

## Metaheurísticas avanzadas y de población descentralizada para problemas de ruteo de vehículos.

Villagra S., Pandolfi D., Villagra A., Lasso M., Rasjido J., Mercado V., Orozco S., Serón N., Vidal P., Valdez J., Montenegro C.

Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEem) - Unidad Académica Caleta Olivia  
 Universidad Nacional de la Patagonia Austral  
 {svillagra, dpandolfi, avillagra, mlasso, jrasjido, vmercado, sorozco, nseron, pjvidal, jcvaldez, cmontenegro}@uaco.unpa.edu.ar

Leguizamón G.

Laboratório de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Computacional (LIDIC)  
 Departamento de Informática - Universidad Nacional de San Luis  
 legui@unsl.edu.ar

### RESUMEN

En el presente trabajo se describe la línea de investigación en el campo de las metaheurísticas, en especial de las metaheurísticas híbridas y paralelas para resolver el problema de ruteo de vehículos y posiblemente otros dominios afines. Se hará hincapié en la investigación y desarrollo de algoritmos híbridos basados en cGA enriquecido con componentes de otras metaheurísticas y en la propuesta de una metodología simple para esta hibridación y que pueda extenderse a otros algoritmos.

Los algoritmos estudiados serán validados a través de estudios experimentales intensivos y analizados rigurosamente bajo la teoría estadística apropiada.

**Palabras clave:** Metaheurísticas, Paralelismo, Hibridación, Problemas de ruteo de vehículos

### CONTEXTO

La línea de investigación descrita en esta presentación se enmarca en el Proyecto de Investigación "Metaheurísticas avanzadas y de población descentralizada para problemas de ruteo de vehículos" llevado a cabo en el Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEem) en el marco del programa de Investigación en Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral.

### 1. INTRODUCCION

El diseño de algoritmos cada vez más eficientes para resolver problemas complejos, tanto de optimización como de búsqueda, ha sido tradicionalmente uno de los aspectos más importantes de la investigación en Informática. El objetivo perseguido en este campo es, fundamentalmente, el desarrollo de nuevos métodos capaces de resolver los problemas complejos con el menor esfuerzo computacional posible, mejorando así los resultados obtenidos por los algoritmos existentes. En consecuencia, esto no sólo permite

afrontar problemas actuales de forma más eficiente, sino también tareas vedadas en el pasado debido a su alto costo computacional. En este contexto, la actividad investigadora en algoritmos exactos, heurísticos ad hoc y metaheurísticos, para resolver problemas complejos de optimización, está creciendo de forma evidente en estos días. La razón es que continuamente se están afrontando nuevos problemas de ingeniería, mientras que, al mismo tiempo, cada vez se dispone de mejores recursos computacionales, como nuevos tipos de computadoras, redes y entornos como Internet. La principal ventaja de la utilización de algoritmos exactos es que garantizan encontrar el óptimo global de cualquier problema, pero tienen el grave inconveniente de que en problemas reales (que suelen ser NP-hard en la mayoría de los casos) su tiempo de ejecución y/o los requisitos de memoria crecen de forma exponencial con el tamaño del problema. En cambio, los algoritmos heurísticos ad hoc son normalmente bastante rápidos, pero la calidad de las soluciones encontradas está habitualmente lejos de ser óptima. Otro inconveniente de estos heurísticos ad hoc es que no son fáciles de definir en determinados problemas. Las metaheurísticas ofrecen un equilibrio adecuado entre ambos extremos: son métodos genéricos que ofrecen soluciones de buena calidad (el óptimo global en muchos casos) en un tiempo razonable.

En la actualidad, uno de los mecanismos que ha probado ser exitoso en el diseño de metaheurísticas eficientes para la resolución de problemas de optimización es el paralelismo. Utilizar algoritmos paralelos es una forma de aliviar los problemas vinculados a tiempos intensivos de ejecución e importantes requerimientos de memoria para resolver instancias complejas de interés actual.

El problema de ruteo de vehículos (VRP) [Dantzing y Ramster 1959] consiste en minimizar el costo de repartir la mercancía a un conjunto de clientes desde un depósito. Reducir el costo implica minimizar el número de vehículos utilizados y la longitud de sus rutas. El interés de este problema viene dado por dos causas principales. Por un lado,

el VRP es un problema NP-hard [Lenstra y Rinnooy Kan 1981] y de alto interés académico debido a su dificultad en las restricciones que incluye, y en la multitud de variantes existentes. Por otro lado, muchos problemas del mundo real pueden ser visualizados (o concebidos) como variantes de VRP, siendo aplicable tanto a grandes empresas logísticas como a empresas locales de reparto (prensa, alimentación, etc.). De hecho, el uso de métodos computarizados a menudo, en empresas de transporte puede llegar a proporcionar un ahorro significativo, llegando en muchos casos a suponer hasta el 20 % del costo total del producto [Toth y Vigo 2001]. En la historia reciente de VRP existe una evolución constante en la calidad de las metodologías empleadas para resolverlo. Estas técnicas comprenden tanto algoritmos exactos como métodos heurísticos (secuenciales y paralelos). De cualquier forma, debido a la dificultad que presenta el problema, no existe ningún método exacto capaz de resolver instancias de más de 50 clientes [Toth y Vigo 2001], [Golden et al. 1998].

## 2. LINEAS DE INVESTIGACION y DESARROLLO

En esta sección se describe la línea de investigación que se lleva a cabo en el proyecto:

- Metaheurísticas paralelas e híbridas aplicadas al problema de ruteo de vehículos

La optimización es una disciplina fundamental en campos de las ciencias tales como Informática, Inteligencia Artificial, Logística, Biología, Tecnología de la Producción, Física, etc. El concepto de optimización puede verse como el proceso de encontrar y mejorar el rendimiento de una publicación o dispositivo a partir de determinados cambios lógicos o físicos. A este tipo de problemas se los puede dividir en dos categorías [Blum y Roli 2003], [Papadimitriou y Steiglitz 1998]: aquellos en los que la solución está codificada mediante valores reales y aquellos cuya solución está codificada con valores enteros. En los últimos encontramos los problemas denominados de optimización combinatoria. Algunos ejemplos muy conocidos son el problema del viajante de comercio (TSP – Travelling Salesman Problem), el problema de asignación cuadrática (QAP – Quadratic Assignment Problems) o los problemas de planificación (Scheduling Problems), entre otros, [Cook et al. 1998], [Papadimitriou y Steiglitz 1998]. En las dos últimas décadas ha emergido un nuevo tipo de técnicas aproximadas que consiste básicamente en la combinación de métodos heurísticos (técnicas aproximadas con componentes aleatorios guiados) básicos en plataformas de más alto nivel con el fin de explorar el espacio de

búsqueda de una forma eficiente y efectiva. Estos métodos son comúnmente conocidos con el término metaheurísticas. En [Blum y Roli 2003] se pueden encontrar recopiladas varias definiciones de metaheurísticas dadas por diferentes autores, pero en general podemos decir que las metaheurísticas son estrategias de alto nivel que planifican de manera estructurada la aplicación de varias operaciones para explorar espacios de búsqueda de elevada dimensión y complejidad intrínseca. Pueden clasificarse en multitud de diferentes formas, en [Blum y Roli 2003] se da una clasificación que depende de un conjunto de características seleccionadas que las diferencian. Así, se puede tener metaheurísticas inspiradas en la naturaleza, basadas en poblaciones o en trayectorias, con función objetivo estática o dinámica, que utilizan una o varias estructuras de vecindario, o que alternativamente memorizan estados anteriores de la búsqueda. De entre las metaheurísticas más conocidas se pueden destacar, entre otras: Simulated Annealing (SA) [Corney 1985], [Kirkpatrick et al. 1983], Tabu Search (TS) [Glover 1986], [Glover y Laguna 1993], procedimiento de búsqueda adaptativo aleatoriamente voraz (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure - GRASP) [Feo y Resende 1995], [Resende y Ribeiro 2003], búsqueda por vecindario variable (Variable Neighborhood Search - VNS) [Hansen y Mladenovic 1997], y otros basados en una población tales como algoritmos evolutivos (EAs) [Bäck et al. 1997], optimización por colonia de hormigas (ACO - Ant Colony Optimization) [Dorigo y Caro 1999], optimización por cúmulo de partículas (PSO - Particle Swarm Optimization) [Eberhart y Kennedy 1995], etc.

En los últimos años, ha aumentado considerablemente el interés en las metaheurísticas híbridas en el campo de la optimización. Se han obtenido buenos resultados en muchos problemas de optimización clásicos y de la vida real utilizando metaheurísticas híbridas. Talbi en [Talbi 2002], [Talbi 2009] propone una taxonomía para algoritmos híbridos y presenta dos clasificaciones para este tipo de algoritmos: jerarquizada y plana. Esta clasificación establece esquemas híbridos específicos en donde, en general, diferentes algoritmos son combinados de acuerdo a ciertos criterios. Sin embargo, en este trabajo se pretende brindar una perspectiva diferente al esquema híbrido planteado previamente. Más precisamente, se pretende crear algoritmos cuya construcción siga criterios similares a los establecidos para diseñar algoritmos híbridos, pero incorporando componentes de los algoritmos antes que al algoritmo como un todo. En este sentido, se puede realizar una analogía entre la hibridación con componentes de otras metaheurísticas y la simbiosis en la naturaleza. En biología, la simbiosis [Fabian

2001] funde especies genéticamente distintas en un único organismo. Simbiosis es la reunión de dos estructuras que han evolucionado por caminos separados. El resultado es una estructura compuesta con un comportamiento diferente del que tenían las componentes por separado. La simbiosis permite que la evolución avance a pasos agigantados. Una criatura simbiótica puede saltar a un nivel superior de complejidad mucho más de prisa que una criatura que evoluciona mediante los procesos habituales de la mutación y la especiación.

En lo que sigue se describe brevemente el uso de metaheurísticas paralelas, tema que conforma el marco global de la investigación a ser abordada en este proyecto. Aunque el uso de metaheurísticas (simples o híbridas) permite reducir significativamente la complejidad temporal del proceso de búsqueda, este tiempo puede seguir siendo muy elevado en algunos problemas de interés real. Con el aumento de plataformas paralelas eficientes, la implementación paralela de estas metaheurísticas surge de forma natural como una alternativa para acelerar la obtención de soluciones precisas a estos problemas. La literatura es muy extensa en cuanto a la paralelización de metaheurísticas se refiere [Alba 2005], [Crainic y Toulouse 2003], [Cung et al. 2003], [Luna et al. 2006], [Luque y Alba 2011] ya que se trata de una aproximación que puede ayudar no sólo a reducir el tiempo de cómputo, sino a producir también una mejora en la calidad de las soluciones encontradas. Esta mejora está basada en un nuevo modelo de búsqueda que alcanza un mejor balance entre intensificación y diversificación. De hecho, muchos investigadores no utilizan plataformas paralelas de cómputo para ejecutar estos modelos paralelos y, aún así, siguen obteniendo mejores resultados que con los algoritmos secuenciales tradicionales. Tanto para las metaheurísticas basadas en trayectoria como para las basadas en población se han propuesto modelos paralelos acorde a sus características con la utilización no sólo de modelos paralelos, sino también de plataformas paralelas, ya que una simple evaluación del problema puede llevar minutos o incluso horas si se consideran problemas en los que intervienen, por ejemplo, complejas simulaciones.

En cuanto a los modelos paralelos de metaheurísticas basadas en trayectoria encontrados en la literatura se pueden clasificar, generalmente, dentro de tres posibles esquemas: ejecución en paralelo de varios métodos (modelo de múltiples ejecuciones [Alba et al. 2004], [Luna et al. 2005]), exploración en paralelo del vecindario (modelo de movimientos paralelos), y cálculo en paralelo de la función de fitness (modelo de aceleración del movimiento).

Teniendo en cuenta a los modelos paralelos de metaheurísticas basadas en población el paralelismo surge de manera natural cuando se trabaja con

poblaciones, ya que cada individuo puede manejarse de forma independiente. Debido a esto, el rendimiento de los algoritmos basados en población suele mejorar bastante cuando se ejecutan en paralelo. A alto nivel podemos dividir las estrategias de paralelización de este tipo de métodos en dos categorías: (1) paralelización del cómputo, donde las operaciones que se llevan a cabo sobre los individuos son ejecutadas en paralelo, y (2) paralelización de la población, donde se procede a la estructuración de la población. Uno de los modelos más utilizados que sigue la primera de las estrategias es el denominado maestro-esclavo (también conocido como paralelización global). En este esquema, un proceso central realiza las operaciones que afectan a toda la población mientras que los procesos esclavos se encargan de las operaciones que afectan a los individuos independientemente. Al margen del modelo maestro-esclavo, la mayoría de los algoritmos paralelos basados en población encontrados en la literatura utilizan alguna clase de estructuración de los individuos de la población. Este esquema es ampliamente utilizado especialmente en el campo de los algoritmos evolutivos y es el que mejor ilustra esta categorización. Entre los esquemas más populares para estructurar la población encontramos el modelo distribuido (o de grano grueso) [Alba 1999] y el modelo celular (o de grano fino) [Alba y Tomassini 2002]. En el caso de los algoritmos distribuidos la población se divide entre un conjunto de islas que ejecutan una metaheurística secuencial. Las islas cooperan entre sí mediante el intercambio de información (generalmente individuos, aunque nada impide intercambiar otro tipo de información). Esta cooperación permite introducir diversidad en las subpoblaciones, evitando caer así en los óptimos locales. Por otro lado, las metaheurísticas celulares [Alba y Dorronsoro 2008] se basan en el concepto de vecindario. Cada individuo tiene a su alrededor un conjunto de individuos vecinos donde se lleva a cabo la explotación de las soluciones. La exploración y la difusión de las soluciones, al resto de la población, se produce debido a que los vecindarios están solapados, lo que produce que las buenas soluciones se extiendan lentamente por toda la población. A parte de estos modelos básicos, en la literatura también se han propuesto modelos híbridos donde se implementan esquemas de dos niveles. Por ejemplo, una estrategia bastante común en la literatura es aquella donde en el nivel más alto tenemos un esquema de grano grueso, mientras que cada subpoblación se organiza siguiendo un esquema celular. A continuación se describe brevemente a los algoritmos evolutivos celulares (cEAs) ya que es una de las líneas principales de investigación y serán los primeros a utilizar como base para el diseño de nuevas propuestas algorítmicas. En los cEAs celulares la población está

estructurada utilizando el concepto de vecindario [Alba y Tomassini 2002], de forma que los individuos sólo pueden interactuar con sus vecinos más próximos en la población.

En un cEA [Tomassini 2005], la población está usualmente estructurada en una rejilla (o malla) bidimensional de individuos. Los individuos sólo pueden interactuar con sus vecinos en el bucle reproductor que aplica los operadores de variación. El solapamiento de los vecindarios provee al cEA de un mecanismo implícito de migración, ya que las mejores soluciones se extenderán suavemente por toda la población, por lo que de esta forma se logra mantener la diversidad genética en la población por más tiempo con respecto a otros EAs no estructurados.

En lo relacionado a metaheurísticas paralelas aplicadas al problema de ruteo de vehículos existen muchas contribuciones y tendencias. Pueden encontrarse diferentes métodos paralelos para variantes del problema de ruteo de vehículos en [Crainic 2008] [Golden et al. 2008]. No obstante, el campo de las metaheurísticas paralelas es muy rico en cuanto a la variedad de metodologías utilizadas, y no todas las variantes del problema de ruteo de vehículos se han abordado. Por lo tanto es un desafío la exploración de algunas variantes de problema, la búsqueda de metodologías y estrategias de paralelización.

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS/ESPERADOS

A continuación se mencionan los resultados esperados del proyecto:

- Investigar y estudiar la aplicación de técnicas paralelas en el ámbito de problemas de ruteo de vehículos.
- Realizar una descripción formal de una metodología para la incorporación de componentes activas de diferentes metaheurísticas en una metaheurística anfitriona.
- Desarrollar algoritmos avanzados y paralelos basados en inteligencia computacional para el problema de análisis.

### 4. FORMACION DE RECURSOS HUMANOS

Un integrante de este proyecto de investigación está desarrollando su Tesis de Doctorado en temáticas afines.

Tres integrantes han comenzado su Maestría orientando sus cursos y trabajos a esta línea de investigación.

Se cuenta con dos becarios de investigación de grado.

### 5. BIBLIOGRAFIA

- [Alba 1999] E. Alba. Análisis y Diseño de Algoritmos Genéticos Paralelos Distribuidos. PhD thesis, University of Málaga, 1999.
- [Alba y Tomassini 2002] E. Alba y M. Tomassini. Parallelism y evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(5):443 – 462, 2002.
- [Alba et al. 2004] Alba, F. Luna, y A. J. Nebro. Advances in parallel heterogeneous genetic algorithms for continuous optimization. *International Journal of Applied Mathematics y Computer Science*, 14(3):101 – 117, 2004.
- [Alba 2005] E. Alba, editor. *Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms*. Wiley, 2005.
- [Alba y Dorronsoro 2008] E. Alba y B. Dorronsoro. *Cellular Genetic Algorithms*. Springer 2008
- [Bäck et al. 1997] T. Bäck, D.B. Fogel, y Z. Michalewicz, editors. *Handbook of Evolutionary Computation*. Oxford University Press, 1997.
- [Blum y Roli 2003] C. Blum y A. Roli. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview y conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3):268–308, 2003.
- [Cerney 1985] V. Cerney. A thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Optimization Theory an Applications*, 45, 1985.
- [Cook et al. 1998] W.J. Cook, W.H. Cunningham, W.R. Pulleyblank, y A. Schrijver. *Combinatorial Optimization*. Wiley Interscience, 1998.
- [Crainic y Toulouse 2003] T. G. Crainic y M. Toulouse. Parallel strategies for metaheuristics. In F. W. Glover y G. A. Kochenberger, editors, *Handbook of Metaheuristics*, Norwell, MA, USA, 2003. Kluwer Academic Publishers.
- [Crainic 2008] Crainic, T.G. Parallel solution methods for vehicle routing problems. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances y New Challenges*. Pages 171-198, 2008, Springer.
- [Cung et al. 2003] V.-D. Cung, S. L. Martins, C. C. Ribeiro, y C. Roucairol. Strategies for the Parallel Implementation of Metaheuristics. In C.C. Ribeiro y P. Hansen, editors, *Essays y Surveys in Metaheuristics*, pages 263–308, Norwell, MA, USA, 2003. Kluwer Academic Publishers.
- [Dantzing y Ramster 1959] G.B. Dantzing y R.H. Ramster, “The truck dispatching problem,” *Management Science*, vol. 6, pp. 80–91, 1959.
- [Eberhart y Kennedy 1995] R. Eberhart y J. Kennedy. A new optimizer using particles swarm theory. In *Sixth International Symposium on Micro Machine y Human Science (Nagoya, Japan)*, IEEE Service Center, Piscataway, pages 39–43, 1995.
- [Feo y Resende 1995] T.A. Feo y M.G.C. Resende. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6:109–133, 1995

- [Golden et al. 2008] Golden, B.L. y Raghavan, S. y Wasil, E.A. The vehicle routing problem: latest advances y new challenges. Vol. 43. 2008. Springer Verlag.
- [Glover 1986] F. Glover. Future paths for integer programming y links to artificial intelligence. *Computer y Operations Research*, 13:533–549, 1986.
- [Glover y Laguna 1993] F. Glover y M. Laguna. Tabu search in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. John Wiley y Sons, 1993.
- [Golden et al. 1998] B.L. Golden, E.A. Wasil, J.P. Kelly, y I-M. Chao, Fleet Management y Logistics, chapter The Impact of Metaheuristics on Solving the Vehicle Routing Problem: algorithms, problem sets, y computational results, pp. 33–56, Kluwer, Boston, 1998.
- [Hansen y Mladenovic 1997] P. Hansen y N. Mladenovic. Variable neighborhood search for the p-median. *Location Science*, 5:207–226, 1997.
- [Kirkpatrick et al. 1983] S. Kirkpatrick, J. Gelatt, y M. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671–680, 1983.
- [Lenstra y Rinnooy Kan 1981] J.K. Lenstra y A.H.G. Rinnooy Kan, “Complexity of vehicle routing y scheduling problems,” *Networks*, vol. 11, pp. 221–227, 1981.
- [Luque y Alba 2011] G. Luque y E. Alba, “Parallel Genetic Algorithms”, Springer, 2011.
- [Luna et al. 2005] F. Luna, E. Alba, y A. J. Nebro. Parallel heterogeneous metaheuristics. In E. Alba, editor, *Parallel Metaheuristics*, pages 395 – 422. Wiley, 2005.
- [Luna et al. 2006] F. Luna, A. J. Nebro, y E. Alba. Parallel evolutionary multiobjective optimization. In N. Nedjah, E. Alba, y L. de Macedo, editors, *Parallel Evolutionary Computations*, volume 22 of *Studies in Computational Intelligence*, chapter 2, pages 33 – 56. Springer, 2006.
- [Papadimitriou y Steiglitz 1998] C. Papadimitriou y K. Steiglitz. *Combinatorial Optimization*. Dover Publications, 1998.
- [Resende y Ribeiro 2003] M.G.C. Resende y C.C. Ribeiro. *Handbook of Metaheuristics*, chapter Greedy randomized adaptive search procedures, pages 219–249. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [Talbi 2002] E.-G. Talbi. A taxonomy of hybrid metaheuristics. *Heuristics*, (8):541–564, 2002.
- [Talbi 2009] E.-G. Talbi. *Metaheuristics: From design to Implementation*. Wiley, 2009.
- [Tomassini 2005] M. Tomassini. *Spatially Structured Evolutionary Algorithms: Artificial Evolution In Space y Time*. Natural Computer. Springer-Verlag, Heidelberg, 2005.
- [Toth y Vigo 2001] P. Toth y D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem*, Monographs on Discrete Mathematics y Applications. SIAM, Philadelphia, 2001.