desempeño y, como era de esperarse, al ser el TSP un problema NP-hard, cuando el tamaño de las instancias crece, el tiempo computacional varía en magnitudes superiores a la proporcionalidad. Lo que está mostrando la presencia de interacción entre los factores método-tamaño de instancia, es que no todos los métodos, para los diferentes niveles de las instancias (10, 20, ..., 100 ciudades) presentan el mismo efecto en cuanto a la eficiencia computacional.

Tabla 10. Análisis de la Varianza para Tiempo_seg - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Método	917,265	3	305,755	446,31	0,0000
B:Instancia_ciudad	629,05	9	69,8945	102,03	0,0000
INTERACCIONES					
AB	1759,42	27	65,1637	95,12	0,0000
RESIDUOS	27,4029	40	0,685072		
TOTAL (CORREGIDO)	3333,14	79			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Considerando la dispersión de los tiempos experimentales para cada uno de los métodos de interés, puede deducirse en la figura 18 que, bajo análisis visual, el método propuesto SCA_2opt se muestra más homogéneo, junto con el IMB y el típico VMC, en comparación con el 2-opt WSB (mejor método del WinQSB en cuando a eficacia). Este último método presenta valores, en segundos, considerablemente superiores que los demás. En él, se está presentando el típico comportamiento de una eficacia favorable respecto a los demás métodos del WinQSB, pero a costa de un notable deterioro de la eficiencia computacional.

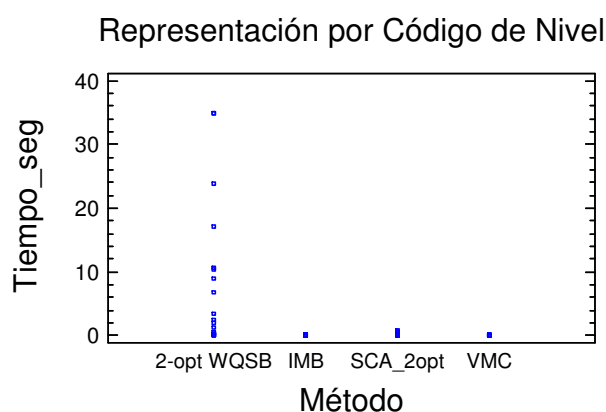


Figura 18. Gráfico de dispersión para el tiempo empleado por las heurísticas

Por el contrario, el método propuesto SCA_2opt, no solo supera a todos los demás en cuanto a la respuesta (costo del tour) que arroja (figura 17), sino que lo hace en un tiempo

computacional aparentemente mucho menor desde el punto de vista práctico. No obstante, para corroborar la validez estadística de estos hallazgos exploratorios, los resultados de la prueba de rangos múltiples de Duncan se muestran en la tabla 11.

En la tabla 11 se observa que el VMC, el IMB y el SCA_2opt desde el punto de vista estadístico se consideran homogéneos en cuando al tiempo computacional, con valores medios de menos de un segundo. Contrario ocurre al 2-opt WQSB cuyo tiempo medio para aportar respuestas considerando las instancias sometidas a ensayo, fue de 7,9 segundos.

Tabla 11. Contraste Múltiple de Rangos para Tiempo_seg según Método

Método: 95,0 porcentaje Duncan				
Método	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
VMC	20	0,0024	0,185077	X
IMB	20	0,03365	0,185077	X
SCA_2opt	20	0,236	0,185077	X
2-opt WQSB	20	7,90785	0,185077	X

Observando el comportamiento de la interacción método-tamaño de la instancia y, teniendo presente el hallazgo anterior, en la figura 19 puede verse la explosión, en tiempo computacional, que presenta el 2-opt WQSB, en comparación con los demás.

Gráfico de Interacción

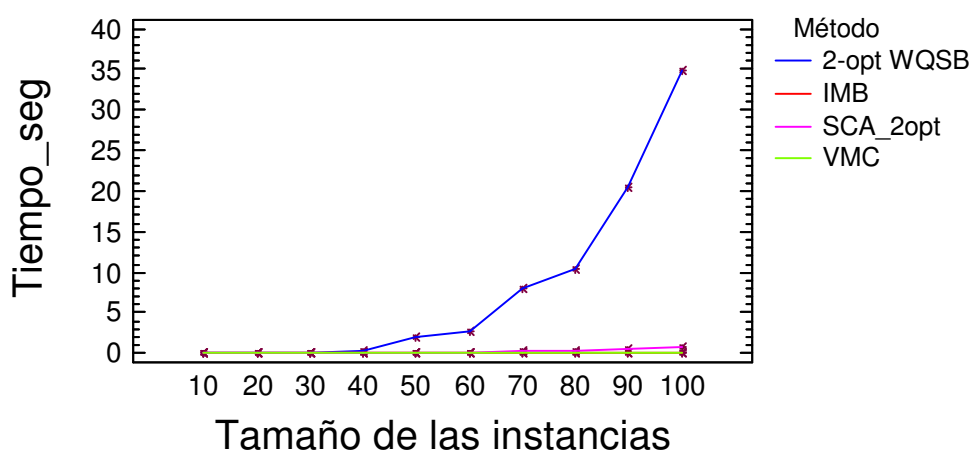


Figura 19. Tiempo empleado por las heurísticas en cada tamaño de las instancias TSP

Ahora bien, con significancia estadística se encuentran evidencias que soportan el hecho de que el método propuesto SCA_2opt supera en cuanto a eficacia (costo) a todas las demás heurísticas de interés y que, en eficiencia, consume un tiempo computacional considerablemente inferior al arrojado por la heurística más eficaz del WinQSB (2_opt WSB), ubicándose cerca de los otros dos métodos. Tanto VMC como IMB presentan una eficacia desfavorable en comparación con los demás. Como mayor soporte a dicha discusión de resultados, en el anexo 3 se presenta la matriz de datos obtenida al realizar las experimentaciones, tanto en eficacia como en eficiencia. Así, considerando los valores medios de eficacia y eficiencia, el SCA_2opt encuentra, en promedio y considerando el rango de experimentación (10,..., 100 ciudades), un costo de magnitud 49% menos que el método más eficaz del WinQSB (2_opt WQSB) en un 100% menos de tiempo computacional.

Para complementar el análisis de la eficiencia, se determinaron las dos funciones que mejor representan el tiempo medio de CPU para cada uno de los métodos: SCA_2opt, el IMB y el 2-optWQSB. En la figura 20 se presentan los resultados.

Comportamiento en el tiempo de PC similar a una heurística rápida

Método	Función de tiempo de CPU			R ²
	Nº	Tipo	f(n)	
2-optWQSB	1	Multiplicativa	$f(n) = (1,23 \times 10^{-7})n^{4,19}$	98,7%
	2	Exponencial	$f(n) = e^{(-4,11+0,08 n)}$	98,1%
SCA_2opt	1	Lineal	$f(n) = -0,32 + 0,00985833n$	89%
	2	Raíz cuad n	$f(n) = -0,776 + 0,1386\sqrt{n}$	82%
IMB	1	Lineal	$f(n) = -0,0377 + 0,001235n$	94%
	2	Raíz cuad n	$f(n) = -0,096 + 0,175805\sqrt{n}$	88,5%

Figura 20. Funciones ajustadas para el tiempo medio de CPU consumido por las heurísticas SCA_2opt, IMB y 2-optWQSB, al someterlos a prueba en instancia desde 20 hasta 100 ciudades, dos de cada tamaño y con incremento de a 10 ciudades.

Nótese que la función que mejor se ajustó al tiempo de CPU consumido por el método propuesto es de tipo lineal, teniendo como segundo mejor ajuste una de raíz cuadrada de n (número de ciudades). Ambos casos son similares a los de heurísticas consideradas rápidas.

— **¿El desempeño del SCA_2opt es resultado del análisis sistémico?**

Luego de ver los anteriores resultados, surge el deseo de estudiar si la favorable eficacia del método propuesto realmente se debe al posible punto de apalancamiento que se le hizo a la heurística vecino más cercano, o por el contrario, es fruto del potencial de la búsqueda local 2_opt que le fue incorporado, o hasta quizá del azar. En otras palabras, ¿dicho notable desempeño se debe al uso del pensamiento sistémico como campo de inspiración?

Recuérdese que el método propuesto SCA_2opt, parte de la solución del vecino más cercano, realiza un sacrificio de corto plazo pasando a la segunda ciudad inmediatamente cercana una sola vez, se adapta siguiendo la misma regla del vecino más cercano para completar el tour, y luego, es donde viene la búsqueda local. Entonces, si el desempeño de la heurística SCA_2opt se debe al análisis sistémico efectuado, el hecho de eliminar el SCA e inicializar exactamente la misma búsqueda local 2opt con la solución del vecino más cercano o con un tour generado aleatoriamente, debería dar un desempeño menos favorable. En ese sentido, se probó el desempeño de dos heurísticas más: VMC_2opt y Aleat_2opt, cuyas estructuras, partiendo de la empleada por el SCA_2opt, se ilustran en la figura 21.

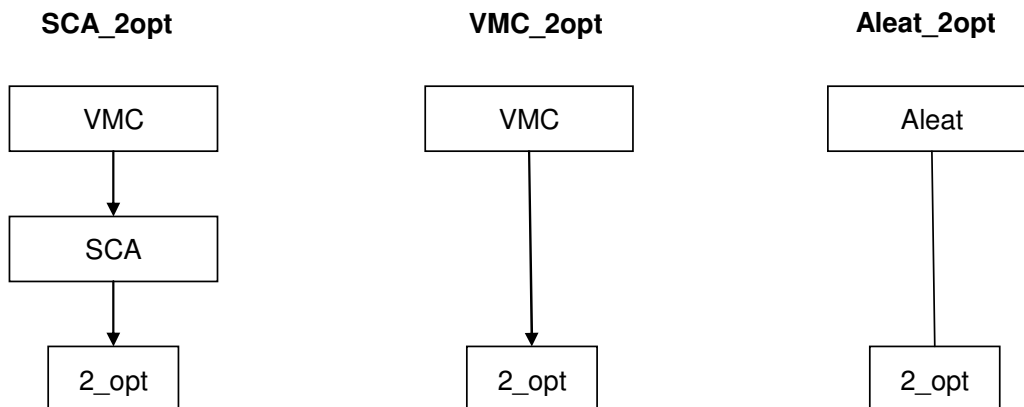


Figura 21. Dos heurísticas alternas para analizar el efecto del SCA

Analizando la eficacia de los métodos, al efectuar ANOVA para estas tres heurísticas, probando esta vez con instancias que van desde 80 hasta 140 ciudades (dos diferentes de cada tamaño y con incrementos de 10), se encontró un valor p nulo para el factor método (0.0000) (tabla 12). Es decir, al menos una de las heurísticas sometidas a prueba presenta un costo diferente respecto a las demás. Pero ¿cuál o cuáles de ellas se diferenciarán?

Tabla 12. Análisis de la Varianza para Costo - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Método	167608,0	2	83804,2	46,26	<u>0,0000</u>
B:Instancias	10419,8	6	1736,63	0,96	0,4761
INTERACCIONES					
AB	17137,9	12	1428,16	0,79	0,6573
RESIDUOS	38041,5	21	1811,5		
TOTAL (CORREGIDO)	233208,0	41			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

La prueba de rangos múltiples de Duncan (tabla 13) arrojó que estas tres heurísticas presentan, entre sí, diferencias estadísticamente significativas respecto al costo del tour arrojado, siendo el SCA_2opt aquella que menor costo medio presenta (298,29).

Tabla 13. Contraste Múltiple de Rangos para Costo según Método

Método: 95,0 porcentaje Duncan				
Método	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
SCA_2opt	14	298,286	11,3751	X
VMC_2opt	14	350,286	11,3751	X
Aleat_2opt	14	450,5	11,3751	X

En la figura 22 se muestra el comportamiento de la eficacia media de estas tres heurísticas para las instancias probadas.

Comportamiento según tamaño de la instancia

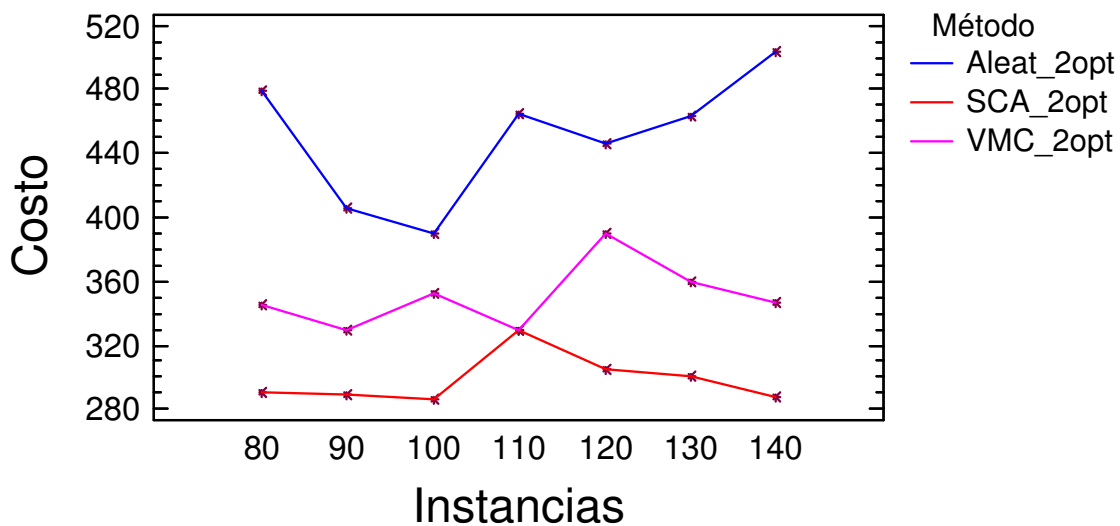


Figura 22. Costo arrojado por las heurísticas en cada tamaño de las instancias TSP

Así, se encuentra que la eficacia de la heurística propuesta SCA_2opt, respecto a las demás, se debe a la incorporación del punto de apalancamiento, resultado del análisis sistémico del vecino más cercano. Es decir, el hecho de inicializar la búsqueda local con el mismo vecino más cercano o con una generación aleatoria del tour, no garantiza el mismo desempeño que iniciando dicha búsqueda con el sacrificio cortoplacista adaptativo, el cual constituye una modificación leve: solo una vez se renuncia a visitar la ciudad inmediatamente cercana y se pasa a la siguiente más cercana, a partir de allí se continúa con la práctica del vecino más cercano.

— Desempeño de una nueva versión del SCA_2opt: SCA_2opt_r

El D_{max} que se nota en el algoritmo (apartado 5.5.2) 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 en esta tesis 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 conduciría 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 almacenado 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 $(1+r)*costo_opt - costo_total$, siendo r $[0, 1]$ 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 serán tanteados bajo ensayo y error para observar el desempeño de la heurística SCA_{2opt}. Dicha estrategia se debe a que la situación descrita no forma parte de los objetivos ni del alcance de esta tesis, sino que es una componente surgida durante el desarrollo de la misma. La optimización del parámetro r representa de por sí un proyecto retador, que puede constituirse en uno de los trabajos futuros de esta tesis.

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 la eficacia y la eficiencia. Se reitera que esto no fue planeado al establecer el capítulo de materiales y métodos, sino que surgió fruto del mismo diseño de la heurística. Así, las comparaciones entre estos dos métodos propuestos se realizaron para nuevas instancias, desde tamaño pequeño (42 ciudades) hasta más complejas (442 ciudades), la mayoría de ellas encontradas en el TSPLib. Las comparaciones se realizaron respecto a la distancia relativa entre el costo arrojado por cada método y el mejor valor reportado en la literatura (óptimo). Esta distancia, a su vez, fue abordada mediante prueba de hipótesis para la diferencia de medias, validando los supuestos de igualdad de varianzas.

Igualmente, estas experimentaciones permitirían monitorear el rango de variación del mejor valor r , encontrado bajo ensayo y error, a fin de tener una primera exploración de los valores más indicados para el r , sin pretender ser concluyentes dado el método de ensayo y error y el interés de esta tesis. En la tabla 14 se presentan los resultados de las experimentaciones.

Tabla 14. Resultados experimentales para comparar los dos métodos propuestos

Instancia TSP	(1) Referente reportado en literatura	Valor r	(2) SCA_2opt_r	(3) SCA_2opt	Distancia relativa [(2)-(1)]/(1)	Distancia relativa [(3)-(1)]/(1)
Swiss42	1.273	0,05	1.285	1.375	0,9%	8,0%
Eil51	426	0,10	436,08	449,85	2,4%	5,6%
St70	675	0,14	690,62	713,98	2,3%	5,8%
Eil75	535	0,16	560,14	588,61	4,7%	10,0%
Eil76	538	0,25	559,61	567,01	4,0%	5,4%
Rat99	1.211	0,18	1.259,51	1.268,95	4,0%	4,8%
KroA100	21.282	0,16	22.219,34	22.379,4	4,4%	5,2%
Eil50	425	0,10	430,48	448,83	1,3%	5,6%
KroA150	26.524	0,19	27.999,66	29.076,90	5,6%	9,6%
Krob150	26.130	0,18	26.904,48	28.136,3	3,0%	7,7%
d198	15.780	0,01	16.180,53	16.212	2,5%	2,7%
Tsp225	3916	0,01	4.054,77	4.071	3,5%	3,9%
Pcb442	50.778	0,13	53.287,29	55.133,8	4,9%	8,6%

Con relación a la distancia relativa de cada método sometido a prueba, la menor es presentada por el SCA_2opt_r, con una media de 3,35%; en tanto que para el SCA_2opt este valor se situó en casi el doble 6,38%. En el 75% de los casos estudiados, la distancia relativa del SCA_2opt_r respecto al valor óptimo no superó el 4,4%, mientras que para el SCA_2opt el tercer cuartil fue de 8,0 %. Cabe anotar que estas magnitudes exactas, aplican para los valores r expuestos en la tabla 14, sobre los cuales no hay certeza de que sean los óptimos.

Al comparar las distancia relativas mediante la prueba de diferencia de medias, el intervalo de confianza, al 95%, fue de [1,5%; 4,5%]; es decir, no incluye el valor 0%. Esto lleva a concluir que la distancia relativa media de los métodos comparados presenta diferencias estadísticamente significativas. Esto, desde luego, tiene validez, siempre y cuando se cumpla el supuesto de igualdad de varianzas y de que las muestras provienen de distribuciones normales. Así, al verificar el cumplimiento de este supuesto, el intervalo de confianza, también al 95%, para el cociente de varianzas fue de [0,74; 8,04]. Al incluir el valor uno (1), no hay razón suficiente para rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas.

Con respecto al supuesto de normalidad, los coeficientes de curtosis y asimetría, estandarizados, se encuentran dentro del rango esperado $[-2; 2]$.

En la figura 23 se presenta el diagrama de cajas y bigotes para la distancia relativa de ambos métodos.

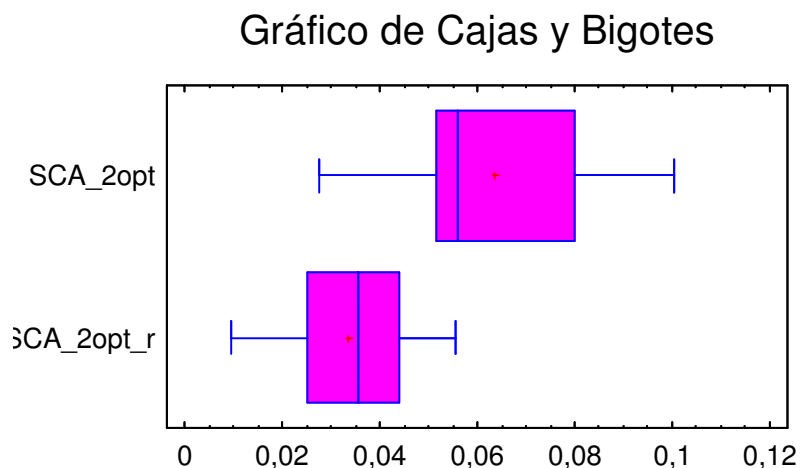


Figura 23. Diagrama de cajas y bigotes para el costo arrojado por los métodos propuestos

Con base en lo expuesto, 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). Con relación a la eficiencia computacional, la distancia relativa en tiempo de cómputo del SCA_2opt_r respecto al SCA_2opt presenta elevada variabilidad (desviación típica: 101%), con valores mínimo y máximo de 2,2% y 297% respectivamente, un promedio de 91,7% más tiempo que el SCA_2opt y una mediana de 36,6%. En otras palabras, dados los valores de r empleados, el SCA_2opt_r presenta mayor eficacia que el SCA_2opt, pero a costa de restar eficiencia computacional.

Observando los valores de r , que mediante ensayo y error dieron una respuesta atractiva para el autor en términos del costo del tour, se encontraron valores entre 0,01 y 0,25, con una media de 0,13, una mediana de 0,14 y una desviación de 0,07. Cabe anotar que en el 75% de los casos el valor r no fue superior a 0,18.

Para entender cómo cambia el tiempo computacional del SCA_2opt_r a medida que cambia el parámetro r se levó a cabo otra prueba. Así, entonces, se estudió el tiempo computacional ante cambios de incremento constante, de 0,05, desde 0 hasta 1,9. Esto para dos instancias: Swiss42 y Eil51.

En la figura 24, para ambas instancias, se presenta el comportamiento del tiempo computacional ante cambios en el valor r.

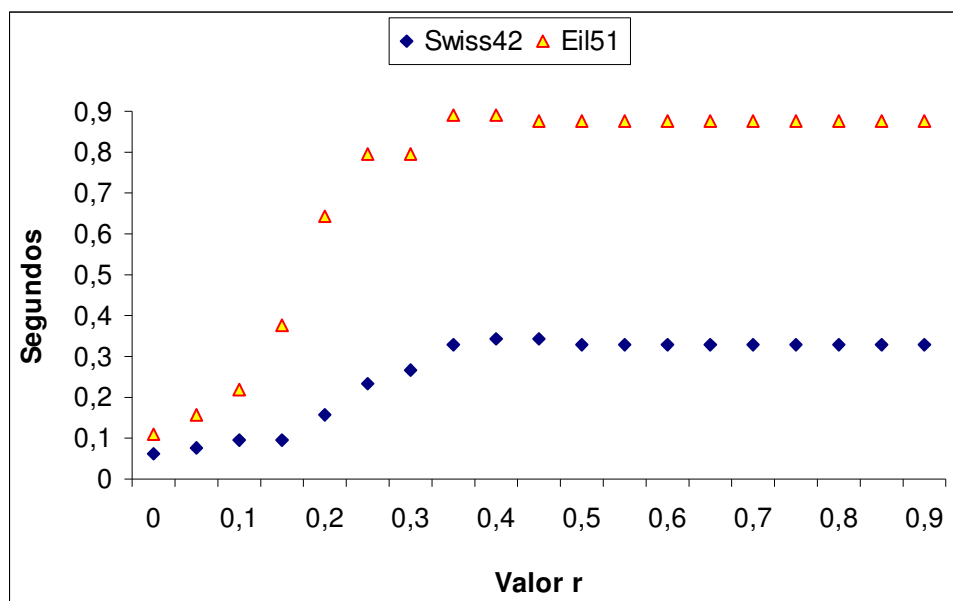


Figura 24. Tiempo computacional a medida que cambia el valor de r

A medida que se incrementa el valor r, el algoritmo acepta más tours para realizar los intercambios 2-opt, así: para un $r=0$, se tienen 63 tours, lo cual consume un tiempo de 0,063 segundos, luego a medida que aumenta el r, entonces va incrementando el número de tours y, en consecuencia, el tiempo computacional. Por ejemplo, antes los cambios de a 0,05 en las pruebas realizadas, el incremento en tours y en tiempo continuó hasta $r=0,45$, culminando allí con 712 tours y con un tiempo de 0,45 segundos. A partir de ese valor de r y considerando los incrementos permisibles (0,05), la cantidad de tours y el tiempo se mostraron convergentes a dichos valores.

También estas pruebas sirvieron para explorar qué ocurre con el costo del tour. Esto, a fin de tener una primera idea del rango de ubicación de los valores más indicados para el r . En la figura 25, para cada instancia, se muestra el comportamiento del costo a medida que crece el r .

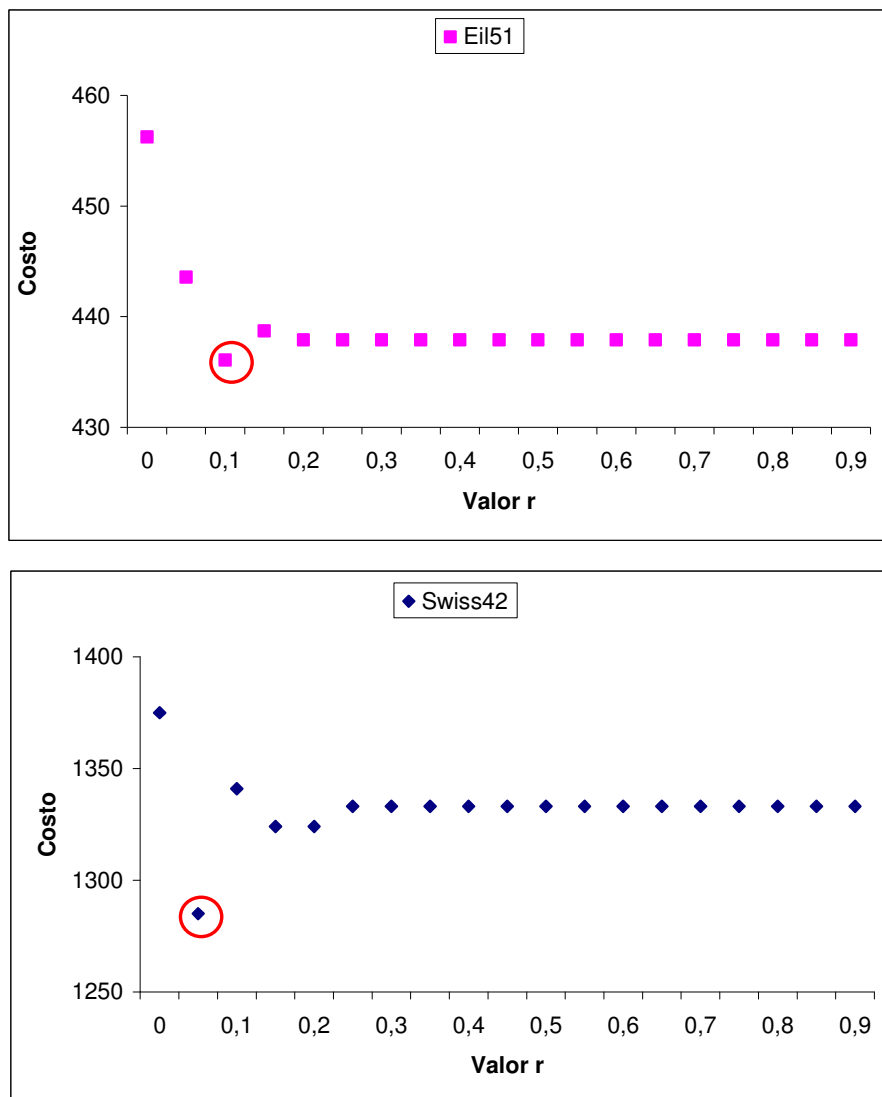


Figura 25. Costo del tour a medida que cambia el valor de r

En el caso de la instancia Swiss42, el mejor costo parece ubicarse en un valor no mayor a 0,1. Ante los incrementos trabajados para el r , el mejor costo fue de 1.285 ($r=0,05$). Es de anotar que después de este valor el costo crece (1.341), pero no converge inmediatamente, sino que tiene una leve disminución (1.324), y luego vuelve a subir (1.333) para ahí si converger. Un fenómeno similar se presenta en Eil51. El menor costo bajo el incremento definido se ubicó en $r=0,1$ (436,08), a partir de allí subió el costo a 438,73 y luego converge hacia el valor 437,9. Parece ser que los mejores costos se encuentran entre el primer 25% de valores permisibles para r (0 - 0,25), lo cual también es coherente con los resultados de la tabla 14.

5.3.2 Comparación con metaheurísticas bajo un método propuesto

Consecuentes con el apartado metodológico (capítulo 4) los métodos propuestos se compararon contra 29 metaheurísticas, extraídas de diversos estudios, las cuales fueron agrupadas en cinco categorías: Colonia de hormigas (7), Algoritmos genéticos (12), Enfriamiento simulado (5) y otros (5). Algunos de los estudios referentes presentaron resultados para solo la(s) metaheurística(s) que proponen; en cambio otros, aparte de ello ofrecieron resultados de metaheurísticas desarrolladas en otros trabajos, como por ejemplo Dorigo y Gambardella (1997) quienes aparte de sus aportes ACS y ACS+3opt ofrecieron 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: el primer valor, de arriba hacia abajo, se trata del costo medio (CM), el segundo es el mejor costo encontrado (MC), señalado con un asterisco (*), el tercero, entre paréntesis, representa el tiempo computacional (TC), en segundos, y el cuarto valor corresponde al número de tours (NT) que consumió cada método para encontrar dicho mejor costo. En el caso del SCA_2opt y el SCA_2opt_r, el costo medio y el mejor encontrado son los mismos, puesto que dichas heurísticas no tienen ninguna generación

aleatoria en los tours. Lo cual sí ocurre con la mayoría de las metaheurísticas, entre ellas: Colonia de hormigas, Algoritmos genéticos, entre otros.

Cada matriz, además, contiene la siguiente gerencia visual, a fin de facilitar el análisis: verde fosforescente (ocupó el primer lugar en la comparación), verde claro (el segundo lugar), amarillo (tercer lugar) y naranja (el último lugar). Las celdas en blanco se refieren a otras posiciones que ocuparon los métodos y el color gris significa que no se pudo realizar la comparación debido a que no se detectaron datos (ND).

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

— **SCA_2opt y SCA_2opt_r 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), MNACO (Ant Colony Optimization with multiple nests' cooperation), MMAS (Max-Min Ant System), ACO MP (Ant Colony Optimization maximum method probability), ACO SLR (ACO Single loop randomness) y ACO MLR (Multi loop randomness). Un aspecto que se consideró importante para procurar que la referenciación tuviese de carácter internacional, fue el extraer 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 tabla 15 se presentan los resultados para seis instancias ubicadas en el TSPLib. Para los métodos propuestos estas instancias fueron descargadas y probadas de primera mano,

pero para los demás, la recopilación de la información proviene de fuentes secundarias (otros estudios realizaron la experimentación).

Tabla 15. Matriz de datos comparativos en el grupo de Colonia de hormigas

		Procesadores		Pent 4, 3.06 GHz		0,175 GHz DEC		Pent 4, 2.4 GHz		Pent 4, 2.8 GHz			
Nº	País:		Variables	Colombia		Bélgica y Suiza [18]		China [19]		USA [20]			
	Instancia TSP	Valor r		SCA_2opt_r	SCA_2opt	ACS	ACS_3opt	MNACO	MMAS	ACO MP	ACO SLR	ACO MLR	
1	Eil50	0,10	CM	430,48	448,83	ND				513,61	471,98	462,51	
			MC	430,48	448,83	425				513,61	460,9	453,64	
			TM	(0,114)	(0,098)	(ND)					(10)	(7)	(36)
			CPC	0,34884	0,29988	(ND)					28	19,6	100,8
			NT	[92]	[62]	[1.830]					[400]	[400]	[400]
2	Eil51	0,1	CM	436,08	449,85			429,04	430,06				
			MC	436,08	449,85			428,87	428,98				
			TM	(0,219)	(0,109)			(10,98)	(40)				
			CPC	0,67	0,33			26,35	96				
			NT	[186]	[63]			[ND]	[ND]				
3	Eil75	0,16	CM	560,14	588,61	ND				606,75	597,96	572,53	
			MC	560,14	588,61	535				606,75	585,69	566,01	
			TM	(0,805)	(0,320)	(ND)					(17)	(13)	(75)
			CPC	2,46	0,98	(ND)					47,60	36,40	210
			NT	[451]	[94]	[3.480]					[400]	[400]	[400]
4	KroA100	0,16	CM	22.219,34	22.379,4	ND			21.288,13	21.342,97	25.483	24.251,0	23.898,04
			MC	22.219,34	22.379,40	21.282			21.285,40	21.285,40	25.483	24229,9	23.531,40
			TM	(1,07)	(0,87)	(ND)			(26,88)	(104,8)	(26)	(22)	(130)
			CPC	3,27	2,66	(ND)			64,51	251,52	72,80	61,60	364
			NT	[206]	[140]	[4.820]			[ND]	[ND]	[400]	[400]	[400]
5	d198	0,01	CM	16.180,53	16.212	16.054	15.781,7			18.381	18.375,28	16.918,76	
			MC	16.180,53	16.212	15.888	15.780			18.381	17.982,90	16.752,80	
			TM	(6,49)	(6,35)	(ND)	(238)			(ND)	(ND)	(ND)	
			CPC	19,86	19,43	(ND)	41,65			(ND)	(ND)	(ND)	
			NT	[246]	[241]	[585.000]	[ND]			[ND]	[ND]	[ND]	
6	Pcb442	0,13	CM	53.287,29	55.133,8	51.690				71.742	69.572,73	81.885,64	
			MC	53.287,29	55.133,80	51.268				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	[659]	[543]	[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.

Para los resultados del SCA_2opt_r la tabla también presenta los valores r que fueron empleados, los cuales no necesariamente son los óptimos, puesto que se trabajó bajo ensayo y error, pues la optimización de este parámetro se dejará como estudio futuro. Vale resaltar de nuevo, que la asociación estudio – método, no necesariamente implica que el o los

autores respectivos desarrollaron el determinado método, sino que, aparte de desarrollar al menos uno de ellos, proporcionaron también resultados de costos o tiempos o tours, fruto de otros estudios primarios.

A modo de ejemplo de interpretación de la tabla 15, respecto a la instancia Eil50 y la variable CM, el SCA_2opt_r arrojó el menor costo (430,48) entre los métodos comparados, es decir, ocupó el primer lugar. El SCA_2opt ocupó el segundo lugar, con un costo de 448,83 y, el tercer lugar se debe al método ACO SLR (471,98). El último lugar fue ocupado por el método ACO MP (513,61). A partir de la información recopilada en la tabla 15, 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 16. 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, hace viable emplear proporciones de casos exitosos, entendiéndose estos como el evento de que un método propuesto supere, en determinada variable, al ser comparado con otro. Los resultados comparativos para la variable TM fueron los mismos que para CPC, por lo que en los análisis se empleó la variable TM.

Tabla 16. Posiciones de los métodos propuestos al compararse en el grupo de Colonia de hormigas

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 16 pudo calcularse el porcentaje de casos comparativos en los que tanto el SCA_2opt como el SCA_2opt_r superaron a otros métodos. Esto se presenta en la tabla 17.

Tabla 17. Porcentaje de éxito de los métodos propuestos al compararse en el grupo de Colonia de hormigas

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

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 17, se asemejan a la probabilidad de que un contrincante determinado supere al otro al finalizar la prueba. Así, una probabilidad de 0,5 es un evento netamente al azar. Atendiendo a este símil y considerando solo el espacio de casos comparativos que se realizaron (tabla 15), cuando el SCA_2opt_r participa en un caso comparativo con algún método basado en Colonia de hormigas, la probabilidad global de que salga favorecido es de 0,75. Cabe aclarar que esto se afirma en términos globales y exploratorios, ya que las probabilidades de éxito respecto a cada método comparativo específico varían. Por ejemplo, nótese en la tabla 15 que el SCA_2opt_r en ninguna de las comparaciones individuales con el ACS (Dorigo y Gambardella, 1997) 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 puedo 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.

Finalmente, 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%). Igualmente, en eficiencia computacional (tiempo, tours) se refleja la bondad del método para llegar a una respuesta (74% de los casos arrojó menores valores). Respecto a eficacia (CM: 50% y MC: 43%) el SCA_2opt no resultó tan favorable como el SCA_2opt_r con relación a las heurísticas 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 de los mismos.

— SCA_2opt y SCA_2opt_r 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), AGIV (Algoritmo Genético con Infección Viral), SGA (Simple GA), MDCCGA (Multiple dynamic diversity control GA), DDCGA (Dynamic diversity control GA), AG serial, paralelo y en grupo (Algoritmos genéticos con ejecución serial, en paralelo y en grupo), FRAG_GA (Fragment GA), IGA (Improved GA), SWAP_GATSP (Swapping GA for TSP), OX_SIM (GA con order crossover and simple inversion mutation), En la tabla 18 se presenta la matriz de comparaciones entre los métodos propuestos y los relacionados con Algoritmos genéticos.

Tabla 18. Matriz de datos comparativos en el grupo de Algoritmos genéticos

Procesadores		Pent 4, 3,06 GHz		Bélgica y Suiza [18]		Brasil [21]		Taiwan [22]			Intel Core 2 Duo 2,33 GHz			Libia [24]					
Nº	Instancia TSP	País	Valor r	Variab	Colombia		GA	AGIV	SGA	MDDCGA	DDCGA	Brasil [23]			Libia [24]				
					SCA_2opt_r	SCA_2opt						AG serial	AG paralelo	AG grupo	FRAG_GA	SWAP_GATSP	OX_SIM	IGA	
1	Swiss42		0,05	CM	1.285	1.375		1.343,6											
				MC	1.285	1.375		ND											
				TM	(0,078)	(0,063)		(ND)											
				NT	[72]	[61]		[ND]											
2	Eil76		0,25	CM	559,61	567,01						591	590	589					
				MC	559,61	567,01								ND	ND	ND			
				TM	(1,40)	(0,352)								(1,390)	(790)	(750)			
				CPC	4,28	1,08								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				21.350	21.900	22.670	21.294,5	
				MC	22.219,3	22.379,4	21.761		25.347,5	25.093,1	23.924,1					21.282	21.504	22.400	21.282
				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	27.999,7	29.076,9			33.495,7	33.130,3	32.737,0								
				MC	27.999,7	29.076,9			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	15.780								15.964	16.132	18.200	15.799,3	
				MC	16.180,5	16.212	ND									15.834	15.992	16.720	15.781
				TM	(6,49)	(6,35)	(253)									(ND)	(ND)	(ND)	(ND)
				NT	[246]	[241]	[ND]										[3.000]	[7.000]	[25.000]
6	Pcb442		0,13	CM	53.287,3	55.133,8			136.426,3	112.253,2	111.235,2				51.930	53.820	59.740	51.208	
				MC	53.287,3	55.133,8			125.779	104.121	103.740					51.104	52.620	53.402	51.101
				TM	(86,87)	(76,79)			(ND)	(ND)	(ND)					(ND)	(ND)	(ND)	(ND)
				NT	[659]	[543]			[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: gigajicios de PC (velocidad de procesador x TM), NT []: nro de tours.

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. Similar a las comparaciones con métodos basados en Colonia de hormigas, es esta oportunidad también se recurrió al procedimiento de obtención de las proporciones de éxito de los métodos propuestos. En la tabla 19 se muestra el porcentaje de casos comparativos donde las heurísticas propuestas superaron a métodos relacionados con Algoritmos genéticos.

Tabla 19. Porcentaje de éxito de los métodos propuestos al compararse en el grupo de Algoritmos genéticos

Variables	Métodos	Total de casos comparativos	Total de casos de éxito	% éxito
Costo medio (CM)	SCA_2opt_r	34	25	<u>74%</u>
	SCA_2opt	34	17	50%
Mejor costo (MC)	SCA_2opt_r	28	19	<u>68%</u>
	SCA_2opt	28	13	46%
Tiempo medio	SCA_2opt_r	6	4	<u>67%</u>
	SCA_2opt	6	6	<u>100%</u>
Número de tours (NT)	SCA_2opt_r	16	13	<u>81%</u>
	SCA_2opt	16	16	<u>100%</u>

De dicha tabla se deduce que, de nuevo, el SCA_2opt_r se muestra prometedor en cuando a eficacia y eficiencia. Por ejemplo, en cuando 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 (TM: 67% y NT: 87%). Así mismo, al observar la eficiencia computacional, el SCA_2opt de nuevo es el más ventajoso (menor tiempo y menores tours consumidos, 100% de los casos).

— **SCA_2opt y SCA_2opt_r 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 expuesto con los nombres: SA (Simulated Annealing), CSA (Conventional simulated annealing), TFSA (Temperature Fuzzy SA), TFSA (Temperature repetition fuzzy SA), PSO-SA (Particle swarm optimization with simulated annealing). En cuanto a las instituciones donde pertenecen los autores de las fuentes de información, están: Bélgica, Suiza, República de Korea y China. Las instancias abordadas presentan tamaños que van

desde 48 ciudades hasta 76. En la tabla 20 se muestra el consolidado de resultados comparativos con gerencia visual.

Tabla 20. Matriz de datos comparativos en el grupo de Enfriamiento simulado

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	34.021,18	34.933					34.512
			MC	34.021,18	34.933					33.966
			TM	(0,078)	(0,094)					(ND)
			NT	[65]	[66]					[ND]
2	Eil50	0,10	CM	430,48	448,83	ND				
			MC	430,48	448,83	443				
			TM	(0,114)	(0,098)	(ND)				
			NT	[92]	[62]	[68.512]				
3	Eil51	0,1	CM	436,08	449,85		480,09	477,85	480,16	
			MC	436,08	449,85		449,66	453,48	449,66	
			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	560,14	588,61	580				
			TM	(0,805)	(0,320)	(ND)				
			NT	[451]	[94]	[173.250]				
5	Eil76	0,25	CM	559,61	567,01		649,05	639,86	647,22	
			MC	559,61	567,01		613,7	603,68	618,03	
			TM	(1,40)	(0,352)		(ND)	(ND)	(ND)	
			NT	[964]	[118]		[204,000]	[159,000]	[147.550]	

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

En la tabla 21 se muestran los resultados de porcentaje de éxitos de los métodos de interés, pero esta vez respecto a enfriamiento simulado. Cabe anotar que no se tenían datos suficientes para realizar comparaciones respecto a tiempo medio de cómputo (TM).

Tabla 21. Porcentaje de éxito de los métodos propuestos al compararse en el grupo de Enfriamiento simulado

Variables	Métodos	Total de casos comparativos	Total de casos de éxito	% éxito
Costo medio (CM)	SCA_2opt_r	10	10	<u>100%</u>
	SCA_2opt	10	6	<u>60%</u>
Mejor costo (MC)	SCA_2opt_r	14	13	<u>93%</u>
	SCA_2opt	14	4	29%
Número de tours (NT)	SCA_2opt_r	12	8	<u>67%</u>
	SCA_2opt	12	12	<u>100%</u>

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).

— **SCA_2opt y SCA_2opt_r con respecto a otras metaheurísticas:**

En esta familia de metaheurísticas se agruparon métodos basados en PE (Programación evolutiva), PSO-TS-CO-2opt (Particle swarm optimization based on space transformation combined with chaotic operations and 2-opt local search), REA (Route exchange algorithm; basado en Swarm intelligent), SFLA (Shuffled frog-leaping algorithm; algoritmo memético) y BCO (Bee colony optimization). Los países relacionados con las instituciones de afiliación de las fuentes de información, son: Bélgica, Suiza, China y Serbia. En la tabla 22 se presenta la matriz de datos con los costos, tiempos y tours para los métodos que

servieron de contraste comparativo, propios de este grupo de metaheurísticas. Los porcentajes de éxitos de los métodos propuestos se exponen en la tabla 23.

Tabla 22. Matriz de datos comparativos en el grupo de otras metaheurísticas

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	30,8	31,21			32,77	30,8	
			MC	30,8*	31,21*			31,88*	30,8*	
			TM	(0,00)	(0,00)			(ND)	(1,84)	
			NT	[24]	[22]			[ND]	[ND]	
2	Att48	0,01	CM	34.021,18	34.933			35.413		
			MC	34.021,18	34.933			34.707		
			TM	(0,078)	(0,094)			(ND)		
			NT	[65]	[66]			[ND]		
3	Eil50	0,10	CM	430,48	448,83	ND				
			MC	430,48	448,83*	426				
			TM	(0,114)	(0,098)	(ND)				
			NT	[92]	[62]	[100.000]				
4	Eil51	0,1	CM	436,08	449,85		440,9	455	436,76	ND
			MC	436,08	449,85		ND	451	428,87	428,87
			TM	(0,219)	(0,109)		(30)	(ND)	(17,42)	(29)
			CPC	0,67	0,33		ND	(ND)	9,28	15,46
			NT	[186]	[63]		[ND]	[ND]	[ND]	[ND]
5	Eil75	0,16	CM	560,14	588,61	ND				
			MC	560,14	588,61	542				
			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.

Tabla 23. Porcentaje de éxito de los métodos propuestos al compararse en el grupo de otras metaheurísticas

Variables	Métodos	Total de casos comparativos	Total de casos de éxito	% éxito
Costo medio (CM)	SCA_2opt_r	9	9	100%
	SCA_2opt	9	3	33%
Mejor costo (MC)	SCA_2opt_r	13	8	62%
	SCA_2opt	13	3	23%
Tiempo medio	SCA_2opt_r	6	5	83%
	SCA_2opt	6	6	100%
Número de tours	SCA_2opt_r	4	2	50%
	SCA_2opt	4	4	100%

De nuevo, con base en la tabla 23, 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 dicho método supere al contrastarse con un método de esta agrupación de metaheurísticas excede el 0,5, ubicándose 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.

— **Porcentaje de éxito del SCA_2opt y SCA_2opt_r consolidando para los cuatro grupos de metaheurísticas:**

Al observar el porcentaje de éxito para la variable costo medio abordando todas las metaheurísticas sometidas a ensayo, en la figura 26 se muestra que la balanza se inclina hacia el SCA_2opt_ cada vez que éste se compara con otro método, siendo más notoria la superioridad respecto a métodos basados en enfriamiento simulado y a la categoría “otros”.

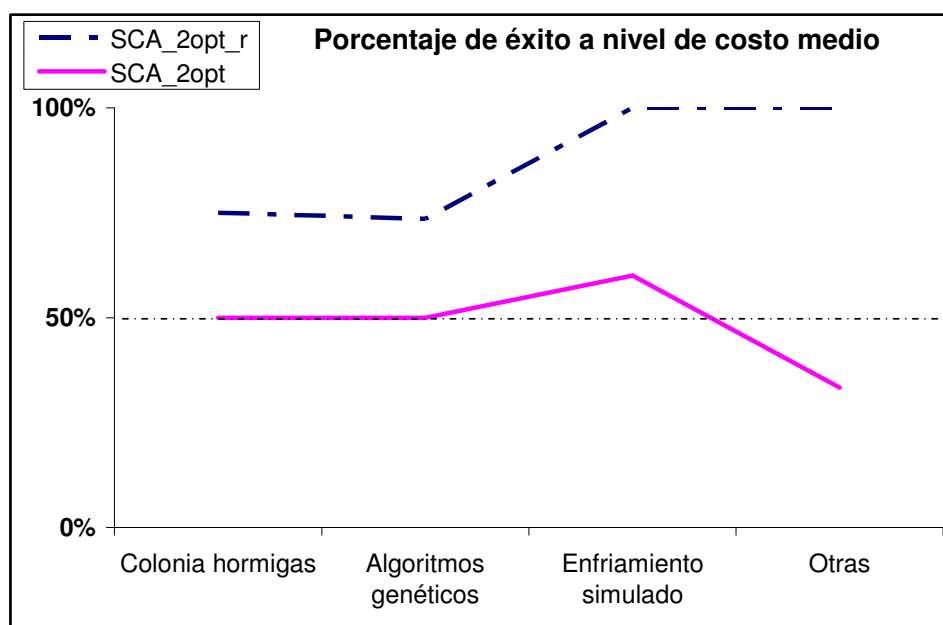


Figura 26. Porcentaje de casos de éxito, en cada grupo de metaheurísticas, al observar el costo medio

Con relación al SCA_2_opt 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 (MC), 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 SCA_2opt_r, siendo más notorio respecto a enfriamiento simulado (figura 27). 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 t para los “otros”, se ubica cerca del 0,25. Lo cual lo coloca e desventaja.

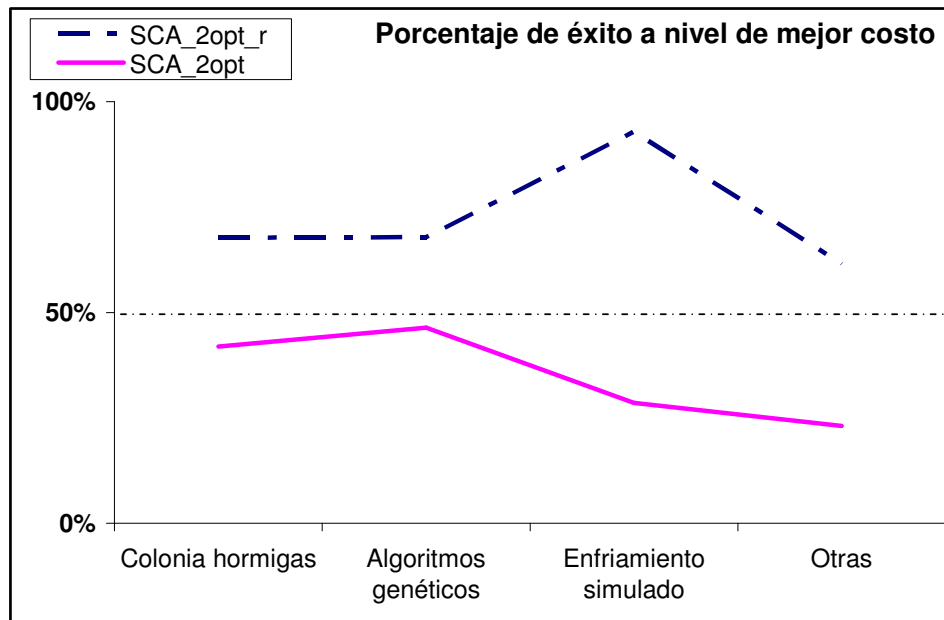


Figura 27. Porcentaje de casos de éxito, en cada grupo de metaheurísticas, al observar el mejor costo

Respecto a la eficiencia computacional, en este caso solo se puede hacer uso del número de tours generados para llegar al mejor costo, puesto que para el tiempo computacional el enfriamiento simulado no presentó datos. Así, recurriendo a NT, en la figura 28 se presentan los resultados. Nótese la superioridad de los dos métodos propuestos.

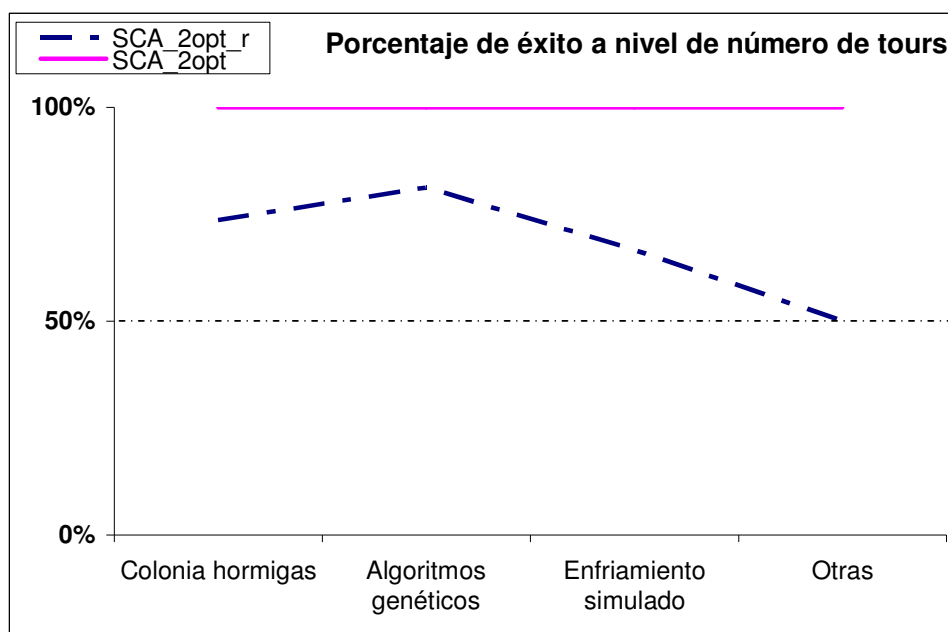


Figura 28. Porcentaje de casos de éxito, en cada grupo de metaheurísticas, al observar el número de tours

Para dar una visión más holística a los análisis y considerar las posibles preferencias de un decisor, al tener que priorizar entre dos objetivos generalmente contrarios en cuanto a la optimización heurística: eficacia y eficiencia, en la siguiente sección se analiza el desempeño de las heurísticas propuestas y de las metaheurísticas a la luz de la teoría multicriterio.

A este punto de la tesis se da cumplimiento al tercer objetivo específico, orientado a dar respuesta a la pregunta ¿Cuál es la eficacia y la eficiencia computacional del algoritmo desarrollado, en comparación con heurísticas de construcción y de mejoramiento, y

metaheurísticas poblacionales, bajo pruebas con instancias de diferentes tamaños del TSP simétrico?

5.4 Análisis multicriterio

El análisis multicriterio se dividió en dos etapas. La primera se enfocó en analizar el desempeño a nivel de heurísticas y la segunda trató la comparación directamente con un nivel más exigente: metaheurísticas. Este tipo de análisis es importante en el sentido de que la literatura comenta la importancia de que un método de optimización heurística presente diversas propiedades, siendo las de posibilidad de análisis objetivo: eficacia, eficiencia. Las demás, aún hay aportes académicos por realizar, debido a que su medición involucra factores “blandos” que traen implícito subjetividad, entre ellos: amigabilidad y sencillez. Así, para evitar sesgos de subjetividad en el presente trabajo y al constituirse en una primera prueba para analizar la pertinencia del pensamiento sistémico como posible campo de inspiración para el desarrollo de métodos de optimización combinatoria, el análisis multicriterio a realizar presentó como factores de estudio la eficacia (costo medio o mejor costo) y la eficiencia (tiempo medio o número de tours).

Otro de los aspectos fundamentales del análisis multicriterio es la posibilidad de incorporar la importancia relativa que el decisor da a los factores a considerar, más aún cuando en la optimización combinatoria y hasta en diversos campos empresariales, eficacia y eficiencia comúnmente son objetivos contradictorios. Por ejemplo, generalmente cuando un algoritmo consume más tiempo, está generando más tours para probar su desempeño, por tanto, hay más posibilidades de encontrar una mejor respuesta, pero a costa de un amplio tiempo computacional. En la comunidad académica y empresarial y ante la complejidad de los problemas reales en los campos logísticos, electrónicos, de producción, etc., no solo la respuesta arrojada por el algoritmo es crucial, sino también el tiempo para encontrarla, de modo que las decisiones puedan llevarse a cabo con criterios de oportunidad (en los momentos requeridos) desde el punto de vista práctico.

En ese sentido, esta tesis consideró cinco perspectivas para representar la importancia relativa de la eficacia y la eficiencia para un decisor. Una de las perspectivas representa a aquel decisor que procura un equilibrio en la evaluación de los factores que para él son importantes, por ejemplo, aplicado a la vida cotidiana, se trata de aquel decisor que mira con igual importancia lo familiar y lo laboral. Así, atendiendo a este tipo de decisor, los pesos empleados para eficacia y eficiencia son equivalentes: 50%. La otra perspectiva simula aquel decisor que al que centra sus prioridades en un solo factor, pero que desde luego, desde el punto de vista práctico, no es viable que el otro factor tenga exactamente un peso de 0%. Para representar esta situación se recurrió al principio de Pareto, el cual, basado en investigación de la distribución de la riqueza en Italia, asoció el 80% - 20%, diferenciando entre lo vital y lo trivial. Para este caso, se simula un escenario donde el decisor da mayor importancia a la eficacia (80%) que a la eficiencia (20%) y, en el otro extremo, se ubica el decisor que da a la eficacia un tratamiento trivial (20%), y a la eficiencia, vital (80%). Las otras dos perspectivas son casos extremistas donde el decisor centra con exageración su inclinación hacia un solo factor (100% de importancia), dejando el otro nulo (figura 29).

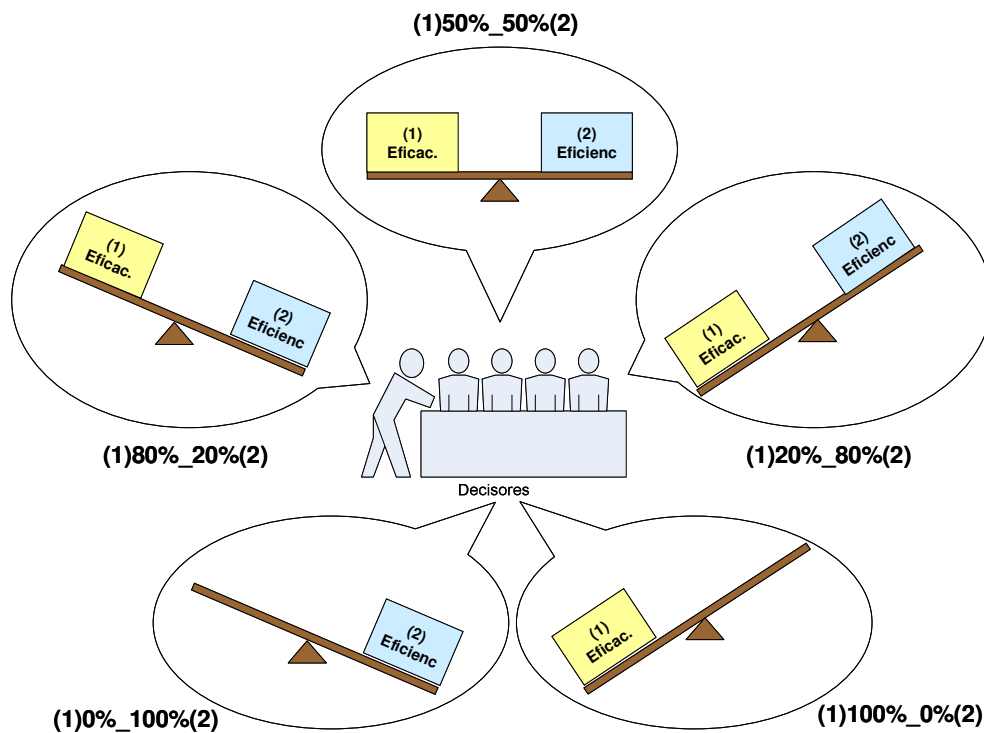


Figura 29. Escenarios de importancia relativa a considerar para eficacia y eficiencia

Bajo las directrices anteriores, a continuación se detalla el procedimiento seguido para el análisis multicriterio, junto con los resultados obtenidos.

5.4.1 Comparación entre heurísticas

Para comparar el desempeño de las heurísticas sometidas a ensayo, desde la perspectiva multicriterio, se eligieron seis instancias simétricas TSP, dos para cada uno de los siguientes tamaños: 60, 80 y 100 ciudades. Estas pertenecen al grupo de instancias empleado en la sección 5.3.1. La eficacia se midió a través del mejor costo encontrado por el método, y la eficiencia, en tiempo medio, en segundos.

Las alternativas de decisión a considerar fueron: SCA_2opt_r, SCA_2opt, VMC, IMB y 2_opt WQSB; es decir aquellas heurísticas con las que antes se realizaron análisis comparativos sin considerar la perspectiva multicriterio.

La tabla 24 contiene los resultados de eficacia y eficiencia, promediando los dos resultados obtenidos, por cada método, en cada tamaño de instancia (60, 80, 100). Esta tabla se conoce como matriz de pagos.

Tabla 24. Matriz de pagos para la comparación entre heurísticas

Factores)	(1) Eficacia (Mejor costo)			(2) Eficiencia (Tiempo medio)		
	Instancias (ciudades)			Instancias (ciudades)		
	60	80	100	60	80	100
Alternativas						
SCA_2opt	300	299	284	0,172	0,406	0,797
SCA_2opt_r	295	293	252	0,188	0,422	0,859
VMC	474	507	567	0,000	0,000	0,000
IMB	509	581	585	0,031	0,047	0,109
2-opt WQSB	315	438	387	3,406	10,391	34,875

En vista de que los factores considerados presentan diferentes unidades de medición (costos y tiempo), es necesario normalizar los valores. Esto permite representarlos como proporciones, bajo un rango entre 0 y 1. La normalización fue realizada empleando la ecuación 2.

$$DN_{ijk} = \frac{D_{ijk}}{\sum_{i=1}^5 D_{ijk}} \quad \forall jk \quad \text{Ec.2}$$

Siendo D_{ijk} el desempeño de la alternativa i en el factor j cuando fue probada en la instancia k . DN_{ijk} este mismo valor pero normalizado entre 0 y 1.

En la figura 30 se presenta la relación jerárquica a emplear para estimar el desempeño global de cada heurística de interés desde la perspectiva de análisis multicriterio.

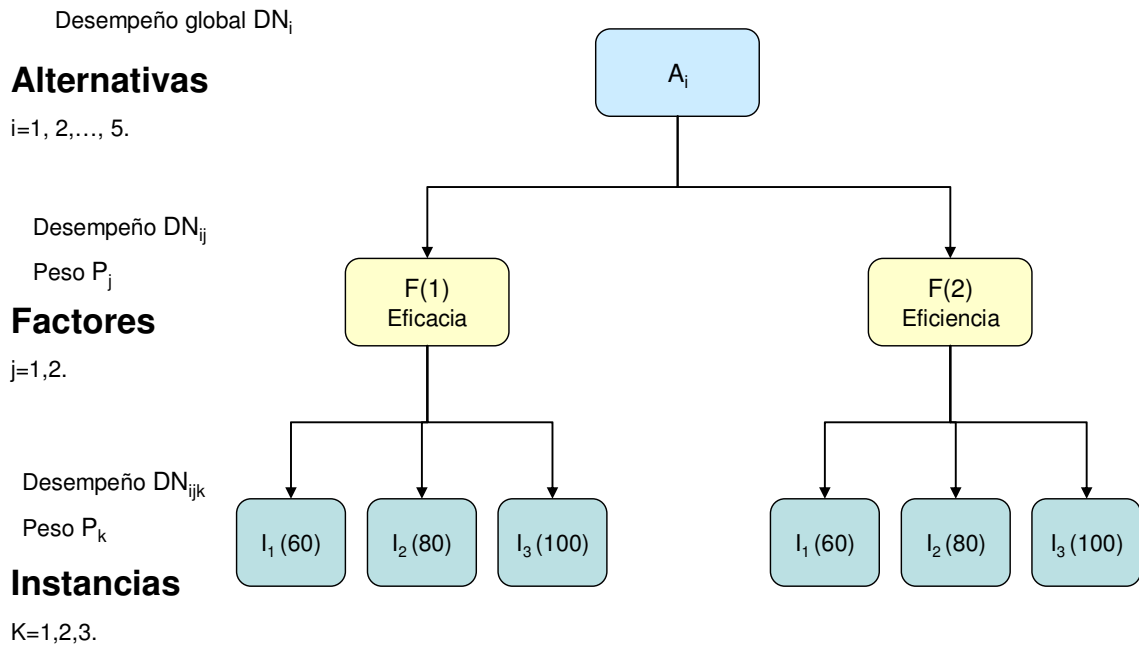


Figura 30. Relación jerárquica para comparar los métodos bajo análisis multicriterio

Con base en dicha relación jerárquica, i representa la alternativa, j el factor y k la instancia probada. Así, siendo P_j el peso del factor j y DN_{ij} el desempeño, normalizado, de la alternativa i en el factor j , es posible estimar el desempeño global, normalizado, de la i -ésima alternativa de decisión (DN_i) mediante la ecuación 3.

$$DN_i = \sum_{j=1}^2 DN_{ij} \times P_j \quad \forall i(1, 2, \dots, 5) \quad \text{Ec.3}$$

En vista de que el objetivo considerando ambos factores eficacia y eficiencia es seleccionar la alternativa que menor costo y menor tiempo presente, entonces el más destacado desempeño lo obtiene aquella que tenga el menor DN_i .

DN_{ij} se expresa como en la ecuación 4.

$$DN_{ij} = \sum_{k=1}^3 DN_{ijk} \times P_k \quad \forall i(1,2,\dots,5), j(1,2) \quad \text{Ec.4}$$

Siendo P_k el peso de la instancia k .

Teniendo presente que no hay criterio suficiente para ponderar con diferencias las instancias consideradas, y de por sí dichas instancias representan complejidad (60, 80, 100 ciudades), con el fin de eliminar sesgos éstas tendrán igual peso: 33.33%. Lo cual hace de DN_{ij} , un promedio aritmético entre estas.

Luego de aplicar el anterior procedimiento, bajo la relación jerárquica descrita, en la tabla 25 se presenta la matriz de pagos normalizada.

Tabla 25. Matriz de pagos normalizada para la comparación entre heurísticas

Alternativas	Eficacia	Eficiencia
	Costo	Tiempo
SCA_2opt	0,1034	0,0340
SCA_2opt_r	0,0984	0,0364
VMC	0,1812	0,0000
IMB	0,1957	0,0050
2-opt WQSB	0,1326	0,9144

Calculando el desempeño global normalizado (DN_i) y considerando los escenarios de importancia relativa expuestos en la figura 29, se presenta en la tabla 26 los resultados obtenidos.

Tabla 26. Desempeño de las heurísticas ante cinco escenarios

Alternativas	Eficacia _ eficiencia				
	100%_0%	80%_20%	50%_50%	20%_80%	0%_100%
SCA_2opt	0,103	0,090	0,069	0,048	0,034
SCA_2opt_r	0,098	0,086	0,067	0,049	0,036
VMC	0,181	0,145	0,091	0,036	0,000
IMB	0,196	0,158	0,100	0,043	0,005
2-opt WQSB	0,133	0,289	0,524	0,758	0,914

Para una mejor interpretación de dichos resultados, la tabla 27 presenta el puesto que ocupó cada heurística sometida a ensayo, apoyados también en gerencia visual, donde el verde fosforescente representa el primer puesto, verde claro el segundo puesto, amarillo el tercer puesto y naranja el último lugar.

Tabla 27. Posiciones de las heurísticas ante cinco escenarios

Alternativas	Eficacia _ eficiencia				
	100%_0%	80%_20%	50%_50%	20%_80%	0%_100%
SCA_2opt	2	2	2	3	3
SCA_2opt_r	1	1	1	4	4
VMC	4	3	3	1	1
IMB	5	4	4	2	2
2-opt WQSB	3	5	5	5	5

A partir de dicha tabla, puede decirse que para un decisor que tiene, en extremo, a la eficacia como lo más importante (100%), o para aquel que la tiene como algo vital, pero sin ser extremista (80%), así como para ese decisor que procura mantener un exacto equilibrio (50%), las heurísticas propuestas son su mejor elección. Siendo el SCA_2opt aquel más promisorio, pues ocupó el primer lugar al considerar esta visión holística del desempeño en eficacia y eficiencia, seguido del SCA_2opt quien tuvo el segundo lugar. En términos de análisis multicriterio, estas dos heurísticas dominaron a todas las demás en dichos escenarios o no fueron sensibles a dichos pesos, lo cual refleja la robustez de los métodos en este rango de importancia relativa. Lo destacable también es que cuando comienza a trasladarse la decisión hacia aquel que tiene a la eficiencia, sin ser extremista, como algo vital (80%), así como para el que es extremista en cuando a la inclinación hacia dicho factor (100%), ninguna de las dos heurísticas ocupa el último lugar. Sin embargo es más sensible el SCA_2opt_r que el SCA_2opt, puesto que este último se mantuvo en el tercer lugar, en tanto que el primero ocupó el penúltimo puesto (4). El 2opt que ofrece el WinQSB se muestra como el menos ventajoso cuando se sale del escenario extremista de 100% de eficacia.

5.4.2 Comparación entre metaheurísticas

En la tabla 28 se detallan los grupos y sus características para la comparación con las metaheurísticas.

Tabla 28. Grupos y sus características, para la comparación con metaheurísticas

Grupo	Instancia	(1) Eficacia	(2) Eficiencia	Fuente de información	País de la fuente de información	Familia	Métodos
1	KroA100	Mejor costo	Tiempo medio	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r
						Tesis actual	SCA_2opt
				Wang y Wang (2008)	China	AC	MNACO
						AC	MMAS
				Velayudhan, Hill, Hiremath y Soneji (2007)	USA	AC	ACO_MP
						AC	ACO_SLR
		AC	ACO_MLR				
2	KroA100	Mejor costo	Número de tours	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r
						Tesis actual	SCA_2opt
				Dorigo y Gambardella (1997)	Bélgica y Suiza	AC	ACS
						GA	GA
				Velayudhan, Hill, Hiremath y Soneji (2007)	USA	AC	ACO_MP
						AC	ACO_SLR
						AC	ACO_MLR
					Libia	GA	FRAG_GA
				Sallabi y El-Haddad (2009)		GA	SWAP_GAT_SP
						GA	OX_SIM
	GA	IGA					
3	Eil51	Mejor costo	Tiempo medio	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r
						Tesis actual	SCA_2opt
				Wang y Wang (2008)	China	AC	MNACO
						AC	MMAS
				Luo, Yang y Li (2008)	China	Otros	SFLA
		Teodorovic (2008)	Serbia	Otros	BCO		
4	Eil76	Mejor costo	Número de tours	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r
						Tesis actual	SCA_2opt
				Jeong, Kim y Lee (2009)	República de Korea	SA	CSA
						SA	TFSA
	SA	TRFSA					
5	Eil76	Costo medio	Tiempo medio	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r
						Tesis actual	SCA_2opt
				Queiros dos Santos (2009)	Brasil	GA	AG serial
						GA	AG paralelo
	GA	AG grupo					

Para este tipo de comparación, no pudo tenerse control para ejecutar experimentación, puesto que la estrategia empleada se basó en benchmark teniendo como fuente literatura sobre el TSP de diversos ámbitos geográficos. El análisis multicriterio las heurísticas propuestas pudieron compararse con 19 metaheurísticas, pero considerando grupos de instancias donde estos métodos presentaran información en el binomio eficacia y eficiencia; en un solo grupo la eficacia representada por el costo medio puesto que no se dispuso de información, para los demás la eficacia se representó por el mejor costo encontrado, haciendo más retadora la comparación. Para la eficiencia, dependiendo de la disponibilidad de datos en la literatura empleada, se recurrió en unos grupos al tiempo medio y en otros al número de tours. Vale anotar que para el análisis multicriterio se recurrió al tiempo medio en lugar de CPC debido a que, si bien los tiempos de CPU de los métodos propuestos son favorables respecto a los demás, para este segundo los resultados favorecen mucho más al SCA_2opt y al SCA_2opt_r, siendo el uso de la variable TM un escenario más retador.

Para cada grupo, el análisis multicriterio se realizó siguiendo exactamente el mismo procedimiento de comparación entre heurísticas, detallado en la sección 5.4.1, por lo que no se redundará en dicha descripción, sino que se pasará a los resultados.

En la tabla 29, para cada grupo, se muestra la matriz de pagos, tanto con los valores de eficacia y de eficiencia originales, como normalizados.

Tabla 29. Matriz de pagos original y normalizada para la comparación con metaheurísticas

Grupo	Instancia	(1) Eficacia	(2) Eficiencia	Fuente de información	País de la fuente de información	Familia	Métodos	(1)	(2)	(1) Norm.	(2) Norm.
1	KroA100	Mejor costo	Tiempo medio	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	22.219,34	1,07	0,1385	0,0034
				Tesis actual		Tesis actual	SCA_2opt	22.379,4	0,87	0,1395	0,0028
				Wang y Wang (2008)	China	AC	MNACO	21.285,40	26,88	0,1327	0,0863
						AC	MMAS	21.285,40	104,8	0,1327	0,3363
				Velayudhan, Hill, Hiremath y Soneji (2007)	USA	AC	ACO MP	25.483	26	0,1589	0,0834
						AC	ACO SLR	24.229,9	22	0,1510	0,0706
				AC	ACO MLR	23.531,40	130	0,1467	0,4172		
2	KroA100	Mejor costo	Número de tours	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	22.219,3	206	0,0898	0,0015
				Tesis actual		Tesis actual	SCA_2opt	22.379,4	140	0,0905	0,0010
				Dorigo y Gambardella (1997)	Bélgica y Suiza	AC	ACS	21.282	4.820	0,0860	0,0343
						GA	GA	21.761	103.000	0,0880	0,7325
				Velayudhan, Hill, Hiremath y Soneji (2007)	USA	AC	ACO MP	25.483	400	0,1030	0,0028
						AC	ACO SLR	24.229,9	400	0,0980	0,0028
						AC	ACO MLR	23.531,4	400	0,0951	0,0028
						GA	FRAG_GA	21.282	800	0,0860	0,0057
				Sallabi y El-Haddad (2009)	Libia	GA	SWAP_GAT_SP	21.504	5.000	0,0869	0,0356
						GA	OX_SIM	22.400	25.000	0,0906	0,1778
		GA	IGA	21.282	454	0,0860	0,0032				
3	Eil51	Mejor costo	Tiempo medio	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	436,08	0,219	0,1676	0,0022
				Tesis actual		Tesis actual	SCA_2opt	449,85	0,109	0,1729	0,0011
				Wang y Wang (2008)	China	AC	MNACO	428,87	10,98	0,1649	0,1124
						AC	MMAS	428,98	40	0,1649	0,4093
				Luo, Yang y Li (2008)	China	Otros	SFLA	428,87	17,42	0,1649	0,1782
Teodorovic (2008)	Serbia	Otros	BCO	428,87	29	0,1649	0,2967				
4	Eil76	Mejor costo	Número de tours	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	559,61	964	0,1889	0,0019
				Tesis actual		Tesis actual	SCA_2opt	567,01	118	0,1914	0,0002
				Jeong, Kim y Lee (2009)	República de Korea	SA	CSA	613,70	204.000	0,2072	0,3988
						SA	TFSA	603,68	159.000	0,2038	0,3108
						SA	TRFSA	618,03	147.500	0,2087	0,2883
5	Eil76	Costo medio	Tiempo medio	Tesis actual	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	559,61	1,4	0,1932	0,0005
				Tesis actual		Tesis actual	SCA_2opt	567,01	0,352	0,1957	0,0001
				Queiros dos Santos (2009)	Brasil	GA	AG serial	591	1.390	0,2040	0,4741
						GA	AG paralelo	590	790	0,2037	0,2695
				GA	AG grupo	589	750	0,2033	0,2558		

A partir de la matriz de pagos normalizada y estudiando el desempeño de los métodos propuestos bajo los escenarios propuestos, en la tabla 30 se muestran los resultados finales para cada grupo. Allí se presenta tanto el DNi, como el puesto ocupado por los diferentes métodos.

Tabla 30. Desempeño de las metaheurísticas ante cinco escenarios

Grupo	Instancia	País de la fuente de información	Familia	Métodos	Eficacia (100%) Eficiencia (0%)		Eficacia (80%) Eficiencia (20%)		Eficacia (50%) Eficiencia (50%)		Eficacia (20%) Eficiencia (80%)		Eficacia (0%) Eficiencia (100%)	
					(DNi)	Puesto	(DNi)	Puesto	(DNi)	Puesto	(DNi)	Puesto	(DNi)	Puesto
1	KroA100	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	0,1385	3	0,1115	1	0,0710	1	0,0304	2	0,0034	2
			Tesis actual	SCA_2opt	0,1395	4	0,1122	2	0,0712	2	0,0301	1	0,0028	1
		China	AC	MNACO	0,1327	1	0,1234	3	0,1095	3	0,0955	4	0,0863	5
			AC	MMAS	0,1327	1	0,1734	6	0,2345	6	0,2956	6	0,3363	6
		USA	AC	ACO MP	0,1589	7	0,1438	5	0,1211	5	0,0985	5	0,0834	4
			AC	ACO SLR	0,1510	6	0,1350	4	0,1108	4	0,0867	3	0,0706	3
			AC	ACO MLR	0,1467	5	0,2008	7	0,2819	7	0,3631	7	0,4172	7
		2	KroA100	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	0,08983	6	0,07216	3	0,04565	2	0,01914	2
Tesis actual	SCA_2opt				0,09048	7	0,07258	4	0,04574	3	0,01889	1	0,00100	1
Bélgica y Suiza	AC			ACS	0,08604	1	0,07569	5	0,06016	8	0,04463	8	0,03428	8
	GA			GA	0,08798	5	0,21687	11	0,41022	11	0,60357	11	0,73247	11
USA	AC			ACO MP	0,10302	11	0,08299	9	0,05293	7	0,02288	7	0,00284	3
	AC			ACO SLR	0,09796	10	0,07893	8	0,0504	6	0,02187	6	0,00284	3
	AC			ACO MLR	0,09513	9	0,07667	7	0,04899	5	0,0213	4	0,00284	3
Libia	GA			FRAG_GA	0,08604	1	0,06997	2	0,04586	4	0,02176	5	0,00569	7
	GA			SWAP_GAT SP	0,08694	4	0,07666	6	0,06125	9	0,04583	9	0,03556	9
	GA			OX SIM	0,09056	8	0,108	10	0,13417	10	0,16034	10	0,17778	10
	GA			IGA	0,08604	1	0,06948	1	0,04463	1	0,01979	3	0,00323	6
3	Eil51	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	0,16763	5	0,13455	1	0,08493	1	0,03532	1	0,00224	2
			Tesis actual	SCA_2opt	0,17292	6	0,13856	2	0,08702	2	0,03548	2	0,00112	1
		China	AC	MNACO	0,16485	1	0,15435	3	0,1386	3	0,12285	3	0,11235	3
			AC	MMAS	0,16490	4	0,21378	6	0,2871	6	0,36042	6	0,40930	6
		China	Otros	SFLA	0,16485	2	0,16753	4	0,17155	4	0,17557	4	0,17825	4
		Serbia	Otros	BCO	0,16485	3	0,19123	5	0,2308	5	0,27036	5	0,29674	5
4	Eil76	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	0,18893	1	0,15152	1	0,09541	1	0,03929	2	0,00188	2
			Tesis actual	SCA_2opt	0,19143	2	0,15319	2	0,09583	2	0,03847	1	0,00023	1
		República de Korea	SA	CSA	0,20719	4	0,2455	5	0,30298	5	0,36045	5	0,39876	5
			SA	TFSA	0,20381	3	0,22521	4	0,2573	4	0,2894	4	0,31080	4
			SA	TRFSA	0,20865	5	0,22458	3	0,24849	3	0,27239	3	0,28832	3
5	Eil76	Colombia	Tesis actual	SCA_2opt_r	0,19319	1	0,15465	1	0,09684	1	0,03902	1	0,00048	2
			Tesis actual	SCA_2opt	0,19575	2	0,15662	2	0,09793	2	0,03925	2	0,00012	1
		Brasil	GA	AG serial	0,20403	5	0,25805	5	0,33908	5	0,4201	5	0,47412	5
			GA	AG paralelo	0,20369	4	0,21684	4	0,23657	4	0,25631	4	0,26946	4
			GA	AG grupo	0,20334	3	0,21384	3	0,22958	3	0,24532	3	0,25582	3

A partir de la tabla 31, se calculó el número de casos en los que las dos heurísticas propuestas ocuparon diversos puesto, delimitados a las siguientes categorías de interés: 1º, 2º, 3º, el último o penúltimo, y otros.

Tabla 31. Posiciones clave en la comparación con metaheurísticas

Métodos	Grupos x escenarios	1er puesto	2do puesto	3ro puesto	Último o penúltimo puesto	Otros
SCA_2opt_r	25	12	9	2	1	1
SCA_2opt	25	8	12	1	1	3

Con base en esta información, puede verse en la figura 31 que el SCA_2opt_r, considerando los 25 casos comparativos (cinco escenarios por cinco grupos), en la mayoría de ellos ocupó el primero o el segundo puesto (84%). Similar ocurrió para el SCA_2opt, con el 80% de los casos. Esto refleja un desempeño prometedor de los métodos propuestos.

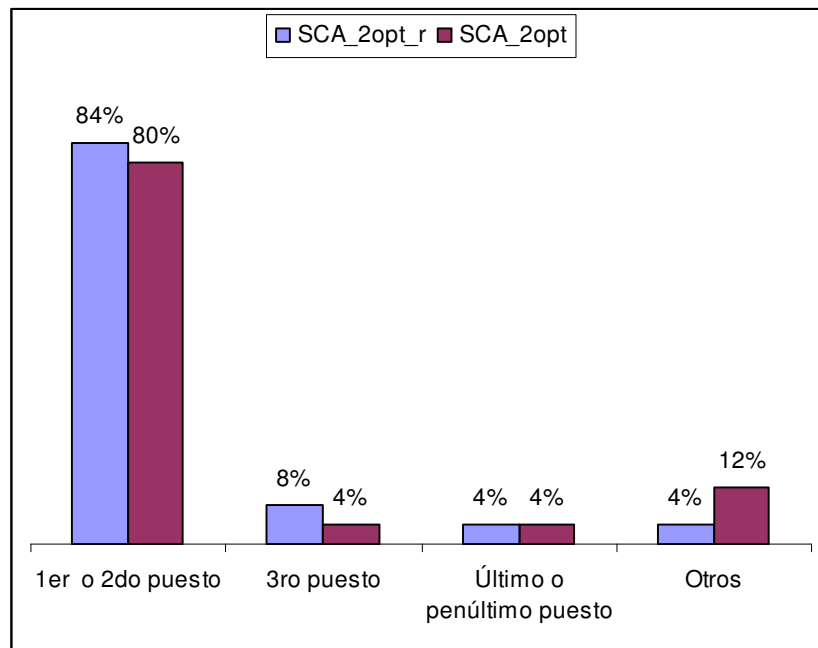


Figura 31. Distribución porcentual de los puestos ocupados por los métodos propuestos ante los 25 casos comparativos

Haciendo énfasis en el escenario extremista de eficacia 100% y en el de un decisor que ve este factor como vital (80%) sin llegar al extremo de nula la eficiencia, en la tabla 32 se observa la distribución de los puestos ocupados por los dos métodos propuestos.

Tabla 32. Distribución porcentual de las posiciones clave en la comparación con metaheurísticas

Escenario	Métodos	Casos	1er puesto	2do puesto	3ro puesto	Último o penúltimo puesto	Otros
Eficacia 100%, eficiencia 0%	SCA_2opt_r	5	40%	0%	20%	20%	20%
	SCA_2opt	5	0%	40%	0%	20%	40%
Eficacia 80%, eficiencia 20%	SCA_2opt_r	5	80%	0%	20%	0%	0%
	SCA_2opt	5	0%	80%	0%	0%	20%

En términos globales, considerando los escenarios de eficacia extremista y de vital (80%), el SCA_opt_r, de los 10 casos comparativos, en seis de ellos ocupó el primer lugar, lo cual representa el 60% de ellos. El SCA_2opt tuvo este mismo porcentaje, pero ocupando el segundo lugar. Esto refleja lo promisorios que pueden ser los métodos propuestos considerando diversos tipos de decisores que se tienen en la realidad.

En esta momento de la tesis ha podido aportarse respuesta a la pregunta de investigación que se buscó saldar con el último objetivo específico del trabajo: ¿Qué posición ocupa el algoritmo desarrollado respecto a heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales, bajo análisis multicriterio considerando el binomio: eficacia y eficiencia? Respecto a ello, el trabajo no solo permitió compararla con metaheurísticas poblacionales, sino con otras posicionadas en la literatura, como por ejemplo, Enfriamiento simulado.

6. Conclusiones

El desarrollo de esta tesis, sin tenerlo planeado desde el inicio, permitió considerar las bondades de la revisión sistemática de literatura, propia de los campos de la salud y de algunas aproximaciones recientes a la ingeniería de software, para extrapolar algunas de sus bondades y convertirlas en una propuesta que emplea Scopus como base de datos de consulta. Esta propuesta fue empleada para levantar la revisión de literatura, incorporando elementos que han permitido localizar la literatura sobre el TSP más posicionada en la comunidad académica, describirla, caracterizarla y cuantificar su representatividad a través del indicador propuesto pCAT. Todo este trabajo ha posibilitado llegar a la conclusión general de que para avanzar alrededor del conocimiento actual sobre los avances en el TSP hay tendencia a generar híbridos de los métodos existentes. Esto aborda tanto los cruces entre metaheurísticas como la combinación de métodos de búsqueda global con la local. En tanto, para avanzar hacia nuevas esferas de conocimiento, trascendiendo el saber actual, es preciso partir desde la base, incorporando nuevos campos de inspiración para el desarrollo de métodos de optimización combinatoria. Sobre ello, recientes campos han surgido, entre ellos, el comportamiento de hormigas reales que trascendió hacia la optimización bajo colonia de hormigas, o también, la termodinámica o el mismo comportamiento cultural de los individuos. Sin embargo, la revisión de la literatura mostró ausencia de una disciplina que cada vez cobra mayor rigor en la toma de decisiones académicas y empresariales: la quinta disciplina (el pensamiento sistémico). Por ello, esta tesis se aventuró en la búsqueda de posible viabilidad para 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 como posible campo de inspiración, partió del análisis de la clásica regla de decisión: vecino más cercano. 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 vecino más cercano, ilustrada en un caso tipo historieta, llamada Don Pablo, subyace el arquetipo sistémico Soluciones rápidas que fallan. Para este tipo de estructura, la presente tesis 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 que en algún momento de la práctica del vecino más cercano, el siguiente desplazamiento no se realizará a la ciudad inmediatamente cercana, disponible, sino que se renunciará a ella para trasladarse hacia la segunda más cercana disponible y, a partir de este cambio, se continuará con la tradicional regla vecino más cercano. Esta estrategia propuesta, atendiendo a una de las tendencias arrojadas por la revisión de literatura, llevó a complementarlo con una búsqueda local: el 2opt.

El método propuesto inicialmente en esta tesis: 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 variedad heurísticas y de metaheurísticas, resultando promisorios en cuanto a eficacia y eficiencia computacional. Para estos dos métodos, se corroboró que el favorable desempeño no se debió ni a la búsqueda local, ni al azar, sino al SCA, lo cual pudo observarse inicializando la búsqueda local 2opt con la solución del vecino más cercano, así como también, observando el comportamiento cuando el tour se generaba aleatoriamente. 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 otras palabras, estos dos métodos son precisos en las respuestas, no es necesario promediarse los resultados que arrojan.

Este trabajo propone, además, un procedimiento para estudiar con visión holística, heurísticas y metaheurísticas, vinculando análisis multicriterio. Esto debido a que dos de las propiedades deseables en un método de este tipo son la eficacia y la eficiencia. La primera asociada a la respuesta arrojada por el algoritmo, y la segunda, se debe al tiempo o número de tours consumidos para encontrarla. Ambos factores son contradictorios, así, por ejemplo, cuando se obtiene una eficacia destacada, generalmente es a costa de pérdida de eficiencia y viceversa. Por ello, la comparación entre las heurísticas y metaheurísticas en función de su desempeño, fue abordado desde el análisis multicriterio, que además, posibilita vincular los intereses del decisor. Por ejemplo, un decisor académico puede inclinarse más hacia la eficacia que hacia la eficiencia, pero otro con necesidad de viabilidad práctica en un caso de urgencia empresarial, podría preferir velocidad en la respuesta por cierta renuncia a la eficacia. Así, se trabajó el análisis multicriterio a la luz de cinco escenarios cotidianos: dos extremistas, en los cuales el decisor deposita todo su interés (100%) en uno de los factores, dejando el otro nulo; otros dos escenarios consideraron el principio de Pareto (80% - 20% y viceversa, y el otro escenario representó aquel decisor que mantiene un equilibrio 50%-50%. Respecto al enfoque empleado para comparar los métodos bajo análisis multicriterio, la revisión de literatura no arrojó un procedimiento similar, sino que se enfocaba en analizar de manera individual costos, en otros tiempos de cómputo y en otros el binomio costo y tiempo, pero sin considerar posible importancia relativa ni emplear el apoyo multicriterio. El procedimiento propuesto destaca las posiciones que ocupan los algoritmos a la luz de los cinco escenarios y posibilita analizar la sensibilidad de los mismos ante cambios de escenarios, brindando características de robustez a los métodos comparados. Este procedimiento puede constituirse en una alternativa para la comunidad académica, en el sentido de vincular otros aspectos a la hora de juzgar sobre el desempeño de los nuevos métodos heurísticos a proponer.

En la comparación de los dos métodos propuestos con heurísticas y metaheurísticas, las fuentes bibliográficas desde donde se extrajo la información referente, fueron elaboradas por autores afiliados a instituciones de ámbitos internacionales, entre ellas: USA, Bélgica, Suiza, Brasil, China y República de Korea. Esto brinda ya una idea del enfoque retador

asumido para comparar el desempeño de las dos heurísticas propuestas, abordando referentes internacionales.

Un aporte más de rigor más pragmático es el hecho de que esta tesis proporciona una alternativa computacional, programada en Macros de Excel, que dada dicha plataforma es de utilidad para que las PYMES manufactureras, con escasez de recursos para compra de software sofisticado, de modo que puedan encontrar soluciones satisfactorias al problema de programación de tareas en una máquina, el cual equivale a un TSP que busca minimizar el tiempo no productivo, debido al alistamiento de la máquina por cambios de referencias.

En términos globales, esta tesis 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, puesto que ofrece 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 de carácter multicriterio variedad de heurísticas y metaheurísticas posicionadas en la comunidad académica.

En la tabla 33 se presenta un resumen de las principales conclusiones explicitando las respuestas generales para las preguntas de investigación formuladas.

Tabla 33. Resumen de las principales conclusiones en cada pregunta de investigación

ID	Preguntas de investigación	Respuestas
P.1	P.1 ¿Qué estructuras sistémicas siguen las soluciones arrojadas por la heurística vecino más cercano para instancias del TSP simétrico?	Arquetipo de "Soluciones contraproducentes"
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?	A veces es necesario hacer sacrificios en el corto plazo, con el ánimo de que se tenga un futuro mejor. En que en algún momento de la práctica del vecino más cercano, el siguiente desplazamiento no se realiza a la ciudad inmediatamente cercana disponible, sino que se renuncia a ella para trasladarse hacia la segunda más cercana disponible y, a partir de este cambio, se continúa con la tradicional regla vecino más cercano.
P.3	¿Cuál es la eficacia y la eficiencia computacional del algoritmo desarrollado, en comparación con heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales, bajo pruebas con instancias de diferentes tamaños del TSP simétrico?	Los dos métodos propuestos resultan promisorios en cuanto a eficacia y eficiencia computacional. Comparados con las heurísticas el SCA_2opt y el SCA_2opt_r superan en eficacia al VMC, IMB y al 2-optWQSB, ante un comportamiento lineal en eficiencia frente al tamaño de las instancias. En las comparaciones individuales con metaheurísticas, el SCA_2opt_r es efectivo: porcentajes de éxito en eficacia se sitúan en promedio en el 80% y en eficiencia en el 71%. El SCA_2opt, en promedio, 42% en eficacia y 100% en eficiencia.
P.4	¿Qué posición ocupa el algoritmo desarrollado respecto a heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales, bajo análisis multicriterio con factores: eficacia y eficiencia?	Considerando los 5 escenarios decisores, como mínimo en el 80% de los casos los dos métodos propuestos ocupan el primero o el segundo puesto
P. General	¿Un algoritmo heurístico basado en el análisis sistémico del vecino más cercano, es capaz de arrojar soluciones efectivas para instancias simétricas TSP, tomando como base comparativa de carácter multicriterio, heurísticas de construcción y de mejoramiento, y metaheurísticas poblacionales?	Esta tesis aporta evidencia que respalda al pensamiento sistémico como un pertinente campo de inspiración para el desarrollo de nuevos métodos de optimización heurística

7. Desafíos futuros

Al ser un primer aporte por analizar la pertinencia de emplear el pensamiento sistémico como campo de inspiración para el desarrollo de algoritmos de optimización combinatoria y, dado que la pregunta general de investigación arrojó viabilidad del tema, son muchos los vacíos de conocimiento que quedan por saldar. Sobre ello, si bien el autor continuará avanzando en esta línea de investigación, se espera que también este trabajo logre motivar e inspirar a otros investigadores y estudiantes, a fin de unir esfuerzos y deseos para dar respuesta, como mínimo, a las siguientes preguntas de investigación, a partir de la fecha abiertas:

P.1 ¿Qué valor del parámetro de la búsqueda local 2_{opt} , empleada en esta tesis, 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?

Referencias

Álvarez, R., Corberán A. & Tamarit, J. (1985). “La combinatoria poliédrica y el problema del viajante. Aplicación al caso de ciento tres ciudades Españolas”. *Qüestió*, V. 9, N°3, Septiembre, pp.199-213.

Angéniol, B., de La Croix V. & Le Texier, J. (1988). Self-organizing feature maps and the travelling salesman problem. *Neural Networks*, Vol. 1, No. 4, pp. 289-293.

Applegate, D., Bixby, R., Chvátal, V. & Cook, W. (2006). *The traveling salesman problem: a computational study*. Princeton University Press. New Jersey. 593p.

Arreola, J. & Arreola A. (2003). “Programación lineal: Una introducción a la toma de decisiones cuantitativa”. Thomson Ed. México, pp. 1-10.

Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problem: An overview of formulations and solution procederes. *Omega*, Vol. 34, No. 3, pp. 209-219.

Bentley, J. (1992). Fast algorithms for geometric traveling salesman problems. *ORSA journal on computing*, Vol. 4, No. 4, pp. 387-411.

Barbiela, J. (1998). La inteligencia artificial aplicada a la gestión de la tesorería. *Rev.R.Acad. Cienc.Exact.Fis.Nat. (Esp)*. Monográfico: Problemas complejos de decisión. Vol. 92, N.O 4, pp 435-439

Bianchi, L., Campbell, A. (2007). Extension of the 2-p-opt and 1-shift algorithms to the heterogeneous probabilistic traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 176, No. 1, pp. 131-144.

Biasca, R., Andriani, C. & Rodríguez, M. (2003). “Un nuevo sistema de gestión para lograr PYMES de clase mundial”. Ed. Norma. México, pp.71-72.

Boese, K., Kahng, A. & Muddu, S. (1994). A new Adaptive Multi-Start Technique for Combinatorial Global Optimization, Operations Research Center. Vol 16, pp. 101-113.

Campbell, A. (2006). Aggregation for the probabilistic traveling salesman problem. Computers and Operations Research, Vol. 33, No. 9, pp. 2703-2724.

Carrabs, F., Cordeau, J., Laporte, G. (2007). Variable neighborhood search for the pickup and delivery traveling salesman problem with LIFO loading. INFORMS Journal on Computing, Vol. 19, No. 4, pp. 618-632.

Carter, A., Ragsdale, C. (2006). A new approach to solving the multiple traveling salesperson problem using genetic algorithms. European Journal of Operational Research, Vol. 175, N. 1, pp. 246-257.

Cassani, L. & Righini, G. (2004). Heuristic algorithms for the TSP with rear-loading. 35th. Annual Conference of the Italian Operational Research Society (AIRO XXXV), Lecce, Italy, September 2004.

Cerný, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, No. 1, pp. 41-51.

Cervantes, M. (2010). Nuevos Métodos Meta Heurísticos para la Asignación Eficiente, Optimizada y Robusta de Recursos Limitados. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia Departamento de Sistemas Informáticos y Computación. p.19.

CLEI'2004. Arequipa – Perú.

Codina, L. (2005). Scopus: el mayor navegador científico de la Web. Vol. 14, No. 1, pp. 44-49.

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.

Dantzig, G., Fulkerson, R. & 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.

Distefano, M., Haarth, R. & Iriarte, E. (2006). Modelación de sistemas tecnológicos en la formación básica de los ingenieros. Congreso TAEE año 2006. Universidad Nacional de Cuyo. Argentina.

Domínguez, J. (2008). Búsquedas genéticas: métodos de optimización global y optimización combinatoria. Tesis Doctoral. Depto. Lenguajes y Sistemas Informáticos Universidad de Cádiz. 292p.

Dorigo, M. & 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.

Dorigo, M., & Gambardella, L. (1997). Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 53-66.

Duan, H., Yu, X. (2007). Hybrid ant colony optimization using memetic algorithm for traveling salesman problem. *Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Approximate*

Dynamic Programming and Reinforcement Learning, ADPRL 2007, art. No. 4220819, pp. 92-95.

Epstein, R., Henríquez, R., Catalán, J., Weintraub, G. & Martínez, C. (2001). “Programación entera mejora el proceso de licitación de raciones alimenticias”. Revista Ingeniería de Sistemas. V. XV, nº1, Junio. pp. 13-30.

Etchegaray, F. (2005) “Optimización del proceso de teñido de telas”. Universidad Nacional de Quilmes, Tesis Phd., Argentina, p. 44.

Ferrer, L. (1998): Del paradigma mecanicista de la ciencia al paradigma sistémico. Universitat de Valencia, Valencia.

Flood, M. (1956). “The Traveling Salesman Problem”. Operations Research, Vol. 4. pp. 61–75.

Fogel, D. (1993). Applying evolutionary programming to selected traveling salesman problems. Cybernetics and Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 27-36.

Gardel, P., Gómez, O. & Barán, B. (2004). Estudio del espacio de soluciones del problema del cajero viajante. XXX Conferencia Latinoamericana de Informática – CLEI’2004. Arequipa – Perú.

Garey, M. & Johnson D. (1979). Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. New York: W.H. Freeman and Co.

Golden, B., Bodin, L., Doyle, T. & Stewart, Jr, W. (1980). Approximate traveling salesman algorithms. Operations research, 28, pp. 694-711.

González, J. & Ríos, R. (1999). “Investigación de operaciones en acción: Aplicación del TSP en problemas de manufactura y logística.” *Ingenierías*, Vol 2, N°.4, pp.18-23.

Hansen, P. & Mladenovic, N. (2003). Variable neighbourhood search. In Fred Glover and Gary A. Kochenberger, editors, *Handbook of Metaheuristics*, chapter 6. Kluwer.

He, Zhu, Hechun, y Ben (2006). A New Algorithm for TSP Based on Swarm Intelligence. *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control. and Automation*, June 21 - 23, 2006, Dalian, China.

Held, M. & Karp, R. (1971). The traveling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II. *Mathematical Programming*, Vol. 1, No. 1, pp. 6-25.

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.

Johnson, D. & McGeoch, L. (1997). The traveling salesman problem: A case of study in local optimization, *Local Search in Comb. Optimization*, Eds. New York: Wiley: New York.

Johnson, D., McGeoch, L. (1997). The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization. In E. Aarts and J. Lenstra (eds.), *Local Search in Combinatorial Optimization*, chapter 8. Wiley, Chichester, pp. 215–310.

Jünger, M., Reinelt, G. & Rinaldi, G. (1995), The Traveling Salesman Problem, in *Handbook in Operations Research and Management Science*, Vol. 7, Ball, M.O., Magnanti, T.L., Monma, C.L. y Nemhauser, G.L. (Eds.), North-Holland, Amsterdam, pp.225–330.

Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Technical Report TR/SE-0401, 1191541.

Kitchenham, B., Pearl Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. *Information and Software Technology*. Vol. 51, No. 1, pp. 7-15.

Laporte, G. (1992). The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, Vol. 59, No. 2, pp. 231-247.

Larrañaga, P., Kuijpers, C., Murga, R., Inza, I., Dizdarevic, S. (1999). Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators. *Artificial Intelligence Review*, Vol. 13, No. 2, pp. 129-170.

Lenstra, J. & Rinnooy, K. (1981). "Complexity of vehicle routing and scheduling problems". *Networks* 11, pp. 221-227.

Letelier M., López L., Carrasco, R. & Pérez P. (2005). Competencias sustentables para el desempeño profesional en ingeniería. *Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá*, vol. 13 N. 2, pp. 91-96.

Lin, S. & Kernighan, B. (1973). An effective heuristic for the travelling salesman problem. *Operations Research* 1973, 21. pp. 498-516.

Liu, Y. 2007. A hybrid scatter search for the probabilistic traveling salesman problem. *Computers and Operations Research*, Vol. 34, No. 10, pp. 2949-2963.

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 \$25.00 © 2008 IEEE, pp. 228-232.

Marti, R. (2003). Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria. Matemáticas. Vol, 1, No. 1, pp. 1-60.

Mora, A. (2005). Resolución del problema militar de búsqueda de camino óptimo multiobjetivo mediante el uso de algoritmos de optimización basados en colonia de hormigas. Tesis doctoral. Granada. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. 215p.

Nguyen, H., Yoshihara, I., Yamamori, K., 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, No. 1, pp. 92-99.

Oermann, M., & Hays, J. (2011). Writing for publication in nursing. Second edition. Springer Publishing Company. New York.

Ohlmann, J., Thomas, B. (2007). A Compressed-Annealing Heuristic for the Traveling Salesman Problem with Time Windows. INFORMS Journal on Computing, Vol. 19, No. 1, pp. 80-90.

Oxman, A., & Guyatt, G. (1993). The science of reviewing research. Annals of the New York Academy of Science, N. 703, pp. 125-134.

Papadimitriou, C. (1977). The Euclidean Traveling Salesman Problem NP-Complete. Theoretical Computer Science. Vol. 4, No. 3, pp. 237-244

Parra, C., Pérez, J. & Torres, D. (2006). “Modelación y simulación computacional de un proceso productivo de una pequeña empresa usando dinámica de sistemas”. Ingeniería y Desarrollo. N°. 20, pp. 151-171.

Pérez, J., Jaramillo, P., Parra, C. & Moreno, L. (2010). Tetra-Heurística Sistémica para el TSP. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, mayo-agosto. Árica. Vol. 18, No. 2, pp. 187-202.

Quirós, R. (1990). Optimización del proceso de aserrío en madera de cortas dimensiones en el Pacífico Seco, Costa Rica. Tesis (Mag Sc). Turrialba (Costa Rica). 29p.

Reinelt, G. (1991). TSPLIB. A traveling salesman problem library. ORSA journal on computing, Vol. 3, No. 4, pp. 376-384.

Ríos, R. & González, J. (2000). Investigación de operaciones en acción: Heurísticas para la solución del TSP. Ingenierías. Octubre-diciembre. Vol 3, N. 9, pp. 15-20.

Rosenkrantz, D., Stearns, R. & Lewis, I. (1977). An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. SIAM Journal on Computing, V. 6, N.3, pp.563-581.

Sallabi, O., y El-Haddad, Y. (2009). An Improved Genetic Algorithm to Solve the Traveling Salesman Problem. World Academy of Science, Engineering and Technology 52, pp. 471-474.

Savla, K., Frazzoli, E. & Bullo, F. (2008). Traveling salesperson problems for the Dubins vehicle. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 53, No. 6, pp. 1378-1391.

Senge, P. (2005). La Quinta Disciplina. El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje. Ediciones Granica S.A., 2da ed, 4ta reimp. Argentina, 490p.

Snyder, L. & Daskin, M. (2006). A random-key genetic algorithm for the generalized traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 174, No. 1, pp. 38-53.

Soto, E. (2004). *LAS PYMES ante el reto del siglo XXI: Los nuevos mercados Globales*. Thomson Learning, México. pp. 24- 26.

Staples, M., & Niazi, M. (2007). Experiences using systematic review guidelines. *Journal of Systems and Software*. Vol. 80, No. 9, pp. 1425-1437.

Stuetzle, T. & Hoos, H. (1997). MAX-MIN Ant System and local search for the traveling salesman problem. *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC*, pp. 309-314.

Shull, F., Singer, J., & Sjoberg, D. (2008). *Guide to advance empirical software engineering*. Springer-Verlag London Limited.

Teodorovic, D. (2008). *Swarm intelligence systems for transportation engineering: Principles and applications*. *Transportation Research Part C* 16, pp. 651–667.

Torgerson, C. (2003). *Systematic Reviews (Continuum Research Methods)*. Countinuum international publishing group. London.

Vallada, E. Maroto, C., Ruiz, R. & Segura, B. (2005). “Análisis de la programación de la producción en el sector cerámico español”. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*.V. 44 nº1, pp. 39-44.

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, No. 2, (2007) 69-76.

Wang y Wang (2008). Research on ACO with Multiple Nests' Cooperation for Narrow TSP. 978-1-4244-2724-6/08/\$25.00 © 2008 IEEE. pp. 143-147.

Waring, T. y Wainwright, D. (2002). "Communicating the complexity of computer integrated operations: an innovative use of process modelling in a North East hospital Trust". International Journal of Operations & Production Management, N° 22, Vol. 4, pp. 394-411.

Anexos

Anexo 1. Código de la heurística vecino más cercano

```
Sub vecino_cercano()

For i = 2 To Nro
cost_menor(i) = 1E+20
'Id del que tiene el menor valor
id_menor(i) = 0
Next i
For i = 1 To Nro - 1
For j = 2 To Nro
If ruta(id_menor(i), j) < cost_menor(i + 1) And id_menor(i) <> j Then
    For k = 2 To i + 1
        'Para ver que no esté seleccionado
        If id_menor(k) = j Then
            siga = "no"
            k = i + 1
        Else
            siga = "si"
        End If
    Next k
    If siga = "si" Then
        cost_menor(i + 1) = ruta(id_menor(i), j)
        id_menor(i + 1) = j
    End If
End If
Next j
```

```

Next i
'Calcula el costo del tour
costo_ruta(1) = ruta(ciudad_ini, id_menor(2))
For k = 2 To Nro - 1
costo_ruta(k) = ruta(id_menor(k), id_menor(k + 1))
Next k
regreso = ruta(id_menor(k), 1)
costo_total = 0
costo_total = costo_total + regreso
For i = 1 To Nro
costo_total = costo_total + costo_ruta(i)
Next i
tours = 0
tours = tours + 1
costo_opt = costo_total
For l = 1 To Nro
id_opt(l) = id_menor(l)
Next l
End Sub

```

Anexo 2. Código 2_opt incorporado en el SCA

Sub Dos_opt()

For i = 1 To Nro - 2

 For j = i + 2 To Nro - 1

If ruta(ciudad(i), ciudad(j)) + ruta(ciudad(i + 1), ciudad(j + 1)) - (ruta(ciudad(i), ciudad(i + 1)) + ruta(ciudad(j), ciudad(j + 1))) < Dmax Then

 'Si el intercambio entre parejas da un menor costo entonces se hace

 Dmax = ruta(ciudad(i), ciudad(j)) + ruta(ciudad(i + 1), ciudad(j + 1)) - (ruta(ciudad(i), ciudad(i + 1)) + ruta(ciudad(j), ciudad(j + 1)))

 aux = ciudad(i + 1)

 ciudad(i + 1) = ciudad(j)

 ciudad(j) = aux

 'Actualiza el vector que aloja el mejor costo encontrado

 h = 0

 For s = i + 2 To Int((j + i) / 2)

 h = h + 1

 aux = ciudad(j - h)

 ciudad(j - h) = ciudad(s)

 ciudad(s) = aux

 Next s

For l = 1 To Nro

 id_opt(l) = ciudad(l)

Next l

'Para que vuelva a hacer 2 opt con el vector mejorado

i = 0

j = Nro - 1

Dmax = 0

'Calcula el costo del tour

For l = 1 To Nro - 1

```

costo_ruta(l) = ruta(id_opt(l), id_opt(l + 1))
Next l
regreso = ruta(id_opt(l), 1)
costo_total = 0
costo_total = costo_total + regreso
For l = 1 To Nro - 1
costo_total = costo_total + costo_ruta(l)
Next l
tours = tours + 1
'Actualiza el mejor costo almacenado
If costo_total < costo_opt Then
costo_opt = costo_total
End If
End If
Next j
Next i
End Sub

```


Anexo 3. Matriz de datos experimentales de heurísticas

Nº	Método	Instancia (ciudades)	Costo	Tiempo (seg)
1	SCA_2opt	10	114	0,000
2	VMC	10	137	0,000
3	IMB	10	194	0,000
4	2-opt WinQSB	10	114	0,000
5	SCA_2opt	10	193,7	0,000
6	VMC	10	219	0,000
7	IMB	10	241	0,000
8	2-opt WinQSB	10	205	0,000
9	SCA_2opt	20	212,2	0,000
10	VMC	20	321	0,000
11	IMB	20	324	0,000
12	2-opt WinQSB	20	214	0,047
13	SCA_2opt	20	201	0
14	VMC	20	268	0
15	IMB	20	330	0
16	2-opt WinQSB	20	246	0,063
17	SCA_2opt	30	234	0,016
18	VMC	30	368	0
19	IMB	30	324	0
20	2-opt WinQSB	30	269	0,109
21	SCA_2opt	30	213	0,016
22	VMC	30	270	0
23	IMB	30	259	0
24	2-opt WinQSB	30	173	0,218
25	SCA_2opt	40	280	0,047
26	VMC	40	509	0
27	IMB	40	417	0,015
28	2-opt WinQSB	40	312	0,328
29	SCA_2opt	40	240	0,047
30	VMC	40	437	0,016
31	IMB	40	402	0,016
32	2-opt WinQSB	40	308	0,516
33	SCA_2opt	50	210	0,109
34	VMC	50	307	0
35	IMB	50	447	0,016
36	2-opt WinQSB	50	298	2,469
37	SCA_2opt	50	331	0,078
38	VMC	50	345	0
39	IMB	50	368	0,015
40	2-opt WinQSB	50	302	1,312
41	SCA_2opt	60	300	0,172

42	VMC	60	474	0
43	IMB	60	509	0,031
44	2-opt WinQSB	60	315	3,406
45	SCA_2opt	60	251	0,156
46	VMC	60	316	0,016
47	IMB	60	445	0,015
48	2-opt WinQSB	60	331	2,062
49	SCA_2opt	70	265	0,266
50	VMC	70	436	0
51	IMB	70	616	0,032
52	2-opt WinQSB	70	405	6,891
53	SCA_2opt	70	268	0,25
54	VMC	70	514	0
55	IMB	70	447	0,047
56	2-opt WinQSB	70	289	9,063
57	SCA_2opt	80	299	0,406
58	VMC	80	507	0
59	IMB	80	581	0,047
60	2-opt WinQSB	80	438	10,391
61	SCA_2opt	80	282	0,391
62	VMC	80	409	0
63	IMB	80	483	0,047
64	2-opt WinQSB	80	302	10,594
65	SCA_2opt	90	276	0,563
66	VMC	90	435	0,016
67	IMB	90	606	0,094
68	2-opt WinQSB	90	331	23,938
69	SCA_2opt	90	301	0,609
70	VMC	90	435	0
71	IMB	90	542	0,079
72	2-opt WinQSB	90	364	17,094
73	SCA_2opt	100	284	0,797
74	VMC	100	567	0
75	IMB	100	585	0,109
76	2-opt WinQSB	100	387	34,875
77	SCA_2opt	100	288	0,797
78	VMC	100	504	0
79	IMB	100	689	0,11
80	2-opt WinQSB	100	403	34,781