



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis:

Maestría en Administración

Título:

Planificación y Gestión de Operaciones en  
Sistemas Logísticos de Distribución

por

Fabio Maximiliano Miguel

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2016





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis:

Maestría en Administración

Título:

Planificación y Gestión de Operaciones en  
Sistemas Logísticos de Distribución

por

Fabio Maximiliano Miguel

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2016



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR.**  
**SECRETARÍA DE POSGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA**

La presente tesis ha sido aprobada el ..... / ..... / ....., mereciendo la calificación de ..... ( ..... )

## PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Magíster en Administración (Resol. de Acreditación CONEAU B N° 119/06), de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Departamento de ..... durante el período comprendido entre el ...../...../..... y el ...../...../....., bajo la dirección del el Dr. Fernando A. Tohmé, Investigador Principal del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y Profesor Titular del Departamento de Economía de la Universidad Nacional del Sur; y de la dirección del Dr. Mariano Frutos, Jefe de Trabajos Prácticos del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur e Investigador Adjunto del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

...../...../.....

.....

Departamento de Administración  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

*Dedicado a María José mi mujer.*

*A Martín mi hermano y Ruben mi viejo.*

*Y a la memoria de mi mamá Bruna y de mis abuelos*

*Quinto y Miguel*

## AGRADECIMIENTOS

Una tesis no es un trabajo que se pueda atribuir exclusivamente a los esfuerzos de una sola persona. En este sentido, quiero agradecer a mis directores, el Dr. Mariano Frutos y el Dr. Fernando Tohmé, quienes incondicionalmente me han brindado su apoyo y me han compartido sus amplios conocimientos sin limitación alguna. Sus comentarios, sugerencias y motivación han sido fundamentales en esta etapa, al igual que su amistad y su calidad humana.

Quiero agradecer a María José compañera incondicional en mi vida por darme su amor, felicidad y paciencia ilimitados. Y a mi hermano y mi viejo los otros dos pilares de mi vida, por su comprensión y ayuda en todo momento.

De manera especial quiero agradecer al Mg. Santiago Maíz por brindarme su amistad, su confianza y su apoyo absoluto en la realización de este mi proyecto de vida. Sin su participación hubiera sido imposible la materialización de este esfuerzo. Gracias Santiago.

Agradezco también a mi familia consanguínea y a mi familia política por darme su ayuda, comprensión y paciencia sin pedir nunca nada a cambio.

También agradezco a la Universidad Nacional de Río Negro por brindarme la posibilidad de lograr esta meta de mi vida. A mis compañeros en esta casa de altos estudios por allanar el camino en muchos momentos difíciles.

De la misma manera extiendo mi reconocimiento a la Universidad Nacional del Sur, a sus profesores, a mis compañeros de posgrado y demás por haberme permitido vivir esta experiencia inolvidable.

## RESUMEN

Esta tesis se encuadra en el análisis de las tecnologías de la información como herramientas para aumentar la eficiencia de la toma de decisiones en sistemas logísticos, en el marco de la gestión de la cadena de suministros. Más específicamente se busca desarrollar y aplicar una herramienta de gestión que mejore la eficiencia de la programación de operaciones en la planificación operativa de la distribución física de mercaderías (*R&S: Routing and Scheduling*) en el ámbito del transporte automotor de cargas refrigeradas fronteras adentro.

En este sentido en este trabajo se definen las formulaciones más conocidas que se encuentran en la literatura de problemas de ruteo de vehículos en el contexto del servicio logístico objeto de la investigación, y se presenta un criterio para su clasificación de acuerdo a los aspectos principales que se desprenden de las investigaciones más relevantes. Luego se modela formalmente una variante del problema clásico de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y ventanas temporales (CVRPTW) en un entorno urbano de distribución. Para su resolución se desarrolla un procedimiento meta-heurístico evolutivo, específicamente un algoritmo genético dada su demostrada adaptación a este tipo de problemas. El procedimiento fue testeado sobre el conjunto de 56 problemas académicos de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y ventanas temporales de Solomon (1987) y se comparó su desempeño con los mejores resultados conocidos obtenidos por otros autores.

La experimentación se realiza sobre un caso de aplicación con información real de un operador logístico (*2PL second part logistic*) bonaerense especializado en el transporte y distribución de mercadería a carga fraccionada en entornos urbanos de distribución. La mercadería tiene restricciones en materia fitosanitaria y requerimientos especiales en el mantenimiento de temperatura y humedad, al tratarse de productos frescos en los que un quiebre o interrupción en la cadena de frío repercute en la calidad

del producto, alterando sus atributos organolépticos. La empresa abastece en un día de operatoria habitual, en promedio, unos doscientos clientes minoristas del Gran Buenos Aires.

Del testeo del optimizador desarrollado en las instancias académicas de Solomon se desprende que presenta un mejor desempeño en problemas con características similares a los problemas de distribución urbana. Aunque el desempeño del algoritmo en problemas con características más cercanas a los de distribución de media a larga distancia es bueno, es inferior a los resultados obtenidos por otros autores.

De los resultados obtenidos de la experimentación con información real se observa una notable calidad de las soluciones y una mejora en cuanto a eficiencia y productividad en comparación con la asignación realizada por la empresa en la instancia real.

## ABSTRACT

This work fits into the analysis of information technologies as tools to enhance efficiency in decision making in logistics systems, and falls within the framework of supply chain management. More specifically, the aim is to develop and apply a management tool that improves the efficiency of operation scheduling in the operational planning of the physical delivery of goods (R&S: Routing and scheduling) in the area of road transportation of refrigerated cargo within the country.

In this respect, this work defines the best-known formulations found in the literature on vehicle routing problems in the context of the logistics service being researched and a criterion for their classification according to the main aspects arising from the most relevant research is presented. Then, a variant of the classic capacitated vehicle routing problem with time windows (CVRPTW) in the delivery in an urban environment is formally modeled. To solve this problem, a meta-heuristic evolutionary procedure, specifically a genetic algorithm, is developed, since it has been shown that it is suitable for this type of problems. The procedure was tested in the set of 56 academic capacitated vehicle routing problems with time windows presented by Solomon (1987) and its performance was compared to the best known results obtained by other authors.

The experiment is carried out on a case of application with real information of a Buenos Aires province logistics service provider (2PL second part logistic) specialized in transportation and distribution of break bulk cargo in urban environments. The goods have constraints in phytosanitary terms and special requirements related to temperature and humidity settings, since they are fresh products whose quality, and, consequently, organoleptic properties, are affected by breaks or interruptions in the cold chain. In a regular working day, the company supplies, in average, around two hundred retail clients in Buenos Aires metropolitan area.

From Solomon's academic testing of this optimizer it follows that it shows a better performance in problems similar to problems in the delivery in urban environments. While the algorithm performance in problems with more similar characteristics to those in middle and long distance transport is good, it is less successful than the results obtained by other authors.

In the results obtained in the experiment with real data we can observe a remarkable quality in solutions and improvements as regards efficiency and productivity as compared to the assignment carried out by the company in real life.

## ÍNDICE GENERAL

PREFACIO.....	iii
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT .....	viii
ÍNDICE GENERAL.....	x
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1. Presentación .....	1
1.1. Tema de tesis .....	1
1.2. Problemática de la investigación: .....	1
1.2.1. Presentación .....	1
1.2.2. Problema de investigación.....	2
1.2.3. Motivación.....	3
1.3. Tipo y Alcance de la Investigación .....	4
1.3.1. Nivel y tipo de investigación .....	4
1.3.2. Objetivos definidos por su alcance .....	4
1.4. Metodología.....	5
1.5. Aporte esperado de la investigación.....	6
1.6. Estructura del trabajo .....	6
CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL.....	8
1. Gestión de la Cadena de Suministros (SCM) .....	9
1.1. Logística.....	11
1.2. Cadena de Suministro .....	14
1.3. Gestión de la Cadena de Suministro .....	17
1.3.1. Actividades Logísticas.....	20
2. Sistema de transporte y distribución.....	26
2.1. Subcontratación.....	30
2.2. Definición y clasificación de operadores logísticos .....	32
2.3. Servicios relacionados a los operadores logísticos .....	35

3. Sistemas de Información .....	37
3.1. Tecnologías de la información y la comunicación.....	37
3.1.1. Captura y la transferencia de información .....	38
3.1.2. Almacenamiento y recuperación de información.....	39
3.1.3. Identificación y entrega de información.....	40
3.2. Sistemas de información en SCM.....	41
3.2.1. Sistemas enfocados en procesos con interacciones corriente arriba.....	42
3.2.2. Sistemas enfocados en procesos enfocados en la cadena de suministro interna..	43
3.2.3. Sistemas enfocados en procesos con interacciones corriente abajo .....	46
CAPÍTULO III. PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS.....	51
1. Definición de problemas de ruteo de vehículos.....	53
1.1. Clasificación del VRP .....	55
1.2. Variantes del VRP .....	60
1.2.1. Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) .....	60
1.2.2. Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW).....	60
1.2.3. Open Vehicle Routing Problem (OVRP) .....	61
1.2.4. Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HFVRP) .....	61
1.2.5. Multi Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) .....	61
1.2.6. Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB) .....	61
1.2.7. Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP) .....	62
1.2.8. Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP) .....	62
1.2.9. Truck and Trailer Routing Problem (TTRP) .....	62
1.3. El problema de ruteo de vehículos capacitados con restricciones en el horario de servicio CVRPTW .....	64
CAPÍTULO IV. MODELADO.....	66
1. Descripción formal del modelo del VRPTW.....	66
1.1. Variables de decisión .....	67

1.2. Modelo matemático del VRPTW .....	68
2. Complejidad computacional .....	70
CAPÍTULO V. RESOLUCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....	73
1. Metodología de resolución.....	73
1.1. Introducción a la resolución del problema.....	73
1.1.1. Algoritmos Exactos.....	73
1.1.2. Algoritmos de Aproximación.....	74
1.2. Algoritmos Evolutivos (AE) .....	80
1.2.1. Fundamentos biológicos.....	80
1.2.2. Modelo general de un AE.....	83
1.2.3. Representación de los individuos de la población .....	85
1.2.4. Operadores Evolutivos.....	87
1.2.5. Descripción esquemática de un AE .....	89
1.2.6. Modelos evolutivos.....	92
2. Justificación de la metodología de resolución seleccionada .....	98
3. Optimizador desarrollado.....	101
3.1. Heurística de construcción de arcos viables temporalmente .....	101
3.2. Algoritmo Genético .....	102
3.2.1. Procedimiento de generación de la población inicial .....	102
3.2.2. Procedimiento de iteración generacional .....	103
3.2.3. Procedimiento de reproducción .....	104
3.2.4. Procedimiento de inserción .....	106
3.2.5. Procedimiento de la función de aptitud.....	108
3.3. Testeo de la Herramienta algorítmica.....	109
CAPÍTULO VI: CASO DE APLICACIÓN.....	115
1. Caracterización del Caso de Aplicación.....	115
1.1. Recopilación de información .....	115

1.2. Caracterización del nivel de la cadena de suministros donde se desarrolla la problemática .....	115
1.3. Caracterización del problema.....	117
2. Experiencia y Resultados.....	121
CONCLUSIONES Y APORTES DEL TRABAJO.....	126
ANEXOS .....	129
REFERENCIAS.....	142
BIBLIOGRAFÍA.....	161

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Empresa integrada a su cadena de suministro</i> .....	16
Figura 2: <i>Red de transporte y distribución de remesa directa</i> .....	28
Figura 3: <i>Red de transporte y distribución tradicional</i> .....	29
Figura 4: <i>Sistemas de Información en la SCM</i> .....	50
Figura 5: <i>VRP en la SCM</i> .....	52
Figura 6: <i>Esquema de una solución a un CVRP</i> .....	55
Figura 7: <i>Variantes de VRP</i> .....	63
Figura 8: <i>Esquema de una solución a un CVRPTW</i> .....	65
Figura 9: <i>Diagrama de flujo de un AE genérico</i> .....	84
Figura 10: <i>Representación de individuos</i> .....	90
Figura 11: <i>Representación binaria de un TSP</i> .....	90
Figura 12: <i>Operador de selección</i> .....	91
Figura 13: <i>Operador de cruce</i> .....	91
Figura 14: <i>Operador de mutación</i> .....	92
Figura 15: <i>Nivel de aptitud</i> .....	92
Figura 16: <i>Dispersión en problemas de Solomon (1987)</i> .....	110
Figura 17: <i>Desempeño y calidad de las soluciones</i> .....	113
Figura 18: <i>Niveles de Distribución</i> .....	116
Figura 19: <i>Distribución geográfica de los nodos</i> .....	122
Figura 20: <i>Solución</i> .....	125

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1. PRESENTACIÓN

El objetivo del presente capítulo es realizar una presentación de la problemática que motiva la tesis, las metas, propósitos y objetivos, la metodología que se usará, los aportes esperados de la investigación y la estructura del trabajo.

#### 1.1. Tema de tesis

Planificación y gestión de operaciones en sistemas logísticos de ruteo de vehículos (R&S: Routing & Scheduling) en redes de distribución, usando técnicas meta-heurísticas con aplicación al transporte automotor de cargas refrigeradas fronteras adentro (Expediente 2046/2014).

#### 1.2. Problemática de la investigación:

##### *1.2.1. Presentación*

En los últimos años, la globalización, la interdependencia económica entre países y la alta competencia internacional significaron cambios estructurales en las economías domésticas y en las estrategias empresariales en empresas transnacionales, que buscando saltar barreras proteccionistas fragmentaron su cadena de valor ubicando distintos eslabones en países diferentes. Consecuentemente, la alternativa de capital más líquido posible, modificó la dinámica inversora orientando los esfuerzos a la disminución de stocks y la transición hacia modelos de gestión más eficientes en el marco de la gestión de la cadena de suministros (SCM, por sus siglas en inglés). Esto requirió una reconversión tecnológica y una tendencia hacia la tercerización de servi-

cios logísticos, potenciando el crecimiento del sector de proveedores especializados en estos servicios<sup>1</sup> volviéndolo más exigente y competitivo.

En este contexto, el aumento del número de partes involucradas en los procesos logísticos de transporte y distribución, en la complejidad de estos procesos y en los estándares de calidad de servicio y eficiencia económica que deben alcanzar para ser competitivos, implican la necesidad de sistemas de información que provean herramientas más eficientes para la toma de decisiones, en un ambiente con cada vez mayores niveles de coordinación e integración entre los distintos niveles de la cadena.

### 1.2.2. *Problema de investigación*

En un ambiente de negocios donde las decisiones a tomar son cada vez más complejas, la implementación de nuevas tecnologías de información en la gestión de sistemas logísticos, aparece como un factor de desarrollo de ventajas competitivas dinámicas en el gerenciamiento de servicios logísticos. Complejidad que deriva en requerimientos de procesamiento y de análisis de flujos de datos masivos y en tiempo real, imprescindibles para la coordinación y el control de los flujos de mercaderías e información con clientes y proveedores.

De la problemática que enfrentan los servicios logísticos más habituales en el marco de la SCM. Despierta nuestro interés la resolución del problema de planificación y la gestión de operaciones en sistemas de transporte y distribución, en entornos urbanos, de mercadería altamente perecedera. El cual, responde a una variante del problema de optimización combinatoria conocido formalmente como *Problema de Ruteo de Vehículos Capacitados con Ventanas Temporales de Servicio (Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows, CVRPTW)*.

---

<sup>1</sup> Operadores logísticos: Ofrecen una serie de servicios conexos al transporte en donde el desplazamiento en sí de las mercaderías es una parte de toda la operatoria.

Este problema se clasifica dentro de los denominados *problemas de optimización combinatoria NP-hard*. Es decir, difíciles de resolver de forma óptima, incluso en instancias pequeñas con un esfuerzo computacional razonable, dada la explosión exponencial en el tamaño de los espacios de soluciones sólo con pequeños aumentos en el tamaño o cambios de las características del problema. En estos casos, los algoritmos exactos sólo permiten resolver problemas relativamente pequeños, por lo que en este trabajo se busca su resolución mediante el desarrollo y la aplicación de un procedimiento algorítmico basado en simulaciones de procesos que ocurren en la naturaleza, como es el caso de las meta-heurísticas evolutivas, que han permitido afrontar de una forma robusta y eficiente este tipo de problemas de decisión en otros contextos.

La herramienta algorítmica desarrollada en el presente trabajo es fácilmente adaptable como módulo de soporte para la toma de decisiones, que use información en tiempo real de la base de datos del *Enterprise Resource Planning* (ERP), o de otros sistemas de información como el *Order Management System* (OMS), el *Warehouse Management System* (WMS) o el *Transportation Management System* (TMS).

### 1.2.3. Motivación

La motivación para el estudio y resolución de este problema, surge de la gran variedad y complejidad de problemas de decisión implícitos en la operatoria diaria de estos tipos de servicios logísticos, y que condicionan la efectividad en el logro de objetivos tanto tácticos como estratégicos de los operadores logísticos y del resto de los actores de la cadena de suministros. En este sentido, el éxito depende críticamente de la programación óptima de las operaciones, donde el espectro de soluciones posibles es muy grande y crece exponencialmente con el número y las características de la dispersión geográfica de los destinos, con el tamaño de la flota, con las restricciones a cumplimentar en materia de capacidad de los vehículos (peso, volumen, etc.) en

entornos urbanos de distribución, y con restricciones en cuanto a ventanas temporales para la prestación efectiva del servicio.

### 1.3. Tipo y Alcance de la Investigación

#### 1.3.1. Nivel y tipo de investigación

La investigación desarrollada en este trabajo, es de tipo aplicada y a nivel explicativo, dado que los resultados obtenidos utilizando métodos analíticos, pretenden aplicarse y/o utilizarse en forma inmediata para resolver la situación problemática expuesta.

#### 1.3.2. Objetivos definidos por su alcance

##### 1.3.2.1 Objetivo General

Abordar, en el marco de las tecnologías de la información aplicadas a la SCM, el desarrollo y aplicación de una herramienta de gestión que mejore la eficiencia de la programación de operaciones en la planificación operativa de la distribución física de mercaderías (*R&S: Routing and Scheduling*), aplicado en el ámbito del transporte automotor de cargas refrigeradas fronteras adentro.

##### 1.3.2.2 Objetivos específicos

- *Primero:* realizar una revisión del marco teórico conceptual en materia de gestión de sistemas de transporte y distribución y de sistemas de información desde el enfoque de la SCM.
- *Segundo:* Definir formalmente el problema de ruteo de vehículos en el contexto del servicio logístico objeto de la investigación.
- *Tercero:* Modelar el sistema de distribución bajo la estructura del problema de ruteo definido.

- *Cuarto*: Resolución del problema mediante el diseño, desarrollo e implementación de una meta-heurística que emule la realidad del problema y construya soluciones factibles y de buena calidad.
- *Quinto*: Prueba de las soluciones mediante información real del proceso en un caso de aplicación específico.
- *Sexto*: Evaluación de las soluciones generadas.

#### 1.4. Metodología

- Se recopilará información, respecto del sector del transporte automotor de cargas relevante en el ámbito del servicio logístico objeto de la investigación y respecto del caso de aplicación.
- Se considera la abundante literatura en materia de optimización de procesos y su análisis matemático mediante simulaciones.
- Se tomarán descripciones de profesionales y operarios respecto de los procesos de distribución de mercaderías considerados y se procederá a su modelado matemático.
- Se tomarán controles necesarios para la validación del modelo y verificar que su comportamiento refleje todos los supuestos y consideraciones del fenómeno real.
- Se realizará la experimentación mediante ensayos numéricos en herramientas de software, para validar el funcionamiento de la herramienta algorítmica propuesta para resolver el problema. De esta manera se intenta demostrar que el algoritmo evolutivo planteado, es efectivo para abordar la problemática objeto de estudio.
- Se realizará la implementación usando datos de un caso de aplicación real, para observar el desempeño y aplicabilidad del optimizador desarrollado.

### 1.5. Aporte esperado de la investigación

De una manera general, la presente investigación busca dar un tratamiento formal a una variante de una familia de problemas organizacionales, que se presentan en el contexto de los servicios logísticos de distribución mediante el transporte automotor de carga. Buscando mejoras reales en la competitividad sectorial, mediante el desarrollo de una herramienta algorítmica que permita una mayor eficiencia en la toma de decisiones en el contexto de la distribución urbana de mercaderías altamente perecederas. De esta manera la investigación presenta un importante impacto socio-económico y productivo, dado que la herramienta algorítmica desarrollada es fácilmente adaptable como módulo de soporte para la toma de decisiones que use información en tiempo real de otros sistemas de información.

### 1.6. Estructura del trabajo

En el presente capítulo se realiza la introducción al trabajo presentando la temática, el problema objeto de estudio y los aspectos metodológicos. En el próximo capítulo, se realizará una revisión del marco teórico conceptual en materia de gestión de sistemas de transporte y distribución, y de sistemas de información, desde el enfoque de la SCM. Presentándose diferentes aspectos relevantes de los sistemas de información y su importancia en relación a la problemática objeto de estudio.

En el capítulo III, se presentará la relación entre los subsistemas de transporte y distribución, y los problemas de ruteo y programación de vehículos en el marco de la SCM. Se realizará una revisión de las formulaciones más conocidas que se encuentran en la literatura de problemas de ruteo de vehículos y se presentará un criterio para su clasificación con el objeto de facilitar la caracterización y el modelado del problema específico bajo estudio.

En el capítulo IV se modelará formalmente la variante del problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad sometidos a restricciones temporales de servicio en un entorno urbano de distribución.

En el capítulo V, se presenta la metodología de resolución y su implementación. Primero se realiza una revisión de los métodos de resolución propuestos en la literatura, luego se profundiza en el marco teórico conceptual de los algoritmos evolutivos, y posteriormente se presenta detalladamente la herramienta algorítmica desarrollada e implementada en Matlab® para la resolución del problema modelado. Finalmente, se presentan los resultados del testeo del optimizador desarrollado en una serie de problemas académicos, comparando su desempeño con el obtenido por algoritmos presentados por otros autores.

En el capítulo VI, primero se realiza la caracterización del caso de aplicación con información real de un operador logístico que enfrenta este tipo de problemática en la prestación de sus servicios. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos de la implementación del modelo y del algoritmo desarrollado en el caso de aplicación con información real de la empresa.

Finalmente, se presentan las conclusiones y los aportes del trabajo.

## CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL

La importancia y complejidad del sistema de programación y ruteo de vehículos (R&S: Routing and Scheduling) en la planificación y gestión de sistemas de transporte y distribución urbana de mercaderías, justifica la utilización de herramientas de ayuda para la toma de decisiones, como modelos matemáticos que faciliten y/o agilicen la ejecución de dicho proceso. Es imprescindible, para un desarrollo adecuado de modelos matemáticos como herramientas de ayuda a la toma de decisiones, conocer previamente las actividades que integran dicho proceso. Además de conocer el proceso en general y sus actividades decisionales en particular, es fundamental identificar la información que se utilizará y los recursos implicados.

En este sentido, según Giannoccaro y Pontrandolfo, *“un modelo conceptual es una herramienta descriptiva que destaca los aspectos y variables relevantes de un problema específico, y/o una estructura empírica que propone guías para tratar con los problemas de un dominio de modelado”* [1]. Aunque el término “modelo conceptual” no proceda de un contexto de modelado matemático, supone una aproximación válida para deducir su significado en dicho contexto. Por consiguiente, se podría definir un modelo conceptual como un modelo que describe y relaciona los conceptos y aspectos generales de un tema, con el objetivo de facilitar su entendimiento y permitir la representación de una realidad específica que se desea estudiar [2].

En el presente trabajo se utiliza el enfoque de la Gestión de la Cadena de Suministro (SCM por sus siglas en inglés), como modelo conceptual de referencia. Ya que reúne, estructura y facilita el entendimiento de los distintos aspectos, que el modelador debe considerar a la hora de construir el modelo matemático de ayuda a la toma de decisiones; en el proceso de ruteo de vehículos, en el marco de la planificación y gestión de sistemas de transporte y distribución.

## 1. GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTROS (SCM)

El objetivo de esta sección es realizar una revisión del marco teórico conceptual en materia de sistemas logísticos desde el enfoque de la SCM, concentrándonos en la importancia de las actividades relacionadas con la gestión de la distribución física de mercaderías y la gestión de la información.

En las últimas décadas hemos vivido un acelerado cambio tecnológico liderado por las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC's) que ha modificado el mundo moderno. Este cambio tecnológico ha generado un significativo aumento de la velocidad de transferencia, de la facilidad de acceso y de la exactitud de la información. El permanente aumento de la conectividad inter-organizacional ha permitido generar procesos y operaciones que hace algunos años eran impensables en cuanto a la integración de la cadena de suministros y a la veracidad, calidad y disponibilidad de la información.

Paralelamente, las prácticas empresariales han evolucionado hacia un nuevo orden de relaciones caracterizado por la cooperación entre empresas que persiguen un objetivo estratégico común, obtener una ventaja competitiva valiosa y difícil de imitar por parte de los competidores. Este esfuerzo cooperativo, surge por la necesidad práctica de adaptarse a los cambios tecnológicos que se daban en el entorno empresarial. En este sentido, la práctica tradicional de canales de distribución fragmentados y con elevados inventarios intermedios, dejó de ser suficiente para sostener una ventaja competitiva si las empresas relacionadas no estaban alineadas con un objetivo estratégico común [3] [4].

La estrategia de desempeñar una función específica del proceso de distribución, de forma independiente en busca de objetivos estratégicos individuales, se volvió rápidamente obsoleta en las últimas décadas del siglo XX. Cuando la tecnología permitió una mayor disponibilidad de información de buena calidad, e introdujo cambios pro-

fundos en procesos de transformación enfocados en los clientes, requiriendo mayor precisión, flexibilidad y menores tiempos de abastecimiento y distribución para ser competitivos. Esto también fue el reflejo de los importantes cambios que se dieron paralelamente en los mercados, con clientes que exigían un mayor nivel de servicio y una mayor variedad de productos que satisfacen las mismas necesidades.

Esta obsolescencia de la estructura tradicional de los canales de distribución, frente a esta nueva dinámica empresarial y de los mercados, hizo indispensable la colaboración y la coordinación entre las empresas para mantener su competitividad, buscando nuevas formas de mejorar las estructuras de los procesos de abastecimiento y distribución, aumentando su desempeño y reduciendo sus costos [3].

En éste contexto, fue evolucionando en consecuencia el cuerpo teórico de las ciencias de la administración, dando lugar poco a poco al enfoque de la SCM, como resultado de la praxis empresarial y de la evolución de la disciplina logística, además del aporte de otras ciencias tanto exactas como humanas [5].

Antes de profundizar en los conceptos que conformarán la base de nuestro marco teórico, es necesario realizar a modo introductorio, una primera diferenciación entre el concepto de SCM y el de logística. Dado que aunque están relacionados, no tienen el mismo significado.

Bowersox, Closs & Cooper (2007) afirman que: *“La administración de la cadena de suministro consiste en la colaboración entre las empresas que persiguen un posicionamiento estratégico común y pretenden mejorar su eficiencia operativa. Refleja (...) una estrategia (...) basada en una dependencia y una colaboración reconocidas. Y genera valor a partir de la sinergia entre las empresas que participa de esta relación cooperativa”*. (...) *“En contraste (...) la logística es el trabajo requerido para mover y colocar el inventario por toda la cadena de suministro. (...) crea valor por la oportu-*

*nidad y el posicionamiento del inventario. Como tal, la logística es un subconjunto de una cadena de suministro” [3].*

En otras palabras, la logística es el subsistema de la SCM que canaliza los flujos físicos (materias primas, insumos, productos en proceso y productos terminados, incluyendo también a los servicios) y los flujos de información desde los proveedores a clientes y viceversa.

### 1.1. Logística

La logística como parte de las ciencias económicas es relativamente nueva y ha tenido un rápido desarrollo. Muchas de las cuestiones relacionadas con su marco conceptual y su terminología están en constante perfeccionamiento, cambio y en la construcción de nuevos contenidos. Los cambios del mercado son tan intensos que la teoría logística (en particular, el marco conceptual) simplemente no puede seguir el ritmo de la praxis empresarial, sobre todo en los campos de aplicación de las tecnologías y sistemas de información.

Esto se ve reflejado en la evolución histórica del concepto mismo de logística, como puede verse en las contribuciones hechas por autores destacados en esta materia como [7], [8], [9], [10], [11]. A continuación se sigue la exposición realizada por David Servera-Francés (2010), quien en su trabajo [12] realiza un análisis histórico muy completo de la evolución de este concepto:

A partir de la segunda guerra mundial, aumenta el interés por parte del sector empresarial en gestionar de forma eficiente los flujos de materiales, aunque aún con independencia entre los flujos de aprovisionamiento, internos y de distribución [11]. Es decir, como actividades logísticas gestionadas de forma aislada, por departamentos funcionales distintos. Además, hasta mediados de la década del sesenta, el término logística se asocia solo a las actividades de distribución física, especialmente al transporte y almacenamiento de productos [12].

En los años sesenta, se observan esfuerzos desde el ambiente académico, por el estudio de la función logística. Las primeras revistas científicas especializadas en esta área se publican en 1961 y 1964 (Transportation Journal y Logistics and Transportation Review). Y en 1963 se funda la primera institución dedicada al estudio, desarrollo y difusión de la función logística el Consejo Nacional de Gestión de la Distribución Física (NCPDM, *National Council of Physical Distribution Management*) [12].

Desde mediados de la década del sesenta se fue ampliando el ámbito de aplicación de la gestión logística, hacia el concepto de “logística integral”. Es decir, como actividades logísticas gestionadas conjuntamente, desde el aprovisionamiento hasta el cliente final [13], [14], [10], [15] y [16]. La aplicación del concepto de “costo total”, permitió identificar las interacciones entre los costos de las diferentes facetas o ciclos logísticos (logística de aprovisionamiento, interna y de distribución), cuya optimización de forma separada llevaba a soluciones subóptimas [17], [12].

A partir de la década del setenta surge la orientación o enfoque hacia el cliente y sus necesidades, reforzando el concepto de logística integral, basada en la integración y coordinación de las funciones internas de la empresa. La función logística, como actividad fundamental en la satisfacción del cliente y como determinante del servicio al cliente [10], [12].

En 1985 cambia su nombre el Consejo Nacional de Gestión de la Distribución Física fundado en 1963, a Consejo de Gestión Logística (CLM, *Council of Logistics Management*), a modo de reconocimiento de la mayor amplitud del término logística respecto del de distribución [12].

Hacia fines de la década del ochenta, se comienza a considerar a la logística como un elemento estratégico para la diferenciación de la empresa [18], [17], [10], [19], [16] y [11]. Principalmente por su relevancia en la implantación de los modernos sistemas

de gestión empresarial, como producción flexible, Just in Time, o sistemas de calidad [20]. Se convierte así en una variable estratégica, que como tal, debe estar en armonía con la estrategia competitiva adoptada por la empresa [21], lo que llevó en muchos casos al rediseño de las estructuras operativas y organizacionales de las empresas [22].

A partir de 1995 la logística deja de ser estratégica solo para diferenciar a la empresa de la competencia, y se sitúa como función generadora de valor para el cliente, aumentando su satisfacción y lealtad [16]. Se entiende que el valor logístico que se materializa, ofreciendo un servicio logístico acorde con los requerimientos del cliente [23].

En el año 2005, la función logística se encuentra claramente integrada con todo el canal de suministro, con el objetivo de aumentar el valor ofrecido al cliente final. Esta concepción de la función logística, se basa en el enfoque de la gestión de la cadena de suministro (SCM, *Supply Chain Management*), en el que se considera la planificación y gestión de todas las actividades necesarias para poner el producto a disposición del cliente, de forma integrada y coordinada entre todas las empresas de la cadena de suministro (proveedores, fabricantes, distribuidores, operadores logísticos y clientes) [12].

El reconocimiento de esta ampliación del ámbito de aplicación de la función logística, llevó en el año 2005 a que el Consejo de Gestión Logística, cambiara su nombre a Consejo de Profesionales de Gestión de la Cadena de Suministro (CSCMP, *Council of Supply Chain Management Professionals*).

La logística ha ido evolucionando junto a las ideas expuestas anteriormente. Actualmente, la definición más aceptada de la función logística, es la dada por el CSCMP en 2008: *“La función logística es la parte de la gestión de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla la gestión eficiente y efectiva del*

*flujo directo e inverso y el almacenamiento de bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el de consumo en función de los requisitos del cliente”.*

En esta definición se encuentra explícitamente a la función logística, como parte de la gestión de la cadena de suministro. Es decir, la SCM como ámbito de aplicación de la función logística.

Antes de continuar con el desarrollo de SCM, es importante definir claramente qué se entiende por cadena de suministro en el presente trabajo.

## 1.2. Cadena de Suministro

El término cadena de suministro hace referencia a una imagen de la manera en que se vinculan las organizaciones [27], como un conjunto de entidades y relaciones que determinan los flujos de materiales, de información y financieros, tanto de modo descendente hacia el cliente, como ascendente hacia los proveedores [28].

Esto no es más que una abstracción con fines metodológicos, dado que una empresa puede participar en más de una cadena de suministro generándose redes muy complejas de analizar. Esta simplificación permite aislar y poder analizar cada rama (componentes y relaciones) de la red, como una cadena de suministro individual [5]. Por esta razón, no existe un consenso absoluto en cuanto a la definición del concepto de cadena de suministro, dado que depende de los aspectos de la complejidad de la red en los que estemos enfocándonos.

Ballou (2004) define una cadena de suministro como: “todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes, desde la etapa de materia prima (extracción) hasta el usuario final, así como los flujos de información relacionados. Los materiales y la información fluyen en sentido ascendente y descendente en la cadena de suministros” [4].

Ballou hace hincapié en el conjunto de actividades logísticas (transporte, gestión de inventarios, procesamiento de pedidos, etc.) que se realizan repetidas veces a lo largo de la cadena antes de que un producto llegue al cliente final, mediante las cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor para el consumidor [4]. El concepto incluye también actividades de otros procesos no logísticos, como la fijación de precios o las políticas de pago a proveedores y de cobranza. Abarcando también la logística inversa, es decir, cubriendo desde la fuente de materias primas hasta el consumidor del producto final y su posible devolución, reciclado y reutilización [5].

Desde el enfoque de sistemas, una cadena de suministros se describiría como un sistema complejo, con fronteras difusas, en el que no son los componentes (organizaciones) por separado los que determinan el desempeño, sino las relaciones existentes entre ellos [5]. De esta manera, la generación de valor estaría dada a partir de la sinergia, entre los componentes del sistema, con respecto a los flujos de información, de producto, de servicios, financieros y de conocimiento [3].

Podemos agrupar estos flujos de la siguiente manera. El *flujo físico* (o de productos y servicios), esto es, el abastecimiento, fabricación y distribución de materias primas, componentes y productos terminados desde proveedores a empresas intermediarias y hasta entregar el producto terminado al cliente final y desde éste hasta el punto de origen. Incluyendo también el flujo de servicios. El *flujo de información* (o de información y conocimiento) posibilitado por el uso de las tecnologías de información y comunicaciones. Y el *flujo financiero*, que incluye por ejemplo transacciones de cobros y pagos que hacen posible la viabilidad del negocio conjunto [5].

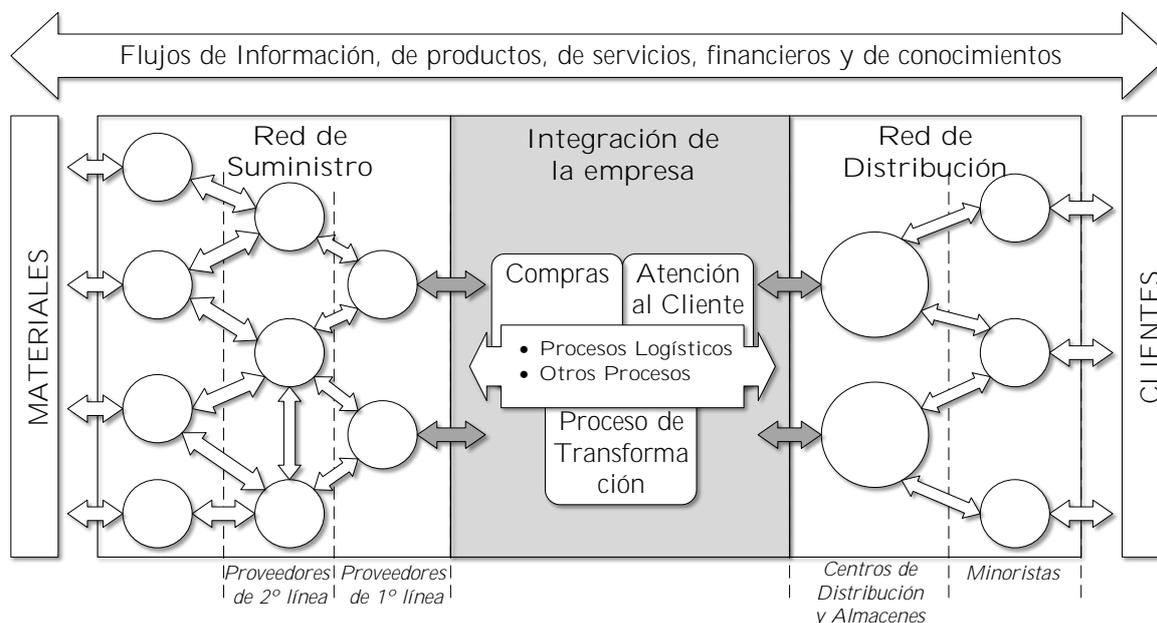
Desde la perspectiva de una empresa como integrante de una cadena de suministro, el control gerencial llega hasta su red de suministro inmediato y a la red de distribu-

ción inmediata [4]. Es decir, en general una empresa individual no controla toda una cadena de suministro.

Pero la sinergia de los procesos a lo largo de la cadena de suministro, puede extenderse más allá de estas relaciones inmediatas a la empresa. Esto es posible, mediante la interrelación entre sus procesos de negocio, con los de organizaciones de eslabones más alejados. Entre estos procesos, el logístico es el conducto principal del flujo físico y de información a través de la cadena de suministros.

A continuación, se representan estas ideas en un diagrama desde la perspectiva de una empresa integrada a la cadena de suministro (sistema). Los elementos del sistema, son las empresas participantes de la cadena y las relaciones están dadas por los flujos descritos anteriormente [3].

Figura 1: Empresa integrada a su cadena de suministro



Fuente: adaptado de Bowersox, Closs & Cooper (2007)

En la Figura 1 se representa la integración de una empresa al sistema de procesos de creación de valor dado por la cadena de suministro. Que inicia con la adquisición de materiales y continúa hasta la entrega del producto o servicio al usuario final. Reflejando la posición central que ocupa el proceso logístico, tanto en la integración inter-

na de procesos, como en la integración e interrelación con el resto de la cadena de suministro. Este proceso es el eje integrador en el que fluyen los productos, los servicios y la información, desde los proveedores a los clientes y viceversa. Agregando valor de tiempo y lugar, es decir, haciendo posible que el producto adecuado llegue al lugar adecuado, en el tiempo adecuado, en las condiciones adecuadas y al costo adecuado [5].

De esta manera se presenta al proceso logístico como una serie de actividades integradas dentro de una empresa e interrelacionadas a través de las organizaciones de una cadena de suministro. La interrelación entre los procesos y la generación de valor a partir de la sinergia, es la base de la SCM.

### 1.3. Gestión de la Cadena de Suministro

Al igual que la definición de logística, la de gestión de cadena de suministro (SCM por sus siglas en inglés) también ha ido evolucionando con el paso de los años. Y después de más de una década de investigación en esta materia, se encuentran varias definiciones de este concepto. Muchas complementarias entre sí y que destacan diferentes aspectos según el contexto de aplicación. A continuación se presentan dos de las más amplias y aceptadas.

En el año 2001, después de una cuidadosa revisión de las definiciones existentes hasta la fecha, Mentzer y otros (citado por [4]) propusieron la siguiente definición de cadena de suministro:

*“La administración de la cadena de suministros se define como la coordinación sistemática y estratégica de las funciones tradicionales del negocio y de las tácticas a través de estas funciones empresariales dentro de una compañía en particular, y a través de las empresas que participan en la cadena de suministros con el fin de mejorar el desempeño a largo plazo de las empresas individuales y de la cadena de suministros como un todo” [34].*

Actualmente el Consejo de Profesionales de Gestión de la Cadena de Suministro (CSCMP) presenta la siguiente definición de gestión de la cadena de suministros.

*“La gestión de la cadena de suministro, abarca la planificación y gestión de todas las actividades involucradas en compras y abastecimiento, transformación y todas las actividades de gestión logística. De manera muy importante, también incluye la coordinación y colaboración con los socios del canal, que pueden ser proveedores, intermediarios, operadores logísticos y clientes. En esencia, la gestión de la cadena de suministro integra la gestión del abastecimiento y la demanda dentro y a través de las empresas”* [35].

Como se desprende de estas definiciones y de las de la subsección anterior, el concepto de gestión de la cadena de suministros es más amplio que el de logística, al cruzar las fronteras organizacionales mediante la coordinación de procesos internos entre diferentes organizaciones con el objetivo de generar valor para el cliente final. Mientras que el concepto de logística estaba más acotado a las actividades sobre las que la gerencia de una empresa individual ejercía control directo.

Siguiendo a Chavez y Torrez-Rabello [5], se destacarán algunos aspectos importantes del concepto de gestión de la cadena de suministro, con el objeto de esclarecer los alcances de este concepto.

En primer lugar los autores destacan la *interrelación* entre procesos clave de negocio, entre los diferentes eslabones de una cadena. Es decir, en la SCM el énfasis está en la agregación de valor para el cliente final mediante la sinergia generada por dicha *interrelación*. Pero esta sinergia no surge de la sola yuxtaposición de los flujos que integran la cadena de suministro (físico, información y financiero), sino de la gestión apropiada de ellos para dotarlos de sincronización y simultaneidad [5].

Es importante destacar, que la *interrelación* entre procesos de integrantes de la cadena puede asumir distintos grados. Yendo desde una elevada integración tecnológica

hasta algún grado de colaboración en tareas específicas. Por lo tanto, el concepto de SCM no está restringido a la forma o el grado que debe asumir esta interrelación. De hecho en los llamados modelos de maduración [36], se caracterizan una serie de etapas por las que puede ir pasando la gestión de una cadena de suministro, desde un estado inmaduro a uno de mayor madurez. En este sentido, inicialmente puede asumir la forma de una colaboración limitada, para ir evolucionando hacia una integración más completa. Aunque, en los últimos años, ha crecido el consenso en la literatura de que a mayor grado de integración, la empresa obtiene una mayor ventaja competitiva y con ella unos mejores resultados [37], [38] y [39].

No obstante, la planificación de los procesos de negocio, se puede analizar desde los tres horizontes tradicionales de planeación. Planificación estratégica, que implica decisiones de selección de procesos y adquisición de recursos a largo plazo. Planificación táctica, que implica decisiones de asignación de recursos a mediano plazo. Y el de planificación operativa, que implica decisiones con un horizonte de planeación de corto plazo. En este sentido, Pineda y López (2013) afirman que a nivel operativo, las estrategias de integración en la SCM se clasifican en coordinación cliente-proveedor, coordinación producción-distribución y coordinación distribución-inventarios. Además, entre estas, destacan como estrategias de gestión de la distribución (a nivel operativo), la coordinación de la planeación de los requerimientos de distribución entre compañías, los sistemas multiloteo (multi-pick), los de multientregas (Multi-drop) y esquemas de gestión de transporte colaborativo [40]. Dadas las características del objeto de estudio del presente trabajo, se dará mayor profundidad a los aspectos relacionados con este último horizonte de planeación.

Otro aspecto importante para delimitar el concepto de gestión de la cadena de suministro, es la identificación del cliente. El cliente de una empresa en particular, es en general otra empresa, para la cual su producto o servicio es un insumo en su proceso de transformación. Pero en el enfoque de la SCM, el verdadero cliente es el cliente

final de la cadena, y es en el que la empresa debe enfocar su proceso de generación de valor. El cliente final es el que valora las características del producto de la cadena, por lo que los integrantes de la cadena deben enfocar sus procesos de transformación en ese cliente final [5].

Asimismo, como se comentó anteriormente, las ventajas competitivas para las empresas involucradas se derivan de que la cadena como un todo, sea más eficiente que otra cadena. Y esto se logra mediante una expansión de la estrategia de operaciones hacia una estrategia con una visión sistémica de la cadena y enfocada hacia la cadena de suministro, por parte de todos los socios de la cadena. Si los socios de una cadena de suministro están trabajando descoordinadamente con estrategias no alineadas, no serán competitivos contra otras cadenas de suministro que hayan logrado un alto grado de cooperación y de consistencia [28]. Es decir, el que una organización posea una orientación estratégica hacia la cadena de suministro como un sistema, no significa que pueda materializarla. Su implementación requiere que las compañías que pertenecen a una cadena posean, cada una por sí misma, dicha orientación o enfoque [5].

En resumen, la gestión de la cadena de suministros se ocupa de la operación, integración y administración de las actividades logísticas implícitas en los procesos de negocio, buscando de manera concreta unificar los recursos y sincronizar los flujos de productos, servicios e información y de las actividades emergentes de las relaciones comerciales, para aumentar el nivel de servicio al cliente y reducir los costos logísticos mediante el desarrollo de soluciones innovadoras.

### *1.3.1. Actividades Logísticas*

Hasta aquí se ha colocado el proceso logístico y sus actividades en el centro de la gestión de la cadena de suministro, como eje del flujo físico (bienes y servicios) y de in-

formación (información y conocimiento), pero no se han especificado detalladamente las actividades que lo conforman.

En este punto es importante destacar que las actividades que conforman el proceso logístico de una empresa individual, varían respecto de las de otra, dependiendo de las características del proceso de transformación de valor de la empresa considerada, y de su función en la cadena de suministro; incluso también de una cadena de suministro a otra. No obstante, a continuación se presenta un cuadro con un listado de actividades logísticas agrupadas en once temas, sacado del trabajo de revisión bibliográfica de los estudios elaborados por los principales académicos en esta materia, realizado por David Servera-Francés (2010) [12]. En el cuadro se presenta el conjunto de actividades logísticas y el listado de autores que ha señalado cada actividad como componente de este proceso.

Tabla 1: Actividades Logísticas

Actividades	Autores
<i>1. Servicio al cliente:</i>	
- Determinación de las necesidades y deseos del usuario con relación al servicio logístico.	1; 2; 3; 4; 5; 11; 13; 15; 17; 19; 20; 21; 22; 23; 25; 26; 30
- Establecimiento de los niveles de servicio al cliente.	1; 2; 3; 4; 7; 11; 13; 12; 17; 21; 22; 25; 26; 29; 30
- Servicio posventa.	2; 11; 15; 21
<i>2. Transporte:</i>	
- Selección del modo y medio de transporte.	1; 3; 4; 7; 5; 9; 11; 17; 18; 19; 8; 24; 25
- Consolidación de cargas.	1; 3; 7; 13; 17; 18; 24
- Establecimiento de rutas de transporte.	1; 3; 11; 18; 19
- Distribución y planificación de los vehículos de transporte.	1; 7; 11; 14; 15; 17; 18; 19; 25
- Tarifación del transporte.	19
<i>3. Gestión de inventarios:</i>	
- Gestión de stocks tanto de materias primas como de producto final.	1; 3; 4; 7; 5; 8; 11; 13; 14; 15; 17; 18; 19; 24

*CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL*

- Proyección de las ventas a corto plazo/ Previsiones de ventas.	1; 2; 3; 7; 11; 22
- Relación de productos en los almacenes.	1; 3; 4
- Número, tamaño y localización de los puntos de almacenamiento.	7; 1; 5; 11; 19; 25
- Estrategias de recepción y envío de productos del almacén.	1; 4; 5; 17; 24
<i>4. Procesamiento de pedidos:</i>	
- Procedimiento de interacción entre la gestión de pedidos y la de inventarios.	1; 4; 9; 11; 14; 21
- Métodos de transmisión de información sobre los pedidos.	1; 4; 7; 11; 17; 21
- Reglas para la confección de los pedidos.	1; 4; 11; 17
<i>5. Almacenamiento:</i>	
- Determinación del espacio de almacenamiento.	1; 7; 19; 25
- Diseño del almacén y de los muelles de carga y descarga.	1; 4; 9; 11; 17; 19
- Configuración del almacén.	1; 7; 4; 5; 19; 25
- Ubicación de los productos en el almacén.	1; 14; 17; 19; 24; 25
- Gestión de operaciones de los almacenes.	4; 11; 13; 14; 18; 19; 25
<i>6. Manejo de mercaderías:</i>	
- Selección y compra del equipo de mantenimiento.	1; 4; 19
- Procedimientos de preparación de pedidos.	1; 3; 5; 11; 17
- Almacenamiento y recuperación de mercancías.	1; 3; 24; 25
- Planificación del flujo de materias primas, productos en curso y productos terminados.	11; 19; 24
<i>7. Compras:</i>	
- Selección de las fuentes de suministro.	1; 3; 4; 5; 14; 19
- Cálculo de las cantidades por comprar.	1; 4; 7; 14
- Selección de los momentos de compra.	1; 4; 7; 14
<i>8. Planificación del producto, mediante la cooperación con el departamento de producción:</i>	
- Especificando las cantidades de los componentes.	1; 3
- Estableciendo la secuencia y el ciclo de producción.	1; 9; 14
- Controles de calidad previos.	3; 4
<i>9. Gestión de información:</i>	

- Recolección, almacenamiento, manipulación y transmisión de información.	1; 2; 3; 4; 7; 5; 8; 11; 17; 18; 20; 21; 22; 24; 26; 27; 28
- Análisis de datos.	1; 4; 21; 28
- Procedimientos de control.	1; 4; 19; 21
- Integración interna y externa de la información.	2;12; 18; 23; 27; 30
<i>10. Logística inversa:</i>	
- Gestión de devoluciones y retornos de productos y envases.	10; 4; 6; 16; 8; 24; 25
- Gestión medioambiental.	10; 6; 16; 8; 24
<i>11. Otras actividades:</i>	
- Coordinación con otros departamentos de la empresa (producción, marketing, compras...).	2; 7; 19; 20; 23; 25; 29; 30
- Envasado y empaquetado.	1; 4; 9; 17; 19
- Consecuencia para la logística de la introducción de nuevos productos.	4; 11
- Previsión y control de costes logísticos.	7; 5; 19
- Gestión de seguros de la mercancía.	17
- Coordinación con otros miembros del canal.	2; 13; 12; 20; 23; 25; 29; 30
1. Ballou (1991)	16. Murphy, Poist y Braunschweig (1996)
2. Bowersox, Closs y Stank (2000)	17. Nieto y Llamazares (1995)
3. Cabrera y Bosch (1995)	18. Novack, Rinehart y Wells (1992)
4. Casanovas y Cuatrecasas (2001)	19. Pau y Navascues (1998)
5. Castán, Caballero y Núñez (2000)	20. Stank, Daugherty y Ellinger (1999)
6. Carter y Ellram (1998)	21. Sharman, Grewal y Levi (1995)
7. Coyle, Bardi y Langley (1996)	22. Stank, Goldsby, Vickery y Savitskie (2003)
8. Daugherty, Autry y Ellinger (2001)	23. Stank, Keller y Daugherty (2001)
9. Durán, Gutiérrez y Sánchez (2001)	24. Wu y Dunn (1995)
10. Fleischmann, Beullens, Bloenhof-Ruwaard y Wassenhove (2001)	25. Wanke y Zinn (2004)
11. Gutiérrez y Prida (1998)	26. Mentzer, Min y Bobbitt (2004)
12. Kohn y McGinnis (1997)	27. See (2007)
13. Langley (1986)	28. Chieh-Yu (2008)
14. Langley y Holcomb (1992)	29. Evert-Jan (2008)
15. Morash, Droge y Vickery (1996)	30. Blaik y Matwiejczuk (2009).

Fuente: David Servera-Francés [12]

Como se desprende del cuadro anterior, las principales áreas de decisión o grupos de actividades logísticas, en los que han coincidido los diferentes autores han sido: el servicio al cliente, transporte, gestión de inventarios, procesamiento de pedidos, almacenamiento, manejo de mercaderías, compras, planificación del producto mediante la cooperación con el departamento de producción, gestión de información y logística inversa. Además de otras actividades dentro de las que se destacan actividades de coordinación interdepartamental de la empresa y actividades de coordinación con otros miembros de la cadena de suministros.

Como ya fue mencionado, estos grupos de actividades presentan altos niveles de interrelación y deben ser planificados y gestionados con el mayor grado de integración posible, dado que cada uno de ellos ejerce un impacto importante sobre el desempeño del sistema como un todo [4].

Cabe destacar también, que cuando hablamos de decisiones de transporte hacemos referencia, a grandes rasgos, a la selección del modo y del medio de transporte, el tipo de vehículo de transporte y sus características, los tamaños de los envíos, la consolidación de cargas y el establecimiento de rutas de transporte, así como la planificación de la distribución y finalmente la programación de los vehículos.

Por otro lado, cuando hablamos de gestión de información, hacemos referencia a actividades relacionadas con recoger, almacenar, manipular y transmitir información y a las TIC's utilizadas para efectivamente gestionarlas. Es decir, con decisiones relacionadas con el segundo gran flujo del proceso logístico, la información.

Las TIC's son uno de los principales mecanismos de coordinación en la SCM [41]. En este sentido, cuando los integrantes de la cadena de suministro mejoran su coordinación mediante sus sistemas de información, reducirán los costos de transacción y la incertidumbre para pronosticar su demanda debido a la mejora de la comunicación [40].

Dado que el objeto de estudio del presente trabajo, se enmarca dentro de las tecnologías de la información y específicamente en el desarrollo de una herramienta de gestión, que mejore la eficiencia de la programación de vehículos en el ámbito del transporte automotor de cargas refrigeradas. Es menester profundizar respecto de las áreas de decisión relacionadas al transporte y a la gestión de información. Sin perder de vista, el hecho ya mencionado de que todos los grupos de actividades presentan un elevado nivel de interrelación, por lo que deben ser planificados y gestionados con el mayor grado de integración posible dado que cada uno de ellos ejerce un impacto importante sobre el sistema como un todo.

## 2. SISTEMA DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN

Las redes de transporte y distribución, devienen de la necesidad de vincular y transportar los bienes de consumo desde su origen de producción hasta el cliente final. Las actividades relacionadas al sistema de transporte y distribución de mercaderías son vitales para el crecimiento y normal desarrollo de una economía, dado que deben garantizar la circulación eficiente y la oportuna disponibilidad de materias primas y productos terminados. En base al objeto de estudio del presente trabajo, nos enfocaremos en las redes de distribución que utilizan modo de transporte de carga por carretera, y más específicamente en entornos urbanos de distribución.

La importancia de estas actividades en Argentina, se ve en que el producto generado por el transporte de cargas por carretera representa, algo más del 2% del Producto Interno Bruto (PIB) de la economía, en tanto que sus ventas<sup>2</sup> alcanzan casi un 3% de las ventas totales del país [42]. Además, considerando la producción<sup>3</sup> a precios básicos de servicios de transporte de carga (vías terrestre, aérea y acuática) para el año 2012, los servicios de transporte de carga por carretera representan 90,8%. También es relevante destacar, que el transporte y almacenamiento representan una parte importante del costo final de los productos y constituyen los elementos más importantes dentro de los costos logísticos [11].

---

<sup>2</sup> La diferencia entre las ventas de transporte y su producto generado se encuentra en que éste se refiere únicamente al valor creado en el proceso productivo. Esquemáticamente, y para el sector transporte, las ventas son equivalentes al Valor Bruto de Producción (VBP) que se forma como la suma del Producto y las compras intermedias realizadas para la producción.

<sup>3</sup> Oferta a precios básicos en miles de pesos corrientes. Fuente INDEC-Matriz de oferta a precios básicos

Como una primera aproximación esquemática del sistema de transporte y distribución se considera una representación mediante una red de nodos y arcos, en los que los nodos representan puntos de almacenamiento donde el flujo de inventario se detiene en forma temporal o de forma definitiva al llegar al cliente final. Y los arcos de la red representan el movimiento de bienes entre distintos puntos de almacenamiento de inventario. Estas actividades de movimiento-almacenamiento para los flujos de inventario sólo son una parte del sistema, la contraparte es la red de flujos de información. Conceptualmente la red de información es similar a la red de flujo de producto descrita en el párrafo anterior, ambas pueden verse como un conjunto de arcos y nodos, que describen ambos flujos del sistema [4].

La red de flujo del producto y la red de flujo de información, integran el sistema de transporte y distribución. Una configuración determinada de este sistema, es una red de almacenes, puntos de distribución, fábricas, inventario movilizado, servicios de transporte y sistemas de procesamiento de información. Esta configuración determinará cierto balance entre el nivel de servicio al cliente y los costos asociados a las actividades involucradas detrás de los flujos mencionados. Además de condicionar el desempeño de la empresa y de la cadena de suministro, así como su planificación y organización temporal [43]. En este punto, es importante destacar que las decisiones de selección o diseño de la estructura de la red son de carácter estratégico, requieren de un horizonte de planeación de mediano a largo plazo, dado que no suele ser fácil modificar la red de distribución, como sí puede serlo actuar sobre otras variables logísticas.

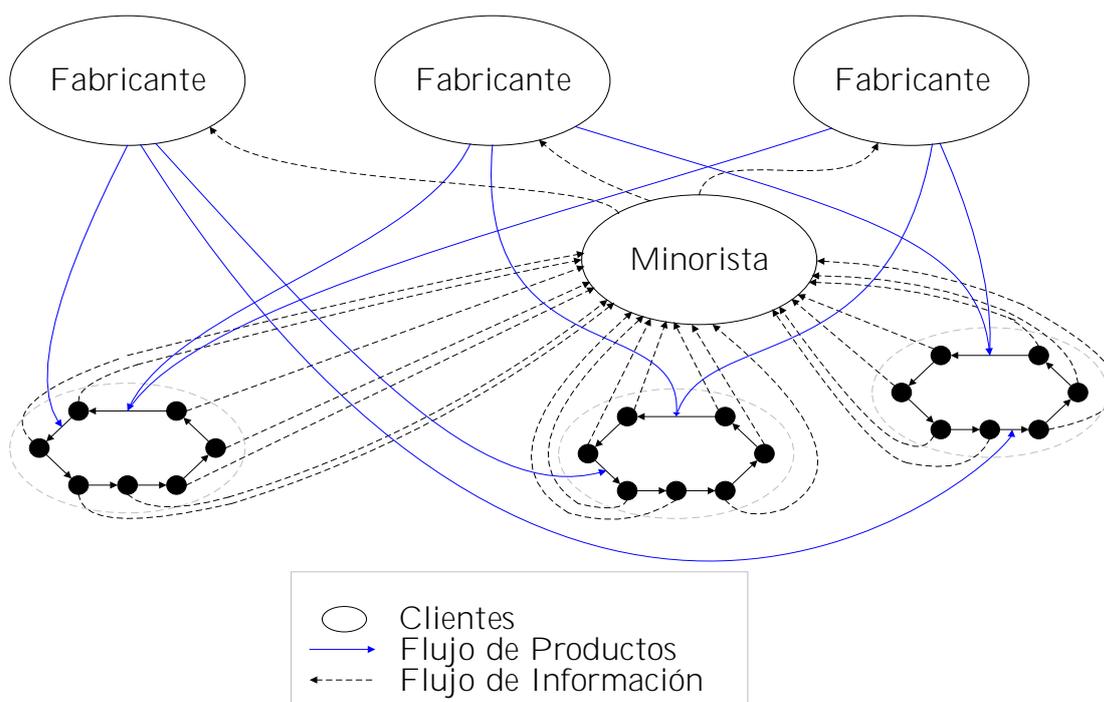
Estructuras diferentes de la red de transporte y distribución en cuanto a los flujos mencionados y las relaciones entre el transporte y los diferentes integrantes de la cadena; determinarán acuerdos logísticos entre ellos con diferentes posicionamientos del inventario a lo largo de la cadena, con flexibilidades y tiempos de respuesta diferen-

tes, con costos de transporte y de inventario diferentes y fundamentalmente con niveles de servicio diferentes.

En las figuras siguientes se busca mostrar este aspecto de la interrelación entre el transporte, los flujos de información y el posicionamiento del inventario, bajo dos configuraciones abstractas con acuerdos estratégicos entre los integrantes de la cadena, muy diferentes.

En el primer caso, Figura 2, se presenta una estructura de carga directa (*drop-shipping*). En esta estructura el producto se envía de forma directa desde el fabricante al consumidor final.

Figura 2: Red de transporte y distribución de remesa directa



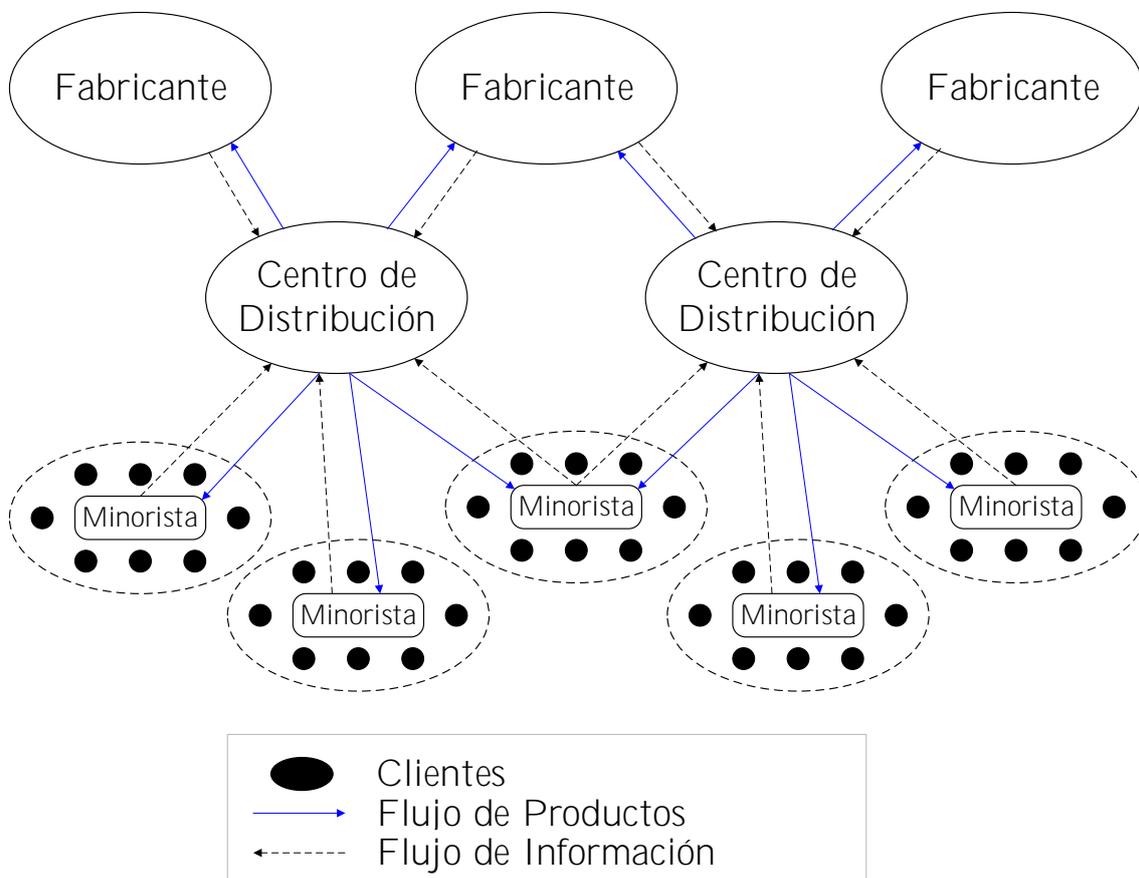
Fuente: adaptado de Chopra y Meindl [43]

El minorista es independiente del fabricante y no mantiene inventarios. La información fluye desde el cliente al minorista y desde éste al fabricante. En este caso, la centralización de inventario en el fabricante reduce los costos de inventarios en la red de distribución pero aumentan los costos de transporte y los de la infraestructura de

información, al ser esta más compleja. Esta estructura es beneficiosa para artículos con alto valor y demanda baja e impredecible [43].

El otro caso por ejemplo, sería el de una estructura más tradicional, Figura 3, en la que el inventario se ubica en las tiendas minoristas, donde los clientes entran y colocan el pedido. Aumentan los costos de inventarios en la red, pero disminuyen los costos de transporte. Esta estructura beneficiosa para productos con alta rotación y en los que el cliente valora una respuesta rápida [43].

Figura 3: Red de transporte y distribución tradicional



Fuente: adaptado de Chopra y Meindl [43]

Comparando ambas estructuras puede verse que la complejidad de los flujos de transporte y de información principalmente, son mayores en el primer caso. Mientras que en el segundo caso, puede verse un mayor escalonamiento del inventario a lo largo de la red de distribución.

En este punto, cabe destacar que las redes de distribución de bienes de consumo como los alimentos perecederos (como se verá posteriormente en el caso de aplicación del presente trabajo), se caracteriza por tener una estructura de producción primaria fragmentada y un elevado número de intermediarios; además de que un porcentaje elevado de toda la comercialización se realiza a través de locales minoristas muy pequeños. Como se mencionó anteriormente estas características condicionan el desempeño de la cadena, y hace imprescindible la coordinación de las actividades logísticas y especialmente del sistema de transporte entre los diferentes eslabones de la cadena de suministro.

Actualmente, los sistemas de transporte y distribución en las cadenas de suministro, contrastan con las redes de distribución tradicionales. En las que el fabricante organizaba y gestionaba su propia red de transporte y distribución. Las ineficiencias de esas redes por las asimetrías en los envíos, su variabilidad temporal, los altos costos de inversión requeridos y el desarrollo tecnológico, han permitido la aparición de empresas especializadas en servicios de transporte y distribución de mercaderías conocidas en general como operadores logísticos.

La subcontratación de las actividades relacionadas al sistema de transporte y distribución, a estas empresas especializadas, es la norma en las cadenas de suministro actuales. Llevando a que una misma ruta pueda ser compartida por varios clientes lo que permite la consolidación de vehículos más eficientemente, aumentando el flujo de carga en cada ruta de la red y operando con costos medios más bajos.

### 2.1. Subcontratación

La subcontratación o tercerización (del neologismo inglés outsourcing), es el acto de trasladar parte de las actividades internas de una empresa y las responsabilidades respecto de sus decisiones, a un proveedor externo de servicios especializados por medio de un contrato. La empresa subcontratante deberá transferir parte del control

administrativo y operacional a la empresa subcontratada. La subcontratación en el marco de la gestión de los sistemas de transporte y distribución, implica un considerable grado de intercambio bidireccional de información, coordinación y confianza, dado que no sólo se transfieren actividades sino también recursos con los que ocurren las actividades, incluyendo personal, instalaciones, equipo, tecnología y otros activos. También se transfieren las responsabilidades para tomar decisiones sobre ciertos elementos.

Razones para subcontratar actividades logísticas ( [44] citado en [27]):

- Razones organizacionales
  - Mejora la eficacia por enfocar esfuerzos en actividades sobre las que se tiene una ventaja competitiva.
  - Aumenta la flexibilidad para adaptarse a los cambios en las condiciones del negocio, en la demanda o en la tecnología.
  - Aumenta la satisfacción de los clientes y la rentabilidad para los accionistas.
- Razones de mejoras
  - Mejora el desempeño operativo (aumenta la calidad y la productividad, se acortan los ciclos, etc.)
  - Se gana experiencia, habilidades y tecnologías que de otro modo no se tendrían.
  - Mejora la administración y el control.
  - Mejora la gestión de riesgos.
- Razones financieras
  - Reduce las inversiones en activos y libera recursos para otros fines.
  - Genera efectivo al transferir los activos al proveedor.
- Razones de utilidades
  - Se gana acceso al mercado y oportunidades de negocios a través de la red del proveedor.
  - Se acelera la expansión porque se aprovecha la capacidad, procesos y sistemas del proveedor.
  - Se expanden las ventas y la capacidad de producción en los periodos en que no puede financiarse la expansión.
  - Se explotan comercialmente las habilidades existentes.
- Razones de costos

- Se reducen los costos por el mejor desempeño y menor estructura de costos del proveedor.
- Los costos fijos se vuelven variables.
- Razones de los empleados
  - Da a los empleados plan de carrera más sólida.
  - Aumenta el compromiso y la energía en áreas secundarias.

En una empresa hay distintos tipos de actividades que en función de su naturaleza podrán o no subcontratarse. Estos tipos de actividades, pueden resumirse en tres: actividades estratégicas, actividades altamente rentables y actividades básicas o de apoyo. Las actividades básicas o de apoyo son claves para la empresa, pero no confieren una ventaja competitiva. Las actividades estratégicas y las actividades altamente rentables, implican una fuente clave de ventaja competitiva para la organización [45].

La subcontratación permite a una empresa enfocarse en las actividades estratégicas y las actividades altamente rentables. La empresa puede fortalecer una ventaja competitiva y reducir los costos, al subcontratar un proveedor especializado en alguna actividad básica o de apoyo, que le permite descargarse de actividades secundarias y enfocarse en sus actividades estratégicas y más rentables.

Es decir, la subcontratación de capacidades hace referencia a la manera en que las compañías se enfocan en las actividades en las que son competitivas sin descuidar lo que es relevante estratégicamente para su negocio, subcontratando otras actividades a prestadores de servicios especializados. El valor agregado más importante que un operador logístico le genera al usuario, es permitirle que dirija sus recursos financieros, humanos y técnicos al negocio que sabe hacer [45].

## 2.2. Definición y clasificación de operadores logísticos

Siguiendo a Los Santos (2006) se puede definir a un operador logístico como: “aquella empresa que por encargo de su cliente diseña los procesos de una o varias fases de su cadena de suministro (aprovisionamiento, transporte, almacenaje, distribución e incluso ciertas actividades del proceso productivo), organiza, gestiona y controla tales

operaciones, utilizando para ello la infraestructura física, tecnología y sistemas de información propios y ajenos, independientemente de que preste o no los servicios con medios propios o subcontratados. En este sentido, el operador responde directamente ante su cliente de los bienes y servicios adicionales acordados en relación con éstos, y es su interlocutor directo” [46].

Es amplia la variedad de operadores logísticos que pueden encontrarse en el mercado. En función del grado o nivel de integración entre la empresa subcontratante y el operador, pueden clasificarse en cuatro niveles 1PL, 2PL, 3PL y 4PL (de menor a mayor grado). Siguiendo a Mora García (2010) estos niveles de operadores se pueden describir de la siguiente manera:

- 1º nivel o 1PL (First Party Logistics), son prácticamente subcontratistas de transporte [47], principalmente a carga completa y después reparto [48].
- 2º nivel o 2PL (Two Party Logistics), proveedores especializados que prestan servicios independientes y ocasionales. Se enfocan exclusivamente en una sola actividad, por ejemplo, transporte o trámites aduaneros y/o almacenamiento. Su objetivo es reducir costos al cliente o proveerlo de capacidad extra cuando sea necesario, evitando una inversión innecesaria. Por ejemplo, en las empresas de paquetería industrial, expreso o courier, que ofrecen servicios de transporte de mercaderías de volumen reducido y con plazos de entrega relativamente cortos. La consolidación del pedido es un factor estratégico para garantizar la competitividad del servicio, dado que la carga asociada a cada cliente es de poco volumen. Generalmente los envíos se caracterizan por estar constituidos con distintas tipologías de productos, con densidades variables y con ventanas temporales muy restrictivas entre los orígenes y los destinos de la red [45].
- 3º nivel o 3PL (Third Party Logistics), operadores logísticos que ejecutan o implementan todas o una proporción de las actividades logísticas bajo un contrato, buscando alcanzar una serie de metas y objetivos definidos. Los servi-

cios que prestan pueden ser operativos, administrativos o ambos, pero deben incluir más que sólo el transporte y almacenamiento. Deben involucrar gestión y control efectivo sobre el proceso logístico con su correspondiente impacto en costos y niveles de servicio de la empresa subcontratante. Por ejemplo, los operadores logísticos que ofrecen servicios de almacenaje, empaquetado y otros servicios de valor agregado de forma conjunta con el servicio de transporte y distribución, generalmente logran niveles de cooperación más altos con sus clientes que las empresas descritas en el párrafo anterior. Habitualmente los volúmenes de transporte son mayores que en el caso del servicio de paquetería industrial [45].

- 4º nivel o 4PL (Fourth Party Logistics), operadores logísticos que ejercen la actividad de planeación y coordinación del flujo de información desde proveedores hasta clientes, permitiendo una mayor integración de la cadena de suministro. A diferencia de los 3PLs más centrados en temas operativos, los 4PLs prestan, entre otros, servicios de consultoría buscando soluciones acordes al enfoque estratégico de la gestión de la cadena de suministros. El 4PL, como integrador de diferentes servicios logísticos de la cadena de suministro, aconseja, diseña, construye y ejecuta soluciones globales. Combinando su propia experiencia con la de los proveedores de servicios complementarios, de manera que comparten riesgos y beneficios con base en una relación directa de intercambio de conocimientos e información [45].

Por otro lado, también es importante clasificarlos en base a su nivel de especificidad respecto a la naturaleza del producto. En este sentido encontramos dos tipos [48]: Por un lado, los *especialistas*, que se adecuan mejor al tipo y especificidades del mercado en el que operan, por ejemplo farmacia, congelados, alimentación, automóvil, etc. Por otro lado, están los *generalistas*, que no requieren tanta especialización y abarcan, con limitaciones, diversos mercados.

### 2.3. Servicios relacionados a los operadores logísticos

Mora García (2010) enumera una serie de servicios que puede ofrecer un operador logístico. Entre los servicios que puede ofrecer un operador logístico están [45]:

- Gestión de Recepción – almacenamiento – despacho.
- Gestión de transporte y distribución.
- Gestión de devoluciones.
- Operaciones de promociones.
- Gestión de cobros.
- Gestión aduanera.
- Procesamiento de órdenes.
- Sistemas de información logística.
- Arriendo de oficinas.
- Servicios de consultoría.

Es relevante profundizar en este apartado, dado el objeto de estudio del presente trabajo, ciertos aspectos de los servicios de transporte prestados por operadores logísticos. Siguiendo el trabajo de Ballou (2004), puede verse que los servicios de transporte se diferencian en función de las posibilidades de consolidación de envíos.

Primero, podemos mencionar los servicios personalizados, como los servicios puerta a puerta, en los que la mercadería comparte el mismo origen o el mismo destino. En este tipo de sistema de distribución, la planificación temporal de los envíos suele ajustarse hasta que se ocupe la capacidad total del vehículo. Esta tipología de servicio también es conocida como Full Truck Load (FTL). La dificultad para estimar temporalmente la demanda y las solicitudes de envío, hacen que la planificación y programación de rutas y cargas en este tipo de servicio sean consideradas como problemas relevantes de gestión de recursos [4].

También se encuentran los mencionados servicios de transporte consolidado. En este tipo de servicios, la planificación temporal de los envíos no se realiza de forma personalizada para cada cliente. En este caso, el operador logístico fija los plazos de distribución y horarios de los envíos, buscando cumplir con un nivel de servicio determinado para el mayor número de clientes. Esta tipología se denomina Less-Than Truck Load (LTL), dado que el tamaño del pedido de un cliente es inferior a la capacidad del vehículo de transporte. Es decir, que cada viaje del vehículo debe cargarse con pedidos de múltiples clientes para aumentar su ocupación (Consolidación del Vehículo). Los operadores logísticos que prestan este tipo de servicios necesitan de espacio de almacenamiento propio o alquilado para la consolidación de los envíos (Terminales de Consolidación).

### 3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN

Hablar de logística y cadena de suministro, es hablar de tecnologías de la información y la comunicación (TIC's) aplicadas a la gestión de la cadena de suministro. Por lo tanto es necesario definir primero el concepto de TIC's para posteriormente continuar con su aplicación al contexto mencionado.

#### 3.1. Tecnologías de la información y la comunicación

Paletta y Dais Vieira Junior afirman que “Las tecnologías de la información pueden ser resumidas como un conjunto de todas las actividades y soluciones producidas por una fuente computacional y con aplicaciones en muchas áreas. El termino tecnologías de la información y las comunicaciones es comúnmente utilizado para denotar el conjunto de recursos automáticos (no humano) dedicadas al almacenamiento, procesamiento y a la comunicación de la información, así como al modo en que estos recursos están organizados en un sistema capaz de ejecutar dicho conjunto de tareas” ([52] citado en [53]).

En el marco de la SCM, el impacto de la revolución tecnológica ligado a las tecnologías de la información y la comunicación, se refleja en el crecimiento exponencial del desarrollo y del uso de sistemas y tecnologías que mejoran la gestión de la información, tanto dentro de la empresa como a lo largo de la cadena de suministro. En este sentido, la información es la clave del desempeño de la SCM, al proporcionar la base sobre la cual se toman las decisiones y se ejecutan las transacciones. Es la fuente de conocimiento de lo que ocurre en los eslabones inferiores y superiores de la cadena de suministro. Es lo que hace visible la cadena de suministro [43].

El uso de las TIC's simplifica y mejora la eficacia y eficiencia de las actividades rutinarias, permitiendo a la empresa concentrar sus esfuerzos en las actividades más rentables. Pero la importancia de las TIC's en la SCM, la da el hecho de que hacen posible que la información correcta esté disponible en momento y el lugar adecuado

cuando se requiere; lo que permite la sincronización del flujo de información con el flujo físico a través de la empresa y de la cadena de suministro [53].

Es importante revisar cuáles son las herramientas tecnológicas más relevantes utilizadas en la gestión de la empresa y de la cadena de suministro. Inicialmente, el desarrollo de sistemas de información empresariales se concentraba en mejorar la eficacia en el registro de transacciones y en el manejo de bases de datos. Actualmente, casi todo el desarrollo y la implementación de sistemas de información, se centra en mejorar la integración del flujo de información entre los integrantes de la cadena y en mejorar la eficiencia y eficacia de la toma de decisiones en dicho contexto.

Pero primero es importante destacar tres tipos de tecnologías que posibilitan la implementación de los sistemas asociados a la toma de decisiones y la gestión de procesos de la SCM. Estas tecnologías son: las destinadas a la captura y la transferencia de la información, las destinadas al almacenamiento y a la recuperación de la información, y las destinadas a la identificación y entrega de información [53].

### *3.1.1. Captura y la transferencia de información*

Las Tecnologías más relevantes para la captura y la transferencia de la información en el marco de la SCM son:

- *Internet*: Internet es un conjunto descentralizado de redes de comunicación interconectadas, que utilizan la familia de protocolos TCP/IP para transferir información desde un lugar a otro, lo cual garantiza que las redes físicas heterogéneas que la componen funcionen como una red lógica única de alcance mundial [54].
- *Banda Ancha*: se conoce como banda ancha a la red (de cualquier tipo) que tiene una elevada capacidad para transportar información y que incide en la velocidad de transmisión de la misma [55] (velocidad superior a 56 Kbytes por segundo).

- *EDI*: El intercambio electrónico de datos (*EDI, electronic data interchange*) permite intercambiar información entre empresas, mediante un formato específico común, haciendo innecesaria la intervención humana y los errores asociados, ya que las operaciones se llevan a cabo íntegramente a través de ordenadores [45]. Se puede definir como, la transferencia de información entre empresas utilizando mensajes electrónicos con contenidos estandarizados [56]. La documentación que se puede intercambiar por EDI es muy amplia pero se destacan por su uso generalizado en la implementación del EDI, las Órdenes de compra, las Facturas de venta, el aviso de despacho, los reportes de inventarios y ventas, los reportes de transferencias de fondos. Los estándares del EDI, llamados X.12, son fijados por el Instituto Nacional Americano de Estándares (*ANSI, American National Standard Institution*) y son especializados entre industrias.
- *XML*: El XML (*eXtensible Markup Language*) permite transmitir datos entre computadoras y de computadores a humanos mediante formatos flexibles. A diferencia del EDI, que usa conjuntos de datos predefinidos o rígidos, el XML es extensible y puede utilizar distintos formatos estándar, para comunicar un amplio rango de datos y las instrucciones para usarlos, entre distintos sistemas computarizados [53]. La gran ventaja del XML, es la flexibilidad en las comunicaciones entre las personas y las computadoras y en consecuencia, con otras personas. Lo que permite coordinar mejor las operaciones de la SCM.

### 3.1.2. Almacenamiento y recuperación de información

Las tecnologías más relevantes asociadas al almacenamiento y la recuperación de la información son las bases de datos. Una base de datos es un conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso [57]. Existen varios tipos pero actualmente la más común es la base de datos relacional. Esta base de datos almacena grupos de datos relacionados en tablas individuales

que permiten la recuperación (entrega de la información consultada) mediante el uso de un lenguaje estándar llamado SQL, *Structured Query Language* [58], [53].

La característica fundamental es que permite el registro, almacenaje y posteriormente la consulta y recuperación de las transacciones. Además, estas transacciones pueden ser observadas en tiempo real [58], [53].

### 3.1.3. Identificación y entrega de información

Las Tecnologías más relevantes para la identificación y entrega de información son:

- *Código de Barras*: es un sistema de codificación que permite identificar de forma rápida e inequívoca el objeto que lo posea, mediante un lector de código de barra. Reduciendo el papeleo, el tiempo, los costos y los errores en procesos que requieran la identificación del objeto, como es el caso de los procesos de entrega y despacho de mercadería [59]. Permiten llevar un control y seguimiento precisos del inventario en las ubicaciones de almacenamiento interno y entre los integrantes de la cadena de suministro, registrando y comunicando con rapidez los detalles de movimientos con una alta precisión y oportunidad [3].

El ancho de las barras y la separación de las mismas son la base de la codificación mediante este sistema. Varían dependiendo de la forma como se almacena la información, de la cantidad de información, del tamaño requerido del código, etc. Los estándares más conocidos son EAN, UPC, ITF, GS1-128, GS1-Datamatrix, GS1 QR code [60]. Cada uno tiene un uso recomendado o un país donde se utiliza, por ejemplo los códigos EAN y UPC está diseñado para alto volumen de lectura, el GS1-128 está diseñado para contener un mayor volumen de información, etc. Los estándares EAN se usan fuera de EE.UU. y Canadá y los UPC se usan para productos vendidos al por menor dentro de EE.UU.

- *Radio Frecuencia*: Otra tecnología de auto identificación son las etiquetas magnéticas o TAGS, que emiten radiofrecuencias (*RFID, Radio Frequency Identification*). Las ventajas principales respecto de los códigos de barra son: que permiten mayor capacidad de almacenamiento de datos, que son reutilizables y que no es necesario el contacto visual entre el lector y la etiqueta [61]. Estos sistemas permiten identificar automáticamente un pedido al ingresar al almacén, mediante antenas que capturan los datos de pequeños chips (adheridos a los productos), que son rastreados e identificados a una cierta distancia por dichas antenas [58].
- *GPS*: El sistemas de posicionamiento global (*GPS, Global Positioning System*) es un sistema que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto (una persona, un vehículo) con una precisión de hasta 15 metros durante las 24 horas del día. Funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el planeta tierra, a 20.200 km de altura, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra [62].

### 3.2. Sistemas de información en SCM

En este apartado, se presenta una revisión de los sistemas de información asociados a la toma de decisiones y la gestión de procesos de la SCM. Según Chopra y Meindl (2008) los sistemas de información que se implementan en la actualidad, se enfocan en tres grupos principales de procesos de la SCM, denominados macro-procesos [43]. Es decir, en la actualidad los sistemas de información no se centran solo en los procesos internos de la organización, sino que se enfocan en los macro-procesos de la cadena de suministro [43]. Los que pueden sintetizarse como, los procesos enfocados corriente abajo de la cadena, los procesos enfocados en la cadena de suministro interna de la empresa y los procesos enfocados corriente arriba de la cadena de suministro. Además estos autores consideran una cuarta categoría que llaman fundamento de administración de las transacciones (*TMF, transaction management foundation*) que

constituiría la base para que funcionen y se comuniquen entre sí los otros procesos macro.

A continuación se presenta la revisión de los sistemas de información aplicados en el ámbito de la SCM siguiendo los criterios de Chopra y Meindl (2008), pero considerando la cuarta categoría como integrada dentro de los sistemas enfocados en la cadena de suministro interna. Esto se justifica en que los sistemas integradores de dos o de los tres macro-procesos de la SCM, siempre incluyen los sistemas básicos para la gestión de las operaciones internas de la empresa.

### *3.2.1. Sistemas enfocados en procesos con interacciones corriente arriba (empresa-proveedores).*

Son procesos enfocados en planificar y gestionar las actividades relacionadas con los socios de la cadena de suministro, que proveen los recursos necesarios para la producción del bien o prestación del servicio. Las principales TIC's y sistemas relevantes relacionados con estos procesos son: el aprovisionamiento electrónico (*e-procurement*), el inventario administrado por el vendedor (*VMI, Vendor Managed Inventory*), y la planeación de reposición continua (*CRP, Continuous Replenishment Planning*), el e-sourcing, e-mails [63].

A continuación se describen los más relevantes.

- El aprovisionamiento electrónico (*e-procurement*) o sistemas de abastecimiento (*Procurement Systems*), son subsistemas especializados en las actividades de compras entre la empresa y sus proveedores [45]. Se basan en la optimización del proceso de aprovisionamiento, a través de la utilización de bases de datos que contienen toda la información requerida acerca de los productos que la compañía requiere, al tiempo que también evalúan el precio de compra, el historial de compras y el desempeño de los proveedores. Una de las funciones principales es ayudar a la selección y evaluación de los proveedores [58].

- El inventario administrado por el vendedor (*VMI, Vendor Managed Inventory*), es la informatización de un sistema de gestión de inventarios donde el proveedor es responsable de las decisiones relacionadas con el nivel de inventario de reposición en las instalaciones de la empresa. Es decir, el stock es monitoreado, planificado y gestionado por el vendedor. En muchos casos, el inventario es propiedad del proveedor hasta que se vende. Requiere compartir información de la demanda con el proveedor para permitirle tomar decisiones de reabastecimiento y producción [43]. Entre sus ventajas está la mejora del servicio al cliente y la reducción de la incertidumbre en la demanda [53].
- Los programas de reabastecimiento continuo (*CRP, continuous replenishment programs*), son subsistemas que permiten al mayorista o fabricante reabastecer al detallista regularmente con base en datos obtenidos en el punto de venta. En la mayoría de los casos, los sistemas CRP se basan en los retiros efectivos de inventario de los almacenes del detallista. Generalmente el inventario del detallista es propiedad de éste [43].

### 3.2.2. *Sistemas enfocados en procesos enfocados en la cadena de suministro interna.*

Son procesos enfocados en planificar y gestionar las operaciones internas de la empresa, relacionadas con su proceso de transformación de valor. Las principales TIC's y sistemas relevantes relacionados con estos procesos son: El ERP, el WMS, el MRP I y II, los sistemas de picking (*Pick to Light-Voice*) y el LMS (*Labor Management System*) [63]. A continuación se hace una breve descripción de los más relevantes.

- El sistema de planificación de recursos empresariales (*ERP, enterprise resource planning*) es un sistema de gestión integrada de recursos de una empresa, un paquete de programas de gestión que permiten administrar el conjunto de

procesos de una empresa. Y está compuesto por una serie de funcionalidades básicas a los cuales se pueden agregar otras más avanzadas.

Entre las funciones básicas de un ERP generalmente se encuentran: La administración de las cuentas por cobrar, el libro mayor, la administración de recursos humanos, la lista de materiales, el control de Inventarios, la administración de pedidos, la planificación de requerimientos de un pedido, etc. Entre las funcionalidades avanzadas están la planeación en colaboración, predicción y reabastecimiento, la administración de las relaciones con el cliente, la administración de eventos de la cadena de suministro, las aplicaciones habilitadas en la web, la planeación y programación avanzada [53].

- El sistema de gestión de almacenes (*WMS, Warehouse Management System*), generalmente es un subsistema o módulo del ERP. Según Ballow (2004) puede incluir al sistema de gestión de pedidos (*OMS, Order Management System*) o tratarse de una entidad separada. Gestiona la información respecto del manejo del flujo del producto en los inventarios de la organización. Gestiona el proceso de recepción de materiales, la ubicación de los materiales en las instalaciones, la selección del pedido dentro de las instalaciones, la carga de trabajo para los recolectores y la estimación de disponibilidad del producto. También controla las operaciones internas de abastecimiento de materiales y componentes al proceso de producción.

Entre sus elementos clave están: 1) recepción; 2) salvaguarda; 3) manejo de inventarios; 4) procesamiento y recuperación del pedido, y 5) preparación del envío [4]. Es importante destacar también dentro de los elementos clave, la optimización de la utilización del espacio dentro de las instalaciones y la optimización del proceso de recolección de pedidos [53].

- Los sistemas de planeación de necesidades de materiales (MRP I y II, *Manufacturing Resource Planning*) son subsistemas o módulos del ERP que permi-

ten calcular la demanda interna. El MRP I toma la información de requerimientos de materiales del programa maestro de producción, la desglosa y crea programas para los proveedores con tipos de partes, cantidades y fechas de pedido y de entrega. Permite analizar los requisitos de componentes de cada producto y sus correspondientes niveles de inventario. El MRP II, permite planificar y controlar todos los recursos internos de la empresa, ya sea fabricación, marketing, finanzas o ingeniería. Estos sistemas mejoran de forma general la gestión de inventarios y producción.

- Sistemas de planificación y programación avanzada (*APS, Advanced Planning and Scheduling*), son aplicaciones muy analíticas que buscan optimizar los procesos de la organización basándose en información transaccional suministrada por el ERP, y que utilizan, entre otras, las siguientes técnicas matemáticas para realizar la planificación de la producción y las operaciones [58] [53]: Programación lineal, Algoritmos greedy, Algoritmo exhaustivo de descenso, Recocido simulado, Búsqueda tabú, Algoritmos genéticos, Colonias de hormigas, etc.
- Los sistemas de ejecución de manufactura (*MES, Manufacturing Execution Systems*), generalmente están integrados al ERP y se enfocan en la gestión de actividades de producción. Son menos analíticos que los APS pero permiten realizar la programaciones de la producción y los requerimientos de materiales y recursos para una planta manufacturera [58] [53].
- Los sistemas de recolección por voz (*voice picking*) son sistemas que combinan el control de los sistemas automatizados con la flexibilidad de los sistemas mecanizados. El operario recibe instrucciones de un ordenador mediante un sistema que convierte la señal en una instrucción verbal, la cual es escuchada por el operario a través de un auricular. De forma similar, el operario puede retroalimentar al sistema mediante una instrucción verbal ingresada mediante un

micrófono, luego se transmite la información convirtiéndola en una señal capaz de ser procesada por el ordenador central. De esta forma, el operario continuamente está hablando con la computadora central, la cual le da instrucciones de cuántos y qué materiales debe recoger en cada posición del almacén [59] [53].

- Los sistemas de recolección por luz (*Pick to Light*) se basan en indicadores luminosos controlados mediante software, que guían al operario dándole diferentes tipos de información a lo largo del todo el proceso de picking, manteniendo el seguimiento en tiempo real del proceso [63]. Cada posición dentro del almacén posee un dispositivo con una pantalla digital, que indica la cantidad de elementos a recoger, e inclusive permite realizar correcciones o modificaciones de las órdenes [53].
- Finalmente están los sistemas de recolección por visión artificial (*Visión Picking*), esta es una tecnología en desarrollo, que permite mediante gafas especiales guiar al operario a través del almacén e interactuar de forma similar que los dos sistemas anteriores con una computadora central, pero gracias a una cámara incrustada en las gafas se logrará mejorar la eficiencia del control del proceso de picking.

### 3.2.3. *Sistemas enfocados en procesos con interacciones corriente abajo (empresa-clientes).*

Están enfocados en planificar y controlar los procesos de distribución y relación con los clientes finales. Además de coordinar y sincronizar las relaciones con procesos internos. Las principales TIC's y sistemas relevantes relacionados con estos procesos son: CRM, TMS, ECR y EPC [63]. A continuación se hace una breve descripción de los más relevantes.

- El sistema de administración de relación con el cliente (*CRM, Consumer Relationship Management*) permite extender la funcionalidad del ERP con los sistemas de ventas y compartir información entre clientes, fuerza de ventas y administración de operaciones. De esta manera, la integración de los procesos de ventas, mercadeo y servicio al cliente con operaciones internas de la empresa, es la base de su eficacia para la satisfacción del cliente final [3]. El enfoque de estos sistemas, es considerar al cliente como un activo más para la empresa. Entre las funcionalidades básicas están las capacidades para relacionarse con el cliente, la trazabilidad de las ventas, el análisis de los históricos de ventas, la administración de precios, promociones, mezcla de productos y categorías [64].
- El sistema de respuesta eficiente al consumidor (*ECR, Efficient Consumer Response*), busca el aprovechamiento de oportunidades de mejora mediante la colaboración de fabricantes, operadores logísticos y distribuidores para la generación de la demanda y la satisfacción del cliente. La colaboración se basa en cuatro estrategias: reaprovisionamiento eficiente, promociones eficientes, surtido eficiente y lanzamiento de nuevos productos eficiente [46].
- El sistema de gestión de transporte (*TMS, Transportation Management System*) planea, ejecuta y administra las funciones de transporte y movimiento de mercadería. Generalmente está vinculado a través del ERP con el WMS, y entre otras cosas busca minimizar el costo total del movimiento de materiales para la empresa y también otros eslabones de la cadena de suministro [3].  
Este sistema busca identificar y evaluar estrategias alternativas de transporte y tácticas para determinar los mejores métodos para mover los productos con las restricciones existentes [65].  
Ballow (2004) destaca que su objetivo es planificar y controlar las siguientes actividades relacionadas al transporte:

○ Selección de la modalidad:

Se puede necesitar transportar productos con distintos tamaños de envío que requieran distintas modalidades de flete. Las opciones de servicio de transporte de carga son aéreo, terrestre, por vía acuática y ferroviaria. El transporte de carga terrestre por carretera típicamente se dividen en transporte de larga distancia y de corta distancia. El TMS debe optimizar la programación de la distribución del flujo de mercaderías en diferentes vehículos, considerando tamaños de los envíos, disponibilidad de espacio de carga, costos y tiempos esperados de envío, frecuencias de los envíos y los requerimientos de desempeño [4].

○ Consolidación del flete:

Una función del TMS consiste en determinar patrones para consolidar envíos pequeños dentro de otros más grandes. Una característica de los costos de transporte es que los costos unitarios de envío descienden al aumentar su tamaño, en este sentido la consolidación de pedidos para el envío supone ahorros sustanciales en los costos de transporte, especialmente cuando los tamaños de los mismos son pequeños. El TMS puede seguir en tiempo real los tamaños de pedidos, destinos y fechas comprometidas de entrega. A partir de esta información y usando reglas de decisión internas, pueden formarse cargas económicas considerando los objetivos de servicio de entrega [4].

○ Ruteo y programación de embarques:

Cuando la empresa posee o subcontrata una flota de vehículos, el sistema debe asegurar que la operación de la flota sea eficiente. Con la integración y coordinación con los otros sistemas (ERP, CRM, WMS), asigna cargas a los vehículos y determina la secuencia óptima en la que deben realizar las paradas considerando la recolección de mercadería

devuelta desde los puntos de parada. Planifica las cargas de regreso, las restricciones para el conductor sobre distancia y tiempos de manejo, así como pausas de descanso, y la utilización de la flota durante múltiples periodos. La base de datos del TMS mantiene información de coordenadas de los destinos; tipo de vehículo, número y capacidad; tiempos de parada para carga y descarga, momentos oportunos y otras restricciones de la ruta. Con esta información en tiempo real, los envíos se programan usando las reglas de decisión o algoritmos implantados en el TMS [4].

○ Procesamiento de quejas:

La base de datos de contenidos de las cargas, valor del producto, información del transportista, origen, destino y de especificaciones de garantías y responsabilidades legales. Permite el procesamiento automático de quejas frente a envíos dañados durante el transporte, reduciendo los tiempos de respuesta frente a estas situaciones [4].

○ Rastreo de envíos:

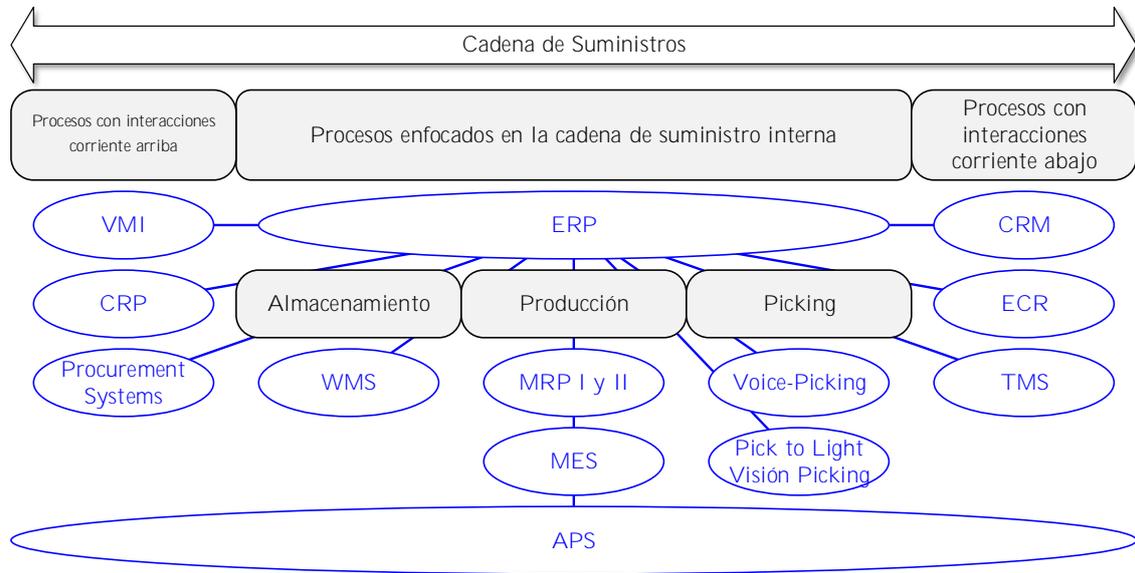
El seguimiento de los envíos y estimaciones de tiempos de entrega, mediante sistemas de posicionamiento global y computadoras a bordo que permiten conocer la localización de los envíos en tiempo real y mediante una aplicación online [4].

○ Pago y auditoría de la facturación del flete:

El TMS precisa los cargos de flete para envíos considerando las excepciones que puedan tener lugar en las tarifas de flete, evitando errores en la facturación. Agiliza el proceso de auditoría de una factura de flete por un reclamo al recibido. Facilita la ejecución del proceso de facturación del flete interactuando con el sistema de información financiera [4].

En la Figura 4, presentada a continuación, se presenta de forma esquemática los diferentes sistemas y subsistemas de información presentados anteriormente y su lugar en la SCM en base a la clasificación realizada por Chopra y Meindl (2008).

Figura 4: *Sistemas de Información en la SCM*



Fuente: elaboración propia

## CAPÍTULO III. PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Con el crecimiento del comercio internacional, la internacionalización de las empresas, la revolución de las tecnologías de la información y la comunicación, y el aumento de la competitividad que surge de estos fenómenos globales, la gestión de la cadena de suministros ha cobrado cada vez mayor relevancia. En este contexto, el aumento de la complejidad de los procesos logísticos de abastecimiento, producción y distribución, así como el incremento del número de partes involucradas, implican la necesidad de sistemas logísticos de información que provean herramientas más eficientes para la toma de decisiones.

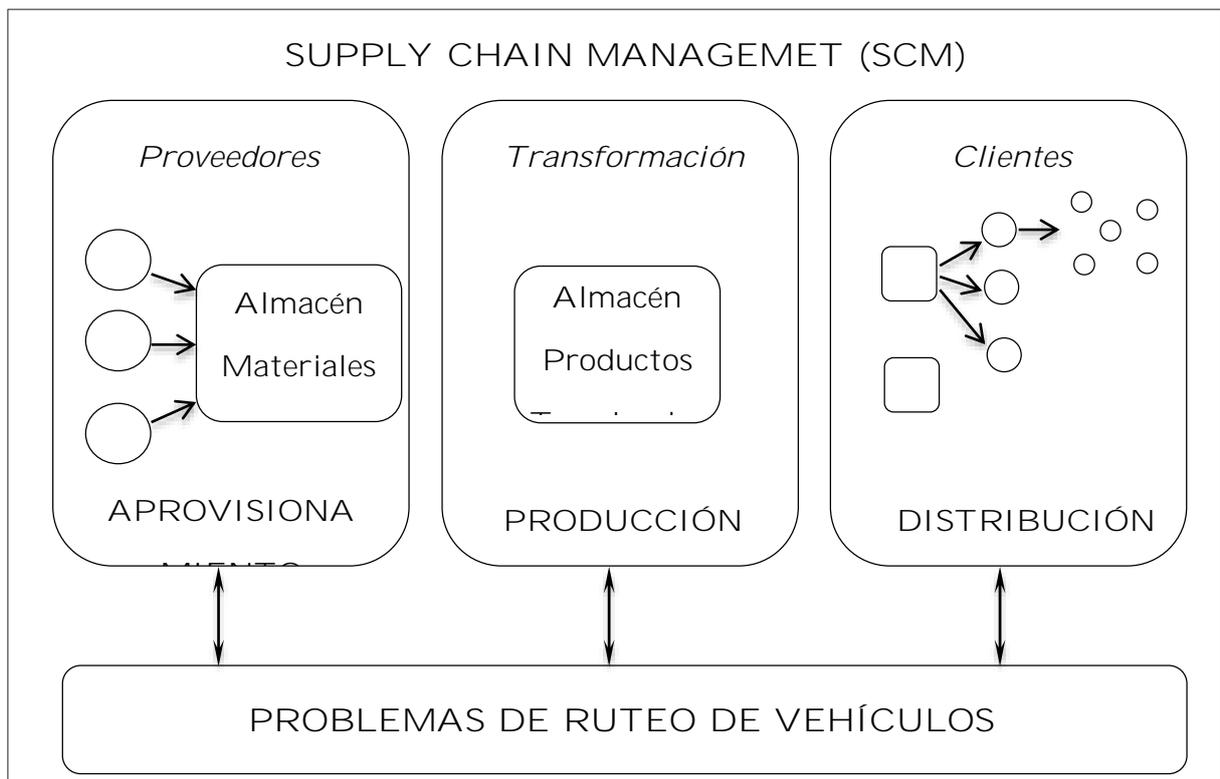
A medida que la ciencia ha ido profundizando el análisis de estos procesos logísticos, y modelando situaciones que contemplan de manera más completa la realidad de la complejidad logística, se ha observado que con mucha frecuencia se presentan problemas de optimización combinatoria que son en su mayoría NP-hard. Es decir, de una elevada complejidad computacional, y que requieren de técnicas que puedan resolver este tipo de problemas de gran tamaño y dificultad.

En los últimos años, se ha demostrado la gran capacidad de adaptación y eficiencia de las técnicas metaheurísticas para resolver éste tipo de problemas NP-hard. Estas técnicas algorítmicas, no garantizan la resolución óptima de un problema pero producen soluciones de calidad aceptable. Por otro lado, se observa en resultados obtenidos en varios trabajos, que una metaheurística puede superar a otra en la resolución de un problema, pero cambiando ciertas características del problema sucede lo contrario. De esta manera no es posible realizar la afirmación de que una heurística sea superior a otra de forma general, y cada problema requiere del desarrollo, adaptación o mejo-

ra del algoritmo para poder resolver con mayor eficiencia el problema con toda su complejidad<sup>4</sup>.

La figura siguiente representa la relación entre los subsistemas logísticos en el marco de la gestión de la cadena de suministros SCM, y su relación con los problemas de ruteo y programación de vehículos.

Figura 5: VRP en la SCM



<sup>4</sup> Que no haya una sola técnica de búsqueda heurística que supere a las demás en todos los casos, es la principal implicación del *No Free Lunch Theorem* [161].

## 1. DEFINICIÓN DE PROBLEMAS DE RUTEO DE VEHÍCULOS

En base a la metodología propuesta para el correcto abordaje del presente trabajo, corresponde en este apartado, efectuar la definición del problema a resolver y sus diferentes formulaciones, para lo que se realizará previamente una revisión de las características relevantes del mismo. En este sentido, se desarrollará la descripción de las características típicas de los problemas relativos a la distribución entre depósito y clientes, considerando sus componentes principales, sus diferentes restricciones operacionales y los posibles objetivos a alcanzar en el proceso de optimización.

Los problemas de distribución física de mercaderías, forman un conjunto variado y complejo de casos, que muchos investigadores han intentado agrupar en base a sus características más relevantes. Pueden describirse de forma general, como la asignación de una ruta, compuesta de una secuencia de clientes, a cada vehículo de una flota, para repartir o recoger mercancías. Y son conocidos generalmente como problemas de ruteo de vehículos (*VRP: Vehicle Routing Problem*) o como problemas de programación de vehículos (*Vehicle Scheduling Problem*).

Una primera definición formal de este tipo de problemas fue hecha en 1959, en el artículo *The Truck Dispatching Problem* [66] en el que los autores Dantzig & Ramser lo separan del problema del agente viajero (*TSP, Travelling Salesman Problem*). En su definición, los autores destacan la necesidad de incluir restricciones de capacidad a la flota de vehículos, para cubrir  $n$  clientes con una demanda conocida. Estas restricciones implicaban la construcción de grupos de rutas, que estarían en función de la capacidad de cada vehículo. Esto reforzó la evidencia para separar este tipo de problemas del TSP, dada la explosión exponencial del número de combinaciones de posibles soluciones que surgían al incluir dichas restricciones.

El *Traveling Salesman Problem* (TSP) constituye la situación general y de partida para formular otros problemas de distribución más complejos pero más prácticos,

como el mencionado problema de ruteo de vehículos [67]. En el TSP se dispone de un sólo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo. Es decir, la ruta debe ser tal que minimice la distancia recorrida. Para  $n$  clientes, en un caso general, el número de rutas factibles que debe considerarse es  $(n - 1)!/2$  puesto que hay  $(n - 1)$  posibilidades para la primera ciudad después de la ciudad de residencia del agente,  $(n - 2)$  posibilidades para la siguiente ciudad y así sucesivamente. El denominador 2 surge porque cada ruta presenta una ruta inversa equivalente con la misma distancia (TSP simétrico) [68]. El problema pertenece al tipo de problemas NP-completo.

En el *Multiple Traveling Salesmen Problem* ( $m$ -TSP),  $m$  vendedores deben cubrir un número determinado de clientes, de forma que cada destino sólo se visita por uno de ellos. Cada ruta empieza en un depósito base que es también el final del recorrido. En este caso, se desea minimizar la suma de las distancias recorridas a lo largo de todas las rutas. El número de vendedores puede ser fijo o una variable de decisión. El problema se puede transformar fácilmente en un TSP añadiendo  $m$  copias del almacén y haciendo que los costos de desplazamiento entre estos puntos virtuales sean infinitos.

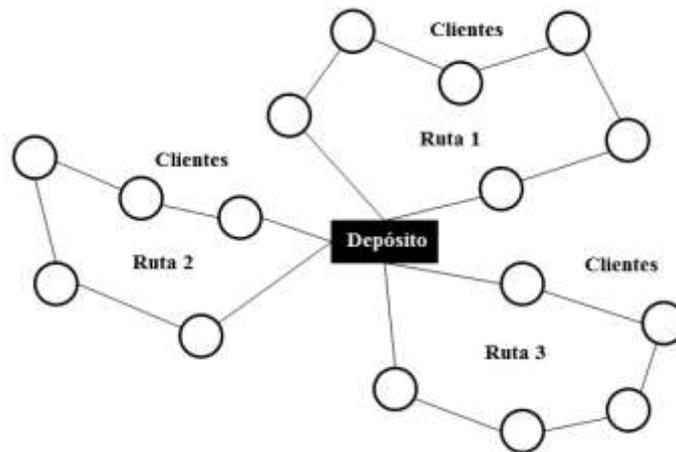
El problema de ruteo de vehículos (VRP), consiste en establecer un programa de rutas para atender un conjunto de clientes con ubicación geográfica y demanda conocida, para ello se cuenta con una flota de vehículos con restricciones de capacidad, de tipo homogénea y que parten desde un único punto de despacho o depósito<sup>5</sup>. El objetivo es minimizar el costo de realizar el servicio al cliente, definido en este caso como

---

<sup>5</sup> Depósito o almacén, serán usados de manera genérica en este trabajo, hasta que se especifique lo contrario. Y ello corresponderá en caso de darse especificaciones respecto del escalonamiento del sistema logístico que se referencie.

el transporte y la entrega de la mercadería. Es decir, el *Vehicle Routing Problem* (VRP), es una generalización del *m-TSP* donde existe una demanda asociada a cada cliente, depósitos dispersos geográficamente y una capacidad determinada de transporte para cada uno de los vehículos [69]. Muchos autores lo han llamado *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), debido a que el total de la demanda de las ciudades visitadas en una ruta no debe superar la capacidad del vehículo [70]. Un ejemplo esquemático de una solución de este tipo de problemas se ve en la siguiente figura.

Figura 6: Esquema de una solución a un CVRP



Desde esa primera definición de 1959 del VRP, han pasado décadas de investigación en esta materia y han surgido diferentes variantes del problema, que han acercado el abordaje del mismo a la compleja problemática logística que se da en la realidad.

La exploración de las definiciones de las variantes más conocidas del VRP, permite comparar antecedentes al presente trabajo y entender con mayor profundidad la problemática estudiada.

### 1.1. Clasificación del VRP

Con el objeto de facilitar la definición del problema específico bajo estudio y de revisar las variaciones más conocidas del VRP, se utiliza la metodología propuesta por

Eksioglu Volkan y Reisman [71]. Estos autores clasifican las características principales de las investigaciones acerca de VRP en cinco grandes grupos a saber:

- Tipo de estudio
- Caracterización del escenario del problema
- Caracterización física del problema
- Características de la información
- Características de los datos

Esto permite identificar el problema estudiado dentro de las variantes del VRP. En la siguiente tabla se presenta la clasificación de la literatura del VRP desarrollada por los mencionados autores:

Tabla 2: *Clasificación de la literatura en VRP [71]*

1.	Tipo de estudio	1.1.	Teóricos		
		1.2.	Métodos aplicados	1.2.1.	Métodos exactos
				1.2.2.	Métodos heurísticos
				1.2.3.	Simulación
				1.2.4.	Métodos de solución en tiempo real
		1.3.	De aplicación documentada		
1.4.	Encuesta, revisión o investigación objetiva				
2.	Caracterización del escenario	2.1.	Número de paradas en la ruta	2.1.1.	Conocida (Determinista)
				2.1.2.	Parcialmente conocida, parcialmente probabilística
		2.2.	Restricciones de carga dividida	2.2.1.	División permitida
				2.2.2.	División no permitida
		2.3.	Cantidad de mandada por el	2.3.1.	Determinista
				2.3.2.	Estocástica

CAPÍTULO III. PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

	cliente	2.3.4.Desconocida
2.4.	Tiempo de solitud de nuevos clientes	2.4.1.Determinista
		2.4.2.Estocástica
		2.4.4.Desconocida
2.5.	Tiempos de espera por servicios a domicilio	2.5.1.Determinista
		2.5.2.Dependiente del tiempo
		2.5.3.Dependiente del tipo de vehículo
		2.5.4.Estocástica
		2.5.5.Desconocida
2.6.	Estructura de ventanas temporales	2.6.1.Ventanas de tiempo flexibles
		2.6.2.Ventanas de tiempo rígidas
		2.6.3.Mixto
2.7.	Horizonte temporal	2.7.1.Un sólo periodo
		2.7.2.Múltiples periodos
2.8.	Con viajes de regreso ( <i>Backhauls</i> )	Nodos con requerimientos de 2.8.1.carga y descarga simultáneamente.
		Nodos con requerimiento de servicio de ida o de retorno, pero no ambos 2.8.2.vicio de ida o de retorno, pero no ambos
2.9.	Restricciones de cobertura de nodos o rutas específicas	2.9.1. Restricciones de prioridad y enganche
		2.9.2. Restricción de subconjuntos de cobertura
		2.9.3.Restricciones de asignación
3.	Características físicas del problema	3.1. Diseño de red 3.1.1.Red direccionada
		3.1. transporte 3.1.2.Red no direccionada
		3.2. Localización de 3.2.1.Clientes en nodos

	direcciones (clientes)	3.2.2.Casos de ruteo en arcos
3.3.	Ubicación geo- gráfica de los clientes	3.3.1. Urbanos (Dispersos con un patrón) 3.3.2.Rural (Dispersos aleatoriamente) 3.3.3.Mixto
3.4.	Número de puntos de origen	3.4.1.Un sólo origen 3.4.2.Múltiples orígenes
3.5.	Número de puntos de carga y descarga (depósitos)	3.5.1.Un sólo depósito 3.5.2.Depósitos múltiples
3.6.	Tipos de ventanas temporales	3.6.1.Restricción en los clientes 3.6.2.Restricción en caminos 3.6.3.Restricción en depósitos 3.6.4. Restricción en vehículos o conductores
3.7.	Número de vehículos	3.7.1.Exactamente $n$ vehículos 3.7.2.Más de $n$ vehículos 3.7.3.Número de vehículos ilimitado
3.8.	Restricción de capacidad de vehículos	3.8.1.Vehículos con capacidad limitada 3.8.2. Vehículos sin limitaciones de capacidad
3.9.	Vehículos homogéneos	3.9.1.Vehículos iguales 3.9.2.Vehículos para cargas específicas 3.9.3.Vehículos heterogéneos 3.9.4. Vehículos para algunos clientes específicos
3.10.	Tiempo de	3.10.1.Determinista

*CAPÍTULO III. PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS*

	entrega	3.10.2. Definida por función
		3.10.3. Estocástico
		3.10.4. Desconocido
		Depende del tiempo de transporte
	3.11.1.	
		3.11.2. Depende de la distancia
		3.11.3. Depende del vehículo
	3.11.4.	Depende de la operación
		3.11.5. Depende de la demora
		Por peligro implícito o riesgo
	3.11.6.	relacionado
<hr/>		
4.	Características de la información	4.1. Evolución de la información
		4.1.1. Estática
		4.1.2. Parcialmente dinámica
		4.2.1. Determinista (conocida)
	4.2. Calidad de la información	4.2.2. Estocástica
		4.2.3. Pronósticos
		4.2.4. Desconocida (en tiempo real)
	4.3. Disponibilidad de la información	4.3.1. Local
		4.3.2. Global
	4.4. Procesamiento de la información	4.4.1. Centralizada
		4.4.2. Descentralizada
	<hr/>	
5.	Características de los datos	5.1.1. Datos del mundo real
		5.1.2. Datos ficticios
		5.1.3. Ambos, reales y ficticios
	5.2. Sin uso de datos	

## 1.2. Variantes del VRP

En base a la clasificación presentada en el punto anterior, se definirá de forma general algunas de las variaciones del VRP relevantes a los fines de la presente investigación. Con el objeto de construir a posteriori una definición más acertada del problema bajo estudio.

### 1.2.1. *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*

Como ya fue mencionado, el problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad (CVRP) es uno de los problemas básicos de ruteo de vehículos. Consiste básicamente en que a cada cliente se le debe enviar cierta cantidad de mercadería, conocida con anticipación, desde un único depósito. Para repartirla se dispone de un determinado número de vehículos con cierta capacidad de transporte, los cuales parten y llegan a un único depósito. Cada vehículo visita exactamente a un único cliente, y cada cliente debe ser visitado por un sólo vehículo, y la suma de las demandas de los clientes visitados por un vehículo no debe exceder la capacidad del mismo. El objetivo de este tipo de problemas suele ser minimizar el costo total, donde dicho costo se puede ver como una función del tiempo o la distancia total recorrida, o bien minimizar el número de vehículos a utilizar [72].

### 1.2.2. *Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)*

Variante del CVRP que se define considerando restricciones temporales conocidas para el servicio o abastecimiento de cada cliente. Existen diversos subtipos y sus combinaciones de este tipo de problemas ya que pueden definirse ventanas de tiempo para diferentes momentos del servicio. Los casos más conocidos pueden resumirse en: restricción de tiempo conocida para la llegada a los clientes; restricción de tiempo conocida para el recorrido del camino hasta el cliente; restricción de tiempo conocida para la llegada a los depósitos de carga; restricción de tiempo conocida para el servicio activo de vehículos o conductores [73].

Posteriormente se profundizará el desarrollo conceptual de este tipo de problema de ruteo.

#### 1.2.3. *Open Vehicle Routing Problem (OVRP)*

Este problema es una variante del CVRP que se enfoca en el manejo de vehículos externos a la compañía. Por tal motivo, cambia la estructura de costos y la programación dado que en general no se contempla el viaje de regreso [74].

#### 1.2.4. *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HFVRP)*

Es una variación del CVRP que considera una flota de vehículos heterogénea. Es decir con diferentes capacidades y formas para cargas de diferentes tipos, como carga suelta o extra dimensionada entre otras [75].

#### 1.2.5. *Multi Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP)*

Problema definido como una variante del CVRP que considera múltiples depósitos o almacenes de carga con distintas ubicaciones geográficas [76].

#### 1.2.6. *Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB)*

Este problema es una generalización del CVRP en la que se permite desarrollar cargas y descargas en las instalaciones de los clientes. Hay dos modalidades, la conocida como VRPB que considera que existen puntos de entrega desde el almacén y otros de recolección hacia el almacén durante el viaje de regreso. Pero no se recoge mercadería hasta que no finalicen las entregas.

Por otro lado, está la conocida como *Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups (VRPSDP)*, que considera que existen puntos de entrega y otros de recolección hacia el almacén, pudiendo coincidir ambos simultáneamente. En este caso se permite la entrega y la recolección mientras no se viole la capacidad del vehículo. Es decir, los bienes son entregados desde el depósito al cliente, y bienes adicionales son cargados en las instalaciones del cliente y son llevados de regreso al de-

pósito [77]. Normalmente éste tipo de planteo responde a la necesidad de transporte de regreso con material de empaque para cumplir con la logística inversa.

#### *1.2.7. Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP)*

Definido como otra variante del CVRP, este problema consiste en permitir que algunos clientes puedan solicitar el servicio en varios momentos durante un período de tiempo. Así, primero los clientes se asignan a algún patrón de servicio (por ejemplo, clientes requieren tres visitas semanales, se podrían asignar a un patrón de servicio de lunes, miércoles y viernes), y luego se resuelve un VRP para cada día del período de tiempo para todos los clientes programados en ese día. Y el objetivo es minimizar la distancia total recorrida por la flota en todos los días del período de tiempo [78].

#### *1.2.8. Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP)*

Problema que consiste en una variante del CVRP clásico, pero con el objetivo de minimizar el tiempo de las rutas y no el costo de las mismas que normalmente depende de la distancia recorrida por los vehículos [79]. En un entorno urbano con congestión, las velocidades no son constantes y el tiempo de viaje entre dos puntos por lo general no es una función sólo de la distancia recorrida. La densidad del tráfico varía y causa fluctuaciones en la velocidad de desplazamiento y en los tiempos de viaje. Esto puede causar considerables diferencias en los tiempos de viaje durante horas pico y horas no pico. Para tener en cuenta estas variaciones, el tiempo de viaje entre dos puntos puede representarse por medio de una función determinista de la distancia entre dos puntos y también de la hora del día en la que se produce el viaje.

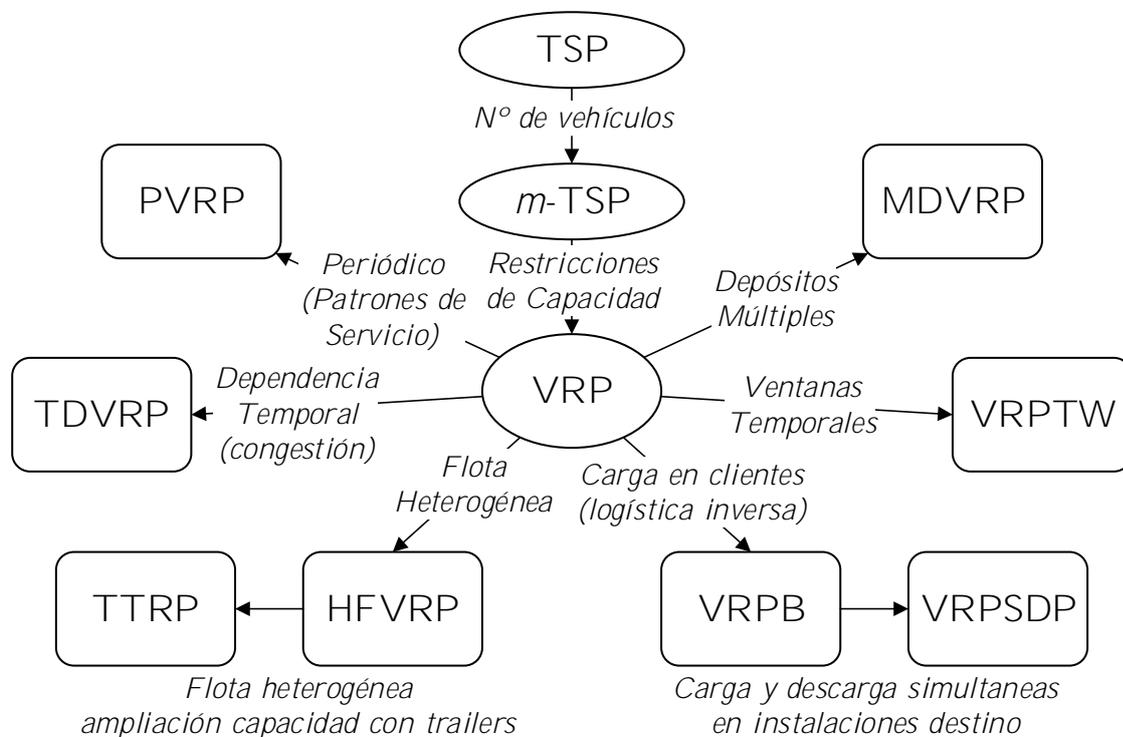
#### *1.2.9. Truck and Trailer Routing Problem (TTRP)*

Este problema de ruteo de vehículos, consiste en la atención de clientes con una flota de vehículos de transporte heterogénea, en la que la capacidad de los camiones se incrementa con un tráiler [80]. Esto implica la consideración de dos restricciones: la primera y más representativa se define por las instalaciones de clientes con espacio de

maniobra limitado, lo que restringe la posibilidad de prestación del servicio con el tráiler enganchado al vehículo. La otra restricción, se contempla en las limitaciones en las calles para el desarrollo de este tipo de transportes con vehículos extra dimensionados. Normalmente existe regulación a contemplar al respecto.

A continuación, se presenta esquemáticamente las variantes del problema de ruteo de vehículos consideradas en este apartado y sus relaciones.

Figura 7: Variantes de VRP



Todos estos problemas son difíciles de resolver debido al crecimiento exponencial de las soluciones en relación con el número de clientes. De hecho, sólo algunos problemas VRPTW de hasta 50 nodos han podido calcularse mediante métodos exactos. En estas circunstancias sólo es posible aplicar algoritmos de aproximación que proporcionen soluciones viables que sean razonables.

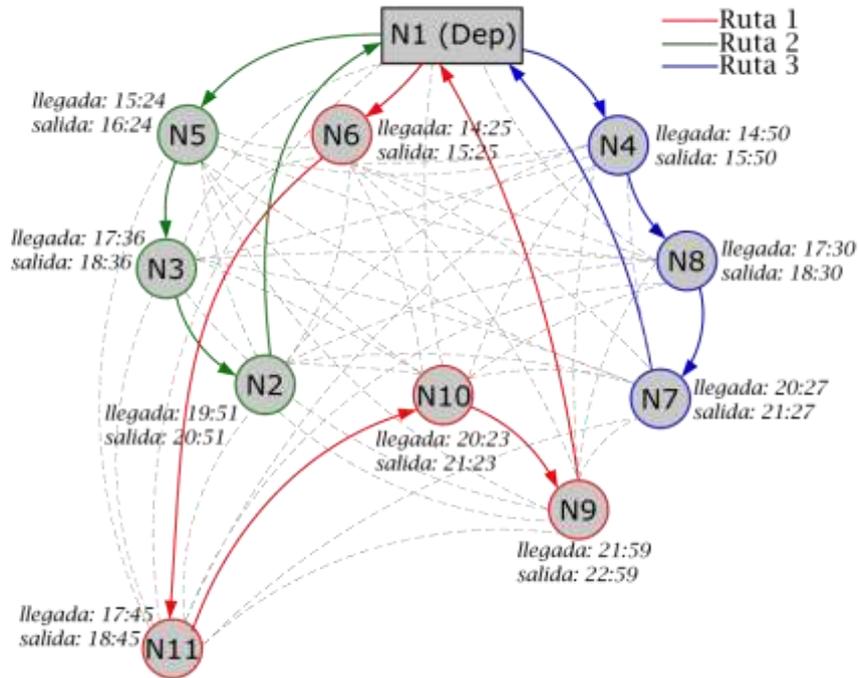
### 1.3. El problema de ruteo de vehículos capacitados con restricciones en el horario de servicio CVRPTW

Como ya se mencionó en la sección anterior, existen muchas variantes del CVRP y una de las variantes más importantes es el problema de ruteo de vehículos con ventanas temporales (VRPTW). Dentro de los subtipos del VRPTW, el más relevante a los fines del presente trabajo, es el caso en el que las ventanas de tiempo se asocian a los posibles intervalos de servicio de descarga de mercaderías en las instalaciones de los clientes.

El problema VRPTW se plantea de la siguiente manera: El problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo consiste en el diseño de un conjunto de rutas de mínimo costo, con punto de origen y finalización en un depósito central, para una flota de vehículos que da servicio a un conjunto de clientes con demandas conocidas. Los clientes deben asignarse exactamente una vez a los vehículos de tal manera que no se excedan las capacidades del vehículo. El servicio a un cliente debe comenzar dentro de la ventana de tiempo definida por el momento de inicio y finalización en que el cliente permite el inicio del servicio [81].

Es decir, cada cliente  $i$  es servido por un vehículo en un intervalo de tiempo definido o ventana de tiempo, denotada como  $[a_i; b_i]$ . Para que un vehículo pueda dar servicio a un cliente, éste debe llegar antes del inicio de la ventana de tiempo o dentro de la misma, pero si llegara después del fin de la ventana de tiempo, entonces ya no es posible brindar el servicio. Un ejemplo esquemático de una solución de este tipo de problemas se ve en la siguiente figura.

Figura 8: Esquema de una solución a un CVRPTW



A su vez, las ventanas temporales pueden ser “hard” o “soft” [82]. En el caso de ventanas temporales “hard” si un vehículo llega temprano, se le permite esperar hasta que el cliente esté listo para iniciar el servicio, pero no se permite que un vehículo llegue a un nodo después del límite superior determinado para iniciar el servicio. En el caso de ventanas temporales “soft” la restricción de ventana de tiempo puede ser violada a un costo determinado.

En el presente trabajo nos enfocaremos en la variante de VRPTW con ventanas de tiempo “hard”, en la que debe cumplirse estrictamente las restricciones correspondientes a las ventanas temporales.

## CAPÍTULO IV. MODELADO

## 1. DESCRIPCIÓN FORMAL DEL MODELO DEL VRPTW

Es reconocida la importancia del VRPTW entre los problemas de distribución física de mercancías, y como tal, es uno de los problemas más estudiados de este tipo en la literatura. En el presente marco teórico se sigue la conocida formulación matemática del VRPTW propuesta por Jesper Larsen [83] con algunas adaptaciones, dado que la problemática objeto de estudio del presente trabajo considera la distribución en entornos urbanos, por lo que se considerarán características del TDVRP.

El modelo del problema VRPTW referenciado en el párrafo anterior, se define para una flota homogénea de vehículos  $V$  con base en el depósito, para un conjunto de clientes  $C$  y se representa mediante un grafo dirigido  $G(V,A)$ .

$N$  representa el conjunto de todos los nodos. El grafo contiene  $|C| + 2$  nodos, de los cuales los clientes corresponden a  $1, 2, \dots, n$  y el depósito se representa con el nodo  $0$  (salida del depósito) y  $n+1$  (llegada al depósito). Por lo tanto el conjunto de nodos viene dado por  $N = \{0, n+1\} \cup \{1, 2, \dots, n\}$ , donde el conjunto  $\{0, n+1\}$  son dos copias del nodo depósito y  $C = \{1, 2, \dots, n\}$  es el conjunto de clientes.

$A$  es el conjunto de todos los arcos, y representa las posibles conexiones entre los nodos. Los arcos no pueden terminar en el nodo  $0$  ni tampoco comenzar en el  $n+1$ . Todas las rutas (secuencias de nodos asignadas a cada vehículo) empiezan en  $0$  y terminan en  $n+1$ . Cada  $arco(i, j) \in A$  donde  $i \neq j$ ,  $i, j \in C$ , tiene asociado un tiempo de viaje  $t_{ij} \in T$ , donde  $T$  es la matriz de tiempos de viaje entre todos los clientes. Luego, para todo  $i \in C$ ,  $s_i \in S$  representa la duración del servicio en el nodo  $i \in C$ . Mientras  $S$  es el vector de tiempos de servicio de todos los clientes.  $Td$  es el vector de tiempos de viaje entre el depósito y cada uno de los nodos  $i \in C$ .

Cada vehículo  $k \in V$  se caracteriza por una capacidad de carga  $q$ .

Cada cliente  $i \in C$  presenta una demanda  $d_i$ , donde  $i \in C$ . Para cada uno de los clientes, el inicio del servicio debe realizarse en un intervalo de tiempo, denominado *ventana de tiempo*  $[a_i, b_i]$ , donde  $i \in C$ . El vehículo puede llegar antes de  $a_i$  al nodo  $i$ , pero no será atendido antes, deberá esperar al momento  $a_i$ . Si el vehículo llegara al nodo  $i$  después de  $b_i$ , habrá perdido la oportunidad para realizar el servicio, por lo cual no es aceptable.

El depósito también tiene una ventana temporal  $[a_0, b_0]$  que marca los límites en la salida y el retorno de los vehículos al depósito. Los vehículos no pueden salir del depósito antes de  $a_0$  y deben estar de vuelta en el depósito antes o en el momento  $b_0$ . También se conoce a  $[a_0, b_0]$  como *horizonte de programación*.

Se puede admitir, sin pérdida de generalidad, que  $a_0=0$ ; es decir, que las rutas comienzan a la hora 0. También que todos los datos (por ejemplo  $q_i$ ,  $c_{ij}$ ,  $t_{ij}$ ,  $a_i$  y  $b_i$ ) son números enteros conocidos y no negativos. Esto no es más que asumir que el modelo es determinístico. Los tiempos  $t_{ij}$  se asumen estrictamente positivos. También se supone que la matriz de tiempos de viaje  $T$ , satisfacen la desigualdad triangular.

El VRPTW considerado consiste en minimizar el tiempo total, asignando a cada cliente un vehículo y a cada vehículo una secuencia de clientes (ruta). Todo esto sujeto a las restricciones definidas anteriormente. Es decir, determinar un conjunto de rutas de tiempo mínimo, una para cada vehículo, de manera que se sirva exactamente una sola vez a cada cliente, cada ruta comience y termine en el depósito y se respeten las restricciones de capacidad de cada vehículo y las de ventanas temporales de cada cliente.

### 1.1. Variables de decisión

El modelo tiene dos conjuntos de variables de decisión,  $X$  e  $Y$ .

Para cada arco  $(i, j)$ , donde  $i \neq j$ ,  $i \neq n+1$ ,  $j \neq 0$ , y cada vehículo  $k$  definimos la variable binaria  $x_{ijk}$  como:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 0 & \text{si el vehículo } k \text{ no viaja directamente desde el nodo } i \text{ al nodo } j \\ 1 & \text{si el vehículo } k \text{ viaja directamente desde el nodo } i \text{ al nodo } j \end{cases}$$

La variable de decisión  $y_{ik}$  se define para cada nodo  $i$  y para cada vehículo  $k$ , e indica el momento en que el vehículo  $k$  empieza a dar servicio al cliente  $i$ . En el caso de que el vehículo  $k$  no preste servicio al cliente  $i$ , la variable  $y_{ik}$  no significa nada. Por otro lado, se supone que  $y_{0k}=0$ , para  $\forall k$ , y que  $y_{n+1,k}$  denota la llegada del vehículo  $k$  a la base.

## 1.2. Modelo matemático del VRPTW

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} \cdot x_{ijk} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq q \quad \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C, \forall k \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$x_{ijk} \cdot (y_{ik} + t_{ij} - y_{jk}) \leq 0 \quad \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (7)$$

$$a_i \leq y_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in N, \forall k \in V \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (9)$$

Donde (1) es la función objetivo a minimizar, el tiempo total. La restricción (2) asegura que cada cliente sea visitado una sola vez por un vehículo.

La inecuación (3) requiere que no se exceda la capacidad máxima de los vehículos. El conjunto de restricciones (4), (5) y (6) son ecuaciones de flujo que garantizan que el vehículo salga del nodo 0 una sola vez, que abandone cualquier nodo  $i \in C$  si y sólo si antes ha entrado en él, y al final vuelva al nodo  $n+1$ . Las inecuaciones (7) establecen que cuando el vehículo  $k$  viaja de  $i$  a  $j$  no pueda llegar a  $j$  antes de  $t_{ij} + y_{ik}$ . El conjunto de restricciones (8) aseguran que se respeten todas las ventanas temporales. Las restricciones (9) garantizan que las variables  $x_{ijk}$  sean enteras. Por último, cuando en algún caso la demanda particular de un cliente supere la capacidad del vehículo, el esquema teórico mantiene su validez simplemente creando nuevos clientes ficticios con la misma localización y horarios de servicio, pero con su demanda dividida.

## 2. COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL

La optimización en general implica hallar el valor máximo o mínimo de una cierta función definida en un dominio. En los problemas de optimización combinatoria, las variables de decisión son enteras y, por lo general, el espacio de soluciones está formado por ordenaciones o subconjuntos de números naturales. Este tipo de problemas se presenta con asiduidad en la toma de decisiones inherentes a la distribución física y el transporte. La importancia práctica de estos problemas ha hecho que fueran objeto de importantes esfuerzos de investigadores para hallar un método de solución eficiente. Por esto, el área de optimización combinatoria resulta tan atractiva, ya que cualquier contribución en este ámbito tiene repercusiones directas en la industria.

La teoría de la complejidad computacional, es una rama de la teoría de la computación, que estudia los recursos (tiempo, espacio, etc.) utilizados durante el cálculo, para resolver un problema. La complejidad computacional de un algoritmo para resolver un problema se mide en función del tiempo y espacio que necesitaría para obtener una respuesta del problema para una entrada cualquiera del mismo [84].

Desde este punto de vista, si un cálculo requiere más tiempo que otro, se dice que tiene una mayor complejidad temporal. Y si por ejemplo, requiere más espacio, se habla de una mayor complejidad espacial.

Desde esta manera, los problemas se pueden clasificar según su complejidad, es decir según los requerimientos de recursos para resolverlos. Existe una escala para medir la complejidad, que incluye, entre otras:

- *Problemas clase P*

Un problema pertenece a la clase P si existe un algoritmo determinista que lo resuelva en tiempo y espacio polinomial (el tiempo cálculo y el espacio crecen de forma polinómica ante incrementos lineales en el tamaño del problema o entrada).

Se dice que un algoritmo es determinista, si para cada entrada del problema nos proporciona una solución [84].

- *Problemas clase NP*

Un problema pertenece a la clase NP si existe un algoritmo no determinista que lo resuelva en tiempo y espacio polinomial. Al contrario de lo que ocurre con los algoritmos deterministas, los algoritmos no deterministas no resuelven el problema, sino que permiten comprobar si cierta estructura asociada a una entrada determinada del problema es realmente una solución de dicha entrada [84].

- *Problemas clase NP-Completo:*

Un problema es NP-Completo, si no existe un algoritmo que lo resuelva en tiempo polinomial. Son un conjunto de problemas NP difíciles de resolver.

- *Problemas clase NP-difícil*

Conjunto de problemas que están dentro de la clase NP-Completo, y que son los más difíciles de resolver dentro de esa clase.

El VRP es clasificado como un problema de tipo *NP-difícil* [85]. Los algoritmos exactos sólo pueden resolver problemas relativamente pequeños de este tipo [86]. Luego, el VRPTW es considerado un problema *NP-difícil* en sentido fuerte, pues contiene como un caso particular al VRP. Lo que indica que es difícil resolver de forma óptima incluso instancias pequeñas, con un esfuerzo computacional razonable [87]. Es decir, no es solucionable de forma óptima por métodos exactos a partir de un tamaño determinado (hasta 50 aproximadamente) [88], dado que esta clase de métodos combinados con la capacidad de los procesadores existentes, podrían tomar un tiempo sustancial en resolver este tipo de problemas. De hecho, solo encontrar una solución viable para el VRPTW con un tamaño de flota fijo, ya es un problema NP-completo ([89] en [72]).

Por lo anterior el presente trabajo se enfoca en la utilización de un algoritmo de aproximación para la obtención de una solución viable del problema bajo estudio, que esté lo suficientemente cerca de la solución óptima; particularmente se utilizará un algoritmo evolutivo, más específicamente un algoritmo genético.

## CAPÍTULO V. RESOLUCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

## 1. METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN

En este apartado, primero se realizará una introducción mencionando algunos métodos de solución al problema de ruteo de vehículos propuestos en la literatura. De manera de poder armar un marco en el cual ubicar la herramienta utilizada en el presente trabajo. Posteriormente se profundizará en dicha herramienta.

## 1.1. Introducción a la resolución del problema

La optimización en general, implica hallar el valor máximo o mínimo de una cierta función, definida en un dominio. Muchos de los problemas prácticos de la vida real, como los citados en el apartado previo, implican determinar la mejor manera posible de agrupar, ordenar o asignar un conjunto finito de objetos que cumplan ciertas condiciones o limitaciones. En este tipo de problemas, conocidos como *problemas de optimización combinatoria*, las variables de decisión son enteras y, por lo general, el espacio de soluciones está formado por ordenaciones o subconjuntos de números naturales.

En la literatura se encuentra una gran cantidad de métodos alternativos de solución para esta familia de problemas, que algunos autores [86] [90] clasifican en dos grandes familias: Algoritmos Exactos y Algoritmos Aproximados

*1.1.1. Algoritmos Exactos*

Los algoritmos exactos devuelven una solución óptima siempre que se los ejecute hasta su terminación, el problema es que en la práctica, el tiempo necesario para esta terminación puede ser prohibitivo [91]. La complejidad computacional de los problemas de ruteo de vehículos capacitados, hace que sólo los casos con pocos clientes puedan ser resueltos por métodos exactos.

Los métodos exactos generalmente utilizan alguna relajación del problema y un esquema de ramificación y acotamiento como en el método Branch and Bound [92]. También, se han propuesto diversas implementaciones del método de Generación de Columnas, que han resultado especialmente efectivas para problemas con ventanas de tiempo. Por otro lado, se han presentado también algoritmos basados en Programación Dinámica [93], que consiguieron resolver problemas de hasta 15 clientes. En los trabajos de Laporte y Norbert [94] y de Laporte [86] se puede encontrar una revisión de métodos exactos utilizados para resolver problemas de ruteo de vehículos.

Entre los trabajos más destacados que han estudiado el VRPTW desde un enfoque exacto están [95], [96], [81], [97], [83] y [98].

### *1.1.2. Algoritmos de Aproximación*

Las heurísticas o algoritmos de aproximación surgen como alternativa ante los elevados tiempos de ejecución de los métodos exactos. Estos procedimientos computacionales se basan en distintas ideas sobre cómo buscar buenas soluciones, ya sean inspiradas en sistemas naturales, en la experiencia e intuición del autor [91].

Con el objeto de solucionar problemas de ruteo de vehículos se han propuesto diferentes tipos de algoritmos de aproximación. De forma general éstos se pueden clasificar en dos grandes clases. Las heurísticas clásicas, desarrolladas entre 1960 y 1990, y las metaheurísticas con un desarrollo importante en las últimas décadas.

#### *1.1.2.1 Algoritmos heurísticos clásicos*

Los algoritmos heurísticos clásicos, fueron un campo muy productivo en la resolución de problemas combinatorios como los de ruteo de vehículos. Son procedimientos simples que realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda y dan soluciones de calidad aceptable, no necesariamente óptimas, en tiempos de cálculo generalmente moderados [88]. Las soluciones obtenidas con este tipo de algoritmos pueden, en ge-

neral, ser mejoradas utilizando métodos de búsqueda más sofisticados, pero incurriendo en mayores tiempos de ejecución.

Las pruebas de estos algoritmos en aquellos casos en donde es posible (por su complejidad) resolverlos exactamente o en los que se dispone de cotas muy ajustadas, arrojan un alejamiento del costo óptimo o cota inferior al costo de la solución aproximada no superior al 1% [99]. Por otro lado, se observa en resultados obtenidos en varios trabajos, que una heurística puede superar a otra en la resolución de un problema, pero cambiando ciertas características del problema sucede lo contrario. De esta manera no es posible realizar la afirmación de que una heurística sea superior a otra de forma general.

Estas heurísticas pueden clasificarse según Zeng [100] en tres grandes categorías. Heurísticas Constructivas, Heurísticas de dos fases y Algoritmos de mejora o búsqueda local.

- *Algoritmos Heurísticos Constructivos*

La solución se crea agregando componentes repetidamente a una solución vacía hasta que se complete. En general se clasifican en:

- *Heurísticos Constructivos de Combinación:*

Se crea inicialmente una solución con una ruta para cada cliente y posteriormente se combinan repetidamente las rutas.

- *Heurísticos Constructivos de Inserción:*

Inician en una solución con rutas vacías y en cada paso insertan un cliente nuevo a las rutas existentes.

La selección del componente a modificar en cada caso, se realiza en base a una estrategia golosa, se elige el mejor componente disponible en el momento de la selección.

Con este criterio de clasificación, a continuación se referencian los algoritmos heurísticos constructivos más conocidos para resolver los problemas de ruteo de vehículos.

En primer lugar, el algoritmo de Clarke-Wright [101], también conocido como el algoritmo de los ahorros. En el que el número de vehículos no está determinado, y el método inicia con rutas que contienen el depósito y otro vértice, en cada paso se van combinando rutas si es que se genera el mayor ahorro posible (Ver [102] donde se revisan otros algoritmos que utilizan el criterio del ahorro para la combinación de rutas [103] [104] [105]).

En segundo lugar, se referencian dos conocidos algoritmos de inserción secuencial. El algoritmo de Mole y Jameson [106], que usa como criterio de selección e inserción la evaluación de la distancia que resulta de insertar un cliente  $k$  en una ruta que no estaba incluido en la ruta entre dos clientes consecutivos  $i$  y  $j$ . Y el algoritmo de Christofides, Mingozzi y Toth [107], en el que en un primer paso se realiza un procedimiento de inserción secuencial utilizando un criterio de peso, para la construcción de un conjunto de rutas factibles; en un segundo paso se usa un procedimiento de inserción en paralelo que consiste en mejorar cada ruta parcial que se va construyendo con un procedimiento de búsqueda local (ver [102] donde se desarrolla de forma más completa éste algoritmo).

Es importante mencionar dos diferencias significativas en la forma en que pueden implementarse las heurísticas constructivas. Una forma de implementación Secuencial, en la que se trabaja sobre una ruta a la vez y cuando ya no es posible realizar ningún cambio se continúa con la siguiente. Y una forma de implementación en Paralelo, en la que se trabaja sobre todas las rutas simultáneamente y en cada iteración se modifica la ruta que más convenga. Generalmente esta última

forma de implementación requiere de un mayor esfuerzo computacional, pero también otorgan mejores resultados.

Entre los ejemplos de heurísticas constructivas aplicadas al VRPTW, se encuentran en los trabajos de Solomon [108] y de Potvin y Rousseau [109]. El primero propone varias heurísticas de inserción secuencial basadas en funciones de costos que incorporan tanto distancias como tiempos. El segundo, adoptan un procedimiento de construcción de rutas en paralelo que mejora el algoritmo de Solomon (1987) cuando los clientes se distribuyen de forma aleatoria por el espacio, dada la miopía de los enfoques secuenciales en esos casos. Sin embargo, este último funciona mejor que el propuesto por Potvin y Rousseau (1993) cuando los clientes se encuentran agrupados por zonas.

– *Heurísticas de dos fases*

Los métodos que proceden en dos fases para la resolución de problemas de ruteo de vehículos, descomponen el problema en sus dos componentes naturales. Agrupar clientes en rutas factibles y construir las rutas. Luego, puede dividirse los métodos de dos fases en dos clases, según qué paso se realiza primero:

*Métodos Asignar Primero - Rutear Después (Cluster-first, route-second)*

En este tipo de heurística en dos fases primero se busca generar grupos de clientes, también llamados clusters, que estarán en una misma ruta en la solución final. Luego, para cada cluster se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad son consideradas en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada cluster no supere la capacidad del vehículo. Por lo tanto, construir las rutas para cada cluster es un TSP que dependiendo de la cantidad de clientes en el cluster, se puede resolver en forma exacta o aproximada. Pueden verse los casos más conocidos de este tipo de métodos aplicado al problema de ruteo de vehículos en [102].

*Método Rutear Primero - Asignar Después (Route-first, cluster-second)*

En estos métodos de rutear primero y asignar después [110] también se procede en dos fases. Primero se calcula una ruta que visita a todos los clientes resolviendo un TSP, en general esta ruta no respeta las restricciones del problema. Y luego se particiona en varias rutas, cada una de las cuales sí es factible. Los algoritmos más conocidos de este tipo aplicados al problema de ruteo de vehículos pueden verse en [102].

– *Algoritmos de mejora o búsqueda local*

Estos algoritmos aplicados al problema de vehículos, parten de una solución inicial e intentan mejorarla realizando pequeños cambios como reubicar o intercambiar clientes, invertir secuencias de clientes, entre otros. Cada método define un vecindario que contiene a aquellas soluciones que se pueden obtener a partir de la actual. En ese vecindario se busca una mejor solución y al encontrarla, ésta reemplaza a la actual. La búsqueda se repite hasta que se llega al punto en que ya no se puede mejorar la solución actual. Se dice entonces que se ha llegado a un óptimo local.

Los movimientos para mejorar una ruta factible suponen cambios simples, se basan normalmente en intercambios de arcos de la solución actual. Estas permutas pueden ocurrir dentro de una ruta o entre varias de ellas. Los movimientos más utilizados en la literatura son: Los movimientos dentro de una ruta, los movimientos entre dos rutas, los movimientos entre tres rutas y otros movimientos.

Entre los trabajos más destacados de la literatura que aplican éstos métodos al problema del VRPTW, se destacan [111], [89], [112], [113], [114], [115], [116], [117] y [118].

### 1.1.2.2 Algoritmos metaheurísticos

En las últimas dos décadas se han desarrollado una nueva generación de algoritmos de aproximación conocidos como metaheurísticas. Estos procedimientos permiten una mejor exploración del espacio de soluciones, en comparación con las heurísticas clásicas que finalizan una vez que se ha alcanzado un óptimo relativo. Exploran el espacio de soluciones posibles de un problema de forma inteligente, es decir intentan especializar la búsqueda de buenas soluciones en zonas prometedoras del espacio y descartar aquellas en las que es improbable encontrarlas. En este sentido, operan como procedimientos genéricos de exploración de espacios de soluciones con el objetivo de escapar a mínimos locales, para guiar a otras heurísticas subyacentes hacia espacios de soluciones de mayor calidad. Proporcionando tanto una estructura general como criterios estratégicos para desarrollar un método heurístico específico que ajuste a un tipo particular de problema.

La exploración más profunda en el espacio de búsqueda que permiten estos algoritmos aplicados a problemas de ruteo de vehículos, en general producen mejores resultados que las heurísticas clásicas, pero a costo de un mayor tiempo de procesamiento. A continuación se listan las metaheurísticas más conocidas que se han aplicado al problema de ruteo de vehículos, para profundizar en el apartado siguiente sobre la metaheurística de interés al presente trabajo.

- *Recocido Simulado (SA: Simulated Annealing)*
- *Recocido Determinístico (DA: Deterministic Annealing)*
- *Búsqueda Tabú (TS: Tabu Search)*
- *Búsqueda Dispersa (SS: Scatter Search)*
- *Búsqueda por Entornos Variables (VNS: Variable Neighborhood Search)*
- *Optimización basada en Colonias de Hormigas (ACO: Ant Colony Optimization)*

- *Procedimiento de Búsqueda Adaptativa Aleatorizada Avariciosa (GRASP: Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)*
- *Redes Neuronales (NN: Neural Networks)*
- *Algoritmos Evolutivos (GA: Evolutionary Algorithms)*

## 1.2. Algoritmos Evolutivos (AE)

El término Computación Evolutiva comprende una serie de técnicas para la resolución de problemas complejos, que emulan procesos naturales de evolución a través de modelos computacionales. Las implementaciones de estos modelos son los algoritmos evolutivos. Estos algoritmos, comprenden una serie de procedimientos computacionales inspirados biológicamente, en los principios de la teoría Neo-Darwiniana de la evolución natural [119].

En este apartado se profundizará el marco conceptual de los Algoritmos Evolutivos, y en especial el de los algoritmos genéticos, dado que como se comentó anteriormente este tipo de procedimientos computacionales son la herramienta algorítmica utilizada para resolver el problema objeto de estudio.

### 1.2.1. *Fundamentos biológicos*

El conjunto de técnicas computacionales que basan su funcionamiento en emular procesos evolutivos, fundamentados en la supervivencia de los individuos más aptos en una población, se denomina algoritmos evolutivos. El propósito de este tipo de técnicas computacionales es, dirigir una búsqueda estocástica haciendo evolucionar un conjunto de estructuras, seleccionando de modo iterativo las más adecuadas [120].

El fundamento biológico de los algoritmos evolutivos, surge de los principios de la teoría Neo-Darwinista de la evolución natural. Según estos principios, la vida en este planeta se puede explicar por un conjunto de procesos que actúan sobre, y dentro, de las poblaciones y especies: la *reproducción*, la *mutación*, la *competencia* y la *selección* [122]. En un sistema que se *reproduce* continuamente a sí mismo, man-

teniendo un cierto equilibrio, está garantizada la *mutación* [123]. Además, el hecho de contar con un espacio restringido para el desarrollo de la vida en este sistema, garantiza la existencia de la *competencia*. La *selección*, sería la consecuencia natural del exceso de organismos que han llenado el espacio de recursos disponibles. El resultado de la interacción de estos procesos estocásticos, de forma iterativa y a través de las generaciones, es la evolución [119].

El *proceso de evolución* puede ser visto como una búsqueda de los mejores individuos de entre un conjunto enorme de posibles candidatos, mediante una serie de transformaciones de la composición genética de las poblaciones, debidas principalmente a las interacciones entre los individuos y de estos con el ambiente.

Esta búsqueda realizada por la naturaleza, es robusta, en el sentido de que es capaz de localizar eficaz y eficientemente individuos de mejor adaptación en un espacio de búsqueda enorme y cambiante.

En este contexto, un *individuo* es un solo miembro de una población. Una *población*, es un grupo de individuos, entre los que se da una interacción permanente (por ejemplo para reproducirse). Cada individuo tiene rasgos visibles (observables), denominados en conjunto *fenotipo*. También tiene una composición genética, denominada *genotipo*. La relación entre estos dos conceptos consiste en que el genotipo da origen al fenotipo después de un proceso de desarrollo [119]. Por otro lado, el conjunto de informaciones genéticas que llevan todos los miembros de una población, se denomina *acervo génico*.

Una *especie*, es un conjunto de poblaciones de individuos, aislado reproductivamente de otras especies, que pueden reproducirse entre sí, y que ocupa un nicho específico en la naturaleza [124].

De esta manera, una población es una entidad genética abierta, es decir que puede intercambiar genes con otras poblaciones de la misma especie. Mientras que una especie es una entidad cerrada, es decir que no puede intercambiar genes con otras es-

pecies. Por lo tanto, se da cierta cantidad de transferencia genética entre poblaciones, y la probabilidad de esta transferencia aumenta, entre poblaciones estrechamente relacionadas espacial y genéticamente. Por esta razón, la *migración* entre grupos aislados o menos relacionados es un proceso muy importante, para reducir las diferencias entre esas poblaciones [125].

El fenómeno conocido como especiación, es una explicación a la aparición de una especie, y consiste en que un conjunto de individuos se aísla reproductivamente y además adquiere adaptaciones a su ambiente [126]. Es decir, si una subpoblación de una cierta especie se separa geográficamente de la población principal durante un tiempo suficientemente largo (muchas generaciones), sus genes divergirán.

En ecosistemas naturales se dan diferentes estrategias de supervivencia, llamadas nichos ecológicos [119]. Un *nicho ecológico* consiste en el ambiente limitado donde una especie es potencialmente capaz de sobrevivir y reproducirse. Es decir, dos especies pueden coexistir de manera estable, sin competir entre ellas, en un mismo ecosistema, si ocupan nichos diferentes (por ejemplo, una especie herbívora y otra insectívora). Pero, si dos especies comparten el mismo nicho ecológico en la misma zona geográfica habrá competencia, y a la larga, la especie más débil se extinguirá (localmente).

De esta manera, el proceso de evolución natural, consiste en el cambio de las características hereditarias de grupos de organismos a través de las generaciones, y ocurre como consecuencia de la interacción básica, y sostenida en el tiempo, de cuatro procesos elementales [125]:

- *Reproducción*: proceso mediante el que los individuos de una misma población generan descendencia. Puede ser asexual (un solo padre) o sexual (dos padres).
- *Mutación*: proceso que introduce modificaciones al azar en la información genética transmitida de padres a hijos. Se diferencian dos tipos, la mutación

génica que suele ser recurrente; y la reordenación cromosómica, que se considera en general un suceso muy raro y probablemente único.

- *Competencia*: consecuencia natural de que las poblaciones crezcan en un espacio finito de recursos.
- *Selección*: es el resultado de cualquier diferencia heredada que se manifiesta en la tasa de supervivencia o reproducción entre individuos portadores de diferentes genotipos (diferencias en eficacia biológica). Es decir, la diferente viabilidad y/o fecundidad de los individuos de una población, se traduce en un número diferente de descendientes (por lo tanto de genes) a la siguiente generación [125]. Consecuentemente, puede definirse la selección natural como, “el proceso por el que las formas de organismos en una población, que están mejor adaptadas al ambiente, incrementan su frecuencia relativamente a las formas menos adaptadas en un número de generaciones” [127].

### 1.2.2. Modelo general de un AE

El concepto darwiniano de evolución guiado por la selección natural, es aplicable a entidades que se replican como, por ejemplo, un ser vivo o un algoritmo evolutivo [125]. Combinando los conceptos biológicos de la *Genética* (representación y relaciones entre individuos) con el *proceso de selección natural* (aptitudes, estrategias de supervivencia., etc.) se fundamenta el modelo general en el cual se basan los algoritmos evolutivos.

En general, para resolver un problema utilizando una computadora, primero buscamos la secuencia de pasos que deben ejecutarse para resolverlo (el algoritmo). Luego, utilizando algún lenguaje de programación, se codifica esta secuencia de pasos en un conjunto de instrucciones que se han de ejecutar. En el caso de los algoritmos evolutivos, al buscar emular evolución natural su esquema general debe contar con:

- Una *población inicial*, creada aleatoriamente, de posibles soluciones del problema, correctamente representadas mediante individuos.

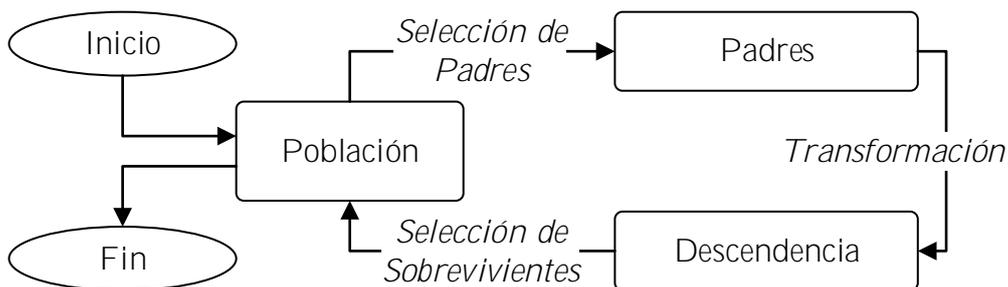
- Un *proceso de selección* de los mejores individuos, que serán los padres de la próxima generación. Basado de las medidas de calidad de cada individuo, conocida como valor de aptitud (o fitness).
- Un *proceso de transformación o reproducción* (cruce, mutación, etc.) para generar, a partir de los padres actuales, nuevos individuos candidatos a solución (descendientes). Que a su vez competirán con los anteriores para tener lugar en la población de la próxima generación.

Estos procesos se repiten hasta que se encuentra un candidato con calidad suficiente o se alcanza un límite de computo establecido previamente (satisfacción de una condición de paro).

Es importante destacar también, que la mayoría de estos procesos son estocásticos. Por ejemplo, durante la selección los mejores individuos no son elegidos de manera determinista, y por lo general incluso los individuos débiles tienen alguna oportunidad de convertirse en un padre o de sobrevivir.

A continuación se presenta el diagrama de flujo de un algoritmo evolutivo genérico, adaptado de [128].

Figura 9: Diagrama de flujo de un AE genérico



Como se tratará posteriormente, existen diferentes tipos de algoritmos evolutivos, pero todos siguen los lineamientos generales descritos en este apartado. Las diferencias entre ellos residen en una serie de cuestiones técnicas como en la forma de repre-

sentar un individuo por ejemplo [128]. Cuando se utilizan algoritmos evolutivos, la preocupación principal no es qué pasos conducirán a la solución del problema, sino más bien, determinar una buena representación de las soluciones.

### 1.2.3. Representación de los individuos de la población

Mediante el concepto de representación, se hace referencia a la vinculación de posibles soluciones en el contexto original del problema (*espacio fenotípico*), con el espacio de soluciones donde se realizará la evolución (*espacio genotípico*). Cualquier solución potencial a un problema debe poder ser especificada dando valores a una serie de parámetros. En este contexto, se requiere esclarecer la terminología utilizada, tomada de los fundamentos biológicos de los algoritmos evolutivos.

Un *cromosoma* es una estructura de datos que contiene una *cadena* de parámetros de diseño o genes [119], y representa un *individuo* de la *población*. Normalmente, es un arreglo o cadena de enteros donde cada posición es conocida como *gen*. Cada *gen* usualmente codifica el valor de un sólo parámetro o atributo de la solución del problema. El *valor* que puede tomar cada gen se conoce como *alelo* (por ejemplo, en representación binaria los alelos son 0 y 1), y la *posición* de un gen en el cromosoma, es conocida como *locus*.

Los objetos que forman posibles soluciones dentro del contexto del problema original, se los denomina *fenotipos*, mientras que su codificación, es decir, los individuos dentro del AE, se les llama *genotipos* [128]. Es decir, el *genotipo* es el individuo codificado en los cromosomas y genes. Y el *fenotipo* son los valores decodificados del cromosoma, de manera que puedan sustituirse en la función de aptitud. Así se constituyen los dos niveles de representación: genotípico y fenotípico.

Se le llama *esquema* (concepto introducido por Holland [129]) a una representación simbólica de un conjunto de cromosomas. Dicha representación se construye colocando en un/os locus determinado/s un símbolo de indiferencia. Indicando que esa posi-

ción puede asumir cualquiera de los alelos posibles del alfabeto usado en la representación del AE. Por lo tanto, un esquema es un conjunto de cromosomas con un patrón determinado en sus genes [119].

Directamente relacionado al concepto anterior, está el de *paralelismo implícito*. Un AE no procesa solo individuos de una población, sino más bien, similitudes entre ellos. Es decir, implícitamente procesa patrones de similitud (esquemas) entre ellos. Y dado que cada individuo encaja paralelamente en muchos patrones a la vez, la eficiencia en la búsqueda se multiplica. Esta idea se conoce como *paralelismo implícito*, dado que mientras el algoritmo calcula las aptitudes de los individuos de una población, estima de forma implícita las aptitudes promedio de un número mucho más alto de cadenas cromosómicas [119].

En el contexto de los AE, la *aptitud* es el valor entregado por la función de aptitud, y esta función expresa una medida de la calidad de un individuo como potencial solución a un problema. En un problema de optimización, generalmente es una transformación de la función objetivo de dicho problema [128].

Se llama *generación* a una iteración de la medida de aptitud y a la creación de una nueva población por medio de operadores de reproducción [119].

El conjunto total de individuos que como tal conforman una población puede dividirse en subpoblaciones. De esta manera se modela la especiación natural, ya que sólo se cruzan individuos de la misma subpoblación.

Sin embargo puede permitirse que algunos individuos transfieran sus genes de una subpoblación a otra. A esto se le conoce como migración. Cuando un individuo puede reproducirse con cualquier otro, sin importar en que subpoblación esté y que ello sólo dependa de su aptitud se dice que la población es panmítica.

Finalmente, cabe destacar que las representaciones más utilizadas son: binaria [129], binaria con código gray [130], entera [131], real [132], árboles [133], listas binarias de longitud variable [134], e híbridos [135].

#### 1.2.4. Operadores Evolutivos

Existen dos operadores evolutivos principales: operadores de reproducción y operadores de selección.

##### 1.2.4.1 Operadores de Reproducción

Los operadores de reproducción son aquellos que modifican la manera en que se transmite la información genética de padres a hijos. Su rol principal, es el de crear individuos nuevos (hijos o descendientes), a partir de los antiguos (padres o progenitores).

Se distinguen 3 categorías [119]:

- Operador de Cruce: actúa sobre parejas de individuos y generalmente producen otro par de nuevos individuos que combinan atributos o genes de ambos progenitores. En optimización el cruce puede ser:
  - De un punto, [136].
  - De dos puntos, [137].
  - Uniforme, [138], [139].

Existen variantes que dependen del tipo de representación utilizada.

- Operador de Mutación: actúa sobre un solo individuo, dando como resultado un hijo o descendiente con un contenido genético “ligeramente” modificado [128]. Proceso relacionado al concepto de *mutación génica*, visto en los fundamentos biológicos.
- Operador de Reordenamiento: actúa sobre un solo individuo, pero cambiando el orden de los genes del mismo. Proceso relacionado al concepto de *reordenación cromosómica*, visto en los fundamentos biológicos [119].

Existen dos subprocesos relacionados con los operadores genéticos: Uno es la *explotación*, el cual consiste en utilizar la información obtenida de puntos del espacio de búsqueda previamente visitados para determinar los puntos que conviene visitar a continuación. La explotación involucra movimientos finos y es un mecanismo provechoso para que un algoritmo encuentre óptimos locales. El operador más relacionado a este subproceso es el de cruce.

El otro es la *exploración*, el cual consiste en visitar nuevas regiones del espacio de búsqueda para tratar de encontrar soluciones prometedoras. La *exploración* involucra grandes saltos en el espacio de búsqueda y es un mecanismo útil para evitar que un algoritmo quede atrapado en óptimos locales. El operador más relacionado a este subproceso es el de mutación.

Holland [129] propuso que la mutación previene la pérdida de diversidad. Se entiende la *diversidad* en sentido general como “*diversidad de individuos*” y en particular como “*diversidad de aptitudes*”, pero no existe una sola medida de la diversidad. Diversidad puede hacer referencia a la cantidad de *valores de fitness diferentes*, a la cantidad de *fenotipos diferentes*, o a la cantidad de *genotipos diferentes* en la población actual [128]. Es importante que exista diversidad en la población para el buen funcionamiento de un algoritmo evolutivo, dado que una baja diversidad generará por un lado, una reducida capacidad de intercambio de información útil entre individuos, y por otro, se tendrá individuos con posibilidades similares de sobrevivir. Estos hechos hacen que la búsqueda se estanque en un óptimo relativo o ni siquiera en un óptimo.

#### 1.2.4.2 Operadores de Selección

El mecanismo de selección de los individuos es muy importante en un algoritmo evolutivo, dado que es el que guía la búsqueda hacia secciones “*prometedoras*” del espacio de búsqueda. Este operador no genera nuevos individuos, sino que se encarga de aumentar la presencia de los mejores esquemas (selección de padres de la siguiente

generación) o de reducir la de los menos aptos (selección de sobrevivientes de la generación actual). Estos procesos pueden clasificarse de forma general de la siguiente manera:

- *Selección proporcional*

Conjunto técnicas de selección propuestas originalmente por Holland [129]. Consisten en elegir individuos de acuerdo a su aporte en términos de aptitud con respecto al total de la población. Como ejemplo de este tipo de procedimientos de selección están [134]: ruleta, sobrante estocástico (con reemplazo y sin reemplazo), universal estocástico, muestreo determinístico.

- *Selección Mediante Torneo*

Se basa en comparaciones directas de aptitud entre individuos. Por lo que requiere solo de una relación de orden que permita comparar y clasificar a los individuos [128]. Es decir, para seleccionar  $k$  individuos de una población, se selecciona cada individuo eligiendo el mejor de un conjunto de individuos tomados al azar de la población, y se repite este proceso  $k$  veces hasta completar la muestra.

Hay dos tipos de selección por torneo: determinística y probabilística [119].

- *Selección de Estado Uniforme*

Utilizada generalmente en algoritmos genéticos no generacionales y aprendizaje incremental. Útil cuando los individuos resuelven el problema de manera colectiva [119].

### 1.2.5. Descripción esquemática de un AE

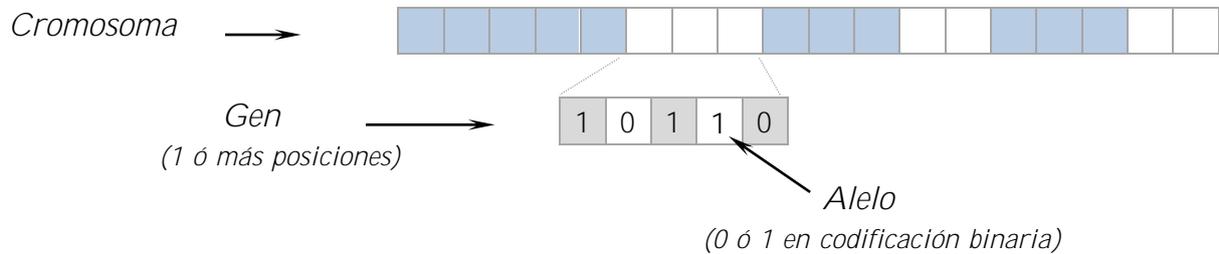
La representación más habitual en los AE es una cadena binaria como la siguiente.

1	0	1	1	0	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Como se verá posteriormente, cuando se presenten los diferentes modelos evolutivos, este tipo de codificación (mediante cadena binaria) es la usada tradicionalmente por los algoritmos genéticos (AGs).

La cadena general representa un *cromosoma* y cada subsección (posición en la cadena general) es un *gen*, que (usualmente) codifica el valor de un solo parámetro [119]. Luego el valor dentro de esta posición es el *alelo*.

Figura 10: Representación de individuos

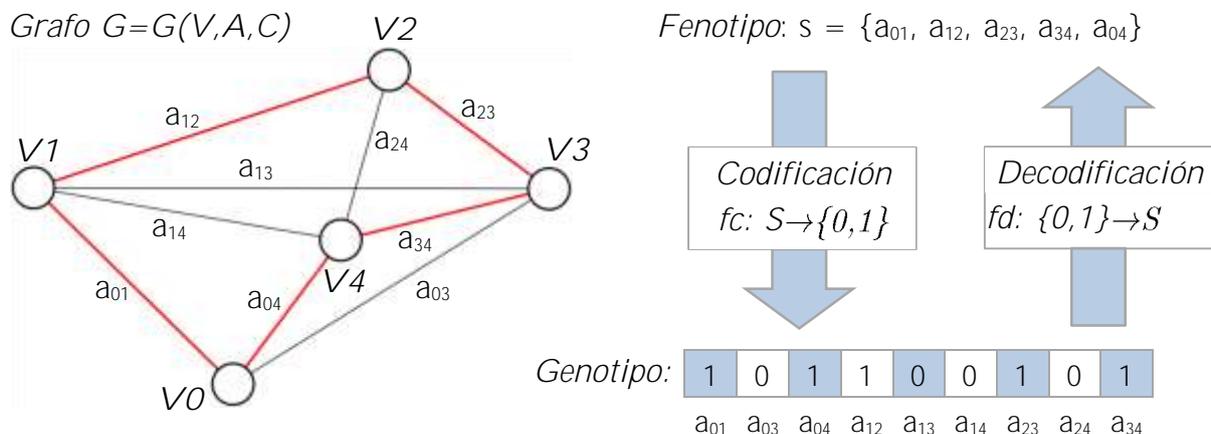


Como fue mencionado anteriormente, la representación se conoce como *genotipo*, el que se corresponde con una solución del problema (*fenotipo*); el proceso que permite pasar del *fenotipo* al *genotipo* se conoce como *codificación*, mientras que el proceso en sentido inverso se conoce como *decodificación*.

La *codificación* especifica de esta manera una función de correspondencia  $f_c: S \rightarrow \{0,1\}$ , donde  $S$  es el espacio de soluciones del problema. La función inversa es la *decodificación*,  $f_d: \{0,1\} \rightarrow S$  y puede ser una función parcial. La complejidad de  $f_c$  y  $f_d$  dependerá de las características del problema y de las variables a codificar.

Por ejemplo, para el problema del agente viajero (TSP, *Travelling Salesman Problem*), usando una representación binaria, podemos representar los arcos presentes en una solución de la siguiente manera.

Figura 11: Representación binaria de un TSP



Como fue descrito anteriormente en cada generación se aplican operadores evolutivos. Se *seleccionan* padres de acuerdo a su nivel de aptitud, se *cruzan* los padres para producir descendientes, se *mutan* aleatoriamente los descendientes y se insertan nuevos individuos creados que *reemplazan* a algunos de la generación anterior. Estos operadores actúan sobre los *genotipos* de los individuos. En las figuras siguientes se esquematiza la aplicación de estos procesos.

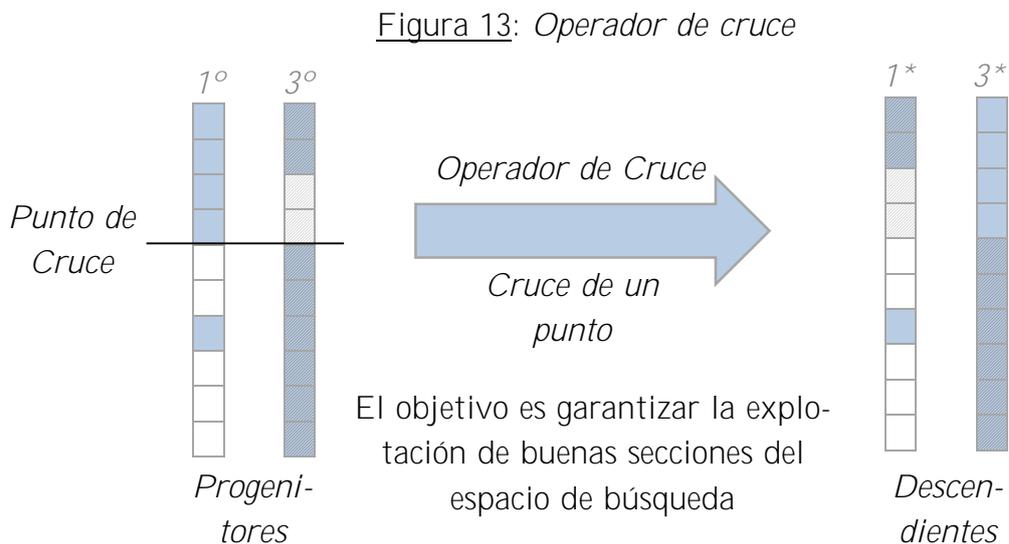
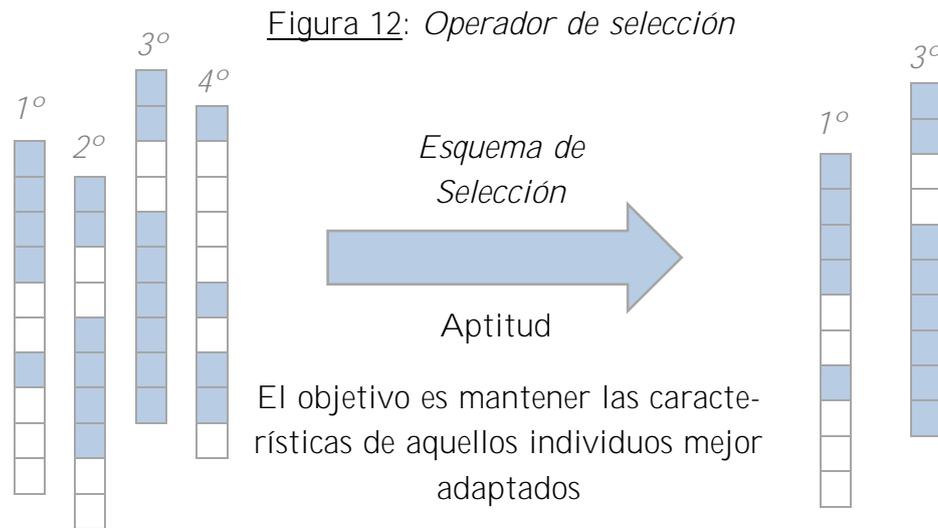
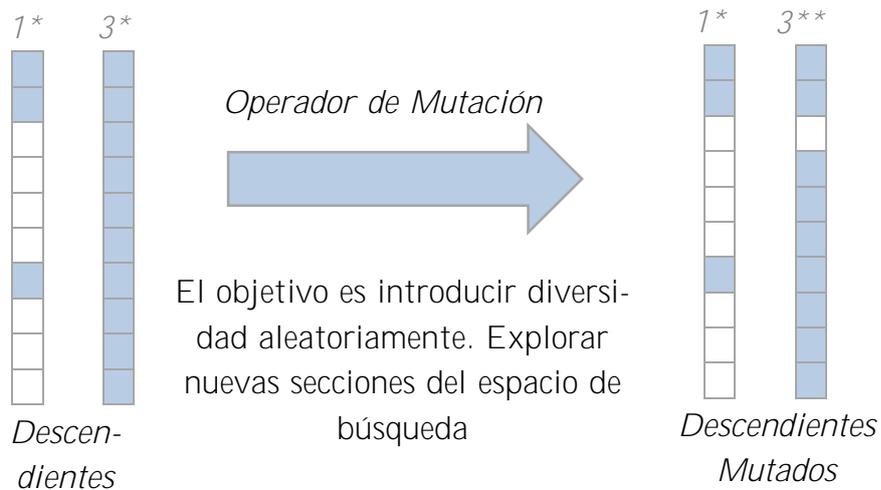
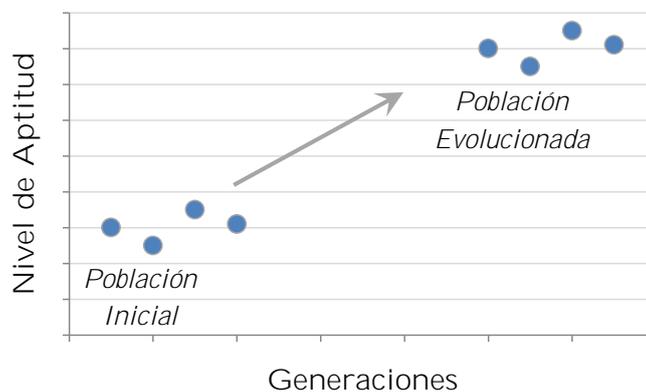


Figura 14: Operador de mutación



La función de aptitud permite evaluar la calidad de un individuo. Sus características dependen del problema y del criterio de optimización a utilizar. Funciona como una caja negra para el AE en la que entra el *fenotipo* y sale el nivel de aptitud, dirigiendo así la forma en que se produce la evolución al influir sobre la determinación de los individuos a los que se les aplicarán los operadores evolutivos. A continuación se esquematiza este efecto en la evolución generacional.

Figura 15: Nivel de aptitud



### 1.2.6. Modelos evolutivos

Actualmente, el procedimiento general para encontrar una solución a un problema, es similar en todos los algoritmos evolutivos. Pero, por las diferencias en sus fundamen-

tos biológicos, se identifican tres tipos principales de algoritmos evolutivos, que históricamente surgieron de forma contemporánea durante la década del sesenta:

#### 1.2.6.1 Programación Evolutiva (PE)

Este modelo fue propuesto en 1966 por Lawrence J. Foguel [140], para simular la evolución como un proceso de aprendizaje, con el objetivo de crear inteligencia artificial. Este enfoque da relevancia a los nexos hereditarios y de comportamiento entre padres y sus descendientes, sin buscar emular operadores genéticos específicos. Ve al comportamiento adaptativo como una forma de inteligencia, concibiéndola como la capacidad de un sistema para adaptar su comportamiento a entornos diferentes y así lograr cumplir ciertas metas específicas.

El modelo opera a nivel de especies, es decir que cada individuo se ve como correspondiente a una especie distinta [128]. Por lo tanto no utiliza operador genético de cruce (diferentes especies no pueden cruzarse entre sí). La *selección* de individuos se realiza de manera probabilística y el *operador genético* principal es la mutación; además opera a nivel fenotipo.

Algoritmo básico de la programación evolutiva [119]:

1. Generar aleatoriamente una población inicial.
2. Aplicar mutación.
3. Calcular aptitud de todos los individuos de la población.
4. Seleccionar mediante torneo (normalmente probabilístico) los individuos que sobrevivirán.

#### 1.2.6.2 Estrategias Evolutivas (EE)

Las estrategias evolutivas (*Evolutionsstrategien*) fueron desarrolladas inicialmente en Alemania en 1964 por Ingo Rechenberg, Hans-Paul Schwefel y Paul Bienert [132] [142]. Surgieron como métodos estocásticos diseñados específicamente para resolver problemas hidrodinámicos de alto grado de complejidad. Con el tiempo fueron incor-

porando distintos aspectos de la computación evolutiva, hasta convertirse en un modelo más de este tipo de procedimientos. Actualmente son algoritmos evolutivos que utilizan una representación de vectores reales, selección determinista y operadores específicos de mutación.

Estos modelos operan a nivel fenotípico de los individuos, por lo que existe un operador de cruce, sexual (dos padres) o asexual (un sólo padre). Sin embargo es un operador secundario con respecto al de mutación.

La mutación es el operador primario y se utiliza con valores Gaussianos. Estos valores son los que permiten que las EE sean auto-adaptativas, ya que evoluciona no sólo a las variables del problema, sino también los parámetros mismos de la técnica (es decir, las desviaciones estándar).

Su mecanismo de selección es determinístico y extintivo (los peores individuos tienen probabilidad cero de sobrevivir).

En su versión original (1+1)-EE no contemplaban el concepto de población. Existía un sólo padre y a partir de él se genera un nuevo individuo mediante la siguiente expresión:  $x_{t+1} = x_t + N(0, \sigma)$  donde  $t$  es la generación y  $N(0, \sigma)$  es un vector de números Gaussianos independientes con media cero y desviación estándar  $\sigma$ . Si el hijo es mejor en aptitud se mantiene, de lo contrario se elimina.

En versiones posteriores las EE comienzan a utilizar una población, en la que hay  $\mu$  padres y se genera un sólo hijo el cual puede reemplazar al peor padre.

En 1975 Schwefel introdujo el uso de múltiples hijos en las EE, considerando dos técnicas. Una preservando los mejores individuos obtenidos de la unión de padres e hijos. Otra permitiendo que sobrevivan sólo los mejores hijos de la siguiente generación.

### 1.2.6.3 Algoritmos Genéticos (AG)

Los algoritmos genéticos, denominados originalmente “planes reproductivos genéticos”, fueron concebidos a inicios de la década del 60 por John H. Holland [143] [144] [136]. Son quizás la técnica evolutiva más popular, Goldberg los define como “*algoritmos de búsqueda basados en el mecanismo de selección natural y genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre una estructura dada de cadenas con un intercambio aleatorio de información para conformar un algoritmo de búsqueda con algo del talento de la búsqueda humana*” [145].

El AG trabaja a nivel genotípico y su operador primario es el de cruce sexual, ya que modela la evolución a nivel de individuos. Su operador secundario es la mutación. La manera de seleccionar los individuos es probabilística basada en sus aptitudes. Normalmente no son auto-adaptativos.

El algoritmo opera sobre una población  $P$  de soluciones codificadas (individuos). La representación tradicional usada para codificar este conjunto de soluciones es el esquema binario. Para cada individuo  $i \in P$  se define una función de aptitud o *fitness*  $f(i)$  de modo que cuanto mayor es el *fitness* de un individuo mejor es la solución que éste representa. Se aplican operadores evolutivos en cada iteración que combinan y modifican a los individuos de la población creando una nueva.

Mediante el *operador de selección* se eligen individuos de la población que tendrán la posibilidad de reproducirse. En general, este operador genera una población intermedia cuya cantidad de individuos depende de las características del operador de cruzamiento utilizado.

Habitualmente los operadores de selección son probabilísticos y suelen dar una mayor ponderación a individuos con mayor *fitness* en la población. Las técnicas de selección usadas en algoritmos genéticos básicos pueden clasificarse en tres grandes grupos [119]:

*Selección proporcional*: técnicas propuestas originalmente por Holland [129] en las que se eligen individuos de acuerdo a su contribución de aptitud con respecto al total de la población. En la selección proporcional la probabilidad de seleccionar al individuo  $i$  es proporcional a  $\frac{f(i)}{f}$ , siendo  $\bar{f} = \frac{1}{|P|} \times \sum_{i \in P} f(i)$  el *fitness* promedio de la población. Existen diferentes variantes dentro de este grupo, por ejemplo la ruleta, el sobranste estocástico, el muestreo determinístico, etc.

*Selección por torneo*: técnica propuesta por Wetzel [146]. En la selección por torneo, cada individuo se toma eligiendo el mejor de un conjunto de  $k$  individuos tomados al azar de la población actual. Esto se repite iterativamente hasta completar la muestra. El parámetro  $k$  suele ser 2 o 3.

*Selección Uniforme*: técnica propuesta por Whitley [147]. En algunos casos es común el uso de mecanismos en los que cada persona tiene la misma oportunidad de ser seleccionada. Esto en principio iría en contra del principio de la selección natural en el que se basan los AGs, pero no es así, al combinarlo con un mecanismo de selección de sobrevivientes fuertemente basado en la aptitud [128].

Una vez que se generó la población intermedia se aplican repetidas veces operadores de reproducción para combinar individuos de dicha población y originar una nueva.

El procedimiento básico de un AG es el siguiente [148]:

---

#### Algoritmo Genético Simple

---

- 1: Generar aleatoriamente una población inicial  $P(0)$  y hacer  $t=0$
  - 2: *Repetir*
  - 3:       Evaluar el *fitness* (aptitud) de cada individuo en  $P(t)$
  - 4:       Seleccionar padres de  $P(t)$  de acuerdo al *fitness*
  - 5:       Aplicar operadores de reproducción para producir la siguiente generación, población  $P(t+1)$
  - 6:       Hacer  $t=t+1$
  - 7: *Hasta* alcanzar criterio de parada.
-

Es importante destacar, antes de cerrar este apartado en el que describimos las características de los AGs, algunos aspectos relevantes de la representación.

Holland [129], comparo diferentes representaciones y concluyó que las codificaciones con reducido número de alelos y cadenas largas, favorecían un elevado paralelismo implícito, mejorando la eficiencia de los AGs. Planteándose de esta manera a la codificación binaria, como la representación más adecuada. Pero también demostró que el paralelismo implícito de los AGs no impide usar alfabetos de mayor cardinalidad.

Esto es importante, dado que en muchas aplicaciones la codificación binaria resulta muy rígida, generando que los AGs tengan serias dificultades para considerar restricciones no triviales del espacio de búsqueda. Por ejemplo, en el caso de problemas de optimización combinatoria como el CVRP donde la representación más natural son permutaciones de números enteros (conocida en la literatura inglesa como *Path Representation*).

En 1994 Michalewicz [149] propuso una estrategia de incorporación directa de conocimiento específico del problema en el AG, mediante la representación. De esa manera pudo dar mayor flexibilidad a la representación, para considerar restricciones en el espacio de búsqueda. A esta variante de los algoritmos genéticos, se la conoce como *programas de evolución*. Comparten la estructura básica de un AG, diferenciándose solamente en dos aspectos. Primero en que buscan utilizar una representación lo más natural posible para el problema que se busca resolver (vectores de números reales, de números naturales, matrices, árboles, etc.). Y segundo, en que los operadores genéticos deben ser específicos para esa representación, adaptables al dominio y lo más cerrados posible.

La metodología de resolución seleccionada para resolver el problema objeto de estudio, pertenece a este tipo de algoritmos genéticos, conocidos como programas de evolución, especializados en optimización combinatoria.

## 2. JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN SELECCIONADA

Una de las características más importantes de los algoritmos genéticos clásicos es su robustez, es decir, el hecho de que un mismo algoritmo sirva para una gran variedad de problemas y sus variaciones. Pero no todos los problemas son igualmente aptos para ser resueltos por los AG, especialmente cuando se introducen restricciones como las que se presentan en el CVRPTW. En estos casos es necesario priorizar la eficiencia por sobre la robustez del algoritmo reformulando y adaptando el GA al problema.

Como fue mencionado al final del apartado anterior, una forma de hacer esto es utilizar una representación natural problema y operadores específicos y cerrados, lo que implica inicializar la población con cromosomas válidos en su totalidad y proveérselos a los operadores evolutivos. Y que éstos a su vez, solo puedan devolver cromosomas también válidos en el sentido de que deben satisfacer todas las restricciones.

Existe una importante cantidad de trabajos en los que se utilizan este tipo de algoritmos en la resolución de problemas de transporte del tipo CVRPTW con resultados muy buenos.

Potvin y Bengio [150] proponen un GA denominado GENEROUS que directamente aplica los operadores genéticos a las soluciones. El método empleado se catalogaría como una búsqueda dispersa “scatter search” más que como un GA. La propuesta inicial se construye mediante la heurística de inserción de Solomon (1987) y la aptitud es función del número de vehículos y la duración de todas las rutas. La selección es estocástica con mayor probabilidad hacia las mejores propuestas. Durante la recombinación dos progenitores se cruzan para generar una nueva solución que debe ser factible. Se emplean dos operadores de cruzamiento que intentan introducir una ruta de una solución en la del otro progenitor. Un operador específico repara entonces la solución generada para que continúe siendo factible. Las mutaciones tratan de redu-

cir el número de recorridos. Por último y con el fin de mejorar la solución se utiliza un mutador basado en el movimiento Or-opt.

Berger, Salois y Begin [151] definen un GA que trabaja de manera conjunta con una heurística de construcción de rutas. La población inicial se crea siguiendo el criterio del nodo más cercano (Solomon, 1987). La calidad de las soluciones pasa por minimizar el número de rutas y la distancia total recorrida. En la selección se escogen las soluciones con una probabilidad que es proporcional a su calidad. El operador de cruzamiento combina iterativamente varias rutas  $r_1$  de la solución padre P1 con un conjunto de clientes que pertenecen a las  $r_2$  rutas de P2 más cercanas a las  $r_1$  rutas de P1. Un procedimiento específico elimina unos cuantos nodos de  $r_1$  empleando después la heurística de inserción de Solomon (1987) para incorporar a los nuevos clientes. Los operadores de mutación se orientan a la reducción del número de recorridos de la solución en aquellas donde existan pocos nodos.

Bräysy [152] amplía el trabajo de Berger y otros [151] proponiendo cinco operadores de cruzamiento y cuatro de mutación. El autor concluye que la mejor estrategia consiste en crear una población inicial lo más diversa posible que contenga algunos individuos con aptitudes muy altas.

Berger, Barkaoui y Bräysy [153] proponen en su trabajo la resolución del CVRPTW con dos poblaciones que trabajan en paralelo. La primera trata de reducir al máximo la distancia total recorrida y la segunda trata de minimizar las restricciones temporales en el caso de ruptura. Se introducen nuevos operadores genéticos que incorporan técnicas de búsquedas en entornos amplios y sistemas de colonias de hormigas.

De los trabajos clásicos referenciados y de una abundante literatura en materia de AG aplicados a la resolución de VRP en sus diferentes versiones (cuya revisión completa escapa a los objetivos del presente trabajo); se desprende la adaptabilidad y el buen desempeño de este tipo de herramientas para resolver el CVRPTW. Por esta

razón en el presente trabajo se implementará un algoritmo genético cuyas características se presentarán detalladamente en la siguiente sección.

## 3. OPTIMIZADOR DESARROLLADO

El optimizador seleccionado para resolver el problema pertenece a la familia de los algoritmos evolutivos. Más específicamente, en la sección 2 de éste capítulo se justificó la utilización de un algoritmo genético como optimizador para el CVRPTW.

En las siguientes subsecciones se presenta la herramienta algorítmica desarrollada para resolver el problema modelado.

## 3.1. Heurística de construcción de arcos viables temporalmente

En una primera etapa mediante el siguiente procedimiento, se construye un conjunto de arcos viables temporalmente a partir de la base de datos de coordenadas, de tiempos de viaje y de tiempos de servicio. La salida del algoritmo es un arreglo de arcos donde cada  $arco(i,j) = \{(t_{ij} + s_j) ; Infinito\}$  para  $i, j \in C$ ,  $t_{ij} \in T$  y  $s_j \in S$ , es viable temporalmente si partiendo desde cualquier momento del intervalo temporal  $[a_i, b_i]$  se llega dentro del intervalo temporal  $[a_j, b_j]$ .

---

 Procedimiento: *Arcos Viables Temporalmente*


---

```

1: Inicio
2:   Leer |C|, T, S, a, b
3:   NodsViab ← { }           % Inicia estructura de nodos viables desde nodo i
4:   ctNodsViab ← ceros(1, |C|) % Inicia contador de nodos viables desde nodo i
5:   arco ← unos(|C|)*infinito % Inicia matriz de arcos viables temporalmente
6:   Para i ← 1 hasta |C|-1, Hacer
7:     Para j ← 1 hasta |C|, Hacer
8:       Si  $b_i + t_{ij} + s_j > a_j \ \&\& \ a_i + t_{ij} + s_j < b_j$  Entonces
9:          $ctNodsViab(i) \leftarrow ctNodsViab(i) + 1$ 
10:         $NodsViab\{i\}(ctNodsViab(i)) \leftarrow j$ 
11:         $arco(i,j) \leftarrow (t_{ij} + s_j)$ 
12:      Fin-Si
13:     Si  $b_j + t_{ji} + s_i > a_i \ \&\& \ a_j + t_{ji} + s_i < b_i$  hacer:
14:        $ctNodsViab(j) \leftarrow ctNodsViab(j) + 1$ 
15:        $NodsViab\{j\}(ctNodsViab(j)) \leftarrow i$ 
16:        $arco(j,i) \leftarrow (t_{ji} + s_i)$ 
17:     Fin-Si
18:   Fin-Para
  
```

19: Fin-Para  
 20: Fin programa

---

### 3.2. Algoritmo Genético

En una segunda etapa se genera una población inicial de soluciones factibles. Como fue mencionado, una población es un conjunto de cromosomas donde cada cromosoma representa una solución posible del problema. Es decir, cada cromosoma es un conjunto de rutas viables temporalmente que cumplen las restricciones de capacidad de los vehículos. A su vez, cada ruta es una secuencia de números naturales que representa la secuencia de nodos a visitar en el itinerario de un vehículo. Luego, una población de cromosomas es un espacio de soluciones viables sobre el que se aplicarán los operadores evolutivos.

Antes de iniciar esta etapa se configuran los parámetros que usará el algoritmo. Por ejemplo tamaño de la población ( $N^\circ$  de cromosomas o  $|Cromosomas|$ ) = 100, número de generaciones = 500.

A continuación se presentará el referido procedimiento.

#### 3.2.1. Procedimiento de generación de la población inicial

---

##### Procedimiento: Generación de la Población Inicial

---

```

1: Inicio
2:   Leer  $NCroms$ ,  $|C|$ ,  $|V|$ ,  $d$ ,  $Td$ ,  $ctNodsViab$ ,  $NodsViab$ ,  $arco$ ,  $q$ 
3:    $Croms \leftarrow \{\text{estructura vacía para cromosomas}\}$ 
4:   Para  $i \leftarrow 1$  a  $|Croms|$ , Hacer
5:     Mientras (1)
6:        $Croms\{i\} \leftarrow \text{Heurística de inserción}()$ 
7:       Si  $|Croms\{i\}| = |C|$  Entonces
8:         Interrumpir Mientras
9:       Fin-Si
10:    Fin-Mientras
11:  Fin-Para
12: Fin-Programa
  
```

---

## 3.2.2. Procedimiento de iteración generacional

En una tercera etapa se inicia un proceso de iterativo de evolución generacional, en el que se mejoran las soluciones generadas anteriormente mediante la aplicación sucesiva de los operadores evolutivos.

---

 Procedimiento: Iteración Generacional
 

---

```

1: Inicio
2: Leer |Croms|, |C|, |V|,  $d$ ,  $Td$ ,  $ctNodsViab$ ,  $NodsViab$ ,  $arco$ ,  $q$ ,  $NGen$ 
3: Para  $j \leftarrow 1$  a  $NGen$ , Hacer
4:    $indice \leftarrow$  permutación aleatoria de |Croms| índices para selección
5:    $CromHijos \leftarrow$  {estructura vacía para cromosomas}
   Reproducción
6:   Para  $i \leftarrow 1$  a  $\frac{1}{2} * |Croms|$ , Hacer
7:      $Padre1 \leftarrow Croms\{indice(2*i-1)\}$ 
8:      $Padre2 \leftarrow Croms\{indice(2*i)\}$ 
7:      $CromHijos\{i\} \leftarrow$  Operador de Reproducción( $Padre1$ ,  $Padre2$ )
9:   Fin-Para
10:  Para  $i \leftarrow 1$  hasta  $\frac{1}{2} * |Croms|$ , Hacer
11:     $Croms\{i\} \leftarrow CromsHijos\{i\}$  % Reemplazo
12:    Mientras (1) Hacer
13:       $Croms\{i + \frac{1}{2} * |Croms|\} \leftarrow$  Heurística de inserción()
14:      Si  $|Croms\{i + \frac{1}{2} * |Croms|\}| = |C|$  Entonces
15:        Interrumpir Mientras
16:      Fin-Si
17:    Fin-Mientras
18:  Fin-Para
   % Condición de Parada
19:   $Temp \leftarrow Aptitud(Croms)$ 
20:  [ $TempMejCrom$ ,  $IndMejCrom$ ]  $\leftarrow$  Minimizar( $Temp$ )
21:  Si  $TempMejCrom = UltTempMejCrom$  Entonces
22:    Interrumpir Para
23:  Fin-Si
24:   $UltTempMejCrom \leftarrow TempMejCrom$ 
25:   $UltIndMejCrom \leftarrow IndMejCrom$ 
   % Seteo para resultados
26:   $Tiempos(j, :) \leftarrow Temp$ 
27:   $Generaciones\{j\}$ 
28: Fin-Para
29: Fin-Programa

```

---

Como operador de selección, se utiliza la técnica de selección uniforme (ver 1.2.6.3). Y a continuación se presentan los procedimientos correspondientes a los operadores de reproducción, una heurística para la construcción aleatoria de soluciones factibles y la función de ajuste.

### 3.2.3. Procedimiento de reproducción

---

Procedimiento: Operador de Reproducción

---

```

1: Inicio
2: Leer Padre1, Padre2, arco, |C|, |V|, q, d
   SETEO DE VARIABLES
3:  $indLleg \leftarrow ceros(2, |C|)$ 
4:  $indSal \leftarrow ceros(2, |C|)$ 
5:  $nRut \leftarrow largo(Padre1)$            % N° de rutas en el padre 1
6: Para  $i \leftarrow 1$  a  $nRut$ , Hacer
7:    $nNodRut \leftarrow largo(Padre1\{i\}) - 1$    % N° de nodos en la ruta i del padre 1
8:   Para  $j \leftarrow 1$  a  $nNodRut$ , Hacer
9:      $indLleg(1, Padre1\{i\}(j+1)) \leftarrow Padre1\{i\}(j)$ 
10:     $indSal(1, Padre1\{i\}(j)) \leftarrow Padre1\{i\}(j+1)$ 
11:   Fin-Para
12: Fin-Para
13:  $nRut \leftarrow largo(Padre2)$            % N° de rutas en el padre 2
14: Para  $i \leftarrow 1$  a  $nRut$ , Hacer
15:    $nNodRut \leftarrow largo(Padre2\{i\}) - 1$    % N° de nodos en la ruta i del padre 2
16:   Para  $j \leftarrow 1$  a  $nNodRut$ , Hacer
17:      $indLleg(2, Padre2\{i\}(j+1)) \leftarrow Padre2\{i\}(j)$ 
18:      $indSal(2, Padre2\{i\}(j)) \leftarrow Padre2\{i\}(j+1)$ 
19:   Fin-Para
20: Fin-Para
21:  $sumLleg \leftarrow suma(indLleg > 0)$        % N° de llegadas a cada nodo
22:  $sumSal \leftarrow suma(indSal > 0)$        % N° de salidas de cada nodo
   Eliminación de arcos repetidos dejando los de menor tiempo
23: Para  $i \leftarrow 1$  a  $|C|$ , Hacer
24:   Si  $sumSal(i) = 2$  Entonces
25:     Si  $arco(i, indSal(1, i)) > arco(i, indSal(2, i))$ 
26:        $indSal(1, i) \leftarrow 0$ 
27:     Si no
28:        $indSal(2, i) \leftarrow 0$ 
29:   Fin-Si
30: Fin-Si
31: Si  $sumLleg(i) = 2$  Entonces

```

```

32:     Si  $\arcsin(\text{indLleg}(1,i), i) > \arcsin(\text{indLleg}(2,i), i)$ 
33:          $\text{indLleg}(1, i) \leftarrow 0$ 
34:     Si no
35:          $\text{indLleg}(2, i) \leftarrow 0$ 
36:     Fin-Si
37: Fin-Si
38: Fin-Para
    Cruce
39:  $\text{NodUsdo} \leftarrow \text{ceros}(1, |C|)$ 
40:  $\text{cdorNodAb} \leftarrow 0$ 
41:  $\text{cdorRut} \leftarrow 0$ 
42:  $\text{hayLleg} \leftarrow \text{suma}(\text{indLleg} > 0)$  % 1: hay llegada desde otro nodo hacia el actual. 0: no
43:  $\text{haySal} \leftarrow \text{suma}(\text{indSal} > 0)$  % 1: hay salida hacia otro nodo desde el actual. 0: no
44:  $\text{indLleg} \leftarrow \text{suma}(\text{indLleg})$ 
45:  $\text{indSal} \leftarrow \text{suma}(\text{indSal})$ 
46:  $\text{CromCruz} \leftarrow \{ \text{estructura vacía para cromosomas} \}$ 
    Búsqueda desde los extremos
47: Para  $i \leftarrow 1$  a  $|C|$  Hacer
48:     Si  $\text{hayLleg}(i)=0 \ \&\& \ \neg \text{NodUsdo}(i) \ \&\& \ \text{haySal}(i)$  Entonces
49:          $\text{cdorRut} \leftarrow \text{cdorRut} + 1$ 
50:          $\text{contAlelo} \leftarrow 1$ 
51:          $\text{CromCruz}\{\text{cdorRut}\}(\text{contAlelo}) \leftarrow i$ 
52:          $\text{CapUsVe}(\text{cdorRut}) = d(i)$ 
53:          $\text{NodAct} \leftarrow i$ 
54:          $\text{NodUsdo}(i) \leftarrow 1$ 
55:          $\text{cdorNodAb} \leftarrow \text{cdorNodAb} + 1$ 
56:     Mientras  $\text{haySal}(\text{NodAct}) \ \&\& \ \neg \text{NodUsdo}(\text{indSal}(\text{NodAct}))$  Hacer
57:          $\text{Cap} \leftarrow \text{CapUsVe}(\text{cdorRut}) + d(\text{indSal}(\text{NodAct}))$ 
58:         Si  $\text{Cap} > q$  Entonces
59:             Interrumpir
60:         Fin-Si
61:          $\text{CapUsVe}(\text{cdorRut}) \leftarrow \text{Cap}$ 
62:          $\text{cdorNodAb} \leftarrow \text{cdorNodAb} + 1$ 
63:          $\text{contAlelo} \leftarrow \text{contAlelo} + 1$ 
64:          $\text{CromCruz}\{\text{cdorRut}\}(\text{contAlelo}) \leftarrow \text{indSal}(\text{NodAct})$ 
65:          $\text{NodAct} \leftarrow \text{indSal}(\text{NodAct})$ 
66:          $\text{NodUsdo}(\text{NodAct}) \leftarrow 1$ 
67:     Fin-Mientras
68: Pero Si  $\text{haySal}(i)=0 \ \&\& \ \neg \text{NodUsdo}(i) \ \&\& \ \text{hayLleg}(i)$  Entonces
69:      $\text{cdorRut} \leftarrow \text{cdorRut} + 1$ 
70:      $\text{contAlelo} \leftarrow 1$ 
71:      $\text{CromCruz}\{\text{cdorRut}\}(\text{contAlelo}) \leftarrow i$ 
72:      $\text{CapUsVe}(\text{cdorRut}) \leftarrow d(i)$ 
73:      $\text{NodAct} \leftarrow i$ 

```

```

74:    $NodUsdo(i) \leftarrow 1$ 
75:    $cdorNodAb \leftarrow cdorNodAb + 1$ 
76:   Mientras  $hayLleg(NodAct) \ \&\& \ \neg NodUsdo(indLleg(NodAct))$  Hacer
77:      $Cap \leftarrow CapUsVe(cdorRut) + d(indLleg(NodAct))$ 
78:     Si  $Cap > q$  Entonces
79:       Interrumpir
80:     Fin-Si
81:      $CapUsVe(cdorRut) \leftarrow Cap$ 
82:      $cdorNodAb \leftarrow cdorNodAb + 1$ 
83:      $contAlelo \leftarrow contAlelo + 1$ 
84:      $CromCruz\{cdorRut\}(contAlelo) \leftarrow indLleg(NodAct)$ 
85:      $NodAct \leftarrow indLleg(NodAct)$ 
86:      $NodUsdo(NodAct) \leftarrow 1$ 
87:   Fin-Mientras
88:    $CromCruzR \leftarrow CromCruz\{cdorRut\}$ 
89:   Para  $i \leftarrow 1$  a  $contAlelo$  Hacer
90:      $CromCruz\{cdorRut\}(i) = CromCruzR(contAlelo + 1 - i)$ 
91:   Fin-Para
92:   Fin-Si
93: Fin-Para
94: Para  $i \leftarrow 1$  a  $|C|$  Hacer
95:   Si  $NodUsdo(i)$  Entonces
96:     continuar
97:   Fin-Si
98:    $cdorRut \leftarrow cdorRut + 1$ 
99:    $contAlelo \leftarrow 1$ 
100:   $capVe(cdorRut) \leftarrow 0$ 
101:   $Cap \leftarrow capVe(cdorRut) + d(i)$ 
102:   $CromCruz\{cdorRut\}(contAlelo) = i;$ 
103:   $capVe(cdorRut) = Cap;$ 
104:   $NodUsdo(i) = 1;$ 
105: Fin-Para
106: Fin-Programa

```

---

### 3.2.4. Procedimiento de inserción

Este procedimiento permite la construcción de nuevos cromosomas factibles de manera aleatoria.

---

Procedimiento: Heurística de inserción

---

- 1: Inicio
- 2: Leer  $|C|, |V|, d, Td, ctNodsViab, NodsViab, arco, q$

SETEO DE VARIABLES

```

3:  NodsLibres ← unos (1:|C|)           % 1 ⇒ libre; 0 ⇒ abastecido
4:  indNodAct ← 1
5:  sadc ← permutación aleatoria de |C| clientes. % Serie aleat. discreta de clientes
6:  CromCruz ← {estructura vacía para cromosomas}
7:  CapUsVe ← ceros(1:|V|) % Capacidad usada del vehículo
8:  cdorNodAb ← 0 % Contador de nodos abastecidos

```

ARMADO DE RUTA PARA CADA VEHÍCULO

```

9:  Para i ← 1 a |V|, Hacer % Selección 1º Nodo de la Ruta i
10:   NodAct ← sadc(indNodAct)
11:   indNodAct ← indNodAct + 1
      % Si NodAct ya fue abastecido salta al siguiente de sadc
12:   Mientras ¬ NodsLibres(NodAct) && indNodAct ≤ |C| Hacer
13:     NodAct ← sadc (indNodAct)
14:     indNodAct ← indNodAct + 1
15:   Fin-Mientras
16:   Si indNodAct > |C| Entonces
17:     Interrumpir % Salida por abastecimiento de ∀ nodos
18:   Fin-Si
19:   tenRut i ← arco(0, NodAct)
20:   denRut i ← d(NodAct)
21:   contAlelo ← 1 % Inicia contador de alelo
22:   CromCruz i (contAlelo) ← NodAct
23:   CapUsVe(i) ← d(NodAct)
24:   NodsLibres(NodAct) ← 0
25:   cdorNodAb ← cdorNodAb + 1

```

SELECCIÓN NODOS SIGUIENTES DE LA RUTA *i*

```

26:  Mientras (1)
27:    Mientras ctNodsViab > 0
      Buscar nodo más cercano y viable temporalmente
28:    [arcPos, indPos] ← min(arco(NodAct, NodsViab{NodAct}))
      % Si próximo nodo posible ya fue abastecido
29:    Si ¬ NodsLibres(NodsViab{NodAct}(indPos)) = 1 Entonces
30:      NodsViab{NodAct}(indPos) ← . . .
      NodsViab{NodAct}(ctNodsViab(NodAct))
31:      ctNodsViab(NodAct) ← ctNodsViab (NodAct)-1
32:      continuar
33:    Si no
34:      Interrumpir
35:    Fin-Si
36:  Fin-Mientras
37:  NViaNodAct ← ctNodsViab(NodAct)
38:  Si NViaNodAct = 1 Entonces
39:    NodSig ← NodsViab{NodAct}(indPos)

```

```

40:     TenRut ← TenRut + arco(NodAct, NodSig)
41:     denRut ← denRut + d(NodSig)
42:     CapDispVe ← denRut ≤ q % 1 ⇒ ∃, 2 ⇒ ∄, capac. disponible
43:     Si CapDispVe = 1 Entonces
44:         contAlelo ← contAlelo + 1
45:         CapUsVe(i) ← denRut
46:         CromCruz{i}(contAlelo) ← NodSig
47:         NodsLibres(NodSig) ← 0
48:         cdorNodAb = cdorNodAb + 1
49:         NodAct ← NodSig
50:     Si no
51:         Interrumpir
52:     Fin-Si
53:     Si no
54:         Interrumpir
55:     Fin-Si
56:     Fin-Mientras
57:     Fin-Para
58:     Fin-Programa

```

---

### 3.2.5. Procedimiento de la función de aptitud

---

Procedimiento: Función de Aptitud

---

```

1: Inicio
2: Leer Crom, T, Td
3: nRut ← largo(Crom)
4: Temp ← 0
5: Para i ← 1 a nRut Hacer
6:     Temp ← Temp + Td(Crom{i}(1)) + Td(Crom{i}(end) )
7:     nNodRut ← largo(Crom{i}) - 1
8:     Para j ← 1 a nNodRut Hacer
9:         Temp ← Temp + T(Crom{i}(j), Crom{i}(j+1))
10:    Fin-Para
11: Fin-Para
12: Fin-Programa

```

---

### 3.3. Testeo de la Herramienta algorítmica

En esta subsección, se presenta la validación del optimizador desarrollado, para la resolución del CVRPTW.

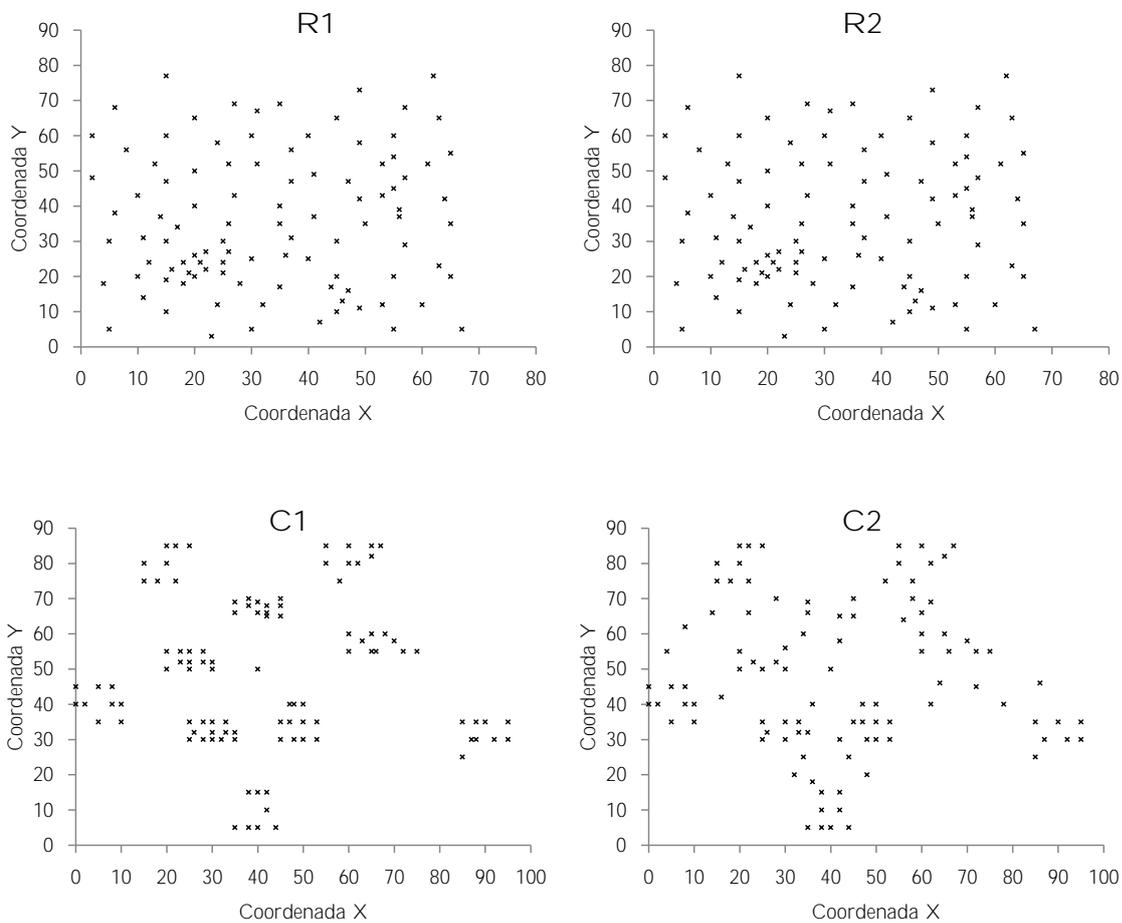
Con el propósito de evaluar la calidad de las soluciones y el rendimiento algorítmico del procedimiento propuesto, se realizó el testeo sobre la lista de problemas de Solomon (1987) [108]. Este conjunto clásico de 56 problemas académicos de referencia de ruteo de vehículos capacitados con ventanas de tiempo (CVRPTW), está compuesto por seis grupos de problemas diferentes (C1, C2, R1, R2, RC1, RC2). Cada uno de estos grupos de problemas, agrupan entre 8 y 12 problemas de 100 nodos. Los problemas varían de acuerdo a la ubicación geográfica de los clientes, la capacidad de los vehículos y las características de las ventanas temporales, tales como el tiempo asignado a cada cliente y el porcentaje de clientes con ventanas de tiempo muy ajustadas.

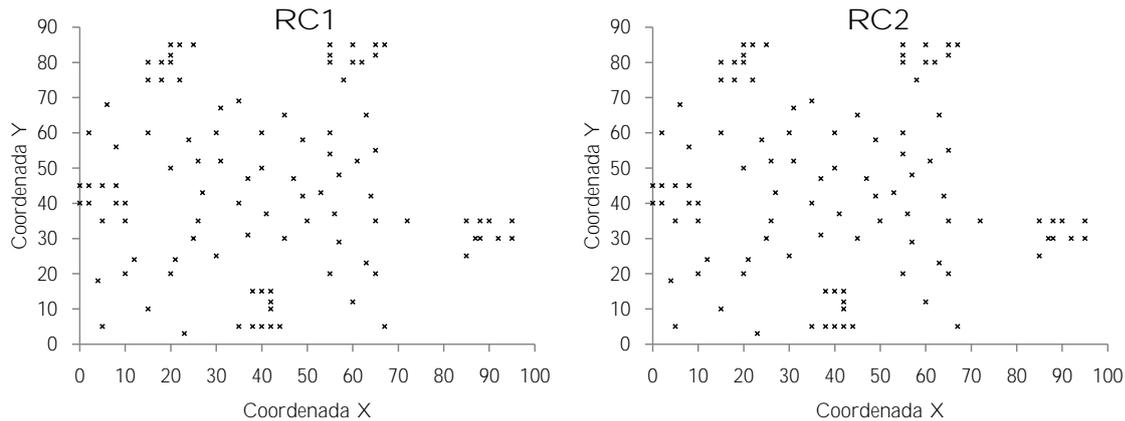
Los problemas tipo C contienen datos de conjuntos de clientes agrupados. Los problemas tipo R contienen datos de conjuntos de clientes con localizaciones generadas aleatoriamente sobre un cuadrado usando una distribución uniforme. El tipo RC contiene combinaciones de los dos tipos anteriores. A su vez, cada tipo se divide en dos grupos. Los problemas del grupo 1 tienen ventanas temporales estrechas con vehículos de menor capacidad (características similares a las de la distribución urbana objeto de estudio del presente trabajo). Los problemas del grupo 2 tienen ventanas temporales más amplias con vehículos de mayor tamaño (características más parecidas a los problemas de distribución de media a larga distancia). Así las soluciones de problemas del grupo 2 en cada tipo, se caracterizan por tener muy pocas rutas y muchos clientes por ruta. Por lo contrario, las soluciones de problemas del grupo 1 en cada tipo, se caracterizan por tener mayor cantidad de rutas y menor cantidad de clientes por ruta.

La información que se proporciona para cada cliente en estos problemas está en el orden siguiente: Índice del cliente, ubicación geográfica con coordenadas  $(x,y)$ , demanda total, tiempo de inicio de servicio, tiempo de finalización del servicio y tiempo requerido para dar el servicio.

En las figuras siguientes se presentan distribuciones de nodos de los seis tipos de problemas de Solomon.

Figura 16: *Dispersión en problemas de Solomon (1987)*





A continuación se presentarán los mejores resultados conocidos, obtenidos por diferentes autores que han resuelto los problemas CVRPTW propuestos por Solomon (1987) y los resultados conseguidos por la herramienta algorítmica implementada en el presente trabajo.

Es importante mencionar que en la formulación del algoritmo presentado en la subsección anterior se considera como entrada los tiempo de viaje  $t_{ij} \in T$ . Donde  $T$  es la matriz de tiempos de viaje entre todos los clientes con la que se genera la matriz de arcos viables. Dado que por la naturaleza urbana del problema de aplicación el objetivo es minimizar los tiempos de viaje. En esta subsección se utiliza un procedimiento habitual para testear algoritmos con éstos problemas. Que es, utilizar para el armado de la matriz de arcos viables, la distancia euclídea entre los nodos. Asumiendo que es simétrica  $d_{ij}=d_{ji}$ , donde  $d_{ij} \in D$  y  $d_{ji} \in D$  y  $D$  es la matriz de distancias euclídeas entre todos los nodos. De esta manera los resultados son comparables con los resultados conocidos de los problemas.

Los experimentos para el algoritmo genético implementado en este trabajo se realizaron sobre los conjuntos de datos de los 56 problemas. Se corrió el algoritmo 5 veces sobre cada problema, luego se promediaron las soluciones. Se presentarán los valores medios de las rutas y distancia total recorrida para los seis grupos de problemas de Solomon (1987), así como el promedio del número de rutas necesarias.

La tabla presenta dos columnas para cada tipo de problema. La primera columna (*Rut*) es el número promedio de rutas obtenidas para los problemas de cada grupo. La segunda columna (*Dist*) es la distancia recorrida total media. Los tiempos de cálculo no son comparables dado que las diferencias en las capacidades computacionales de los equipos utilizados por los diferentes autores son contundentes.

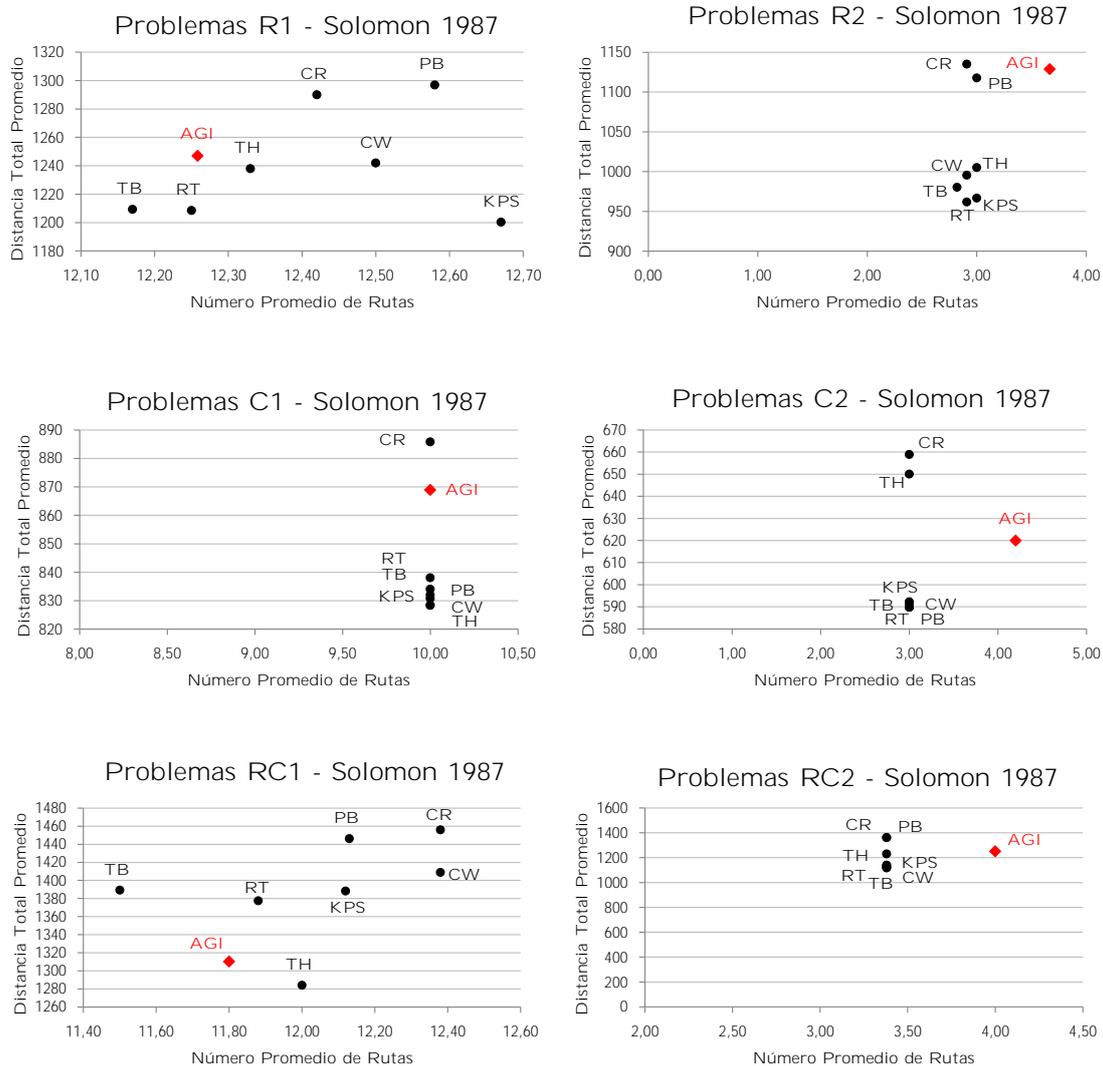
Tabla 3: *Mejores soluciones promedio del CVRPTW (Solomon 87)*

	R1		C1		RC1		R2		C2		RC2	
	<i>Rut</i>	<i>Dist</i>										
RT	12,25	1208,50	10,00	828,38	11,88	1377,39	2,91	961,72	3,00	589,86	3,38	1119,59
TB	12,17	1209,35	10,00	828,38	11,50	1389,22	2,82	980,27	3,00	589,86	3,38	1117,44
CR	12,42	1289,95	10,00	885,86	12,38	1455,82	2,91	1135,14	3,00	658,88	3,38	1361,14
PB	12,58	1296,80	10,00	838,01	12,13	1446,20	3,00	1117,70	3,00	589,93	3,38	1360,57
TH	12,33	1238,00	10,00	832,00	12,00	1284,00	3,00	1005,00	3,00	650,00	3,38	1229,00
KPS	12,67	1200,33	10,00	830,75	12,12	1388,15	3,00	966,56	3,00	592,29	3,38	1133,42
CW	12,50	1241,89	10,00	834,05	12,38	1408,87	2,91	995,39	3,00	591,78	3,38	1139,70
AGI	12,26	1246,99	10,00	882,89	11,80	1310,21	3,67	1128,61	4,20	621,02	4,03	1252,07

Los resultados considerados en la tabla corresponden a los algoritmos desarrollados en los trabajos de los siguientes autores (RT) Rochat y Taillard [154], (TB) Taillard, Badeau y otros [155], (CR) Chiang y Russel [156], (PB) Potvin y Bengio [150], (TH) Thangiah y otros [157], (KPS) Kilby, Prosser y Shaw [158], (CW) Cordone y Wolfler-Calvo [159], (AGI): Algoritmo genético implementado en el presente trabajo.

Las figuras siguientes representan la comparativa entre la calidad de las soluciones y el rendimiento del algoritmo genético implementado y los algoritmos referenciados.

Figura 17: Desempeño y calidad de las soluciones



Puede verse en la Tabla 3 que los resultados obtenidos mediante el AGI son análogos a los resultados obtenidos por otros autores al resolver los problemas CVRPTW de Solomon con sus herramientas algorítmicas.

Finalmente en la Figura 17 puede observarse en la comparación de las figuras que el desempeño del algoritmo es superior en los casos con ventanas temporales más estrechas y vehículos más pequeños (grupos 1), que en los casos de ventanas temporales más amplias con vehículos de mayor capacidad (grupos 2). Es decir, el AGI presenta un mejor desempeño en problemas con características similares a los problemas de distribución urbana como es el caso de aplicación del presente trabajo (vehículos de

baja capacidad y ventanas temporales estrechas). Mientras que el desempeño en problemas con características más cercanas a los de distribución de media a larga distancia (grupo 2), el desempeño del algoritmo es bueno, pero es inferior a los resultados obtenidos por otros autores.

## CAPÍTULO VI: CASO DE APLICACIÓN

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de la aplicación del modelo propuesto en el capítulo IV y haciendo uso del optimizador desarrollado en el capítulo V, para resolver un problema de ruteo de vehículos con ventanas temporales que enfrenta un operador logístico de la cadena de suministro de fruta fresca a mercado interno.

### 1. CARACTERIZACIÓN DEL CASO DE APLICACIÓN

#### 1.1. Recopilación de información

Se realizaron entrevistas a responsables de empresas referentes que operan en los distintos niveles considerados de la cadena de suministros de frutas frescas, con el objetivo de caracterizar la red de distribución bajo estudio y la problemática que enfrentan los distintos operadores. También se recopiló información relevante al objeto de estudio de diferentes organismos nacionales como INDEC, SENASA, FUNBAPA y de la base de datos del Mercado Central.

#### 1.2. Caracterización del nivel de la cadena de suministros donde se desarrolla la problemática

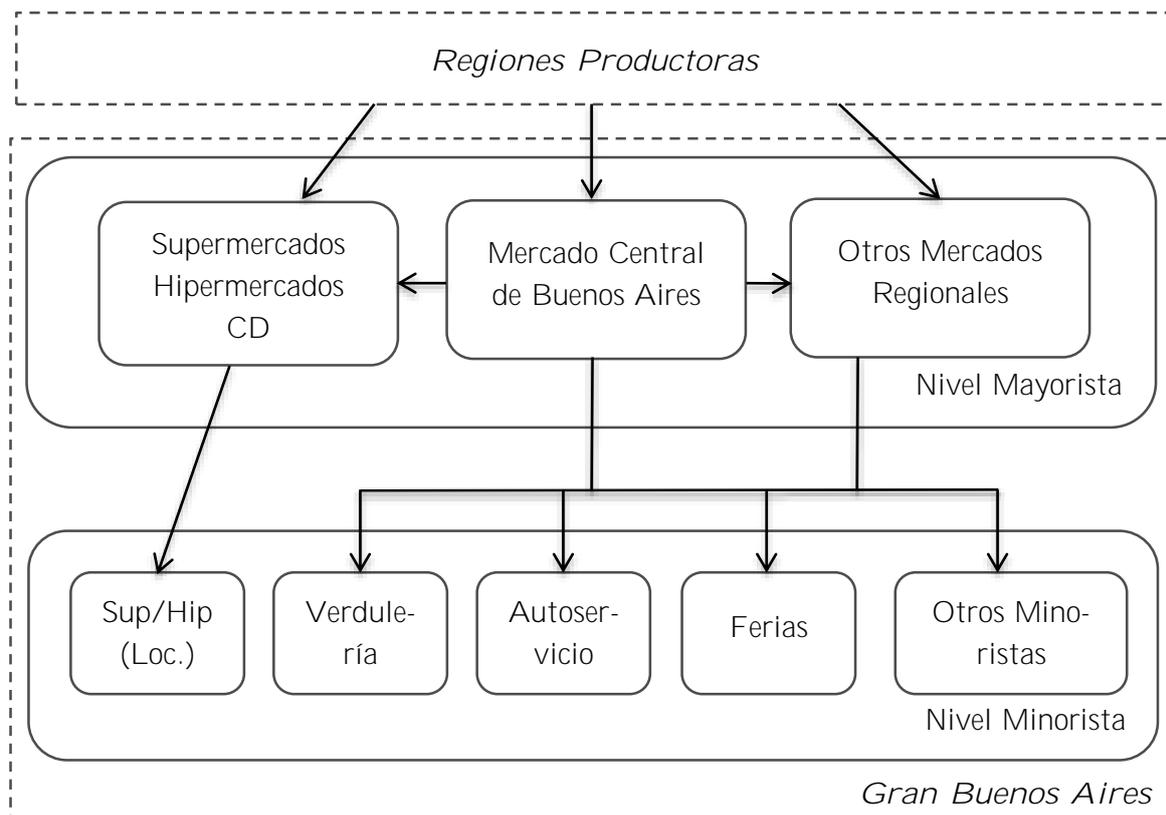
En Argentina la cadena de suministros de fruta fresca ha estado orientada históricamente a los mercados externos. Pero en las últimas décadas el mercado internacional se ha tornado cada vez más complejo y competitivo. Adicionalmente, los diferentes países importadores de estos productos han endurecido sus políticas comerciales restringiendo cada vez más el ingreso de estos productos tanto mediante medidas arancelarias como paraarancelarias, haciendo muy exigentes las condiciones para el acceso a esos mercados. Estas condiciones internacionales impactan directamente sobre las condiciones del mercado interno aumentando los estándares de calidad de servicio y eficiencia económica que se deben alcanzar. Por esta razón la atención en este trabajo

se concentró sobre el principal mercado interno de esta cadena de suministros, la región geográfica del Gran Buenos Aires (GBA), mercado consumidor de más de 12,8 millones de personas.

La problemática estudiada en este caso de aplicación, se centra en la etapa de transporte y distribución urbana de la cadena de suministros de fruta fresca a mercado interno. Por lo que se considera como nivel superior de la red de distribución el Mercado Central de Buenos Aires (MCBA), como centro comercializador de la cadena de suministros de frutas frescas que abastece la región geográfica del GBA. La estructura de la red de distribución de la cadena de suministros de frutas frescas en esta región se extiende desde este nivel superior a centros de distribución menores abastecidos desde el mercado central o directamente desde las regiones productoras, para luego llegar a los puntos de venta minorista.

A continuación se presenta un esquema simplificado de los niveles de distribución de la cadena en la región del GBA.

Figura 18: Niveles de Distribución



### 1.3. Caracterización del problema

Para la aplicación del modelo presentado en el capítulo IV y la utilización de la herramienta desarrollada en el capítulo V, se trabaja con información de un operador logístico bonaerense. La empresa presta el servicio logístico de distribución urbana de fruta fresca mediante camiones refrigerados que abastecen gran cantidad de minoristas de la Ciudad de Buenos Aires y del Gran Buenos Aires. Actualmente la empresa no cuenta con las características de la flota de vehículos parametrizada en el modelo, pero está evaluando homogeneizar la flota y cambiar su modelo de negocio acercándose a lo modelado en esta subsección. En adelante, en las referencias a las características de los vehículos utilizados por la empresa se considerará la flota ideal a la que la empresa busca acceder. Por otro lado, la empresa cuenta con un depósito refrigerado ubicado estratégicamente en el MCBA, mediante el que tiene acceso a los proveedores mayoristas de éste tipo de productos y permite el funcionamiento del sistema logístico cumpliendo con la capacidad, el layout y todas las características requeridas para el manejo del volumen que mueve la empresa de éste tipo de mercaderías.

En el caso bajo estudio, la empresa opera como un *second part logistics* (2PL), es decir como un operador especializado de un servicio independiente, en este caso transporte y distribución de mercadería a carga fraccionada con volúmenes relativamente reducidos y plazos de entrega diarios. Se considera a los fines de este trabajo, la distribución que realiza el operador desde el MCBA a los puntos de distribución minorista. Debido a que los pedidos que tienen como destino otros mercados regionales u otros centros de distribución mayoristas (centros de distribución de grandes cadenas de supermercados) se realizan a carga completa, con menor frecuencia y con vehículos de mayor capacidad. Características que se encuentran en problemas de distribución de larga y media distancia y con muy poca frecuencia en problemas de distribución urbana.

La mercadería se caracteriza por un volumen y densidad relativamente homogéneos, y por requerimientos especiales en materia fitosanitaria en general, pero principalmente en cuanto a mantenimiento de una temperatura y humedad específicas de forma que se garantice la continuidad de la cadena de frío. Su interrupción repercute en la calidad del producto alterando su apariencia y atributos organolépticos. Estos requerimientos de condiciones controladas de temperatura y humedad en las actividades de manipuleo, estiba, transporte y almacenaje; implican reducir al mínimo los tiempos de servicio al cliente en sus instalaciones, los tiempos en ruta y condiciona el horizonte de programación a un día.

El tipo de servicio que presta la empresa corresponde a los denominados *Less-Than Truck Load* (LTL), dado que el tamaño del pedido de cada cliente es inferior a la capacidad del vehículo de transporte y cada viaje debe cargarse con pedidos de múltiples clientes para aumentar su ocupación. Esta estrategia consistente en colocar en el mismo vehículo más de una carga o pedidos de distintos clientes para aumentar la eficiencia del sistema de transporte, cuando los pedidos son inferiores a la capacidad de carga, es conocida como consolidación del vehículo.

La flota homogénea de vehículos  $V$ , consta de  $|V| = 20$  camiones de reparto refrigerados (frío positivo  $> 0^\circ$ ) de tres ejes, con acceso posterior y equipados con accesorios para aumentar la productividad de las operaciones de carga/descarga y manejo de la mercadería. Entre ellos se destacan, la plataforma elevadora hidráulica posterior para equiparar la altura del piso del camión con la calzada; el sistema de rodillos sin tracción para un rápido desplazamiento de las unidades dentro del camión; sistemas de anclaje y estiba para reducir riesgos de desplazamientos y daños durante el transporte. Estos accesorios reducen el tiempo de servicio si en las instalaciones del cliente a un máximo de 15 minutos. Cada camión  $k$  cuenta con una capacidad de 6.000 kg (300 unidades) requisito normativo para poder transitar en las zonas donde están establecidos los depósitos de los clientes. Se considera una estructura LIFO (*last in*

*first out*) en la asignación del espacio del vehículo dado que el acceso carga/descarga del vehículo es por la parte posterior.

En un día promedio la empresa abastece unos  $|C| = 200$  clientes minoristas ubicados en el GBA. Cada cliente  $i$  tiene una demanda diaria (pedido)  $d_i$  de entre 10 y 30 unidades. Las unidades corresponden a empaques homogéneos de fruta fresca de dimensiones: largo 50 cm, ancho 32 cm y alto 30 cm; y peso: 20 kg. Los clientes poseen ventanas de tiempo dentro de las cuales debe iniciar el servicio.

El operador inicia las actividades de picking de pedidos de los clientes a los mayoristas dentro del MCBA a las 7:00 hs. El reparto inicia a las 9:00 hs. En un día habitual los mayoristas inician sus actividades de venta a las 4:00 hs. El depósito permanece abierto para la salida e ingreso de vehículos desde las 9:00 hs a las 22:00hs. La matriz de tiempos de viaje entre todos los clientes  $T$ , se estima de la base de datos del sistema de posicionamiento global y seguimiento de los vehículos para cada día y época del año.

El problema consiste en determinar la secuencia óptima de clientes a visitar en cada ruta  $R_k$  del vehículo  $k$  buscando minimizar el tiempo de viaje. La caracterización del escenario del caso de aplicación determina las siguientes características del modelo implementado: Una vez programada la ruta  $R_k$ , el número de paradas  $|R_k|$  es conocido (determinístico); no se permite la división del pedido (carga)  $d_i$  de un cliente  $i \in C$ , el tamaño del pedido  $d_i$  por cliente es determinístico (se conoce previamente al armado de la ruta y de la carga); estructura de ventanas de tiempo  $[a_i, b_i]$ , es rígida en los clientes; el horizonte temporal es de un sólo período (diario); no se considera servicio de retorno (no se recoge carga durante la ruta); no existen restricciones de prioridad o cobertura de nodos o rutas específicas. Respecto de la caracterización física del problema, se considera una localización de clientes en nodos (no en arcos), con ubicación geográfica urbana no dispersos aleatoriamente; con un sólo punto de origen de

carga y descarga (un sólo depósito,  $i=0$ ); un número determinado de vehículos homogéneos y con capacidad limitada; tiempos de entrega determinista y costos de transporte dependientes del tiempo de transporte como es característico en casos de distribución urbana de mercadería.

La variante del VRPTW modelada formalmente en la sección 1 del capítulo IV se corresponde con la caracterización del problema descrita en la sección actual.

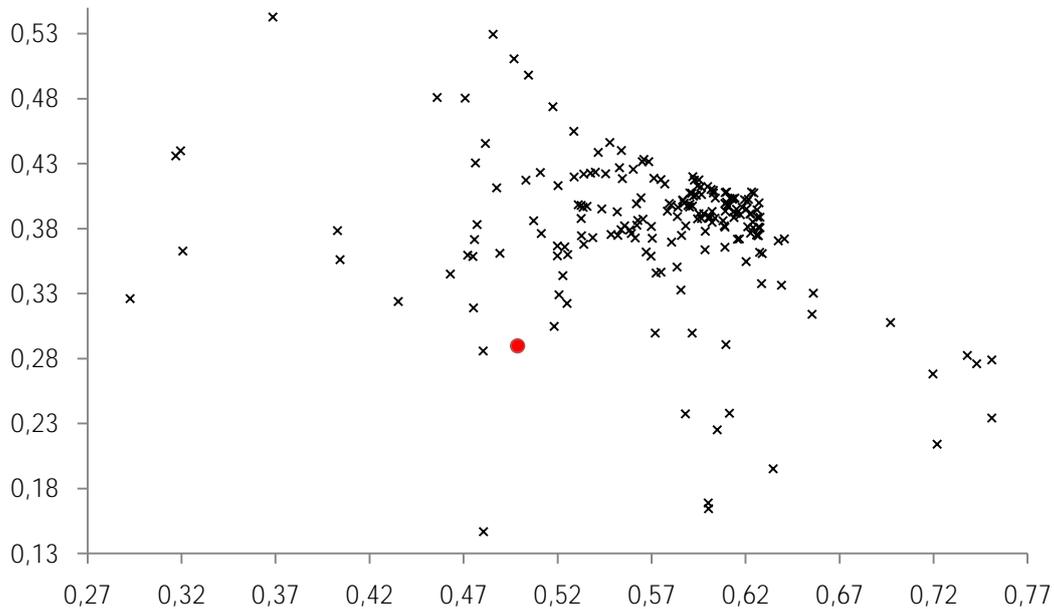
## 2. EXPERIENCIA Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la aplicación del modelo formalizado en la sección 1 del capítulo IV y la metaheurística desarrollada en la sección 3 del capítulo anterior, al caso de aplicación caracterizado en la sección anterior del presente capítulo, con el objeto de evidenciar la adecuación del modelo y del optimizador propuesto al caso real caracterizado.

El caso real de aplicación caracterizado en el capítulo anterior sobre el que se realizó la experimentación, presenta un escenario de una complejidad muy superior a los 56 problemas académicos de Solomon sobre los que se testeó el algoritmo. En este sentido, el problema presenta el doble del tamaño que los académicos referenciados y una dispersión muy particular de la localización de los nodos clientes, dada las características geográficas de la región. Se observa una gran concentración de nodos en torno al centro de la capital federal y un aumento en la dispersión de manera semicircular a medida que nos desplazamos hacia el conurbano bonaerense.

En la Figura 19 se presenta el conjunto de nodos dispersos en el área de la capital federal y el conurbano bonaerense transformado del sistema de coordenadas esféricas (coordenadas geográficas) al sistema de coordenadas cartesianas para  $x \in [0,1]$  e  $y \in [0,1]$ . En esta figura se observa el mencionado patrón de dispersión de nodos, con una gran densidad en la zona aledaña al microcentro, reduciéndose a medida que nos desplazamos en el semicírculo equidistante del centro hacia el conurbano bonaerense.

Figura 19: Distribución geográfica de los nodos



También se observa que el nodo depósito (MCBA) se encuentra fuera de la zona con alta densidad nodal. Esto hace que en cada ruta se tengan tiempos altos desde el depósito al primer y último nodo de cada ruta y tiempos bajos entre nodos intermedios.

En el experimento se consideró un set de pedidos  $d$  de los  $|C|=200$  clientes correspondiente a un día de operación normal de la empresa. En la Tabla 5 de la sección Anexos puede verse la información correspondiente a cada cliente presentada de la siguiente manera: Índice del cliente, ubicación geográfica en coordenadas cartesianas  $(x,y)$  para  $x \in [0,1]$  e  $y \in [0,1]$ , demanda total, tiempo de inicio de servicio, tiempo de finalización del servicio y tiempo requerido para dar el servicio. Sobre esta información se corrió el algoritmo genético presentado en la sección 3 del capítulo V y se compararon los resultados con la asignación realizada en la realidad por la empresa.

La mejor solución obtenida por la aplicación del algoritmo se presenta en la Tabla 6 de la sección Anexos. A continuación se presenta a modo de ejemplo la solución para la primera ruta.

Tabla 4: *Rutas 1 de la solución*

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada <i>a i</i>	Salida <i>de i</i>	
			0		
166	27	29,5	9:44	9:59	584,5
172	30	30,7	10:15	10:30	630,2
193	21	32,6	11:02	11:17	677,8
188	26	23,2	11:41	11:56	716,1
173	28	42,6	12:38	12:53	773,7
86	24	21,1	13:14	13:29	809,7
83	28	15,1	13:44	13:59	839,8
9	25	19,4	14:19	14:34	874,2
163	24	18,7	14:52	15:07	907,8
80	26	24,4	15:32	15:47	947,3
175	23	40,3	16:27	16:42	1002,6
0	0	100,0	18:22	18:22	1102,6
<i>Total</i>	<i>282</i>	<i>397,6</i>			

La primera columna de la tabla de cada ruta  $R_k$ , indica en orden descendente la secuencia de nodos a visitar por cada vehículo  $k=\{1,2,\dots,18\}$ , con punto de partida y de llegada en el nodo 0 (Depósito).

La segunda columna indica la cantidad de unidades de pedido  $d_i$  que debe descargarse en las instalaciones de cada cliente  $i$ . La tercera columna indica el tiempo de viaje (en minutos) entre cada par de nodos consecutivos de la ruta, *arco* ( $i, j$ ) para  $i \in R_k$ .

La cuarta columna indica la hora y los minutos del momento de llegada al nodo cliente  $i \in R_k$ . La quinta columna indica la hora y los minutos del momento de partida del nodo  $i \in R_k$  hacia el nodo  $i+1$ . Y la sexta columna indica la cantidad de minutos totales acumulados en la ruta incluido el tiempo de servicio al cliente, la demora por llegada temprano si la hubiere y el tiempo de viaje.

Como se observa en la Tabla 5 (ver Anexos) de pedidos y ventanas de tiempo de servicio habilitadas por cada cliente y en la Tabla 6 de soluciones, el algoritmo permite programar las cargas de los vehículos y la secuencia de clientes a visitar, cumpliendo con las ventanas temporales para el inicio del servicio de todos los clientes, cumpliendo con los pedidos de todos los clientes sin cumplimientos parciales y dentro del tiempo de servicio del depósito.

Es notable la calidad de las soluciones obtenidas con la herramienta algorítmica propuesta. El resultado en la instancia real (por cuestiones de confidencialidad no es posible presentar detalladamente información en este aspecto), implicaba un factor de utilización promedio de los camiones de similares características, de un 75% de su capacidad y un abastecimiento de un menor número de clientes para cumplir con las restricciones temporales.

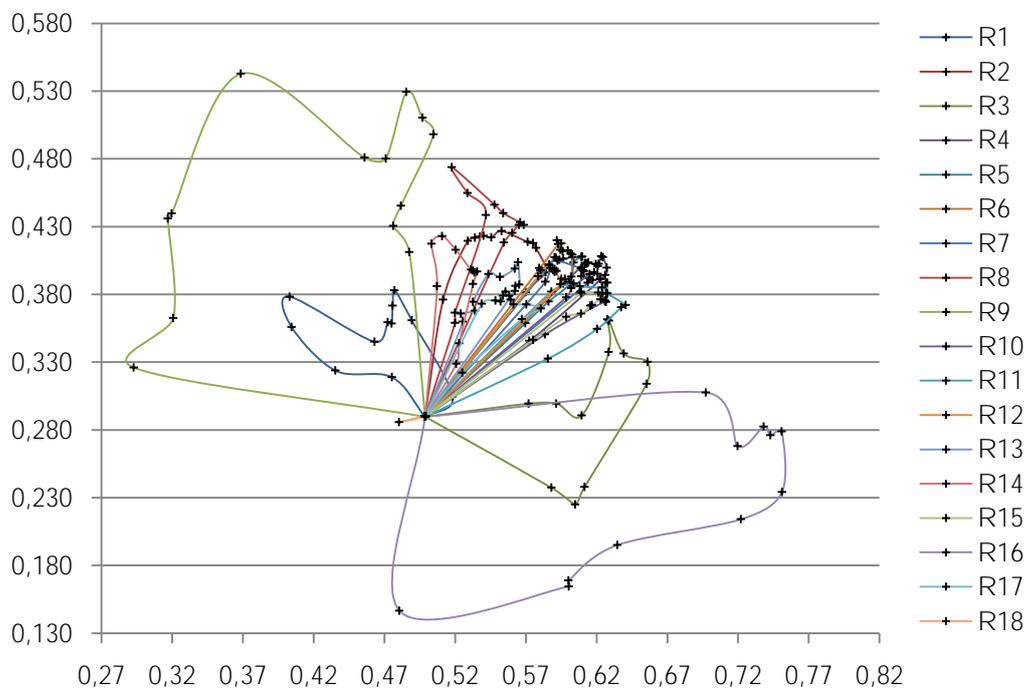
El tiempo total acumulado para todos los camiones en la distribución es de 153hs y 36 minutos. Lo que hace un tiempo medio por camión de 8hs y 32 minutos, reduciéndose al mínimo la cantidad de horas extras pagadas. El indicador de capacidad utilizada promedio es superior al 93%, lo que representa niveles muy elevados de eficiencia en la utilización de la capacidad de carga.

En la Tabla 7 del anexo se presentan los indicadores de capacidad utilizada por camión y promedio. Los tiempos totales de cada ruta y los tiempos en tránsito (no parado) por ruta. Con estos tiempos se construye un indicador del % del tiempo total de la ruta que el camión no está parado esperando para poder realizar el servicio al

cliente. Esto es relevante por el tipo de producto que se transporta, la mayor pérdida de frío una vez iniciada la ruta se presenta durante el tiempo de servicio en las instalaciones del cliente.

A continuación se presenta en la Figura 20 el conjunto de rutas que surge como mejor solución al problema, dada por el optimizador implementado. Permite apreciar la capacidad del algoritmo de resolver el problema en las condiciones particulares de dispersión de los nodos clientes.

Figura 20: *Solución*



## CONCLUSIONES Y APORTES DEL TRABAJO

El propósito de la tesis fue abordar en el marco de las tecnologías de la información, el desarrollo y aplicación de una herramienta de gestión que mejore la eficiencia de la programación de operaciones en la planificación operativa de la distribución física de mercaderías (*R&S: Routing and Scheduling*) aplicado en el ámbito del transporte automotor de cargas refrigeradas en un entorno urbano.

En este sentido, primero se realizó una revisión del marco teórico conceptual en materia de gestión de sistemas logísticos de transporte y distribución desde el enfoque de la gestión de la cadena de suministros. Lográndose establecer la importancia y complejidad de la problemática que enfrentan las actividades relacionadas con la gestión de la distribución física de mercaderías en el contexto bajo estudio.

Se describieron diferentes aspectos relevantes de los sistemas de información y su importancia, en relación a la problemática logística que enfrentan los sistemas de transporte y distribución de mercaderías en el marco de la gestión de la cadena de suministros. Logrando identificar las relaciones entre los diferentes sistemas de información logística y sus procesos principales, dando un marco para la posible integración de la herramienta algorítmica desarrollada en esta tesis como módulo de soporte para la toma de decisiones de programación y ruteo de vehículos que use información en tiempo real del sistema de gestión de transporte y el resto de los sistemas de información logística relacionados.

Con el objeto de facilitar la caracterización y el modelado del problema específico bajo estudio, se presentó la relación entre los subsistemas logísticos de transporte y distribución, con los problemas de ruteo y programación de vehículos en el marco de la gestión de la cadena de suministros. Se realizó una revisión de las formulaciones más conocidas que se encuentran en la literatura de problemas de ruteo de vehículos y se presentó un criterio para su clasificación de acuerdo a los aspectos principales

que se desprenden de las investigaciones más conocidas acerca del VRP. Concluyéndose con la identificación de una variante del CVRPTW como la que mejor se adapta a la problemática objeto de estudio.

Posteriormente se modeló formalmente la variante del problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad sometidos a restricciones temporales de servicio “vehicle routing problem with time windows” (VRPTW) en un entorno urbano, y se lo clasificó de acuerdo a la complejidad computacional de su resolución.

Luego se presentó la metodología de resolución para la problemática bajo estudio. Donde primero se realizó una revisión de los métodos de resolución de la problemática bajo estudio propuestos en la literatura. Después se profundizó en el marco teórico conceptual de los algoritmos evolutivos. Y finalmente se realizó la justificación de la metodología de resolución seleccionada.

Consecutivamente se presentó la herramienta algorítmica desarrollada para la resolución del problema modelado. Con el objeto de evaluar el desempeño y la calidad de sus soluciones, se testeó este procedimiento sobre el conjunto de 56 problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y ventanas temporales de Solomon (1987). Se compararon los resultados obtenidos por el optimizador desarrollado con los mejores resultados conocidos, obtenidos por diferentes autores que han resuelto mediante diferentes herramientas algorítmicas las listas de problemas mencionada. Concluyéndose que el optimizador presenta un buen desempeño en esta tipología de problemas en comparación con otros procedimientos conocidos y que se adapta mejor a problemas con vehículos de menor capacidad y ventanas temporales más estrechas como es el caso de la problemática de ruteo en un contexto urbano.

Finalmente se realizó la aplicación del modelo formulado y del optimizador desarrollado para resolverlo en un caso de aplicación de una empresa real. Primero se realiza la caracterización de la problemática que enfrenta el operador logístico a nivel distri-

bución regional de la cadena de suministro, para luego realizar la caracterización detallada del problema de ruteo que enfrenta en un día de operatoria habitual. Se realiza la experimentación sobre el caso de aplicación y se evalúan las soluciones generadas comparándolas con los resultados que había obtenido la empresa en la realidad. Finalmente se presentan los resultados obtenidos. Concluyéndose que la calidad de las soluciones obtenidas mediante la aplicación del algoritmo desarrollado superaban en todos los aspectos a las obtenidas por el procedimiento aplicado por la empresa en el caso real.

Como trabajo futuro se contempla abordar modelos que incorporen más características de la realidad que enfrentan los operadores logísticos, considerando mayores niveles de coordinación e integración en la toma de decisiones en los diferentes niveles de la cadena de suministros. Considerando la búsqueda de algoritmos eficientes que puedan resolver estos problemas de manera eficiente.

Finalmente, como aporte y base para trabajo futuro, debe destacarse que la herramienta algorítmica desarrollada en el presente trabajo es fácilmente adaptable como módulo de soporte para la toma de decisiones, que use información en tiempo real de la base de datos del *Enterprise Resource Planning* (ERP) o de otros sistemas logísticos de información como el *Order Management System* (OMS), el *Warehouse Management System* (WMS) y el *Transportation Management System* (TMS).

## ANEXOS

Tabla 5: Clientes y Set de Pedidos

$i$	$x$	$y$	$d_i$	$TW$		$s_i$
				$a_i$	$b_i$	
1	0,55	0,42	24	12:00	17:00	15
2	0,63	0,37	21	12:00	17:00	15
3	0,60	0,41	22	12:00	17:00	15
4	0,57	0,42	20	12:00	17:00	15
5	0,56	0,38	23	12:00	17:00	15
6	0,61	0,39	22	12:00	17:00	15
7	0,60	0,38	25	12:00	17:00	15
8	0,53	0,45	26	8:00	13:00	15
9	0,48	0,37	25	12:00	17:00	15
10	0,61	0,40	28	12:00	17:00	15
11	0,60	0,39	27	12:00	17:00	15
12	0,62	0,40	21	12:00	17:00	15
13	0,61	0,40	23	8:00	13:00	15
14	0,63	0,39	27	12:00	17:00	15
15	0,62	0,41	23	12:00	17:00	15
16	0,60	0,40	25	12:00	17:00	15
17	0,61	0,41	22	12:00	17:00	15
18	0,62	0,38	25	12:00	17:00	15
19	0,60	0,39	21	8:00	13:00	15
20	0,62	0,38	23	12:00	17:00	15
21	0,60	0,39	25	12:00	17:00	15
22	0,49	0,41	23	16:00	21:00	15
23	0,60	0,41	29	12:00	17:00	15
24	0,62	0,38	30	12:00	17:00	15
25	0,63	0,37	25	8:00	13:00	15
26	0,59	0,39	27	12:00	17:00	15
27	0,60	0,41	25	12:00	17:00	15
28	0,62	0,37	23	8:00	13:00	15
29	0,54	0,40	29	12:00	17:00	15
30	0,59	0,40	29	8:00	13:00	15
101	0,63	0,38	24	12:00	17:00	15
102	0,62	0,40	27	12:00	17:00	15
103	0,62	0,40	28	12:00	17:00	15
104	0,60	0,39	30	12:00	17:00	15
105	0,62	0,39	27	12:00	17:00	15
106	0,63	0,39	26	12:00	17:00	15
107	0,62	0,39	23	12:00	17:00	15
108	0,61	0,40	29	12:00	17:00	15
109	0,62	0,40	25	12:00	17:00	15
110	0,32	0,36	24	8:00	13:00	15
111	0,61	0,40	21	12:00	17:00	15
112	0,62	0,39	22	12:00	17:00	15
113	0,63	0,40	22	12:00	17:00	15
114	0,61	0,40	28	8:00	13:00	15
115	0,61	0,40	25	8:00	13:00	15
116	0,61	0,39	22	12:00	17:00	15
117	0,61	0,40	30	8:00	13:00	15
118	0,62	0,39	26	8:00	13:00	15
119	0,56	0,38	27	12:00	17:00	15
120	0,63	0,38	27	12:00	17:00	15
121	0,58	0,42	23	8:00	13:00	15
122	0,59	0,40	25	12:00	17:00	15
123	0,59	0,41	30	8:00	13:00	15
124	0,63	0,37	25	8:00	13:00	15
125	0,59	0,41	24	8:00	13:00	15
126	0,55	0,42	26	16:00	21:00	15
127	0,60	0,41	28	12:00	17:00	15
128	0,74	0,28	29	16:00	21:00	15
129	0,64	0,34	28	12:00	17:00	15
130	0,64	0,37	20	12:00	17:00	15

31	0,58	0,40	30	8:00	13:00	15
32	0,64	0,37	26	12:00	17:00	15
33	0,58	0,40	24	8:00	13:00	15
34	0,61	0,37	23	8:00	13:00	15
35	0,58	0,40	28	8:00	13:00	15
36	0,63	0,36	21	12:00	17:00	15
37	0,60	0,36	22	8:00	13:00	15
38	0,63	0,36	24	12:00	17:00	15
39	0,58	0,41	27	8:00	13:00	15
40	0,58	0,37	26	8:00	13:00	15
41	0,57	0,43	28	12:00	17:00	15
42	0,57	0,38	20	8:00	13:00	15
43	0,56	0,38	28	8:00	13:00	15
44	0,57	0,39	22	8:00	13:00	15
45	0,56	0,40	27	8:00	13:00	15
46	0,57	0,37	20	8:00	13:00	15
47	0,56	0,40	27	12:00	17:00	15
48	0,56	0,39	21	8:00	13:00	15
49	0,56	0,38	21	12:00	17:00	15
50	0,56	0,37	23	12:00	17:00	15
51	0,57	0,36	20	16:00	21:00	15
52	0,58	0,35	29	8:00	13:00	15
53	0,55	0,38	27	12:00	17:00	15
54	0,57	0,43	24	12:00	17:00	15
55	0,55	0,37	24	12:00	17:00	15
56	0,55	0,43	20	12:00	17:00	15
57	0,54	0,37	23	12:00	17:00	15
58	0,54	0,40	21	8:00	13:00	15
59	0,55	0,44	20	12:00	17:00	15
60	0,53	0,40	29	8:00	13:00	15
61	0,54	0,42	30	12:00	17:00	15
62	0,53	0,40	21	12:00	17:00	15
63	0,53	0,40	30	12:00	17:00	15
64	0,53	0,37	30	12:00	17:00	15
65	0,55	0,45	21	12:00	17:00	15
66	0,52	0,37	23	8:00	13:00	15

131	0,59	0,33	29	16:00	21:00	15
132	0,62	0,41	26	12:00	17:00	15
133	0,51	0,38	30	16:00	21:00	15
134	0,59	0,38	26	8:00	13:00	15
135	0,62	0,40	30	12:00	17:00	15
136	0,62	0,39	28	12:00	17:00	15
137	0,59	0,40	30	12:00	17:00	15
138	0,59	0,42	25	8:00	13:00	15
139	0,66	0,33	22	12:00	17:00	15
140	0,57	0,43	29	12:00	17:00	15
141	0,46	0,48	30	12:00	17:00	15
142	0,62	0,39	28	12:00	17:00	15
143	0,61	0,40	25	8:00	13:00	15
144	0,60	0,39	24	12:00	17:00	15
145	0,61	0,38	20	12:00	17:00	15
146	0,60	0,39	30	12:00	17:00	15
147	0,59	0,40	21	12:00	17:00	15
148	0,59	0,40	25	12:00	17:00	15
149	0,59	0,30	25	16:00	21:00	15
150	0,62	0,37	27	12:00	17:00	15
151	0,59	0,40	26	8:00	13:00	15
152	0,62	0,35	27	12:00	17:00	15
153	0,59	0,42	27	8:00	13:00	15
154	0,58	0,39	30	8:00	13:00	15
155	0,57	0,36	28	8:00	13:00	15
156	0,56	0,43	21	12:00	17:00	15
157	0,55	0,38	30	12:00	17:00	15
158	0,54	0,42	26	12:00	17:00	15
159	0,53	0,42	26	12:00	17:00	15
160	0,54	0,44	26	8:00	13:00	15
161	0,53	0,42	23	12:00	17:00	15
162	0,52	0,34	30	8:00	13:00	15
163	0,48	0,38	24	12:00	17:00	15
164	0,48	0,29	28	8:00	13:00	15
165	0,63	0,34	25	12:00	17:00	15
166	0,48	0,32	27	8:00	13:00	15

67	0,52	0,41	30	12:00	17:00	15
68	0,52	0,37	25	12:00	17:00	15
69	0,52	0,36	26	8:00	13:00	15
70	0,53	0,36	22	12:00	17:00	15
71	0,60	0,41	24	12:00	17:00	15
72	0,51	0,42	23	12:00	17:00	15
73	0,51	0,39	29	12:00	17:00	15
74	0,50	0,42	25	12:00	17:00	15
75	0,59	0,41	24	8:00	13:00	15
76	0,63	0,39	21	12:00	17:00	15
77	0,52	0,33	28	8:00	13:00	15
78	0,53	0,32	24	8:00	13:00	15
79	0,58	0,35	29	8:00	13:00	15
80	0,49	0,36	26	12:00	17:00	15
81	0,59	0,37	30	12:00	17:00	15
82	0,60	0,41	23	12:00	17:00	15
83	0,48	0,36	28	12:00	17:00	15
84	0,61	0,39	20	8:00	13:00	15
85	0,59	0,40	27	8:00	13:00	15
86	0,47	0,36	24	12:00	17:00	15
87	0,53	0,37	26	12:00	17:00	15
88	0,53	0,39	26	8:00	13:00	15
89	0,59	0,41	25	8:00	13:00	15
90	0,59	0,40	24	8:00	13:00	15
91	0,61	0,41	25	12:00	17:00	15
92	0,60	0,42	30	8:00	13:00	15
93	0,63	0,38	30	12:00	17:00	15
94	0,60	0,39	23	12:00	17:00	15
95	0,61	0,39	24	12:00	17:00	15
96	0,63	0,38	23	8:00	13:00	15
97	0,60	0,38	27	12:00	17:00	15
98	0,58	0,39	23	8:00	13:00	15
99	0,55	0,39	23	12:00	17:00	15
100	0,61	0,38	25	12:00	17:00	15
167	0,52	0,47	29	12:00	17:00	15
168	0,66	0,31	27	12:00	17:00	15
169	0,57	0,30	30	16:00	21:00	15
170	0,61	0,29	29	16:00	21:00	15
171	0,70	0,31	20	16:00	21:00	15
172	0,44	0,32	30	8:00	13:00	15
173	0,46	0,34	28	12:00	17:00	15
174	0,48	0,43	22	16:00	21:00	15
175	0,52	0,30	23	16:00	21:00	15
176	0,48	0,45	22	16:00	21:00	15
177	0,74	0,28	30	16:00	21:00	15
178	0,50	0,50	20	16:00	21:00	15
179	0,47	0,48	26	16:00	21:00	15
180	0,50	0,51	27	16:00	21:00	15
181	0,72	0,27	23	16:00	21:00	15
182	0,61	0,24	20	8:00	13:00	15
183	0,75	0,28	25	12:00	17:00	15
184	0,59	0,24	25	8:00	13:00	15
185	0,50	0,29	23	8:00	13:00	15
186	0,60	0,23	21	8:00	13:00	15
187	0,49	0,53	21	16:00	21:00	15
188	0,40	0,38	26	8:00	13:00	15
189	0,75	0,23	29	12:00	17:00	15
190	0,57	0,35	22	16:00	21:00	15
191	0,63	0,20	27	12:00	17:00	15
192	0,72	0,21	20	12:00	17:00	15
193	0,40	0,36	21	8:00	13:00	15
194	0,60	0,17	23	12:00	17:00	15
195	0,60	0,16	27	8:00	13:00	15
196	0,32	0,44	21	12:00	17:00	15
197	0,32	0,44	21	12:00	17:00	15
198	0,37	0,54	20	12:00	17:00	15
199	0,48	0,15	27	8:00	13:00	15
200	0,29	0,33	21	8:00	13:00	15

Tabla 6: Soluciones

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540,0
166	27	29,5	9:44	9:59	584,5
172	30	30,7	10:15	10:30	630,2
193	21	32,6	11:02	11:17	677,8
188	26	23,2	11:41	11:56	716,1
173	28	42,6	12:38	12:53	773,7
86	24	21,1	13:14	13:29	809,7
83	28	15,1	13:44	13:59	839,8
9	25	19,4	14:19	14:34	874,2
163	24	18,7	14:52	15:07	907,8
80	26	24,4	15:32	15:47	947,3
175	23	40,3	16:27	16:42	1002,6
0	0	100,0	18:22	18:22	1102,6
<i>Total</i>	<i>282</i>	<i>397,6</i>			

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
42	20	62,5	10:17	10:32	617,5
31	30	22,4	10:39	10:54	654,9
39	27	22,0	11:16	11:31	691,9
121	23	15,5	11:47	12:02	722,4
4	20	15,5	12:17	12:32	753,0
56	20	22,2	12:55	13:10	790,2
1	24	17,5	13:27	13:42	822,7
61	30	16,3	13:58	14:13	853,9
158	26	15,0	14:28	14:43	883,9
159	26	15,4	14:59	15:14	914,2
161	23	16,2	15:30	15:45	945,4
133	30	33,5	16:18	16:33	993,9
0	0	50,5	17:24	17:39	1059,4
<i>Total</i>	<i>299</i>	<i>324,35</i>			

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
184	25	57,2	10:12	10:27	612,2
186	21	22,7	10:34	10:49	649,9
182	20	19,9	11:09	11:24	684,7
168	27	50,7	12:15	12:30	750,4
139	22	20,7	12:51	13:06	786,1
129	28	21,3	13:27	13:42	822,4
38	24	25,0	14:07	14:22	862,4
36	21	14,5	14:36	14:51	891,9
165	25	24,0	15:15	15:30	930,9
170	29	35,1	16:05	16:20	981,0
149	25	22,2	16:43	16:58	1018,2
169	30	22,1	17:20	17:35	1055,3
0	0	44,8	18:20	18:35	1115,1
<i>Total</i>		297	380,1		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
13	23	80,9	10:35	10:50	635,9
114	28	14,4	10:50	11:05	665,3
143	25	14,1	11:19	11:34	694,4
115	25	14,3	11:48	12:03	723,7
12	21	16,1	12:19	12:34	754,8
135	30	14,6	12:49	13:04	784,4
103	28	14,6	13:19	13:34	814,0
15	23	16,3	13:50	14:05	845,3
132	26	14,4	14:19	14:34	874,8
113	22	17,3	14:52	15:07	907,1
106	26	16,1	15:23	15:38	938,2
190	22	44,2	16:22	16:37	997,4
0	0	52,7	17:30	17:45	1065,1
<i>Total</i>		299	330,07		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
	0			9:15	540
Ruta 5	151	26	73,5	10:28	628,5
	75	24	16,7	10:45	660,2
	125	24	14,3	11:14	689,5
	123	30	15,0	11:44	719,5
	82	23	15,0	12:14	749,6
	71	24	16,6	12:46	781,2
	17	22	16,8	13:17	813,0
	91	25	14,2	13:47	842,1
	16	25	16,7	14:18	873,9
	21	25	20,4	14:54	909,2
	81	30	22,3	15:31	946,5
	51	20	23,4	16:09	984,9
	0	0	55,4	17:20	1055,3
	<i>Total</i>		298	320,26	

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)	
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>		
	0			9:15	540	
Ruta 6	153	27	80,2	10:35	635,2	
	138	25	15,1	10:50	665,3	
	92	30	15,5	11:20	695,9	
	89	25	15,8	11:51	726,7	
	27	25	14,6	12:21	756,3	
	127	28	15,4	12:51	786,7	
	3	22	15,1	13:21	816,9	
	23	29	14,5	13:51	846,3	
	144	24	20,6	14:26	882,0	
	104	30	15,6	14:57	912,6	
	11	27	15,7	15:28	943,3	
	0	0	71,9	16:55	1030,3	
	<i>Total</i>		292	310,25		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
98	23	68,7	10:23	10:38	623,7
30	29	19,4	10:43	10:58	658,1
85	27	16,6	11:14	11:29	689,6
117	30	21,2	11:50	12:05	725,8
10	28	14,4	12:20	12:35	755,2
111	21	14,9	12:50	13:05	785,1
108	29	14,2	13:19	13:34	814,3
116	22	15,6	13:49	14:04	845,0
95	24	15,7	14:20	14:35	875,6
107	23	14,6	14:50	15:05	905,2
112	22	14,9	15:20	15:35	935,1
6	22	15,5	15:50	16:05	965,6
0	0	77,4	17:23	17:38	1058,0
<i>Total</i>		300	323,04		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
69	26	44,2	9:59	10:14	599,2
66	23	17,0	10:16	10:31	631,2
160	26	45,4	11:16	11:31	691,6
8	26	22,6	11:54	12:09	729,2
167	29	23,1	12:32	12:47	767,3
65	21	31,0	13:18	13:33	813,3
59	20	17,5	13:50	14:05	845,8
54	24	19,7	14:25	14:40	880,5
140	29	15,2	14:55	15:10	910,6
41	28	15,3	15:25	15:40	940,9
156	21	17,1	15:57	16:12	973,0
126	26	17,7	16:30	16:45	1005,7
0	0	72,6	17:58	18:13	1093,2
<i>Total</i>		299	358,24		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
200	21	101,5	10:56	11:11	656,5
110	24	33,1	11:29	11:44	704,6
197	21	44,6	12:29	12:44	764,2
196	21	15,8	13:00	13:15	795,0
198	20	61,7	14:16	14:31	871,7
141	30	58,7	15:30	15:45	945,4
179	26	20,1	16:05	16:20	980,6
187	21	35,3	16:55	17:10	1030,9
180	27	23,1	17:33	17:48	1069,0
178	20	20,0	18:08	18:23	1104,0
176	22	37,9	19:01	19:16	1156,9
174	22	20,5	19:37	19:52	1192,4
22	23	23,2	20:15	20:30	1230,5
0	0	65,0	21:35	21:50	1310,5
<i>Total</i>		298	560,54		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
52	29	57,6	10:12	10:27	612,6
25	25	34,3	10:46	11:01	662,0
124	25	14,2	11:16	11:31	691,2
96	23	16,5	11:47	12:02	722,7
136	28	18,6	12:21	12:36	756,3
142	28	14,1	12:50	13:05	785,4
102	27	15,7	13:21	13:36	816,1
109	25	14,9	13:50	14:05	845,9
105	27	15,3	14:21	14:36	876,2
97	27	20,8	14:57	15:12	912,0
7	25	17,1	15:29	15:44	944,2
0	0	69,6	16:53	17:08	1028,8
<i>Total</i>		289	308,79		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
134	26	67,7	10:22	10:37	622,7
19	21	20,8	10:43	10:58	658,6
84	20	15,8	11:14	11:29	689,4
118	26	20,5	11:49	12:04	724,9
14	27	15,7	12:20	12:35	755,6
76	21	14,4	12:49	13:04	784,9
120	27	17,1	13:22	13:37	817,0
101	24	14,2	13:51	14:06	846,2
32	26	20,4	14:26	14:41	881,6
130	20	15,4	14:56	15:11	912,0
152	27	23,7	15:35	15:50	950,6
131	29	31,1	16:21	16:36	996,7
0	0	54,5	17:31	17:46	1066,2
<i>Total</i>		<i>294</i>	<i>331,17</i>		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
154	30	68,6	10:23	10:38	623,6
33	24	16,0	10:39	10:54	654,6
35	28	14,6	11:09	11:24	684,2
90	24	17,2	11:41	11:56	716,3
148	25	15,0	12:11	12:26	746,3
137	30	14,5	12:40	12:55	775,7
122	25	14,6	13:10	13:25	805,4
147	21	14,6	13:39	13:54	834,9
146	30	16,9	14:11	14:26	866,8
94	23	14,9	14:41	14:56	896,7
26	27	16,0	15:12	15:27	927,7
0	0	71,2	16:38	16:53	1013,9
<i>Total</i>		<i>287</i>	<i>293,93</i>		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
43	28	61,0	10:15	10:30	616,0
48	21	15,4	10:31	10:46	646,4
44	22	15,1	11:01	11:16	676,5
45	27	20,8	11:37	11:52	712,3
47	27	16,1	12:08	12:23	743,3
99	23	18,9	12:42	12:57	777,2
29	29	17,4	13:14	13:29	809,6
87	26	23,6	13:53	14:08	848,2
64	30	16,7	14:24	14:39	880,0
68	25	18,1	14:58	15:13	913,1
70	22	16,4	15:29	15:44	944,5
0	0	45,3	16:29	16:44	1004,8
<i>Total</i>		280	284,78		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
77	28	32,7	9:47	10:02	587,7
162	30	20,2	10:07	10:22	622,9
88	26	32,7	10:55	11:10	670,6
58	21	17,9	11:28	11:43	703,5
60	29	14,7	11:58	12:13	733,2
62	21	14,6	12:27	12:42	762,9
63	30	14,5	12:57	13:12	792,4
67	30	21,5	13:33	13:48	828,9
72	23	19,6	14:08	14:23	863,5
74	25	17,8	14:41	14:56	896,3
73	29	27,1	15:23	15:38	938,4
0	0	54,3	16:32	16:47	1007,8
<i>Total</i>		292	287,75		

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
79	29	53,7	10:08	10:23	608,7
37	22	26,0	10:34	10:49	649,7
34	23	18,4	11:08	11:23	683,1
28	23	17,6	11:40	11:55	715,7
150	27	14,4	12:10	12:25	745,1
24	30	17,0	12:42	12:57	777,0
2	21	15,4	13:12	13:27	807,4
93	30	14,1	13:41	13:56	836,5
20	23	16,1	14:12	14:27	867,6
18	25	15,1	14:42	14:57	897,7
145	20	19,1	15:16	15:31	931,9
100	25	14,3	15:46	16:01	961,1
0	0	73,8	17:14	17:29	1050,0
<i>Total</i>		<i>298</i>			<i>314,97</i>

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
199	27	74,3	10:29	10:44	629,3
195	27	64,6	11:33	11:48	708,9
194	23	15,7	12:04	12:19	739,6
191	27	32,1	12:51	13:06	786,6
192	20	51,2	13:57	14:12	852,9
189	29	28,7	14:41	14:56	896,5
183	25	32,6	15:29	15:44	944,1
128	29	17,4	16:01	16:16	976,5
177	30	17,2	16:33	16:48	1008,7
181	23	23,6	17:12	17:27	1047,4
171	20	33,0	18:00	18:15	1095,3
0	0	97,3	19:52	20:07	1207,7
<i>Total</i>		<i>280</i>			<i>487,65</i>

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				9:15	540
78	24	31,4	9:46	10:01	586,4
155	28	38,0	10:24	10:39	639,5
40	26	20,4	10:59	11:14	674,8
46	20	18,3	11:33	11:48	708,2
50	23	17,6	12:05	12:20	740,8
5	23	15,6	12:36	12:51	771,4
49	21	15,1	13:06	13:21	801,4
119	27	15,6	13:37	13:52	832,1
53	27	15,4	14:07	14:22	862,4
55	24	15,8	14:38	14:53	893,2
157	30	15,4	15:08	15:23	923,7
57	23	18,0	15:41	15:56	956,7
0	0	52,6	16:49	17:04	1024,3
<i>Total</i>	<i>296</i>	<i>289,27</i>			

Nodos <i>i</i>	Demanda <i>d<sub>i</sub></i>	<i>i</i> → <i>j</i> (min)	Vent. Temp. (hs)		Tiempo Acum. (min)
			Llegada a <i>i</i>	Salida de <i>i</i>	
0				0,4	540
18	23,0				
5		5:31	9:29	0,4	569,23
16	28,0				
4		1:26	9:51	0,4	606,29
0	0,0	17:31	10:28	0,4	643,02
<i>Total</i>	<i>51</i>	<i>58,02</i>			

Tabla 7: *Tiempos y capacidad utilizada*

	<i>T. Total. (T.T.)</i>	<i>T. en ruta (T.R)</i>	<i>T.R. / T.T</i>	<i>% Ut. Capac</i>
<i>Camión 1</i>	9 hs 23 min	6 hs 38 min	70,7%	94,0%
<i>Camión 2</i>	8 hs 39 min	5 hs 24 min	62,5%	99,7%
<i>Camión 3</i>	9 hs 35 min	6 hs 20 min	66,1%	99,0%
<i>Camión 4</i>	8 hs 45 min	5 hs 30 min	62,9%	99,7%
<i>Camión 5</i>	8 hs 35 min	5 hs 20 min	62,2%	99,3%
<i>Camión 6</i>	8 hs 10 min	5 hs 10 min	63,3%	97,3%
<i>Camión 7</i>	8 hs 38 min	5 hs 23 min	62,4%	100,0%
<i>Camión 8</i>	9 hs 13 min	5 hs 58 min	64,8%	99,7%
<i>Camión 9</i>	12 hs 51 min	9 hs 21 min	72,7%	99,3%
<i>Camión 10</i>	8 hs 9 min	5 hs 9 min	63,2%	96,3%
<i>Camión 11</i>	8 hs 46 min	5 hs 31 min	62,9%	98,0%
<i>Camión 12</i>	7 hs 54 min	4 hs 54 min	62,0%	95,7%
<i>Camión 13</i>	7 hs 45 min	4 hs 45 min	61,3%	93,3%
<i>Camión 14</i>	7 hs 48 min	4 hs 48 min	61,5%	97,3%
<i>Camión 15</i>	8 hs 30 min	5 hs 15 min	61,8%	99,3%
<i>Camión 16</i>	11 hs 8 min	8 hs 8 min	73,0%	93,3%
<i>Camión 17</i>	8 hs 4 min	4 hs 49 min	59,7%	98,7%
<i>Camión 18</i>	1 hs 43 min	0 hs 58 min	56,3%	17,0%
<i>Promedio</i>	<i>8 hs 32 min</i>	<i>5 hs 31 min</i>	<i>63,8%</i>	<i>93,2%</i>

## REFERENCIAS

- [1] I. Giannoccaro y P. Pontrandolfo, «Models for supply chains management: a taxonomy,» de *Proceedings of the Production and Operations Management Conference POMS mastery in the new millennium*, Orlando, FL, 2001.
- [2] F. Alarcón, M. M. E. Alemany, C. Lario y R. F. Oltra, «Modelo conceptual para el desarrollo de modelos matemáticos de ayuda a la toma de decisiones en el proceso colaborativo de comprometer pedidos,» *XIII Congreso de Ingeniería de Organización*, pp. 3-12, 2009.
- [3] D. J. Bowersox, D. J. Closs y M. B. Cooper, *Administración y logística en la cadena de suministros*, 2da ed., México, D.F.: McGraww-Hill/Intermaericana, 2007.
- [4] R. H. Ballou, *Logística. Administración de la cadena de suministro*, 5ta ed., México: Pearson Educación, 2004.
- [5] J. H. Chavez y R. Torrez-Rabello, *Supply Chain Management*, Santiago: RIL editores, 2012.
- [6] E. W. Smykay, D. J. Bowersox y F. H. Mossman, *Physical Distribution Management: Logistics Problems of the Firm*, Nueva York: Macmillan, 1961.
- [7] D. J. Bowersox, *Logistical Management*, New York: Macmillan Publishing Co., 1974.
- [8] D. J. Bowersox, «Emerging from the recession: the role of logistical management,» *Journal of Business Logistics*, vol. 4, nº 1, pp. 23-33, 1983.

- [9] C. J. Langley, «The evolution of the logistics concept,» *Journal of Business Logistics*, vol. 7, nº 2, pp. 1-13, 1986.
- [10] J. L. Kent y D. J. Flint, «Perspectives on the evolution of logistics thought,» *Journal of Business Logistics*, vol. 18, nº 2, pp. 15-29, 1997.
- [11] R. H. Ballou, «The evolution and future of logistics and supply chain management,» *European Business Review*, vol. 19, nº 4, pp. 332-348, 2007.
- [12] D. Servera-Francés, «Concepto y evolución de la función logística,» *INNOVAR. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, vol. 20, nº 38, pp. 217-234, 2010.
- [13] J. Colin y G. Paché, *La logistique de la distribution*, Paris: Chotard et Associés Éditeurs, 1988.
- [14] P. Schary y J. Coakley, «Logistics Organization and the information System,» *The Journal of International Logistics Management*, vol. 2, nº 2, pp. 22-29, 1991.
- [15] A. Casanovas y L. Cuatrecasas, *Logística Empresarial*, Barcelona: Gestión 2000, 2001.
- [16] J. T. Mentzer, S. Min y L. M. Bobbitt, «Toward a unified theory of logistics,» *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 34, nº 8, pp. 606-627, 2004.
- [17] M. Christopher, *Logistics and Supply Chain Management*, London: Pitman Publishing, 1992.
- [18] R. H. Ballou, *Logística empresarial: control y planificación*, Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 1991.

- [19] J. R. Stock, «Marketing myopia revisited: lessons for logistics,» *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 32, n° 1, pp. 12-21, 2002.
- [20] J. B. Fuller, J. O´Conor y R. Rawlinson, «Tailored Logistics: The Next Advantage,» *Harvard Business Review*, vol. 3, pp. 87-98, 1993.
- [21] G. Stock, N. Greis y J. Kasarda, «Logistics, strategy and structure: A conceptual framework,» *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 18, n° 1, pp. 37-52, 1998.
- [22] G. Gutiérrez y A. Durán, «Information technology in logistics: a Spanish perspective,» *Logistics Information Management*, vol. 10, n° 2, pp. 73-79, 1997.
- [23] P. Blaik y R. Matwiejczuk, «Logistics processes and potentials in a value chain,» *Logforum*, vol. 5, n° 2, pp. 1-8, 2009.
- [24] L. J. Krajewski, L. P. Ritzman y M. J. Malhotra, *Operations management: process and value chains*, 8th ed., México: Pearson Education, 2007, p. 752.
- [25] M. Fisher, «What Is the Right Supply Chain for Your Product?,» *Harvard Business Review*, pp. 105-116, 1997.
- [26] H. L. Lee, «Aligning Supply Chain Strategies with Product Uncertainties,» *California Management Review*, vol. 44, n° 3, pp. 105-119, 2002.
- [27] R. B. Chase, R. F. Jacobs y N. Aquilano, *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Producción y cadena de suministros*, 12 ed., México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2009.
- [28] R. G. Schroeder, S. M. Goldstein y M. J. Rungtusanatham, *Administración de operaciones. Conceptos y casos contemporáneos*, México: McGraw-

- Hill/Interamericana Editores, 2011.
- [29] J. T. Mentzer, W. DeWitt, J. S. Keebler, S. Min, N. W. Nix, C. D. Smith y Z. G. Zacharia, «Defining supply chain management,» *Journal of Business Logistics*, vol. 22, nº 2, pp. 1-25, 2001.
- [30] M. E. Porter, *Ventaja competitiva: Creación y sostenimiento de un desempeño superior*, 19 ed., Impresión México: Compañía Editorial Continental, 2000.
- [31] D. Hall y A. Braitwaite, «The Development of Thinking in Supply Chain and Logistics Management,» de *Handbook of Logistics and Supply Chain Management*, Pergamon, 2001, pp. 81-97.
- [32] H. Stadtler, *Supply chain management and advanced planning - Concepts, models, software and case studies*, Berlin: Springer, 2002.
- [33] J. F. Shapiro, *Modeling the Supply Chain*, Duxbury Press, 2000.
- [34] J. T. Mentzer, W. DeWitt, J. S. Keebler, S. Min, N. W. Nix, C. D. Smith y Z. G. Zacharia, «Defining Supply Chain Management,» *Journal of Business Logistics*, vol. 22, nº 2, pp. 1-25, 2001.
- [35] C. o. S. C. M. Professionals, «CSCMP- Council of Supply Chain Management Professionals,» CSCMP, 2015. [En línea]. Available: <https://cscmp.org/about-us/supply-chain-management-definitions>.
- [36] P. Harmon, *Business Process Change: A Manager's Guide to Improving, Redesigning, and Automating Processes*, San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 2003.
- [37] R. R. Lummus, D. W. Krumwiede y R. J. Vokurka, «The relationship of logistics to supply chain management: developing a common industry

- definition.,» *Industrial Management & Data Systems*, vol. 101, n° 8, pp. 426-432, 2001.
- [38] M. T. Frohlich y R. Westbrook, «Arcs of integration: an international study of supply chain strategies.,» *Journal of operations management*, vol. 19, n° 2, pp. 185-200, 2001.
- [39] T. Van der Vaart y D. P. Van Donk, «A critical review of survey-based research in supply chain integration.,» *International Journal of Production Economics*, vol. 111, n° 1, pp. 42-55, 2008.
- [40] C. Pineda y C. López, «Una revisión al estado del arte de la integración de toma de decisiones en la red logística.,» *Ingeniería*, vol. 18, n° 1, pp. 118-148, 2013.
- [41] A. Kanda y S. G. Deshmukh, «Supply chain coordination: perspectives, empirical studies and research directions.,» *International journal of production Economics*, vol. 115, n° 2, pp. 316-335, 2008.
- [42] J. F. Sánchez, A. Cortés, E. A. Peralta y S. O. Díaz, *El Transporte Automotor de Cargas en la Argentina*, Buenos Aires, Argentina: edUTecNe, 2007.
- [43] S. Chopra y P. Meindl, *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación.*, México: Pearson Educación, 2008.
- [44] M. F. Greaver, *Strategic outsourcing: a structured approach to outsourcing decisions and initiatives.*, Nueva York: AMACOM Div American Mgmt Assn., 1999.
- [45] L. A. Mora García, *Gestión logística integral. Las mejores prácticas en la cadena de abastecimiento.*, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2010.

- [46] I. S. Los Santos, *Logística y marketing para la distribución comercial*, Esic Editorial, 2006.
- [47] J. J. A. Tejero, *El transporte de mercancías*, ESIC Editorial, 2015.
- [48] M. M. Torres, *Transporte, operadores, redes*, Díaz de Santos, 2013.
- [49] H. W. Davis y W. H. Drumm, «Logistics Costs and Service Database-2002,» de *Annual Conference Proceedings*, San Francisco, CA, 2002.
- [50] D. M. Lambert y T. C. Harrington, «Establishment Customer Service Strategies Within the Marketing Mix: More Empirical Evidence,» *Journal of Business Logistics*, vol. 10, nº 2, p. 50, 1989.
- [51] R. B. Chase, F. R. Jacobs y N. J. Aquilano, *OPERATIONS AND SUPPLY MANAGEMENT*, McGraw-Hill/Irwin, 2010.
- [52] F. C. Paletta y N. Dais Vieira Junior, «Information technology and communication and best practices in it lifecycle management,» *Journal of technology management & innovation*, vol. 3, nº 4, pp. 80-94, 2008.
- [53] J. A. Zapata Cortés, M. D. Arango Serna y W. Adarme Jaimes, «Herramientas tecnológicas al servicio de la gestión empresarial,» *Avances en Sistemas e Informática*, vol. 7, nº 3, pp. 87-102, 2010.
- [54] c. d. Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Internet&oldid=85455972>. [Último acceso: 1 septiembre 2015].
- [55] c. d. Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Banda\\_ancha&oldid=85485663](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Banda_ancha&oldid=85485663). [Último acceso: 1 Septiembre 2015].

- [56] IBM, Redbooks. Implementing EDI Solutions., USA: IBM, 2003.
- [57] c. d. Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, La enciclopedia libre, [En línea]. Available:  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Base\\_de\\_datos&oldid=85452043](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Base_de_datos&oldid=85452043). [Último acceso: 1 Septiembre 2015].
- [58] M. Hugos, Essentials of Supply Chain Management, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [59] E. Frazelle y R. Sojo, Logística de Almacenamiento de Clase Mundial, Grupo editorial Noma, 2007.
- [60] G. AISBL, «GS1 Argentina,» [En línea]. Available:  
[http://www.gs1.org.ar/SOL\\_identificacion.asp](http://www.gs1.org.ar/SOL_identificacion.asp).
- [61] M. Mauleón, Sistemas de almacenaje y picking, España: Díaz de Santos, 2003.
- [62] c. d. Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, La enciclopedia libre, [En línea]. Available:  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema\\_de\\_posicionamiento\\_global&oldid=85037862](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema_de_posicionamiento_global&oldid=85037862). [Último acceso: 1 Septiembre 2015].
- [63] A. Correa Espinal y R. A. Gómez Montoya, «Tecnologías de la información en la cadena de suministro,» *Dyna*, vol. 76, n° 157, pp. 37-48, 2009.
- [64] A. Payne, Handbook of CRM: achieving excellence in customer management, Great Britain: Elsevier, 2006.
- [65] G. D. Taylor, Logistics engineering handbook, New York: CRC press, 2007.
- [66] G. B. Dantzig y J. H. Ramser, «The Truck Dispatching Problem,»

- Management Science*, vol. 6, nº 1, pp. 80-91, 1959.
- [67] C. Theys, O. Bräysy, W. Dullaert y B. Raa, «Using a TSP heuristic for routing order pickers in warehouses,» *European Journal of Operational Research*, vol. 3, nº 200, pp. 755-763, 2010.
- [68] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, New York: McGraw Hill, 2001.
- [69] B. Kallehauge, J. Larsen y O. B. G. Madsen, «Lagrangian duality applied to the vehicle routing problem with time windows,» *Computers & Operations Research*, vol. 33, nº 5, pp. 1464-1487, 2006.
- [70] M. Frutos y F. Tohmé, «A new approach to the optimization of the CVRP through genetic algorithms,» *American Journal of Operations Research*, vol. 2, nº 4, pp. 495-501, 2012.
- [71] B. Eksioglu, A. Volkan y A. Reisman, «The vehicle routing problem: A taxonomic review,» *Computers & Industrial Engineering*, nº 57, p. 1472–1483, 2009.
- [72] P. Toth y D. Vigo, «An Overview of Vehicle Routing Problems,» de *The vehicle routing problem*, Philadelphia, SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002, p. 26.
- [73] J. Cordeau, G. Laporte y A. Mercier, «A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows,» *Journal of the Operational Research Society*, vol. 52, pp. 928-936, 2001.
- [74] F. Li, B. Golden y E. Wasil, «The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results,» *Computers & Operations Research*, vol. 34, pp. 2918 - 2930, 2007.

- [75] F. Li, B. Golden y E. Wasil, «A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem,» *Computers & Operations Research*, vol. 34, pp. 2734 - 2742, 2007.
- [76] D. Gulczynski, B. Golden y E. Wasil, «The multi-depot split delivery vehicle routing problem: An integer programming-based heuristic, new test problems, and computational results.,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 61, pp. 794 - 804, 2011.
- [77] S. Ropke y D. Pisinger, «A unified heuristic for a large class of Vehicle Routing Problems with Backhauls,» *European Journal of Operational Research*, vol. 171, pp. 750 - 775, 2006.
- [78] D. Gulczynski, B. Golden y E. Wasil, «The period vehicle routing problem: New heuristics and real-world variants,» *Transportation Research Part E*, vol. 47, pp. 648 - 668, 2011.
- [79] C. Malandraki y R. Dial, «A restricted dynamic programming heuristic algorithm for the time dependent traveling salesman problem,» *European Journal of Operational Research*, vol. 90, pp. 45-55, 1996.
- [80] I. Chao, «A tabu search method for the truck and trailer routing problem.,» *Computers and Operations Research*, vol. 29, n° 1, pp. 33 - 51, 2002.
- [81] J. Desrosiers, Y. Dumas, M. Solomon, Soumis y F., «chapter Time Constrained Routing and Scheduling,» de *Handbooks in Operations Research and Management Sciences*, Amsterdam, North Holland, 1995, pp. 35 - 139.
- [82] M. Desrochers, J. Desrosiers y M. Solomon, «A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows.,» *Operations Research*,

- vol. 40, p. 342–354, 2002.
- [83] J. Larsen, «Parallelization of the Vehicle Routing Problem with Time Windows,» de *PhD. Thesis*, Denmark, Lyngby. Institute of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2001.
- [84] P. R. Columé, Problemas de etiquetado: Complejidad Computacional (Tesis doctoral, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2002.
- [85] J. Lenstra y A. Rinnooy KAN, «Complexity of vehicle routing and scheduling problems,» *Networks*, vol. 11, pp. 221 - 228, 1981.
- [86] G. Laporte, «The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms,» *European Journal of Operational Research*, vol. 59, pp. 345 - 358, 1992.
- [87] G. A. Kindervarter y M. W. Savelsbergh, «chapter Vehicle Routing: handling edge exchanges,» de *Local Search in Combinatorial Optimization*, England, John Wiley & Sons, 1997, pp. 337 - 360.
- [88] A. Olivera, «Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos (Reportes Técnicos),» UR. FI - INCO, Uruguay, 2004.
- [89] M. W. P. Savelsbergh, «Local search in routing problems with time windows,» *Annals of Operations research*, vol. 4, nº 1, pp. 285-305, 1985.
- [90] J. Cordeau, M. Gendreau, G. Laporte, J. Potvin y F. Semet, «A guide to vehicle routing heuristic,» *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, pp. 512 - 522, 2002.
- [91] A. Olivera, «Memorias adaptativas para el problema de ruteo de vehículos con múltiples viajes (Tesis de maestría),» Universidad de la República. Facultad de Ingeniería. Instituto de Computación – PEDECIBA, Uruguay,

- 2005.
- [92] G. Nemhauser y L. Wolsey, *Integer and Combinatorial Optimization*, New York: John Wiley & Sons, 1988, p. 784.
- [93] A. W. Kolen, A. H. Rinnooy Kan y H. W. Trienekens, «Vehicle Routing with Time Windows,» *Operations Research*, vol. 2, n° 35, pp. 266 - 273, 1987.
- [94] G. Laporte y Y. Nobert, «Exact algorithms for the vehicle routing problem,» *Annals of Discrete Mathematics*, vol. 31, p. 147 – 184, 1983.
- [95] M. Desrochers, J. K. Lenstra, M. W. P. Savelsbergh y F. Soumis, «Vehicle Routing: Methods and Studies, chapter Vehicle Routing with Time Windows: Optimization and Approximation,» *Vehicle Routing: Methods and Studies*, pp. 65 - 84, 1988.
- [96] M. M. Solomon y J. Desrosiers, «Time window constrained routing and scheduling problems,» *Transportation Science*, vol. 22, pp. 1 - 13, 1988.
- [97] J. Cordeau, G. Desaulniers, J. Desrosiers, M. Solomon y F. Soumis, «chapter The VRP with time windows,» de *The Vehicle Routing Problem, SIAM Monographs on discrete Mathematics and Applications*, Philadelphia, SIAM, 2001, pp. 157 - 194.
- [98] W. Cook y J. Rich, «A parallel cutting-plane algorithm for the vehicle routing problems with time windows,» Houston, 1999.
- [99] V. C. Aucejo, *Problemas de Rutas.*, researchgate, 22014.
- [100] L. Zeng, H. L. Ong y K. M. Ng, «An assignment-based local search method for solving vehicle routing problems,» *Asia-Pacific Journal of Operational*

- Research (APJOR)*, vol. 22, pp. 85 - 104, 2005.
- [101] G. Clarke y J. V. Wright, «Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points,» *Operations Research*, vol. 12, pp. 568 - 581, 1964.
- [102] G. Laporte y F. Semet, «Classical heuristics for the capacitated VRP,» de *The vehicle routing problems*, Philadelphia, SIAM, 2002, pp. 109 - 128.
- [103] T. J. Gaskell, «Bases for vehicle fleet scheduling,» *Operational Research Quarterly*, vol. 18, pp. 281 - 295, 1967.
- [104] P. Yellow, «A computational modification to the savings method of vehicle scheduling,» *Operational Research Quarterly*, vol. 21, pp. 281 - 283, 1970.
- [105] M. Desrochers y T. W. Verhoog, «A matching based savings algorithm for the vehicle routing problem,» Canada, 1989.
- [106] R. H. Mole y S. R. Jameson, «A Sequential Route-Building Algorithm Employing a Generalised Savings Criterion,» *Operational Research Quarterly*, vol. 27, pp. 503 - 511, 1976.
- [107] N. Christofides, A. Mingozzi y P. Toth, «The vehicle routing problem,» de *Combinatorial Optimization*, Chichester, Wiley, 1979, pp. 315 - 338.
- [108] M. M. Solomon, «Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints,» *Operations Research*, vol. 35, pp. 254 - 265, 1987.
- [109] J. Y. Potvin y J. Rousseau, «A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows,» *European Journal of Operational Research*, vol. 66, pp. 331 - 340, 1993.

- [110] J. Beasley, «Route first – cluster second methods for vehicle routing,» *Omega*, vol. 11, pp. 403 - 408, 1983.
- [111] R. Russell, «An effective heuristic for the M-tour traveling salesman problem with some side conditions,» *Operational Research*, vol. 15, pp. 84 - 88, 1977.
- [112] M. W. P. Savelsbergh, «An efficient implementation of local search algorithms for constrained routing problems,» *European Journal of Operational Research*, vol. 47, pp. 75 - 85, 1990.
- [113] M. W. P. Savelsbergh, «The vehicle routing problem with time windows: minimizing route duration,» *Journal on Computing*, vol. 4, pp. 146 - 154, 1992.
- [114] M. M. Solomon, E. K. Baker y J. R. Schaffer, «Vehicle routing and scheduling problems with time window constraints: efficient implementations of solution improvement procedures,» de *Vehicle Routing: Methods and Studies*, Amsterdam, Bruce Golden & Arjang Assad, 1988, pp. 85 - 106.
- [115] E. K. Baker y J. R. Schaffer, «Solution improvement heuristics for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints,» *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 6, pp. 261 - 300, 1986.
- [116] H. R. G. Van Landeghem, «A bi-criteria heuristic for the vehicle routing problem with time windows,» *European Journal of Operational Research*, vol. 36, pp. 217 - 226, 1988.
- [117] P. M. Thompson y H. N. Psaraftis, «Cyclic transfer algorithms for

- multivehicle routing and scheduling problems,» *Operations Research*, vol. 41, pp. 935 - 946, 1993.
- [118] J. Y. Potvin y J. M. Rousseau, «An Exchange Heuristic for Routing Problems with Time Windows,» *Journal of the Operational Research Society*, vol. 46, pp. 1433 - 1446, 1995.
- [119] C. A. C. Coello y C. S. P. Zacatenco, «Introducción a la computación evolutiva,» CINVESTAV-IPN, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Computación, México, DF., 2004.
- [120] J. Aguilar, «La Programación Evolutiva en la Identificación de Sistemas Dinámicos a Eventos Discretos.,» *Revista IEEE Latinoamerica Transactions*, vol. 5, nº 5, pp. 301-310, 2007.
- [121] D. B. Fogel, «An introduction to simulated evolutionary optimization,» *IEEE Transactions on neural networks*, vol. 3, pp. 3-14, 1994.
- [122] A. Hoffman, *Arguments on Evolution: A Paleontologist's Perspective*, New York: Oxford University Press, 1989.
- [123] D. B. Fogel, *Evolutionary Computation. Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1995.
- [124] E. Mayr, «Processes of speciation in animals,» *Progress in clinical and biological research*, vol. 96, pp. 1-19, 1982.
- [125] J. Cabrero y J. P. M. Camacho, «Fundamentos de genética de poblaciones,» de *Evolución: la base de la biología*, Granada, Proyecto Sur, 2002, pp. 83-126.

- [126] M. Aguilera y J. F. Silva, «Especies y biodiversidad,» *Interciencia*, vol. 22, n° 6, pp. 299-306, 1997.
- [127] M. Ridley, *Evolution*, Boston: Blackwell, 1993.
- [128] A. Eiben y J. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*, Springer, 2015.
- [129] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- [130] D. Whitley, S. Rana y R. Heckendorn, «Representation issues in neighborhood search and evolutionary algorithms,» de *Genetic Algorithms and Evolution Strategy in Engineering and Computer Science*, West Sussex, England, John Wiley and Sons, 1998, pp. 39-57.
- [131] C. A. Coello, A. D. Christiansen y A. H. Aguirre, «Using a new GA-based multiobjective optimization technique for the design of robot arms,» *Robotica*, vol. 16, n° 4, pp. 401-414, 1998.
- [132] H. P. Schwefel, *Evolution and Optimization Seeking*, New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [133] J. R. Koza, *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, MIT press, 1992.
- [134] D. E. Goldberg y K. Deb, «A comparison of selection schemes used in genetic algorithms,» de *Foundations of Genetic Algorithms*, California, Morgan Kaufmann, 1991, pp. 69 - 93.
- [135] D. Dasgupta y D. R. McGregor, «A more biologically motivated genetic algorithm: the model and some results,» *Cybernetics and Systems: An*

- International Journal*, vol. 25, nº 3, pp. 447-469, 1994.
- [136] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Cambridge: MIT Press, 1992.
- [137] A. K. De Jong, «An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems,» de *PhD thesis*, University of Michigan, 1975.
- [138] D. H. Ackley, *A Connectionist Machine for Genetic Hillclimbing*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [139] G. Syswerda, «Uniform Crossover in Genetic Algorithms,» de *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, California, Morgan Kaufmann Publishers, 1989, pp. 2 - 9.
- [140] L. J. Fogel, A. J. Owens y M. J. Walsh, *Artificial intelligence through simulated evolution*, Chichester, UK: Wiley, 1966.
- [141] L. J. Fogel, «Intelligence Through Simulated Evolution,» de *Forty years of Evolutionary Programming*, New York, John Wiley & Sons, 1999.
- [142] H. G. Beyer y H. P. Schwefel, «Evolution strategies - A comprehensive introduction,» *Natural computing*, vol. 1, nº 1, pp. 3-52, 2002.
- [143] J. H. Holland, «Concerning efficient adaptive systems,» de *Self-Organizing Systems*, Washington, D.C., Spartan Books, 1962, pp. 215-230.
- [144] J. H. Holland, «Outline for a logical theory of adaptive systems,» *Journal of the Association for Computing Machinery (JACM)*, vol. 9, nº 3, pp. 297-314, 1962.
- [145] D. E. Goldberg, «Genetic Algorithms in Search,» de *Optimization, and Machine Learning*, Alabama, Addison Wesley Longman Inc, 1989.

- [146] A. Wetzel, Evaluation of the effectiveness of genetic algorithms in combinatorial optimization., Pittsburgh, Philadelphia, USA: University of Pittsburgh, 1983.
- [147] L. D. Whitley, «The GENITOR Algorithm and Selection Pressure: Why Rank-Based Allocation of Reproductive Trials is Best,» de *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, California, Morgan Kaufmann Publishers, 1989, pp. 116-121.
- [148] B. P. Buckles y F. E. Petry, Genetic Algorithms, IEEE Computer Society Press, 1992.
- [149] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1992.
- [150] J. Y. Potvin y S. Bengio, «The Vehicle Routing Problem with Time Windows-Part II: Genetic Search,» *Journal on Computing*, vol. 2, nº 8, pp. 165-172, 1996.
- [151] J. Berguer, M. Salois y R. Begin, «A hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows,» de *Proceedings of the 12th Biennial Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*, Berlin, Springer-Verlag, 1998, pp. 114-127.
- [152] O. Bräysy, «A new algorithm for the vehicle routing problem with time windows based on the hybridisation of a genetic algorithm and route construction heuristics,» *Proceedings of the University of Vaasa, Research papers*, vol. 227, 1999.
- [153] J. Berguer, M. Barkaoui y O. Bräysy, «A Parallel Hybrid Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows,» de

- Working paper, Defense Research Establishment Valcartier, Canada, 2001.*
- [154] Y. Rochat y E. Taillard, «Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing,» *Journal of Heuristics*, vol. 1, pp. 147-167, 1995.
- [155] E. D. Taillard, P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin y J. Y. Potvin, «A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows,» *Transportation Science*, vol. 2, n° 31, pp. 170-186, 1997.
- [156] W. Chiang y R. Russell, «Simulated Annealing Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows,» *Department of Quantitative Methods, University of Tulsa*, pp. 74-104, 1993.
- [157] S. R. Thangiah, I. H. Osman y T. Sun, «Hybrid genetic algorithm, simulated annealing and tabu search methods for vehicle routing problems with time windows,» *Computer Science Department, Slippery Rock University*, 1994.
- [158] P. Killby, P. Prosser y P. Shaw, «Guided Local Search for the Vehicle Routing Problem With Time Windows,» de *Metaheuristics: Advances and Trends in Local Search for Optimization*, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 473-486.
- [159] R. Cordone y R. Wolfer-Calvo, «A heuristic for vehicle routing problems,» Politecnico di Milano, Dipartimento di Electronica e Informazione, Milan, Italy, 1998.
- [160] G. C. Williams, *Natural selection. Domains, levels, and challenges*, Oxford: Oxford University Press, 1992.
- [161] D. H. Wolpert y W. G. Macready, «No free lunch theorems for

optimization,» *Evolutionary Computation, IEEE Transactions*, vol. 1, nº 1, pp. 67-82, 1997.

## BIBLIOGRAFÍA

- T. Bäck, D. B. Fogel, y Z. Michalewicz, *Evolutionary computation 1: Basic algorithms and operators (Vol. 1)*. CRC Press, 2000
- R. H. Ballou, *Logística. Administración de la cadena de suministro*, 5ta ed., México: Pearson Educación, 2004.
- D. J. Bowersox, D. J. Closs y M. B. Cooper, *Administración y logística en la cadena de suministros*, 2da ed., México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana, 2007.
- R. B. Chase, F. R. Jacobs y N. J. Aquilano, *Operations and supply management*, McGraw-Hill/Irwin, 2010.
- R. B. Chase, R. F. Jacobs y N. Aquilano, *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Producción y cadena de suministros*, 12 ed., México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2009.
- J. H. Chavez y R. Torrez-Rabello, *Supply Chain Management*, Santiago: RIL editores, 2012.
- S. Chopra y P. Meindl, *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación.*, México: Pearson Educación, 2008.
- A. Eiben y J. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*, Springer, 2015.
- D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison Wesley, 1989.
- M. Hugos, *Essentials of Supply Chain Management*, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- L. J. Krajewski, L. P. Ritzman y M. J. Malhotra, *Operations management: process and value chains*, 8th ed., México: Pearson Education, 2007, p. 752.
- Z. Michalewicz, *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*. Springer Science & Business Media, 2013

- R. G. Schroeder, S. M. Goldstein y M. J. Rungtusanatham, Administración de operaciones. Conceptos y casos contemporáneos, México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2011.
- P. Toth y D. Vigo, The vehicle routing problem. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001