

Optimización de la logística de distribución utilizando técnicas de la Inteligencia Artificial

Gabriela Minetti, Carolina Salto, Hugo Alfonso, Carlos Bermúdez,
M.Juliana Dielschneider Del Bono, Javier Vargas
Laboratorio de Investigación en Sistemas Inteligentes (LISI)
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Pampa
Calle 110 Esq. 9 (6360) General Pico - La Pampa - Rep. Argentina
Te. / Fax: (02302) 422780/422372, Int. 6302
e-mail: {saltoc, minetti, alfonsoh, bermudezc, juliana, jvargas}@ing.unlpam.edu.ar

Resumen

La logística en Argentina está influida por el decisivo peso de la producción primaria en la organización del sistema, por una orientación prevalente hacia las exportaciones globales y las dirigidas al mercado regional sudamericano, y por una matriz de transporte dominada por el transporte automotor de cargas y la concentración portuaria. La logística remite a flujos de materiales y de información; a lugares de manipulación, depósito y transformación de las mercancías; a redes y nodos de circulación; y a tiempos de movimiento y no movimiento que responden a aspectos materiales (las infraestructuras, los transportes y las cargas) y también a aspectos funcionales (los servicios, las normativas y regulaciones). En suma, la logística implica un uso del territorio en el tiempo, una convergencia espacio-temporal, una organización y sincronización de flujos a través de estrategias sobre los nodos y las redes. Esta aproximación resalta las limitaciones de miradas parciales y destaca la necesidad de considerar una perspectiva integral que incluya, además, los aspectos organizacionales y de coordinación. La consideración de infraestructuras de circulación; servicios de transporte; infraestructuras de comunicaciones; servicios de almacenamiento y agregado de valor; normativas y regulaciones y costos operativos, entre otros, da cuenta del desafío que involucra una coordinación amplia de políticas estatales de diferente tipo y a cargo de estructuras administrativas diversas. El despliegue de la logística como uno de los “usos del territorio”, abre la posibilidad de acentuar el enfoque territorial. En esta línea de investigación se aborda la optimización de la

logística de distribución de cargas y paquetería. Para tal fin se propone el desarrollo de software logístico, que incorpore herramientas basadas en inteligencia artificial, como soporte para la toma de decisiones a nivel gerencial y asistido por herramientas que permitan evaluar la incidencia de la matriz de costos y buscar el equilibrio del sistema. Se considera que el abordaje de la optimización de la logística de distribución centrada en la provincia de La Pampa tendría impacto en la matriz productiva y de servicios de toda la región.

Palabras claves: Optimización, Logística de distribución, Inteligencia Artificial

Contexto

Esta línea de investigación surge como una proyección del Proyecto "Big data optimization con algoritmos metaheurísticos utilizando frameworks de computación distribuida" que se desarrolla desde el 2021 en la Facultad de Ingeniería de la UNLPam. Este proyecto se lleva adelante en el Laboratorio de Investigación de Sistemas Inteligentes (LISI) de la Facultad de Ingeniería y es dirigido por la Dra. Salto.

En el LISI, desde su creación en 1998, nos hemos abocado al estudio de algoritmos cada vez más eficientes para la solución de problemas complejos, tanto de optimización como de diseño. En este dominio, el objetivo consiste en obtener algoritmos nuevos que den solución al problema y que necesiten un esfuerzo computacional más pequeño que los algoritmos existentes, así como caracterizar su comportamiento para las clases de problemas

que demanda la comunidad científica e industrial en general. Cabe destacar que desde hace varios años, los integrantes de este laboratorio mantienen una importante vinculación con investigadores de las universidades argentinas, Universidad Nacional de San Luis y Universidad Nacional de Río Cuarto, y de la Universidad de Málaga (España), con quienes se realizan trabajos conjuntos.

Introducción

La optimización de la logística de distribución de cargas y paquetería, conocida en el ámbito de la investigación operativa [1] como el problema del enrutamiento de vehículos (VRP, sus siglas en Inglés) [2], es posiblemente uno de los problemas de optimización combinatoria más clásicos que surgen en la cadena logística. El VRP consiste en determinar las rutas que debe tomar una determinada flota de vehículos para recolectar y/o distribuir artículos en ubicaciones conocidas de clientes. Cada artículo suele tener asociado un determinado tamaño o peso. La cantidad total (en términos de peso o tamaño) de las cantidades recolectadas por un solo vehículo no puede exceder su capacidad. En la versión más clásica del VRP, se supone que todos los datos (demandas del cliente, tiempos de viaje, ventanas de tiempo, etc.) se conocen de antemano. El responsable de la toma de decisiones, tanto en grandes compañías como en pequeñas empresas, debe planificar con anticipación las rutas de los vehículos para satisfacer las demandas de los clientes a un costo de viaje mínimo. El costo del viaje puede incluir, entre otros, el tiempo de viaje, las horas hombre, los viáticos, el combustible y los peajes [3], [4]. Desafortunadamente, el VRP es fuertemente NP-duro incluso para un solo objetivo, ya que el problema del viajante de comercio (TSP) [5] puede reducirse polinomialmente a él [6]. Los avances en la tecnología de la comunicación y de la información permiten que las flotas de vehículos sean manejadas en tiempo real. Esto implica usar conjuntamente sistemas de información geográfica, sistemas de posicionamiento global, sensores de flujo de tráfico y teléfonos celulares para obtener datos en tiempo real. Por ejemplo, la ubicación actual de los vehículos, requerimientos de los nuevos

consumidores, el tiempo de viaje en ruta, entre otros. En este contexto, al introducir diversas características dinámicas el VRP clásico se convierte en dinámico (DVRP, por sus siglas en Inglés) [7], [8], representando una parte importante de muchos sistemas de distribución y transporte actuales. El dinamismo puede darse en el bloqueo de la ruta entre dos clientes, en órdenes modificadas por los consumidores, incremento en el tiempo de viaje debido a las malas condiciones climáticas, etc. A estas dos versiones de VRP se suman los requerimientos de nuevos servicios como una mayor atención pública sostenible [9], las restricciones de acceso urbano [10], [11], el aumento de los volúmenes de entrega [12], el uso de instalaciones de transbordo que surgen en la logística de la ciudad [13], la integración de producción, inventario, distribución y enrutamiento de múltiples viajes con ventanas de tiempo [14], la utilización de una flota heterogénea con backhaul (viaje de vuelta) [15], entre otros. Al ser todos estos servicios variantes de VRP pertenecen a la clase de problemas NP-duro. El VRP ha sido objeto de intensos esfuerzos de investigación en el área de la Inteligencia Artificial, considerando enfoques de optimización tanto exactos como heurísticos. Los primeros estudios de solución para el VRP, centrados en técnicas exactas, se pueden encontrar en [16], [17], [18], [19], entre otros. Debido al alto nivel de complejidad de este problema y su amplia aplicabilidad a situaciones de la vida real, las técnicas de solución capaces de producir soluciones de alta calidad en un tiempo limitado, como las heurísticas y las metaheurísticas [20], son de primordial importancia, como lo muestran estas contribuciones: [13], [21], [22], [23], [24], entre muchas otras. Estas técnicas, que pertenecen a la clase de algoritmos de búsqueda estocásticos, reducen de forma significativa la complejidad temporal del proceso de búsqueda aún cuando se ejecutan secuencialmente. Pero la paralelización de este proceso, además de disminuir los tiempos, permite aumentar la calidad de las soluciones halladas. En este sentido, resulta necesario el análisis de las distintas plataformas de hardware (procesadores multicore, unidades de procesamiento gráficas, ambientes cloud) y de software (Hadoop, Spark, MPI, High Processing Computing -HPC- en general) actuales que per-

miten desarrollar técnicas de computación paralelas que mejoran la resolución de problemas con menores tiempos de cómputo. Además de, medir objetivamente el algoritmo en términos de calidad de la solución y tiempo computacional sobre los problemas de los que no se conoce una solución óptima. El desarrollo de estas técnicas, por ser estocásticas, presenta un tercer desafío igual de importante: el uso de métodos y de técnicas estadísticas para valorar la robustez del algoritmo en un amplio rango de casos. Esto conlleva a una mayor usabilidad de esta clase de algoritmos al incorporarlos como módulos de optimización dentro de los sistemas de soporte de decisiones gerenciales [25]. Desde el LISI hemos abordado algunas variantes de este problema [26] así como también del conocido problema del viajante de comercio [27]. Además, hemos resuelto una gran variedad de problemas combinatorios NP-duros con herramientas inteligentes, a saber: diseño de redes de distribución de agua [28], [29], diseño de redes de sensores [30], [31], [32], de planificación de trabajos [33], [34], de ensamblado de fragmentos de ADN [35], [36], corte y empaquetado [37], entre otros. Así como también, la paralelización de estas herramientas en ambientes HPC [38], [29]. La experiencia que hemos alcanzado en la resolución de esta variedad de problemas, nos permitiría aplicar y adaptar estas técnicas en la resolución del problema de optimización de la logística de distribución de cargas y paquetería en la Provincia de La Pampa y su región aledaña. Se trabajará con datos de prueba brindados por la comunidad científica (benchmarks) que nos permitirá contrastar y evaluar nuestra propuesta con algoritmos de la literatura, con el objetivo de medir el desempeño de los algoritmos desarrollados. A partir de esto, podremos utilizar nuestra propuesta algorítmica para optimizar escenarios de distribución reales, incorporando el análisis del impacto de los costos fijos (aquellos que son constantes durante el volumen “normal” de operación del transportista) y variables (aquellos que varían con los servicios o el volumen) propios de nuestra provincia y región aledaña.

Línea de investigación y desarrollo

Para abordar este puntual problema de opti-

mización de la logística de distribución de cargas y paquetería, se propuso el desarrollo de software logístico, que incorpore herramientas basadas en inteligencia artificial, como soporte para la toma de decisiones a nivel gerencial y asistido por herramientas que permitan evaluar la incidencia de la matriz de costos y buscar el equilibrio del sistema. Luego de la identificación y enunciado del VRP y sus variantes, se procede con la formulación de las hipótesis que guiará nuestro trabajo de investigación: H1- La herramienta de software, basada en las técnicas estocásticas de la inteligencia artificial, es capaz de diseñar rutas de distribución eficientes para incrementar la eficiencia operacional, reducir costos y aumentar la satisfacción de los clientes. H2- La determinación de los factores de costos relacionados a cada ruta planificada, su clasificación en cuanto a variabilidad y la asignación de un valor, permiten estudiar la incidencia de cada uno de ellos en el costo total de dicha ruta y contar con información importante para la toma de decisiones. Con el fin de demostrar las hipótesis, el objetivo general de este proyecto es brindar herramientas de software sólidas para la toma de decisiones, que permitan optimizar la logística de distribución de carga y paquetería que minimicen costos e incrementen la eficiencia operacional, no solo en relación al tiempo, sino también en cuanto a los costos en que se incurrirán necesariamente. De esta manera se proporcionan soluciones de alta calidad al problema VRP y sus variantes presentes en nuestra región. Este problema tiene varias aristas a considerar tales como capacidad de carga de los vehículos, una flota heterogénea, rutas abiertas, zonas geográficas de distribución, prioridades de entrega, ventanas de tiempo para contactar a clientes, backhaul, entre otras. También se contempla que dichas situaciones se puedan producir o variar dinámicamente. En función de la alta complejidad de los VRPs es que no se pueden encontrar soluciones exactas en tiempos razonables. Dado lo anterior, los problemas de este tipo se resuelven utilizando técnicas provenientes de la inteligencia artificial como lo son las meta-heurísticas, que buscan encontrar la mejor solución posible en un tiempo acotado. Por lo tanto, el software logístico a desarrollar en este proyecto para la toma de decisiones seguirá tales lineamientos. Para

alcanzar el objetivo general propuesto se establecen los siguientes objetivos específicos: 1- Relevar las características que presenta el VRP en entornos reales de nuestra región. 2- Modelar el problema y formularlo matemáticamente, identificando variables, objetivos y restricciones. 3- Seleccionar el método metaheurístico más adecuado en base al cual se desarrollará el sistema de logística de distribución inteligente. 4- Diseñar e implementar el software logístico que optimizará la logística de distribución. 5- Estudiar el costo de cada ruta de distribución obtenida por el software para verificar su viabilidad en situaciones reales y facilitar la toma de decisiones en forma proactiva. 6- Analizar posibles extensiones distribuidas y/o paralelas de esta herramienta para reducir su tiempo de respuesta.

Resultados esperados

El resultado final de este proyecto es diseñar e implementar un software logístico como soporte para la toma de decisiones a nivel gerencial de empresas que incluyan en sus actividades tareas de distribución de cargas y paquetería. Dicha tecnología permitirá, a partir de la consideración de las distintas variables y restricciones, conseguir el mayor rendimiento y eficacia en los procesos logísticos. Por ello el impacto potencial de esta propuesta cubrirá distintas aristas. Por un lado permitirá la formación específica de un grupo de profesionales y de estudiantes avanzados de las carreras en el abordaje de este complejo problema tan importante para la región. Por otro lado, se desarrollarán aplicaciones apropiadas para potenciales centros de logística y distribución a instalarse en la provincia. La Facultad de Ingeniería se beneficiará, pues este aprendizaje favorece la formación de los recursos humanos en una actividad de transferencia de los resultados de la investigación desarrollada para una futura aplicación del software logístico en una empresa de la región. También es importante resaltar la interdisciplinariedad en el tratamiento de la propuesta ya que permite vincular áreas ingenieriles: Sistemas Inteligentes, Sistemas Distribuidos, Bases de Datos, Ingeniería de Software, Costos Industriales e Investigación Operativa, que

provienen de la Ingeniería en Sistemas y de la Ingeniería Industrial.

Formación de recursos humanos

La realización de este proyecto brindaría el marco adecuado para continuar con la formación de los integrantes del mismo y propiciar un ambiente para la cooperación entre ellos y empresas de la región interesadas en el abordaje de la problemática abordada. Se contempla la incorporación de dos alumnos avanzados de las carreras de Ing. en Sistemas y de Ing. Industrial para que se inicien en la tarea de investigación y sea esta un área propicia para desarrollar sus trabajos de tesis, o bien recientes graduados de las mencionadas carreras que se deseen incorporar a la actividad académica o de investigación. Las tareas a asignar consistirán en: 1 - el desarrollo de una aplicación para interactuar con el software logístico, 2 - la implementación de un entorno gráfico para visualizar las rutas obtenidas en la optimización del problema, 3 - el relevamiento de datos actualizados correspondientes a los costos fijos y variables determinados, y 4 - la verificación de las rutas de distribución obtenidas por la metaheurística con los datos relevados.

REFERENCES

- [1] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introducción a la investigación de operaciones*, 9th ed. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, 2012.
- [2] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- [3] S. Chopra and P. Meindl, *Administración de la Cadena de Suministro: Estrategia Planeación y Operación*, 5th ed. Pearson, 2013.
- [4] R. Ballou, *LOGÍSTICA. Administración de la cadena de suministros*, 5th ed. Pearson, 2004.
- [5] G. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson, "Solution of a large-scale traveling-salesman problem," *Journal of the Operations Research Society of America*, vol. 2, no. 4, pp. 393–410, 1954. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/166695>
- [6] J. K. Lenstra and A. H. G. R. Kan, "Complexity of vehicle routing and scheduling problems," *Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 221–227, 1981. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/net.3230110211>
- [7] H. Psaraftis, *Dynamic Vehicle Routing Problems*. North-Holland, 1988, pp. 223–248.
- [8] O. Madsen, A. Larsen, and M. Solomon, *Recent developments in dynamic vehicle routing systems*, 1st ed. Springer, 2008, vol. 43, pp. 199–220.

- [9] M. Savelsbergh and T. Van Woensel, “50th anniversary invited article—city logistics: Challenges and opportunities,” *Transportation Science*, vol. 50, no. 2, pp. 579–590, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0675>
- [10] S. Ville, J. Gonzalez-Feliu, and L. Dablanc, “The limits of public policy intervention in urban logistics: Lessons from vicenza (italy),” *European Planning Studies*, vol. 21, no. 10, pp. 1528–1541, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/09654313.2012.722954>
- [11] R. Elbert and C. Friedrich, “Simulation-based evaluation of urban consolidation centers considering urban access regulations,” in *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2018, pp. 2827–2838.
- [12] Comisión-Europea, “Directorate general for mobility and transport,” 2019. [Online]. Available: <https://www.amt-autoridade.pt/media/1934/2019-transport-in-the-eu-current-trends-and-issues.pdf>
- [13] C. Friedrich and R. Elbert, “Adaptive large neighborhood search for vehicle routing problems with transshipment facilities arising in city logistics,” *Computers Operations Research*, vol. 137, p. 105491, 2022.
- [14] B. Ramos, C. Alves, and J. Valério de Carvalho, “An arc flow formulation to the multitrip production, inventory, distribution, and routing problem with time windows,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 29, no. 1, pp. 526–553, 2022. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/itor.12765>
- [15] W. Wu, Y. Tian, and T. Jin, “A label based ant colony algorithm for heterogeneous vehicle routing with mixed backhaul,” *Applied Soft Computing*, vol. 47, pp. 224–234, 2016.
- [16] B. L. Golden and A. A. Assad, “Perspectives on vehicle routing: Exciting new developments,” *Operations Research*, vol. 34, no. 5, pp. 803–810, 1986. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/170738>
- [17] —, *Vehicle Routing: Methods and Studies*, Amsterdam: North - Holland, 1988.
- [18] M. Desrochers, J. Lenstra, M. Savelsbergh, and F. Soumis, “Vehicle routing with time windows: Optimization and approximation,” *Vehicle Routing: Methods and Studies*, vol. 16, 01 1988.
- [19] M. M. SOLOMON and J. DESROSIERS, “Time window constrained routing and scheduling problems,” *Transportation Science*, vol. 22, no. 1, pp. 1–13, 1988. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/25768291>
- [20] E. Talbi, *Metaheuristics: from Design to Implementation*. Wiley, 2009.
- [21] E. Demir, T. Bektaş, and G. Laporte, “An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 223, no. 2, pp. 346–359, 2012.
- [22] G. Dueck, “New optimization heuristics: The great deluge algorithm and the record-to-record travel,” *Journal of Computational Physics*, vol. 104, no. 1, pp. 86–92, 1993.
- [23] G. Dueck and T. Scheuer, “Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing,” *Journal of Computational Physics*, vol. 90, no. 1, pp. 161–175, 1990.
- [24] D. Dumez, F. Lehuédé, and O. Péton, “A large neighborhood search approach to the vehicle routing problem with delivery options,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 144, pp. 103–132, 2021.
- [25] E. Alba, C. Blum, P. Asasi, C. Leon, and J. Gomez, Eds., *Optimization Techniques for Solving Complex Problems*. Wiley, 2009.
- [26] C. Bermudez, P. Graglia, N. Stark, C. Salto, and H. Alfonso, “Comparison of recombination operators in panmictic and cellular gas to solve a vehicle routing problem,” *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 2010.
- [27] G. F. Minetti, G. Luque, and E. Alba, “The problem aware local search algorithm: an efficient technique for permutation-based problems,” *Soft Comput.*, vol. 21, no. 18, pp. 5193–5206, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2515-9>
- [28] C. Bermúdez, C. Salto, and G. Minetti, *Communications in Computer and Information Science*, 2019, ch. Solving the Multi-Period Water Distribution Network Design Problem with a Hybrid Simulated Annealing, pp. 3–16.
- [29] C. Bermudez, H. Alfonso, G. Minetti, and C. Salto, “A parallel optimization solver for the multi-period wdnd problem,” *Springer, Cham*, vol. 12886, Sep. 2021.
- [30] J. Hernandez, C. Salto, G. Minetti, M. Carnero, and M. C. Sanchez, “Hybrid simulated annealing for optimal cost instrumentation in chemical plants,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 74, pp. 709–714, May 2019.
- [31] G. Minetti, J. Hernandez, M. Carnero, C. Salto, C. Bermúdez, and M. Sánchez, “Tuning a hybrid sa based algorithm applied to optimal sensor network design,” *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 20, p. e03, 05 2020.
- [32] J. Hernandez, C. Salto, G. Minetti, M. Carnero, and M. Sánchez, “Reliability estimation for sensor networks in chemical plants using monte carlo methods,” *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 48, pp. 439–444, 01 2020.
- [33] C. Salto, F. Morero, and C. Bermúdez, “Parallelism and hybridization in differential evolution to solve the flexible job shop scheduling problem,” *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 20, p. e04, 05 2020.
- [34] G. Minetti, G. Luque, and E. Alba, “The problem aware local search algorithm: an efficient technique for permutation-based problems,” *Soft Computing*, vol. 21, 09 2017.
- [35] G. Minetti, E. Alba, and G. Luque, “Seeding strategies and recombination operators for solving the dna fragment assembly problem,” *Inf. Process. Lett.*, vol. 108, no. 3, pp. 94–100, 2008.
- [36] G. Minetti and E. Alba, “Metaheuristic assemblers of dna strands: Noiseless and noisy cases,” 07 2010, pp. 1–8.
- [37] C. Salto, M. G. Leguizamón, and E. Alba, “Parallel aco algorithms for 2d strip packing,” 2010.
- [38] C. Salto, G. Minetti, E. Alba, and G. Luque, *Developing Genetic Algorithms Using Different MapReduce Frameworks: MPI vs. Hadoop: 18th Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence, CAEPIA 2018, Granada, Spain, October 23–26, 2018, Proceedings*, 01 2018, pp. 262–272.