

Optimización de Rutas basadas en Soft Computing para Movilidad Inteligente

Tesis doctoral



Airam Expósito Márquez

Directores: Dr. Julio Brito Santana
Dr. José Andrés Moreno Pérez

Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas
Universidad de La Laguna

Memoria para la obtención del título de
Doctor en Ingeniería Informática

mayo 2020

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Agradecimientos

Este trabajo no hubiese sido posible sin las contribuciones que muchas personas han aportado a lo largo del proceso de desarrollo.

En primer lugar me gustaría agradecer a mis directores de tesis, Julio y José Andrés, su apoyo constante, esfuerzo personal, tiempo y paciencia dedicados. Han sido una fuente de motivación y sabiduría, y luz guía a lo largo de estos años. Gracias por la confianza ofrecida, el trato cercano, la amistad y el tiempo que hemos estado juntos hasta llegar a este punto.

Por supuesto, agradecer a compañeros y amigos del grupo de investigación y departamento, especialmente a Marcos y Belén por su tiempo, apoyo, consejos y trato cercano dados durante este tiempo.

Agradecer especialmente a Günther y Simona por hacerme sentir como en casa y por los conocimientos, discusiones y consejos brindados durante las estancias realizadas.

Quiero dar las gracias a mis amigos y compañeros de facultad Christopher e Israel por el apoyo, conocimientos e ideas compartidas, y las incontables horas de tertulias y discusiones.

Finalmente, me gustaría agradecer a toda mi familia, especialmente a mis padres y mi hermana, por su paciencia, cariño y apoyo constante a lo largo de este proceso. Y a toda la familia de amigos que siempre han estado apoyándome. Ellos me han brindado la confianza y soporte que se requieren.

Sin el apoyo de muchas personas este trabajo no hubiera sido posible, es por ello que este trabajo es también el suyo.

Muchas gracias a todos.

Airam Expósito Márquez

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Abstract

Passenger and freight mobility is one of the major challenges for the development of islands, cities, and territories in general. The prosperity, competitiveness, and sustainability of several economic and business areas are affected by mobility. Population growth, limited capacity of territories transport systems and infrastructures, and environmental impact of transport force territories to address the challenge of developing sustainable and effective mobility. Under this scenario, a territory with sustainable and efficient transport and mobility management offers citizens better quality of life in a place in which mobility is not an inconvenience.

Digital transformation and ICTs drive the improvement of mobility services for citizens, help to correctly manage demand in transport networks, and generate economic and environmental value. The emergence of smart mobility integrates transport system, infrastructures, and technologies to make passenger and freight transport efficient, accessible, safer, and cleaner. Therefore, the smart mobility strategies must be able to provide tangible economic and environmental benefits and improve the quality of freight and passenger transport. It means taking actions on multiple fronts; efficient management of freight and passenger mobility, reducing environmental impact, improving the planning and efficiency of public transport, reducing congestion, optimizing use of physical infrastructure, among others.

One of the key operations for mobility services is route planning operations. This operational activity mainly includes two modes of transport, freight and passenger. Most of the freight and passenger transports are carried out through road transport. The decisions taken concerning route planning operations affect the economic and environmental side, and the quality of life of citizens in territories. The route planning operations can be optimized to improve several dimensions such as quality of service, costs, service flexibility, energy consumption, environmental impact, sustainability, among others.

The task of addressing route planning operations gives rise to the appearance of complex combinatorial optimization problems that require considering several requirements, constraints, information sources, among others. In most of the cases, these optimization problems are classified as \mathcal{NP} -hard with respect to their computational complexity. This class of problems requires efficient optimization approaches and smart strategies in order to obtain high-quality solutions while avoiding large computational times. In this regard, approximate optimization approaches, such as heuristic and metaheuristics, and smart techniques inherent in Artificial

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

VI

Intelligence and Soft Computing have proven to be effective and efficient methods to solve complex route planning problems.

This thesis presented as a compendium of publications aims to design, implement, and validate simple, efficient and flexible optimization procedures based on Artificial Intelligence and Soft Computing dedicated to improving route planning solutions in the contexts of freight transport, personalized tourist trip planning, and eco-efficient recyclable waste transport. Several solution approaches to solve Vehicle Routing Problem with Time Windows, Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows, Team Orienteering Problem with Time Windows, Tourist Trip Design Problem, and real-world and new variants of these mentioned problems have been proposed. The quality of service, customer orientation, imprecision and uncertainty in information, and eco-efficiency are criteria considered in the identified route planning problems. The computational experiments have proved that the proposed methods and techniques are suitable to obtain high quality solutions within short computational times and can be incorporated as modules into intelligent transport systems.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Índice general

Índice de figuras	IX
1. Introducción	1
1.1. Ámbito general de la tesis	1
1.2. Motivación	5
1.3. Hipótesis y objetivos	7
1.4. Contribuciones	8
1.5. Metodología	13
1.6. Estructura de la tesis	14
2. Transporte y planificación de rutas	17
2.1. Movilidad, ciudades y territorios inteligentes	17
2.2. Transporte	18
2.3. Turismo y transporte	20
2.4. Gestión de la cadena de suministro y planificación de rutas	22
2.5. Sistemas inteligentes de planificación de rutas	23
2.6. Problemas de planificación de rutas	26
2.6.1. Problemas de rutas para transporte de mercancías orientados a la calidad de servicio	26
2.6.2. Problemas de rutas recogida de residuos	28
2.6.3. Problemas de diseño de rutas turísticas	29
2.7. Soft Computing	31
2.7.1. Métodos de optimización difusa	32
2.7.2. Heurísticas y metaheurísticas	33
3. Investigación	37
3.1. Quality of Service Objectives for Vehicle Routing Problem with Time Windows	37
3.1.1. Resumen	37
3.1.2. Objetivos de investigación	38
3.1.3. Metodología	38

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

3.1.4. Resultados obtenidos y conclusiones finales	39
3.2. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure to Design Waste Collection Routes in La Palma	40
3.2.1. Resumen	40
3.2.2. Objetivos de investigación	41
3.2.3. Metodología	41
3.2.4. Resultados obtenidos y conclusiones finales	43
3.3. A Fuzzy GRASP for the Tourist Trip Design with Clustered POIs	44
3.3.1. Resumen	45
3.3.2. Objetivos de investigación	45
3.3.3. Metodología	46
3.3.4. Resultados obtenidos y conclusiones finales	47
3.4. GRASP-VNS for a periodic VRP with time windows to deal with milk collection	48
3.4.1. Resumen	49
3.4.2. Objetivos de investigación	49
3.4.3. Metodología	50
3.4.4. Resultados obtenidos y conclusiones finales	51
4. Conclusions and Further Research	53
4.1. Conclusions	53
4.2. Further Research	55
Bibliografía	59
Apéndices	69
A. Quality of service objectives for vehicle routing problem with time windows	71
B. Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in La Palma	85
C. A fuzzy GRASP for the tourist trip design with clustered POIs	101
D. GRASP-VNS for a Periodic VRP with Time Windows to Deal with Milk Collection	121

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Índice de figuras

1.1. Relación entre la cadena de suministros, la logística y el transporte	3
1.2. Metodología y proceso seguido	13
2.1. Ciclos de la cadena de suministro	22

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Lista de Acrónimos

ACO	Ant Colony Optimization
ACS	Ant Colony Systems
BSRP	Bus School Routing Problem
CCVRP	Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
DE	Differential Evolution
DMP	Delivery Man Problem
Ee-VRP	Eco-efficient Vehicle Routing Problem
FLP	Fuzzy Linear Programming
GCI	Grupo de Computación Inteligente
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
GVRP	Green Vehicle Routing Problem
I+D+i	Investigación, Desarrollo e Innovación
ILS	Iterated Local Search
IoT	Internet of Things
IoV	Internet of Vehicles
ITS	Intelligent Transport System
IUDR	Instituto Universitario de Desarrollo Regional
JFO	Jumping Frog Optimization
LNCS	Lecture Notes in Computer Science

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

LNS	Large Neighbourhood Search
m-TSP	Multiple Traveling Salesman Problem
MIP	Mixed Integer Programming
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MLP	Minimum Latency Problem
MTRP	Multiple Travelling Repairmen Problem
OP	Orienteering Problem
PET	Personalised Electronic Tourist Guide
PIB	Producto Interior Bruto
POI	Point Of Interest
PRP	Pollution Routing Problem
PSO	Particle Swarm Optimization
PVRPTW	Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows
QSVRPTW	Quality Service Vehicle Routing Problem with Time Windows
RIS3	Estrategia de Especialización Inteligente de Canarias
SA	Simulated Annealing
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TOP	Team Orienteering Problem
TOPTW	Team Orienteering Problem with Time Windows
TS	Tabu Search
TSP	Traveling Salesman Problem
TTDP	Tourist Trip Design Problem
TTDP-Clu	Tourist Trip Design Problem with Clustered POIs
VND	Variable Neighborhood Descent
VNS	Variable Neighborhood Search

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Índice de figuras

XIII

- VRP** Vehicle Routing Problem
- VRPRL** Vehicle Routing Problem in Reverse Logistics
- VRPTW** Vehicle Routing Problem with Time Windows

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Capítulo 1

Introducción

1.1. Ámbito general de la tesis

Uno de los grandes retos a los que se enfrentan los territorios en general, y en particular las ciudades, islas y destinos turísticos, es tratar de planificar su futuro de forma que proporcione un desarrollo del bienestar social y de la economía con un enfoque sostenible. Este reto es abordado por territorios, ciudades, islas y destinos, que hacen esfuerzos estratégicos en situarse como espacios inteligentes, apoyados en el aprovechamiento de los avances científicos y tecnológicos. Los territorios inteligentes son aquellos con capacidad de dotarse de un perfil propio, apoyado en sus singularidades y componentes de excelencia. Un perfil que tiene que ser competitivo para las actividades económicas, equilibrado socialmente y sostenible desde el punto de vista ambiental y cultural [132]. El “Plan Nacional de Territorios Inteligentes”¹ define un territorio inteligente como un conjunto de elementos interrelacionados que han de comunicarse entre sí, cuyos objetivos son ofrecer mejores servicios a los ciudadanos, dar respuesta a las necesidades de los territorios más desfavorecidos y generar nuevos modelos de negocio que impulsen la economía. Los resultados esperados están asociados a la mejora de la calidad de vida, desarrollando servicios avanzados para el ciudadano y estrategias de economía sostenible. En este sentido, las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC) son herramientas fundamentales para afrontar los retos de crecimiento y complejidad de los territorios, y alcanzar los resultados esperados. No es posible hablar de territorios inteligentes sin las TICs y sin transformación digital. Concretamente, tecnologías como, las conexiones inalámbricas 4G y de nueva generación 5G, el Internet de las cosas (IoT), el Big Data y análisis de datos, el cloud computing y edge computing, entre otros, son esenciales para abordar los retos sociales y económicos de forma sostenible en el futuro. Los avances en computación, comunicaciones y electrónica han proporcionado múltiples dispositivos para capturar y aprovechar grandes cantidades de datos. El desarrollo de herramientas y sistemas

¹Plan Nacional de Territorios Inteligentes. Diciembre 2017. Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

digitales facilita su análisis y tratamiento, por el cual se dispone de conocimiento, que permite gestionar los recursos más eficientemente y, planificar y tomar decisiones más adecuadas, inteligentes y sostenibles.

En el contexto de territorios inteligentes uno de los pilares fundamentales es la movilidad inteligente. Desarrollar patrones de movilidad sostenibles y eficientes es necesario para garantizar que el transporte de personas y mercancías se desarrolle de forma eco-eficiente, limitando el impacto medioambiental y garantizando la calidad de vida del entorno donde se desarrolla. Para ello es esencial la planificación de servicios de movilidad atendiendo a los cambios de comportamiento a través del uso de sistemas inteligentes, los cuales impulsan el desarrollo de la movilidad y accesibilidad sostenibles. Las tecnologías y el conocimiento disponible facilitan un entendimiento mayor de las demandas, que favorece una mejor y más inteligente planificación de la movilidad, servicios más personalizados y eficientes a los ciudadanos y al mismo tiempo una reducción de las externalidades negativas, como la congestión y la contaminación. Las nuevas estrategias que se están diseñando actúan en múltiples frentes, entre otros los siguientes:

- la gestión eficiente del movimiento de mercancías y personas,
- cambios del modelo energético hacia sistemas renovables, sostenibles, eficientes y de alta reducción del consumo,
- el diseño de nuevos espacios urbanos, infraestructura y equipamiento,
- el fomento de nuevos modos de transporte, incluida la movilidad compartida,
- la implementación de plataformas digitales de gestión de servicios y plataformas de logística flexible,
- el desarrollo de sistemas inteligentes de transporte, sistemas de gestión y seguimiento de flotas y sistemas intermodales conectados a la infraestructura,
- la puesta en marcha de sistemas de información y ayuda a la planificación orientados al ciudadano.

La gestión inteligente de la movilidad permite alinear las necesidades y condiciones cambiantes de las regiones para mejorar la eficacia y eficiencia de las cadenas de suministro de la que forman parte múltiples actores. La gestión inteligente de las cadenas de suministro y las operaciones de transporte que en ella se dan, son catalizadores fundamentales de una economía moderna y sostenible, incidiendo de forma directa en la competitividad, productividad y eficiencia de los distintos sectores económicos. Afectan a la prosperidad y sostenibilidad económica de las regiones, proveyendo un significativo aporte al producto interior bruto (PIB), al empleo, al bienestar social y a la calidad de vida. Es por ello que las cadenas de suministros han sido objeto de estudio por parte de la comunidad científica desde numerosas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

áreas de conocimiento. La cadena de suministros se define como el conjunto de actividades de producción, distribución y comercialización de productos y servicios, y por tanto, incluye todos aquellos procesos necesarios hasta hacerlos llegar al consumidor final. En la industria tradicional, este conjunto de procesos abarca el abastecimiento y producción mediante la fábrica de componentes y el ensamblaje final, hasta la distribución en los mercados finales, con la inclusión de todas las operaciones de almacenamiento, transporte y gestión de materias relativas a la logística. Los actores que forman parte de la cadena de suministros constituyen una estructura interrelacionada de diferentes entidades que dependen unas de las otras [90]. La compleja tarea que supone organizar la cadena de suministros abarca la gestión de todas sus operaciones, incluyendo la integración, coordinación, planificación y control de los flujos de productos e información entre intermediarios, proveedores y clientes [34].

A su vez dentro de la cadena de suministros, la logística está formada por el conjunto de actividades de transporte y almacenamiento que permiten llegar al lugar previsto en condiciones de tiempo y cantidad apropiadas para satisfacer la demanda minimizando el coste de las actividades [32]. La importancia de una adecuada gestión e implementación de las operaciones logísticas incide directamente en la adquisición, abastecimiento y planificación de la producción y del servicio al cliente [13]. Es importante destacar, en contra de la concepción establecida, que la logística no es sinónimo de transporte, tiene un alcance más amplio. Para aclarar este hecho, la figura 1.1 muestra la relación entre la gestión de la cadena de suministros, la gestión de la logística y las operaciones de transporte. Por su parte las operaciones de transporte desempeñan un papel fundamental dentro de la gestión de la cadena de suministros y la logística [92]. El peso del coste medio de la logística para la industria en España es del

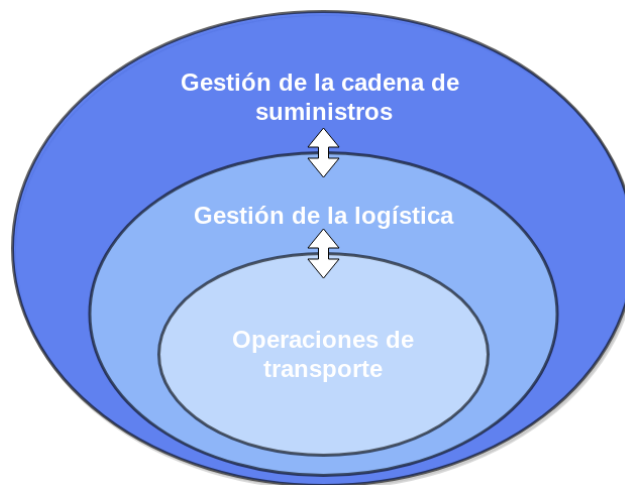


Figura 1.1 Relación entre la cadena de suministros, la logística y el transporte

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

6,5 % de su volumen de negocio. El 60 % de este coste es derivado del transporte y el 40 % restante pertenece al almacenamiento. Las decisiones relativas a la logística tienen efecto en el precio final de los bienes transportados y almacenados. En España, el 6,5 % del precio final de los bienes de consumo corresponde a costes de transporte y almacenamiento².

En las Islas Canarias, el contexto geográfico de esta tesis, la movilidad presenta una serie de características que afectan particularmente a su desarrollo. Su condición archipelágica y su orografía hacen que las islas tengan características como lejanía respecto a los principales mercados, dependencia y vinculación con el exterior, territorio reducido y fragmentado, y alta densidad y dispersión de la población. Estas singularidades influyen en la cadena de suministros, la logística y el transporte, afectando a la cohesión y a la competitividad. Las islas tienen una dependencia económica del exterior, y el transporte de mercancías y personas es un factor crítico en el comercio exterior e interior. Este factor, sumado a un mercado interior reducido que no permite el desarrollo de una economía de escala, incide negativamente en la competitividad de las empresas de la región. No obstante, el potencial aprovechamiento de las singularidades permitiría el desarrollo sostenible de las regiones archipelágicas ultraperiféricas³. Un conjunto de estas ventajas se encuentran relacionado con la conectividad y accesibilidad y, estrechamente ligadas a la logística y transporte, a las tecnologías de la información y las comunicaciones y al turismo como motor clave para la economía de la región. Son objetivos específicos de la Estrategia de Especialización Inteligente de Canarias 2014-2020 (RIS3)⁴ la mejora de la accesibilidad, la potenciación de las actividades logísticas, la economía baja en carbono, el desarrollo industrial, la eficiencia energética, la digitalización y el liderazgo inteligente del turismo.

La condición archipelágica de Canarias no solo incide en la movilidad, sino también en otro sector íntimamente ligado y principal generador de riqueza y empleo del archipiélago canario, el sector turístico. En su mayor parte, la estructura sectorial de la región está soportada en el sector servicios, más de tres cuartas partes, y dentro de éste, el turismo es el que mayor peso presenta en la economía y empleo. Los indicadores económicos confirman esta situación: un 35 % del total del PIB en Canarias, un 40,4 % del total del empleo, un 10,9 % del total del gasto público y un 34,9 % del total de impuestos recaudados son provenientes del turismo en el año 2018⁵. Existen retos que deben ser afrontados en el sector, como son, los indicadores medioambientales y la huella de carbono que genera, y el impacto socio-económico y las señales de agotamiento de un modelo de crecimiento cimentado en la acogida de un mayor número de turistas. Estos retos requieren iniciativas innovadoras, basadas en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), con el objetivo de impulsar proyectos de calidad que fomenten el desarrollo

²Fuente: Estudio de caracterización del sector del transporte y la logística en España 2016. Everis

³Comunicación de la Comisión. Las Regiones Ultraperiféricas: una ventaja para Europa. COM(2008) 642 final de 17 de octubre de 2008

⁴<https://www3.gobiernodecanarias.org/aciisi/ris3/>

⁵IMPACTUR Canarias 2018, Estudio del Económico del Turismo sobre la economía y el empleo de las Islas Canarias. EXCELTUR, Gobierno de Canarias

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

minimizando los impactos negativos medioambientales y sociales. Esto es, la transición hacia un destino turístico inteligente que garantice el desarrollo sostenible del territorio, accesible para todos y facilite la interacción e integración del visitante con el entorno. Una estrategia inteligente e innovadora soportada sobre una infraestructura tecnológica de vanguardia permite a la vez incrementar la calidad de la experiencia en el destino y mejorar la calidad de vida del residente. En un destino inteligente, la movilidad inteligente es una parte fundamental del mismo. La accesibilidad de turistas a los destinos, el transporte a puntos de interés, el traslado entre éstos y el retorno a los lugares donde se alojan, son servicios y experiencias claves. La movilidad eficiente de un destino turístico tiene un gran impacto en la experiencia turística, explicando cómo viajan las personas y por qué eligen diferentes formas de vacaciones, destinos y transporte [81]. Por ello, es de interés disponer de sistemas y herramientas que faciliten la información, la planificación y el diseño de itinerarios turísticos personalizados, teniendo en cuenta las preferencias del turista.

En los territorios inteligentes los servicios de movilidad y los sistemas que facilitan la información y la planificación del transporte tienen que orientarse al usuario, al ciudadano y a la calidad, además de ser eficientes y sostenibles. Los sistemas que ayudan a la planificación de rutas deben perseguir objetivos similares, orientación al cliente y a la calidad del servicio, canalizar una gestión eficiente y sostenible de los recursos disponibles, incluyendo los medioambientales, y tener la capacidad de adaptarse y ser flexibles a entornos complejos y cambiantes. Las técnicas y métodos de Inteligencia Artificial, y más concretamente los de la Soft Computing, aportan soluciones inteligentes en el ámbito de los sistemas de planificación de rutas. Más específicamente, los enfoques aproximados y flexibles, como las técnicas heurísticas y metaheurísticas, y los métodos de optimización difusa, con el uso de los conjuntos y sistemas difusos para el tratamiento de la información vaga e imprecisa, son herramientas claves para el desarrollo de sistemas inteligentes de ayuda a la movilidad y particularmente, los sistemas de planificación de rutas.

1.2. Motivación

La presente tesis se encuentra avalada por la experiencia del Grupo de Computación Inteligente (GCI) y del Instituto Universitario de Desarrollo Regional (IUDR) de la Universidad de La Laguna en investigación relativa a problemas de optimización en movilidad y operaciones de transporte, los cuales han sido abordados principalmente a través de técnicas de Inteligencia Artificial y Soft Computing. La principal motivación por la temática que trata la presente tesis doctoral surge en origen de la experiencia citada, de los proyectos de investigación y de transferencia que se han realizado, dando respuesta a problemas de optimización de operaciones de logística y transporte, entre ellas la planificación de rutas. Otro aspecto es el diseño y desarrollo de componentes de sistemas inteligentes con diferentes técnicas de la Inteligencia Artificial y Soft Computing para dar solución a esta clase de problemas y mejorar

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

la calidad de las soluciones obtenidas. A continuación describimos algunos aspectos específicos, relacionados con el transporte y la movilidad, que motivan el trabajo de investigación realizado.

En la movilidad inteligente la gestión eficiente de la cadena de suministros es fundamental para permitir la producción de bienes, mercancías y servicios, además de garantizar que estos sean dispuestos de forma eficaz y eficiente. La mejora continua de la eficiencia, eficacia y sostenibilidad de estas operaciones es uno de los retos clave y más complejos que afrontan las empresas y organizaciones. El apoyo y el desarrollo de proyectos e iniciativas de I+D+i en el entorno de la movilidad, la gestión de la cadena de suministro y el transporte son claves para abordar y mejorar estas actividades, y por ende para el progreso de los territorios. El desarrollo de proyectos de investigación y transferencia en el marco descrito ha sido uno de los factores motivadores. La investigación realizada durante esta tesis ha sido base para los proyectos ejecutados, los cuales se referencian posteriormente.

Un elemento motivador de esta tesis, es proveer transporte con mayor calidad de servicio, ligado a la mejora de la satisfacción del cliente [22]. La orientación al cliente de los objetivos, de los servicios y operaciones de transporte y su gestión eficiente y sostenible son fundamentales. La percepción de mayor calidad en el servicio por parte del cliente es dependiente de la reducción de los tiempos de comienzo del servicio, el cumplimiento de los tiempos de respuesta y la adaptación del servicio a sus necesidades y preferencias. La planificación de rutas debe considerar un enfoque orientado al cliente y entre sus objetivos tener en cuenta criterios de calidad, sostenibilidad y satisfacción del cliente. Las soluciones de alta calidad en problemas de planificación de rutas de recogida y entrega de bienes y mercancías se debe centrar en obtener niveles de servicio elevado y eco-eficientes, con el menor consumo de recursos, es decir reducción de costes y de impacto medioambiental. En el caso de la planificación de rutas turísticas, focalizar en el diseño de rutas que se ajusten a las preferencias del turista y que supongan una reducción en el uso de recursos. En ambas aplicaciones, es necesario disponer de herramientas inteligentes que permitan evaluar soluciones alternativas y obtener la solución más adecuada.

Otra de las motivaciones está asociada con la investigación en problemas reales y aplicados presentes en usuarios, empresas y organizaciones cuando planifican sus rutas. Los problemas abordados en esta tesis son lo suficientemente complejos y su espacio de soluciones lo suficientemente grande como para que las heurísticas, metaheurísticas y otras técnicas de la Inteligencia Artificial y Soft Computing sean apropiadas para la búsqueda de soluciones aproximadas. En contextos reales y aplicados, una planificación eficiente, eficaz y flexible tiene que dar respuesta a los cambios del entorno y requiere de la recolección y disponibilidad de datos e información de usuarios, operadores y territorio. Es común que estos datos e información no estén disponibles con certeza, precisión, exactitud y completitud para llevar a cabo la planificación. Así, un elemento motivador ha sido la incorporación de técnicas que permitan tratar información imprecisa e incompleta y encontrar las mejores soluciones para la planificación de las operaciones de transporte. En este sentido, se ha trabajado en el modelado

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

de problemas de planificación de rutas considerando información imprecisa y metodologías con capacidad y flexibilidad para abordar este tipo de problemas. Las herramientas de planificación de rutas para su éxito deben disponer de técnicas y métodos eficaces y eficientes de optimización en ambientes de decisión difusos e imprecisos.

Actualmente se asiste a la creciente preocupación por el impacto medioambiental, la cual ejerce presión sobre territorios, gobiernos y empresas para el desarrollo de actividades sostenibles. Una actuación estratégica en políticas de sostenibilidad es el fomento de la movilidad inteligente de personas y mercancías con el objetivo de disponer de un ecosistema de transporte eficiente, competitivo, y ambientalmente sostenible. Otra de las actuaciones aborda la creciente generación de residuos debido a factores como, la urbanización, el aumento de la población y su nivel de vida, y la gestión de los mismos. El equilibrio entre proporcionar servicios de alta calidad a los ciudadanos y la reducción del impacto medioambiental hacen necesario diseñar nuevos procesos de gestión eco-eficientes del transporte, incluyendo la recogida y e traslado de residuos sólidos. Esta tesis también ha puesto el foco de interés en abordar problemas de planificación de rutas de transporte y de recogidas de residuos con criterios eco-eficientes.

1.3. Hipótesis y objetivos

A tenor del ámbito de la tesis y de los elementos motivadores de la investigación presentados previamente, las hipótesis de partida de la tesis son las siguientes: puede mejorarse la planificación de rutas utilizando técnicas inteligentes que se adapten a información, criterios de decisión y objetivos de problemas reales; los procedimientos actuales no contemplan de manera adecuada la orientación al cliente y criterios de referencia de calidad del servicio y es necesario diseñar otros; y las técnicas híbridas que combinan diferentes componentes de la Inteligencia Artificial y Soft Computing aportan la inteligencia que los procedimientos de optimización necesitan y son las técnicas apropiadas para implementar sistemas de planificación.

El objetivo principal de esta tesis doctoral es el diseño, implementación y validación de procedimientos de optimización simples, eficientes y flexibles basado en Inteligencia Artificial y Soft Computing dedicados a la mejora de la planificación de rutas, en ambientes imprecisos, orientado a la calidad y eficiencia del servicio que contribuyan al conocimiento en estos campos. Los problemas tratados centran principalmente su atención en los contextos de planificación de rutas para transporte de recogida y entrega de mercancías, planificación de rutas eco-eficientes para la recogida de residuos y la planificación de rutas turísticas personalizadas. Las componentes de optimización resultantes pueden ser integradas con posterioridad en el desarrollo de Sistemas de Información, Sistemas de Planificación y Sistemas Inteligentes de Transporte, de forma que sirvan de soporte y ayuda a la toma de decisiones a usuarios y actores en las operaciones de planificación citadas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Para el alcance y cumplimiento del objetivo general de esta tesis se deben lograr una serie de objetivos específicos asociados a cada uno de los contextos citados anteriormente. Concretamente se espera obtener una descripción y análisis de cada problema, la especificación de características y los enfoques emergentes. El entorno en el que se abordan los problemas demanda analizar las condiciones y características como: la adaptación al cliente, criterios de calidad y eficiencia en el servicio que demandan los clientes, criterios eco-eficientes, imprecisión de la información, flexibilidad en las soluciones alternativas a los problemas. Todos ellos son explorados en la literatura. Este objetivo cubre la especificación formal, características reales de los problemas, descritas anteriormente, así como se incorporan preferencias de los usuarios y el agrupamiento de localizaciones.

Por último, es fundamental diseñar e implementar técnicas y métodos basados en Inteligencia Artificial y Soft Computing para la resolución de los modelos formulados, así como la evaluación del comportamiento y rendimiento computacional de las mismas. Estas técnicas y métodos deben encontrar soluciones eficientes y flexibles en supuestos más realistas, a través de la gestión de la imprecisión de la información y la utilización de metaheurísticas.

1.4. Contribuciones

A lo largo del trabajo de desarrollo de la tesis doctoral y en el alcance de los objetivos, se ha generado una serie de contribuciones, resultados de la investigación en el ámbito de las operaciones de planificación de rutas en los contextos citados.

Entre las contribuciones generadas, las más relevantes son citadas a continuación:

1. Revisiones

Revisión de la literatura y estado del arte acerca del ámbito, novedades, intereses, enfoques emergentes y problemas de planificación de rutas. A lo largo de la tesis se ha realizado una revisión del estado del arte y de la literatura de problemas de planificación de rutas atendiendo a los aspectos motivacionales y a enfoques emergentes a abordar. El objetivo es responder a, qué modelos de planificación pueden aplicarse a los problemas reales y actuales, y cómo abordarlos en esta tesis [25], [50].

■ Publicaciones:

- Expósito-Izquierdo, C., Expósito-Márquez, A. and Brito-Santana, J. (2017). Mobility as a Service. Cap. 15 in *Smart Cities. Foundations, Principles, and Applications* (eds H. Song, R. Srinivasan, T. Sookoor and S. Jeschke), Wiley, pages 409-436. <https://doi.org/10.1002/9781119226444.ch15>
- Brito, J., Castellanos-Nieves, D., Expósito, A., and Moreno, J.A. (2018). Soft Computing Methods in Transport and Logistics. In: Pelta D., Cruz Corona C. (eds) in *Soft Computing Based Optimization and Decision Models*. Studies

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

in Fuzziness and Soft Computing, vol 360. Springer, Champages, pages 45–61.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-64286-4_3

2. Rutas de recogida y entrega.

Modelado y resolución de problemas de planificación de rutas de entrega y recogida de mercancías, específicamente las variantes con ventanas de tiempo y de planificación periódica, considerando la orientación al cliente, la calidad de servicio y otros supuestos. Estas contribuciones hacen hincapié en el diseño y aplicación de metaheurísticas a modelos de optimización que tienen como objetivo la calidad del servicio a través de diferentes métricas [45], [19], [23], [17], [42], [49], [43], [46]. Adicionalmente, se consideran otras aportaciones relativas al modelado y resolución de problemas de planificación de rutas cerradas y abiertas, es decir con subcontratación de operaciones combinadas con vehículos propios [20].

■ Publicaciones:

- Brito, J., Expósito, A., and Moreno, J. A. (2013). Variable neighbourhood search for close–open vehicle routing problem with time windows. *IMA Journal of Management Mathematics*, 27(1):25–38. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpt024>
- Brito J., Expósito A., Moreno-Pérez J.A. (2015). Bi-objective Discrete PSO for Service-Oriented VRPTW. In: Greiner D., Galván B., Périaux J., Gauger N., Giannakoglou K., Winter G. (eds). *Advances in Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control in Engineering and Sciences*. Computational Methods in Applied Sciences, vol 36. Springer, Cham, pages 445-460. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11541-2_29
- Expósito A., Raidl G.R., Brito J., Moreno-Pérez J.A. (2018) GRASP-VNS for a Periodic VRP with Time Windows to Deal with Milk Collection. In: Moreno-Díaz R., Pichler F., Quesada-Arencibia A. (eds). *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2017*. EUROCAST 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10671. Springer, Cham, pages 299–306. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74718-7_36
- Expósito, A., Brito, J., Moreno, J. A., and Expósito-Izquierdo, C. (2019). Quality of service objectives for vehicle routing problem with time windows. *Applied Soft Computing*, 84:105707. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105707>

■ Aportaciones a congresos:

- Expósito, A., Brito, J., Moreno, J.A. (2013). PSO discreto para el VRPTW orientado a la calidad del servicio. In Libro de Actas de la Multiconferencia CAEPIA13, pages 483–492. Asociación Española para la Inteligencia Artificial.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- Brito, J., Expósito, A., and Moreno, J. (2014). Discrete PSO for VRPTW with quality objective. In Proceedings of the 5th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing, META'14. INRIA.
- Brito, J., Expósito, A., and Pérez, J. A. M. (2015). Planificación de rutas para productos perecederos utilizando un híbrido GRASP-VNS. In Libro de Actas Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados MAEB 2015, pages 305–312.
- Expósito, A., Brito, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2015). Hybrid GRASP-VNS for milk collection problem modeled as PVRPTW. In Metaheuristic International Conference (MIC'15) proceedings.
- Expósito, A., Raidl, G. R., Brito, J., and Moreno-Pérez, J.A. (2017). Un GRASP/VNS para un problema de recogida de leche modelado como PVRPTW. In Proceeding of the Metaheuristics International Conference (MIC 2017) and the XII Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2017) Conference. Barcelona, Universitat Pompeu Fabra.

3. Diseño de rutas turísticas.

Modelado y resolución de problemas de planificación de rutas turísticas personalizadas, variantes del Tourist Trip Design Problem (TTDP). El modelado de problemas para el diseño de itinerarios turísticos y su resolución mediante técnicas de Soft Computing [41], [18]. Específicamente se propone y resuelve un nuevo modelo que introduce agrupamientos de localizaciones o de puntos de interés a visitar y, se diseñan y aplican estrategias novedosas de resolución [49], [94], [47].

■ Publicaciones:

- Expósito, A., Brito, J., and Moreno, J. A. (2016). A heuristic-biased GRASP for the team orienteering problem. In *Advances in Artificial Intelligence*, pages 428–437, Cham. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44636-3_40
- Expósito, A., Mancini, S., Brito, J., and Moreno, J. A. (2019). A fuzzy GRASP for the tourist trip design with clustered POIs. *Expert Systems with Applications*, 127:210 – 227. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.03.004>
- Moreno J., Brito J., Santana A., Castellanos D., García I., Expósito A. Smart Recommender for Blue Tourism Routing. *Lecture Notes in Computer Science*, 12014 (2020) ISSN: 0302-9743. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45096-0_25

■ Aportaciones a congresos:

- Brito, J., Expósito-Márquez, A., and Moreno, J.A. (2017). A fuzzy GRASP algorithm for solving a tourist trip design problem. The 2017 IEEE International

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por:	Fecha:
Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE 2017, Naples, Italy, July 9-12, 2017, pages 1–6. IEEE.

- Expósito-Márquez, A., Mancini, S., Brito, J., and Moreno-Pérez, J.A. (2018). Dynamic stochastic tourist trip design problem with clustered POIs. The 29th European Conference on Operational Research (EURO 2018). Valencia, EURO. The Association of European Operational Research Societies. July 8-11, 2018.

4. Rutas de recogida

Modelado y resolución de problemas de planificación de rutas para la recogida y depósito de residuos. Estas aportaciones siguen la línea que promueve la flexibilidad, simplicidad y eco-eficiencia de soluciones en problema reales de planificación de rutas para la recogida y depósito de residuos [44], [51].

■ Publicaciones:

- Expósito-Márquez, A., Expósito-Izquierdo, C., Brito-Santana, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2018). Solving an eco-efficient vehicle routing problem for waste collection with GRASP. In: Del Ser J., Osaba E., Bilbao M., Sanchez-Medina J., Vecchio M., Yang XS. (eds) *Intelligent Distributed Computing XII*, IDC 2018. Studies in Computational Intelligence, vol 798. pages 215–224, Cham. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99626-4_19
- Expósito-Márquez, A., Expósito-Izquierdo, C., Brito-Santana, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2019). Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in La Palma. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 137, November 2019, 106047. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106047>

■ Aportaciones a congresos:

- Expósito-Márquez, A., Expósito-Izquierdo, C., Brito-Santana, J., Moreno-Pérez, J. A. (2018). Solving an Eco-efficient Vehicle Routing Problem for Waste Collection with GRASP. 12th International Symposium on Intelligent Distributed Computing (IDC), Bilbao, Spain.
- Moreno-Pérez, J. A., Expósito-Márquez, A., Expósito-Izquierdo, C., Brito-Santana, J., Castellanos-Nieves, D. (2019). Recyclable Waste Collection Routing Problem, formulation and solution. VeRoLog 2019, 7th meeting of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics Optimization. Seville, Spain.

5. Rutas en contexto difuso

Modelado y resolución de problemas de planificación de rutas de vehículos considerando imprecisión e incertidumbre en la información. Aportaciones al tratamiento de la imprecisión en los datos y en las restricciones de los modelos de planificación de rutas abordados, para ello

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

se considera la optimización difusa, un enfoque metodológico simple y flexible para abordar las componentes difusas del modelo [16], [15], [21], [14], [48].

▪ **Publicaciones:**

- Brito, J., Expósito, A., Moreno, J. (2017). Planificación de viajes turísticos con preferencias y restricciones difusas. *Revista Investigación Operacional*, 38:122–131.
- Expósito, A., Mancini, S., Brito, J. Moreno-Pérez, J. (2019). Solving a Fuzzy Tourist Trip Design Problem with Clustered Points of Interest. *Recent Advances and Applications*. Studies in Fuzziness and Soft Computing, pages 3. 1–47. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10463-4_2

▪ **Aportaciones a congresos:**

- Brito, J., Expósito, A., Moreno, J. A., Verdegay, J. L. (2014). Planificación de rutas orientada a la calidad del servicio con tiempos difusos. In Libro de Actas ESTYLF2014 XVII Congreso Español sobre tecnologías y lógica Fuzzy, pages 223–228. Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza.
- Brito, J., Expósito, A., Moreno, J. A. (2016). The team orienteering problem with fuzzy times. In Libro de Actas ESTYLF2016 XVIII Congreso Español sobre tecnologías y lógica Fuzzy, pages 154–155. Departamento de Matemática Aplicada. Universidad del País Vasco.
- Brito, J., Expósito, A., Moreno, J. A. (2016). Solving the team orienteering problem with fuzzy scores and constraints. In 2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), pages 1614–1620, Vancouver, Canada.

Las contribuciones realizadas han formado parte de diferentes proyectos de investigación y de transferencia tecnológica y de conocimiento, los cuales se presentan a continuación:

Proyectos de investigación:

- Hiperheurísticas: Herramientas Inteligentes para la Optimización de la Toma de Decisiones Asistida (2011). Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España. TIN2008-06872-C04-01.
- Sistema de soporte inteligente para la resiliencia de las terminales portuarias (2016). Ministerio de Economía y Competitividad. TIN2015-70226-R.
- Planificación Inteligente de Actividades en Turismo Marino apoyadas en la Geolocalización y las TICs (2017). Fundación Cajacanarias. 2016TUR19.

Proyectos de transferencia:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- Integración de recomendador de rutas para cross selling en la plataforma de Civitfun para la gestión inteligente de la relación entre el hotel y el cliente (2017). Civitfun Tourism S.L.
- Evaluación y diseño de rutas de recogida de residuos y envases en contenedores de los municipios de la isla de La Palma (2018). Ecoembalajes España, S.A.
- Prototipo de recomendador de rutas turísticas en Wando Experiences (2019). Wando Experience, S.L.

1.5. Metodología

La metodología empleada a lo largo del trabajo de investigación de esta tesis se concreta en el estudio, diseño, implementación y análisis de las alternativas metodológicas y componentes tecnológicas, para la resolución de diversos problemas reales. La figura 1.2 muestra la metodología y proceso general seguido para abordar los problemas de planificación de rutas, y el diseño y desarrollo de componentes de optimización.

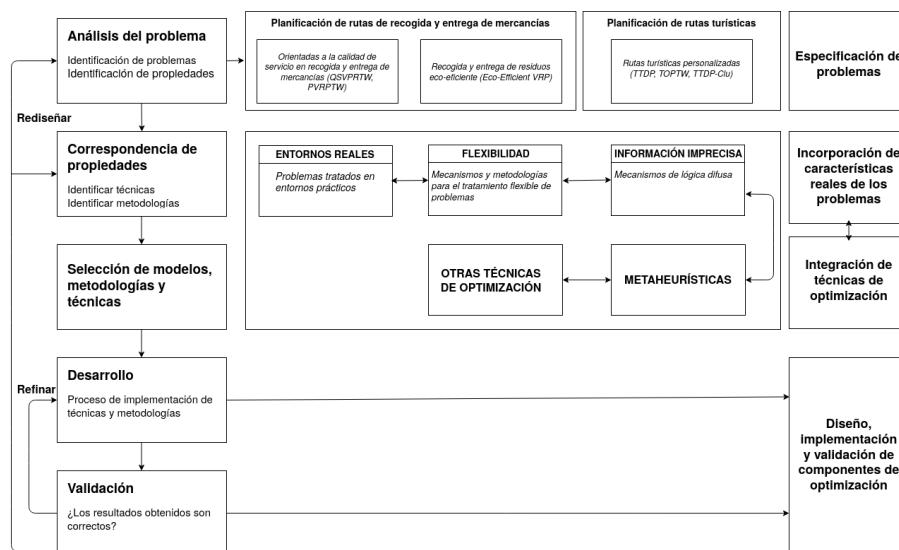


Figura 1.2 Metodología y proceso seguido

Las etapas que se muestran en la figura 1.2 se resumen de la siguiente manera:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2528892	Código de verificación: tpBnHJp1
Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

1. *Análisis del problema.* En esta etapa se identifican, estudian y analizan los problemas a través de la literatura científica y se determinan sus propiedades y características reales en los contextos trabajados a lo largo de la tesis.
2. *Correspondencia de propiedades.* A lo largo de esta etapa se mapean y emparejan las propiedades de las metodologías y técnicas de optimización con las propiedades y características de los problemas a tratar.
3. *Selección de modelos, metodologías y técnicas.* Durante esta etapa se analiza qué técnicas son las más adecuadas para dar solución a los problemas estudiados.
4. *Desarrollo y validación.* En esta etapa se desarrollan las metodologías y técnicas de optimización y de la Soft Computing seleccionadas para dar solución a los problemas, y se evalúa el rendimiento de estas.

Complementariamente a la metodología y proceso de trabajo presentada, a lo largo de la tesis se han realizado esfuerzos en la difusión de resultados y progresos obtenidos asistiendo a seminarios, congresos nacionales e internacionales especializados en los temas tratados, y en la publicación de artículos de revistas internacionales de interés en los temas propuestos.

Durante el desarrollo de la tesis se han establecido colaboraciones con diferentes entidades públicas y empresas privadas para la realización de proyectos de transferencia de conocimiento e investigación en el ámbito de la planificación de rutas. Las entidades y empresas con las que se ha colaborado son la Fundación CajaCanarias, Civitfun Tourism S.L., Ecoembalajes España S.A., y Wando Experience S.L. Estos proyectos se han centrado principalmente en los contextos de planificación de rutas para la recogida y depósito de residuos reciclables, y en el diseño de rutas turísticas personalizadas. Adicionalmente se han establecido contactos y colaboraciones con profesionales e investigadores que trabajen en planificación de rutas y temas afines de los que han surgido diferentes trabajos de investigación en común. De estas colaboraciones forman parte la realización de varias estancias de investigación que habilitan la obtención del doctorado con mención internacional de esta tesis.

1.6. Estructura de la tesis

Esta memoria de tesis se presenta en base a la modalidad de tesis por compendio de artículos. Los contenidos de este documento están organizados y estructurados en cuatro capítulos, que se describen a continuación.

El capítulo primero introduce aspectos generales de la tesis doctoral, comenzando con la descripción del ámbito y las motivaciones que han conducido el trabajo de investigación desarrollado. A continuación se definen las hipótesis de partida y los objetivos de la tesis, para posteriormente comentar las contribuciones realizada durante el proceso de investigación.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Para finalizar el capítulo se especifican las distintas fases y actividades de la metodología propuesta y seguida a lo largo de la tesis.

El segundo capítulo contiene los fundamentos conceptuales y metodológicos que han formado parte de la investigación. Las primeras secciones introducen los conceptos de movilidad y territorios inteligentes y describe el ámbito del transporte y su relación con el turismo. A continuación, se argumenta la importancia de las tareas de planificación de rutas dentro de la cadena de suministros como una de sus actividades clave y da una visión de los sistemas inteligentes de planificación de rutas que ayudan y facilitan la toma de decisiones en esta actividad. El relato sobre el estado del arte de los problemas de planificación de rutas abordados en la investigación se explica en la siguiente sección. Por último, se hace un breve repaso al ámbito del conocimiento de la Soft Computing y las técnicas utilizadas, optimización difusa y metaheurísticas.

El tercer capítulo describe los principales artículos publicados durante la investigación, los cuales se incluyen como compendio de esta tesis. Para cada uno de ellos se explican los aspectos más relevantes: breve resumen, objetivos de investigación perseguidos, la metodología utilizada, los resultados obtenidos, las conclusiones y trabajos futuros.

Finalmente, el cuarto capítulo expone las conclusiones generales de la tesis y los trabajos futuros propuestos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Capítulo 2

Transporte y planificación de rutas

2.1. Movilidad, ciudades y territorios inteligentes

Los retos actuales a los que se enfrentan las ciudades tienen que abordarse con nuevos enfoques e ideas. Las ciudades inteligentes son estrategia de desarrollo que pueden considerarse en diferentes dimensiones: economía, movilidad, medioambiente, hábitat y forma de vida y gobernanza. En estos ámbitos los proyectos de actuación se materializan en acciones integrales acordes a la naturaleza de los problemas abordados. Algunos ejemplos de estas acciones son el diseño urbano de espacios verdes, la gestión eficiente de la energía y el agua, la planificación de la movilidad como servicio, la administración electrónica y la participación ciudadana, la reducción de los residuos, etc. Una gestión eficiente de las respuestas y soluciones en cada una de las dimensiones y en contextos geográficos limitados no puede desarrollarse mediante proyectos y acciones aisladas. Esta es una de las razones por las que de manera natural en algunos espacios es necesario extender el concepto de ciudad inteligente a territorios inteligentes.

Los territorios inteligentes permiten abordar problemas conjuntamente en zonas de grandes dimensiones con núcleos de población poco densos. Muchas regiones, como las insulares, no disponen de los recursos y condiciones de las grandes ciudades para abordar estrategias inteligentes. Un enfoque extendido permite mitigar la división urbano-rural, provee un visión compartida del territorio, facilita la colaboración pública-privada y provee el desarrollo de nuevos servicios y actividades basadas en infraestructuras de comunicación de nueva generación 5G, IoT, el Big Data y análisis de datos, cloud computing y edge computing, y disponibilidad de datos abiertos. Un nuevo ecosistema centrado en las personas y orientado en aspectos sociales, económicos y medioambientales, en el que dispositivos, servicios, plataformas y aplicaciones relacionan actores y agentes de forma multidimensional. Un ecosistema donde fluyen grandes volúmenes de datos procedentes de los ámbitos más diversos, que pueden ser tratados de forma inteligente. Un nuevo paradigma de información y comunicación distribuida, abierta y compartida. En el cual se desarrollan aplicaciones, plataformas y medios sociales

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

accesibles, en la nube, móviles, ubicuas y sensorizadas. Una oportunidad para la generación de nuevos servicios de valor añadido, orientados a usuarios finales, a la calidad y sostenibilidad.

La movilidad y su gestión es uno de los grandes retos de los territorios. La movilidad inteligente como dimensión de los territorios inteligentes gestiona la oferta y demanda en materia de movilidad de personas y mercancías, desde una perspectiva de calidad, sostenibilidad y eficiencia. Entre otras, proporciona soluciones para la planificación y diseño de rutas, previsión y priorización de actuaciones, *benchmarking* de calidad, política tarifaria, gestión de flotas, parking inteligente, vehículo eléctrico, control de peajes, acceso a zonas restringidas, etc. Estas soluciones adquieren sentido en la optimización en tiempo real. Por ello, son esenciales actividades como la captura de datos, la extracción de información y el intercambio de datos continuo y automático para tomar decisiones, resolver incidentes y realizar una gestión conveniente.

El desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones aplicadas a la movilidad y la transformación digital de la logística y el transporte son objetivos prioritarios para proporcionar mejores servicios orientados al usuario final. La inversión y disponibilidad de infraestructuras y equipamientos conectados e interoperables entre sí son fundamentales para proveer información y conocimiento que facilitan los servicios de movilidad. La implementación de sistemas inteligentes juegan un papel muy importante tanto en la captura, transmisión y evaluación de la información sobre las operaciones como en la planificación y gestión de los servicios de movilidad. La inteligencia de estos sistemas no es solo disponer de información, sino del tratamiento y uso de la misma para el análisis, optimización, mejora de la toma de decisiones y prospectiva asociada a los servicios.

2.2. Transporte

El transporte es una de las actividades fundamentales en la logística. Es esencial para el desarrollo económico y la competitividad de territorios y organizaciones. El transporte facilita la movilidad y accesibilidad de personas y mercancías. Además, otros sectores como el comercio, turismo e industria dependen del transporte para el desarrollo de su actividad. El transporte se puede clasificar por el modo/medio que se utilice para el desarrollo de la actividad (carretera, vías, marítimo, aéreo) y por el contenido de lo que transporta (mercancías, personas). El transporte de mercancías garantiza el abastecimiento y provisión de bienes a territorios y organizaciones, relacionando proveedores y clientes, y es crucial en la entrega de bienes en tiempo, estado y calidad correctos. La mayor proporción de bienes y mercancías transportados se moviliza a través de transporte por carretera. En 2017 el transporte de mercancías por carretera representó el 76,7% del total del transporte de mercancías terrestre dentro de la Unión Europea¹. El transporte de mercancías es una actividad socio-económica de alta relevancia en la economía e impacto ambiental en los territorios. El transporte de pasajeros

¹Fuente: EUROSTAT 2017

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

garantiza accesibilidad, puntualidad y frecuencia en el traslado de personas. Adicionalmente, el transporte de pasajeros también colabora en la competitividad de los sectores productivos y en la integración social territorial, facilitando la movilidad de las personas. La demanda de movilidad es creciente en general, y especialmente en áreas urbanas y metropolitanas. La calidad y eficiencia de los servicios de transporte de pasajeros se ve afectada por los problemas de congestión y contaminación. El reto es buscar el equilibrio entre cubrir las demandas y necesidades de movilidad y reducir las externalidades negativas.

Actualmente algunos de los grandes desafíos que enfrentan los territorios en materia de movilidad y transporte se desarrollan en áreas urbanas y metropolitanas. Uno de ellos es el continuo crecimiento del comercio electrónico tiene notables consecuencias en el transporte de entrega de mercancía en áreas urbanas y metropolitanas. La mayoría de estas entregas son de reducido tamaño, lo que dificulta la eficiencia del transporte y la distribución de última milla. Esta creciente demanda aumenta la presión sobre las infraestructuras, congestiona vías, genera un impacto negativo en el medio ambiente y refuerza problemas propios de zonas urbanas como falta de espacios de carga y descarga, complicaciones en zonas peatonales, de patrimonio o casco antiguo de baja accesibilidad, entre otros. Como contrapartida, la creciente demanda genera efectos positivos como modernización de infraestructuras y medios, y la aparición de nuevas soluciones.

Otro de los desafíos del transporte de mercancías y pasajeros es el de sus efectos adversos en el medioambiente. El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España cifra que el transporte de mercancías y personas es responsable del 25 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, correspondiendo al transporte por carretera el 95 % de estas emisiones ². La presencia simultánea de transporte de personas y mercancías congestiona las vías de circulación con el consiguiente incremento de los tiempos de desplazamiento, contaminación acústica, ocupación y uso de las infraestructuras, y consecuentemente reducción de la calidad de vida y competitividad empresarial de los territorios. La creciente preocupación sobre la manera de reducir el impacto medioambiental está fomentando el desarrollo e innovación de la movilidad con el objetivo de disponer de un sistema eficaz, eficiente, competitivo, y ambientalmente sostenible.

Los desafíos citados previamente en muchos casos entran en conflicto con los intereses de las empresas de transporte. Por su naturaleza, estas empresas tienen la necesidad de ser competitivas y rentables, asumiendo que los costes de transporte pueden representar valores cercanos al 50 % del coste total logístico [6], necesitan optimizar sus procesos operativos para ajustar los costes operacionales de transporte además de aumentar la calidad de los servicios. Las operaciones de transporte requieren del uso de recursos como energía, trabajo, infraestructuras y vehículos, entre otros. Las operaciones más eficientes serán aquellas que

²Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx>)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

menor cantidad de recursos requieran en su ejecución, esta minimización de recursos a su vez se traduce en reducción de costes económicos e impacto medioambiental.

Los avances futuros en materia de transporte deben orientarse hacia la mejora y el uso adecuado de la red de infraestructuras disponibles y la incorporación de soluciones innovadoras en la gestión del transporte y movilidad de mercancías y personas para prestar servicios eficientes, eficaces y sostenibles. La alta competencia está forzando a las organizaciones a buscar nuevas soluciones para la reducción de costes, mejora y generación de servicios. La búsqueda de nuevas e innovadoras soluciones a estos desafíos es una labor compleja y difícil para las organizaciones. Ante esta situación, la simplificación de los problemas en pos de abordarlos parcialmente es una alternativa común. En este sentido, existen oportunidades y margen de mejora para el desarrollo de proyectos I+D+i en la línea de buscar soluciones innovadoras a todos estos problemas. Concretamente el desarrollo de metodologías y técnicas inteligentes para la optimización y mejora de la toma de decisiones en el ámbito del transporte es una de ellas.

2.3. Turismo y transporte

El turismo es uno de los mayores subsectores productivos en la economía global, aporta una décima parte de los puestos de trabajo y un 10,4% del PIB global. Esta actividad económica creció a lo largo del 2018 un 4,6% según datos de la Organización Mundial del Turismo³. Este crecimiento ha permitido la creación de empleo, representando uno de cada cinco de todos los empleos creados en el mundo durante los últimos cinco años. El turismo tiene un efecto dinamizador en diversas actividades económicas involucradas como son las de alojamiento, transporte, alimentos y bebidas, comercio minorista, cultura, deportes y ocio.

El modelo turístico, que tanto éxito ha cosechado, debe adecuarse a un escenario marcado por un continuo crecimiento y cambios permanentes y veloces en el mercado, producidos por la transformación digital y la innovación. En la medida que aumenta en todo el mundo la actividad turística, es necesario equilibrar la competitividad, con una planificación del uso y carga del destino y factores de sostenibilidad. Este es un objetivo complejo donde es necesario encontrar soluciones innovadoras y diversificadas de los productos y servicios del destino.

El turismo influye en diversas dimensiones sociales y económicas de forma decisiva, y entre ellas destacan la movilidad y el transporte. La disponibilidad de servicios de transporte es condición previa para acceder al destino turístico, así como para conectar los distintos puntos de interés del mismo. La relación entre turismo y transporte es, en cierto modo, una relación de recíproca dependencia, es difícil pensar en el sector turístico sin transporte y viceversa. El avance y desarrollo del transporte, sus modos, servicios e infraestructuras, y el uso de nuevas tecnologías, impulsan el desarrollo del turismo [40]. El transporte juega un rol fundamental en el enriquecimiento de la experiencia turística, e incluso puede ser un elemento de atracción

³<https://unwto.org/>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

turística por sí mismo [80]. Dentro de los productos turísticos ofertados el transporte es una parte esencial y dependiente, es críticamente valorado por turistas, tanto en el acceso al destino como para desarrollo de actividades en este. Por ello, las mejoras en la movilidad en el destino favorecen el desarrollo y calidad de la experiencia turística.

Actualmente la mayor parte de los turistas y destinos turísticos se encuentran permanentemente conectados a Internet. La transformación digital sufrida por los servicios turísticos y otras actividades afines y la conectividad tecnológica proporcionan servicios digitales de apoyo a la toma de decisiones recreativas y de movilidad de los turistas. Previa estancia en el destino, los turistas usan estos servicios para planificar sus viajes en los días de estancia haciendo uso de la información de los puntos de interés a visitar y de los servicios de movilidad existentes en el destino. Esto permite a los turistas optimizar la calidad de la experiencia turística. Durante su estancia en el destino, los turistas necesitan estar conectados y hacer uso de estos servicios digitales para complementar información y tomar decisiones en situaciones dinámicas e imprevistas sobre la planificación, o por cuestiones de improvisación o "serendipia" de nuevos puntos de interés. La capacidad de poder tomar decisiones informadas a través del uso de servicios digitales en Internet influye en la satisfacción del turista. La solución a muchos de los desafíos que se plantean en turismo y movilidad actualmente tienen como aliado el uso de las TICs y la transformación digital.

Así como los territorios inteligentes fomentan el uso de las TICs para dar servicios a las personas, los destinos turísticos inteligentes debe promover el uso de los avances de las TICs con el objetivo de proveer servicios e interactuar con usuarios, turistas, proveedores y otros actores interesados en el sector. Esto facilita la integración de servicios y herramientas que permiten incrementar la calidad de los servicios optimizando la experiencia turística con un mejor aprovechamiento de los recursos. De esta forma, los destinos inteligentes mejoran la calidad de los servicios turísticos ofertados y la eficiencia del uso de recursos e infraestructuras, incidiendo positivamente en la satisfacción de la experiencia turística y la competitividad del destino y territorio, así como la de los actores con intereses en el sector.

En este contexto, la movilidad inteligente es una dimensión fundamental de los destinos inteligentes. La movilidad inteligente apoyada en servicios de planificación turística, análisis de datos e información al turista, para optimizar la movilidad sostenible de los usuarios, permite dar respuesta dinámica a los cambios y exigencias de estos. En este sentido, los sistemas inteligentes juegan un rol importante en la satisfacción del turista, a través de dos servicios como son, la recomendación personalizada de puntos de interés y la planificación de rutas turísticas en función de los puntos de interés recomendados. Concretamente, las guías turísticas electrónicas personalizadas (*Personal Electronic Tourist guide*, PET) son una solución integrada que realiza estos dos servicios en dispositivos móviles [123] [111].

En concreto las tareas de planificación de rutas turísticas que desempeñan los sistemas PETs pueden ser abordadas como problemas de optimización combinatoria. Estos problemas persiguen definir un conjunto de rutas para cada día de estancia del turista en el destino con

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

el objetivo de maximizar la satisfacción de la experiencia turística. Para ello se considera información relativa a tiempos de desplazamiento entre puntos de interés, horarios de apertura y cierre, tiempos de visita, preferencias del turista respecto de los puntos de interés, entre otra información. Enfrentar este tipo de problemas de optimización es una labor compleja que depende de los requisitos y dimensiones del problema y de la disponibilidad de la información. Es por ello que se recurre a metodologías y técnicas inteligentes para abordar estos problemas como son las heurísticas, metaheurísticas y otras técnicas de la Soft Computing para la obtención de soluciones de alta calidad y tratamiento de la incertidumbre [54].

2.4. Gestión de la cadena de suministro y planificación de rutas

Las tareas propias de la planificación logística y operaciones de transporte han evolucionado para adecuarse al cambiante y competitivo escenario que predomina en los diversos sectores productivos. Las decisiones tomadas en torno a las operaciones de transporte son una cuestión fundamental para la gestión de las cadenas de suministro. Estas decisiones desempeñan un papel vital en el éxito de las cadenas de suministro por diversos factores como son la reducción de costes, optimización de uso de recursos, consideraciones medioambientales y mejora de la calidad del servicio al cliente final. La cadena de suministro puede ser segmentada en tres ciclos básicos; de adquisición o aprovisionamiento, de producción y de distribución [118]. En la Figura 2.1 pueden verse los ciclos de la cadena de suministro y cómo se relacionan entre sí.

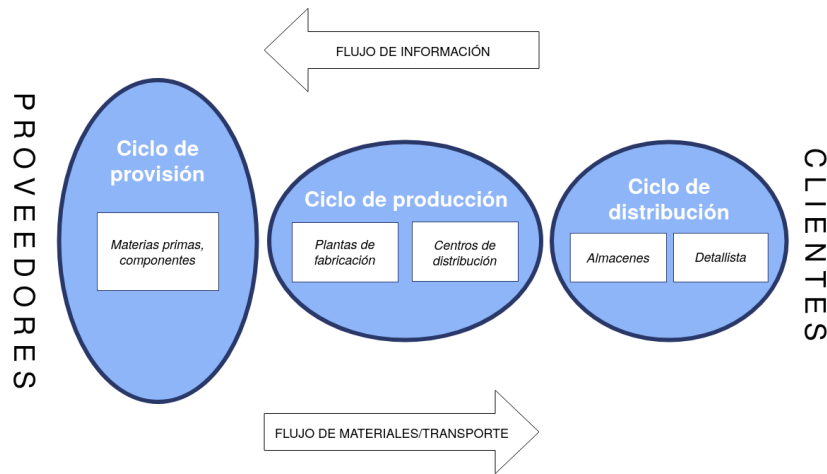


Figura 2.1 Ciclos de la cadena de suministro

En la toma de decisiones en la cadena de suministro se distinguen tres niveles fundamentales de planificación: estratégico, táctico y operativo [95]. Estos niveles de planificación

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2528892	Código de verificación: tpBnHJp1
Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

se diferencian en su dimensión temporal y en los diferentes problemas que abordan. Los problemas de dimensión estratégica incluyen decisiones que afectan a largo plazo, relativas a elementos como el número, tamaño, ubicación y capacidad de las unidades de almacenamiento y transporte. Las decisiones tácticas, abordan problemas a medio plazo, relativas al diseño de la red de distribución, la ubicación y asignación de zonas y áreas de distribución y la tasa de suministro. Finalmente la planificación operativa, con un horizonte de planificación a corto plazo, se encarga del diseño y establecimiento de rutas, organización de carga y descarga de vehículos, entre otras actividades. Dependiendo de los niveles de planificación a los que se atienda es posible encontrar diferentes problemas, que en multitud de casos pueden ser abordados desde la optimización combinatoria. Las decisiones que se toman y los problemas encontrados dependen de los objetivos, recursos y restricciones o limitaciones fijadas, así como de la información disponible.

La planificación y establecimiento de rutas es una de las actividades de mayor importancia asociadas al transporte [112]. El diseño de rutas de transporte es una parte fundamental de la toma de decisiones a nivel operativo en la gestión logística de multitud de actividades, organizaciones y territorios. El impacto económico, medioambiental y de calidad servicio de esta actividad operativa varía considerablemente en función de la calidad de las decisiones tomadas. No obstante, la relevancia y efecto de la planificación de rutas en los territorios y organizaciones que la llevan a cabo tiene un alto impacto.

La optimización de las tareas de planificación de rutas tienen como resultados la reducción de costes y tiempos de desplazamiento, la mejora de la calidad del servicio, la adaptación del servicio al cliente y el ahorro energético que contribuye a la sostenibilidad. Abordar las tareas de planificación de rutas en las cadenas de suministro como problemas de optimización supone considerar multitud de información, requisitos y objetivos para modelar el problema. Generalmente, esto da como resultados complejos problema de optimización para los que la búsqueda de soluciones es una difícil labor que requiere competencias en diferentes áreas de conocimiento y esfuerzos computacionales elevados. Es por ello que para abordarlos se recurre a herramientas y sistemas inteligentes que hacen uso de metodologías y técnicas inteligentes propias de la Inteligencia Artificial y de la Soft Computing como son las heurísticas y metaheurísticas. Estas herramientas permiten automatizar la obtención de soluciones de alta calidad en tiempos razonables considerando los requisitos e información del problema de planificación de rutas en estudio.

2.5. Sistemas inteligentes de planificación de rutas

La computación inteligente trata de diseñar sistemas computacionales que actúen de forma inteligente. Es decir, sistemas que sean capaces de obtener información y conocimiento del entorno, aplicándolo para adaptar su comportamiento, tomando decisiones y realizando acciones de control de forma autónoma, así como que puedan procesar información incompleta,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

con incertidumbre, extraer conclusiones o aprender de ejemplos. Por lo tanto, podemos considerar que es posible diseñar e implementar sistemas inteligentes con las siguientes capacidades: actuar, organizarse y autocontrolarse de manera autónoma en entornos con incertidumbre, llevar a cabo procedimientos de análisis, organización y conversión de datos en conocimiento, para aprender, aplicarlos en reducir la incertidumbre y, encontrar y dar respuestas a objetivos concretos y complejos de forma eficiente. En el área de la computación inteligente, la Soft Computing aparece como una familia de métodos y técnicas que se aplican en el desarrollo de sistemas inteligentes que resuelven problemas reales [142]. Las principales componentes son el razonamiento aproximado y los métodos de aproximación funcional y de optimización, incluyendo los de búsqueda. En un segundo nivel surgen el razonamiento probabilístico, la lógica y los conjuntos fuzzy, las redes neuronales y las metaheurísticas, así como todos los modelos híbridos resultado de la combinación de las componentes anteriores [129] [131].

Los sistemas de inteligentes aplicados a resolver problemas de transporte, los denominados sistemas inteligentes de transporte (*Intelligent Transport Systems*, ITS), tienen un papel fundamental en la detección, transmisión y evaluación de la información sobre las operaciones y servicios de transporte. Estos sistemas aúnan tecnologías, infraestructuras y servicios, así como métodos y técnicas que se emplean en la planificación y gestión del transporte de personas y mercancías. Inteligencia en este caso no es solo disponer de tecnologías, técnicas y métodos sino también el uso adecuado de las mismas para integrar información del entorno, muchas veces imprecisa, analizar y optimizar el sistema y tomar decisiones más eficiente. Así en logística y transporte, empresas, vehículos e infraestructuras intercambian información compleja y los sistemas inteligentes la utilizan para proporcionar soluciones que mejoran el funcionamiento del sistema de transporte y su servicios.

Los ITS integran sistemas de información, sistemas de gestión de flotas y sistemas de planificación de rutas, haciendo uso de información de diversas fuentes del entorno. En la literatura es posible encontrar abundantes referencias a los ITS, a continuación se indican algunos. El sistema de guía de ruta para ITS propuesto en [66], proporciona indicaciones de conducción basados en información de tráfico sobre un origen y un destino haciendo uso de algoritmos metaheurísticos genéticos. En [116] se presenta un ITS basado en un modelo dinámico para planificación de rutas que incorpora información en tiempo real utilizando tiempos de viaje variables para la reducción de costes de transporte. En [76] se encuentra el diseño y desarrollo de un sistema de guiado de conducción con el objetivo de reducir los tiempos de conducción a través de ITS. En este caso, el número de variables necesarias para el cálculo preciso de las indicaciones de conducción requieren del uso de algoritmos metaheurísticos. Otro ejemplo se encuentra en [135] en el que se diseña un ITS asistido por información de sensores para control de semáforos automáticos en intersecciones con el objetivo de reducir el tiempo promedio de espera de los vehículos. La hibridación de un método de control difuso y algoritmos metaheurísticos genéticos permiten optimizar el tiempo de espera en los semáforos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Un ITS que hace uso de metaheurísticas genéticas y métodos de control difusos con sensores para controlar automáticamente los semáforos en intersecciones se presenta en [136]. El objetivo es también la reducción de los tiempos de espera de los vehículos en los semáforos. En [78], se investiga el efecto que los diferentes tipos de inexactitud de información, considerando escasez de fuentes de datos, recopilación e inexactitud de presentación, pueden tener sobre el rendimiento de los ITS. El trabajo de investigación [88] describe las posibles aplicaciones de ITS que pueden usar vehículos autónomos destacando el potencial y los desafíos de los ITS habilitados para vehículos autónomos para los territorios y ciudades inteligentes. En [69] se propone un sistema de control de tráfico para ITS efectivo con la ayuda de la tecnología Internet de Vehículos (*Internet of Vehicles*, IoV). En este sistema se integra una propuesta de metaheurística de colonia de hormigas para encontrar soluciones.

En particular, los sistemas inteligentes para la planificación de rutas se articulan con el objeto de encontrar e identificar las posibles rutas alternativas eficientes para el transporte. El sistema tiene que ser capaz de diseñar las rutas y seleccionar los recursos y medios disponibles de manera eficaz, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por la organización, clientes y el entorno. Adicionalmente debe evaluar las rutas alternativas de acuerdo a los criterios y prioridades de los usuarios en términos de costes, tiempos de servicio, calidad, eficiencia, e impacto ambiental.

Los métodos de optimización desempeñan un rol fundamental en el diseño de sistemas inteligentes de transporte para la gestión y planificación del transporte y la movilidad en general, y para la planificación de rutas en particular. Los métodos de optimización, tanto exactos como heurísticos, forman parte de los módulos y núcleo de la planificación de rutas de estos sistemas. La incorporación de información imprecisa y con incertidumbre es una línea de trabajo en el desarrollo de estos sistemas, dada la naturaleza de la información de los problemas reales que se abordan. El uso de técnicas y métodos propios de la Inteligencia Artificial son comunes para modelar la información y conocimiento, y resolver problemas de forma automatizada, con cierto aprendizaje y tratando la imprecisión e incertidumbre. Entre algunas de estas técnicas podemos encontrar las técnicas propias de la Soft Computing como la optimización difusa y las metaheurísticas

En general los sistemas inteligentes para apoyar la toma de decisiones complejas relativas a la planificación de rutas son demandados en el sistema de movilidad en ciudades territorios y destinos turísticos. Se trata de ofrecer servicios de movilidad de alta calidad, que optimicen los recursos disponibles, cumplan con los requisitos de los usuarios, operadores y el entorno, y tengan en cuenta consideraciones medioambientales y de consumo energético. Existen multitud de retos que abordar dentro de la investigación, el desarrollo y la transferencia, relacionados con el diseño y desarrollo de sistemas de planificación de rutas para proporcionar soluciones prácticas, eficientes, flexibles, escalables y robustas. Para dar respuesta a los problemas reales es necesario combinar tecnologías emergentes con conocimientos, metodologías y técnicas de la Inteligencia Artificial y de la Soft Computing.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

2.6. Problemas de planificación de rutas

Los ITS incluyen entre sus funcionalidades servicios de planificación de rutas. Estos sistemas disponen de módulos o componentes que hacen uso de la información de diferentes fuentes dentro del sistema y están específicamente dedicados a realizar las tareas de diseño de rutas. Los módulos de planificación hacen uso de modelos de optimización que permiten formalizar el problema a resolver y las técnicas de optimización que dan solución al problema. La formalización de los problemas de optimización requiere de la especificación formal de parámetros, variables y restricciones. Para modelar los problemas de planificación de rutas a menudo se usan modelos de optimización combinatoria de la clase Mixed Integer Linear Programming (MILP). Las técnicas de optimización se dividen en métodos exactos que garantizan la solución óptima al problema y métodos aproximados.

Los problemas de planificación de rutas han despertado el interés científico y académico desde hace más de 50 años [71]. Hasta la actualidad, se han propuesto multitud de enfoques y formas de abordar estos problemas. A medida que surgen nuevos requerimientos de mayor complejidad, la comunidad científica aborda y busca soluciones apropiadas. En el trabajo de investigación de la presente tesis se abordan diferentes tipos de problemas de planificación de rutas en los contextos de transporte de mercancías y calidad de servicio, rutas eco-eficientes para la recogida de residuos y la rutas turísticas personalizadas. En las posteriores subsecciones se realiza una breve revisión centrada en estos problemas de interés tratados.

2.6.1. Problemas de rutas para transporte de mercancías orientados a la calidad de servicio

Uno de los modelos más generales para abordar los problemas de planificación de rutas de transporte es el denominado Problema de Rutas de Vehículos (*Vehicle Routing Problem*, VRP), también conocido de manera más específica como el problema de rutas de vehículos con capacidad limitada (*Capacitated Vehicle Routing Problem*, CVRP). En este problema los vehículos están ubicados en un depósito central y son utilizados para visitar clientes dispersos geográficamente y satisfacer las demandas conocidas de los mismos. Cada cliente debe ser visitado una sola vez por uno de los vehículos, respetando un tiempo máximo de ruta, restricciones de capacidad de los vehículos, y minimizando costos, distancias o tiempos. El primer antecedente de este modelo, fue el Problema del Viajante de Comercio (*Travelling Salesman Problem*, TSP) introducido por Flood en 1956, donde un agente vendedor debe visitar cierta cantidad de ciudades en un solo viaje, de tal manera que inicie y termine su recorrido en la ciudad origen.

La primera referencia al problema con varios vehículos, TSP múltiple o m-TSP se encuentra en [89]. Este es una generalización del TSP en la cual se tiene un depósito y m vehículos, es decir m agentes viajeros. El objetivo es construir exactamente m rutas, una para cada vehículo, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos. Cada ruta

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

debe comenzar y finalizar en el depósito y puede contener a lo sumo p clientes. En el problema m-TSP a cada cliente se le asocia una demanda y cada vehículo cuenta con cierta capacidad, así el problema del agente viajero da origen al problema de rutas denominado VRP [120].

Entre las variantes más conocidas del VRP se encuentra la que incluye las restricciones de ventana de tiempo asociadas a cada cliente, definiendo un intervalo de tiempo dentro del cual el cliente debe ser atendido. Este problema es conocido como el Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*, VRPTW). El servicio de cada cliente debe empezar dentro de la ventana de tiempo asociada a este y el vehículo debe parar en el centro de consumo por instantes de tiempo. En caso de que el vehículo llegue antes del tiempo de inicio de la ventana de tiempo, este debe esperar hasta el instante de inicio. Las ventanas de tiempo están definidas de tal manera que se asume que todos los vehículos salen del centro de distribución en el instante cero. Es posible considerar ventanas de tiempo duras en las que no se puede realizar la entrega al cliente fuera de los periodos establecidos, mientras que en las ventanas de tiempo suaves se permite la entrega fuera de estos periodos pero con una penalización. A partir de artículo seminal de Solomon en el año 1987 [109] han aparecido en la literatura multitud de referencias, entre otras las que incluyen revisiones amplias de los métodos de resolución de estos problemas [12], [114], [26].

Generalmente el VRPTW persigue la planificación de las rutas para un periodo fijo, por ejemplo para un día de servicio. Otras de las variantes estudiadas, el VRPTW Periódico (*Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows*, PVRPTW), diseña las rutas en un horizonte de planificación extendido, donde los clientes deben ser atendidos durante unos determinados días. El PVRPTW aparece por primera vez en [33]. Más recientemente, son publicados otros trabajos de este modelo como [137], [102], [133]. Se puede encontrar otras referencias importantes en la literatura acerca de problemas periódicos de rutas de vehículos, sus diferentes variantes y nuevas adaptaciones a problemas del mundo real [52], [60].

Una de las variantes de especial interés para la tesis, centran la atención en como la función objetivo del VRP maneja los criterios de calidad del servicio y la orientación al cliente asociados a servir en el menor tiempo posible. Ejemplos de aplicaciones que consideran este criterio son la logística y transporte en situación de desastres naturales, el transporte escolar, logística en servicios de mantenimiento y el transporte de bienes perecederos. En este trabajo se estudia la percepción de los clientes cuando miden el rendimiento de las empresas que proveen servicios de transporte urgente [30] y definiciones de calidad autores además proporcionan varias escalas de medición. En la literatura podemos encontrar varios modelos que incorporan una función objetivo que utiliza el criterio de llegar lo antes posible, como son el Problema de Múltiple Viajes de Reparadores (*Multiple Travelling Repairmen Problem*, MTRP), también llamado Problema del Repartidor (*Delivery Man Problem*, DMP) y el Problema de Latencia Mínima (*Minimum Latency Problem*, MLP) para rutas múltiples. Los reparadores visitan un conjunto de nodos cuyo objetivo es minimizar la latencia total, el tiempo de espera del cliente o maximizar los ingresos recaudados. Variantes de este último modelo se pueden encontrar en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

estos trabajos más recientes [82], [104], [96]. También podemos encontrar referencias similares en el Problema de Rutas de Autobuses Escolares (*Bus School Routing Problem*, BSRP) es otro problema que utiliza objetivos similares. Los objetivos en estos problemas son expresados entre otro como: reducir el tiempo o la distancia que los estudiantes invierten en llegar a la escuela. La eficacia y el criterio de calidad del servicio se mide por el tiempo total de viaje que los estudiantes pasan en el autobús. Algunos trabajos que se encuentran en la literatura con minimización del tiempo que los estudiantes permanecen en el autobús como indicador de calidad son [74], [99], [100]. Por último considerar otra extensión del VRP orientada a la calidad del servicio que es el CVRP Acumulativo (*Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem*, CCVRP), un problema con una función objetivo que minimiza los tiempos de llegada a los clientes sujetos a limitaciones de capacidad del vehículo. El modelo simplificado de minimización de energía en los problemas de rutas de vehículos es equivalente al CCVRP [67]. En la literatura es posible encontrar diferentes propuestas para este problema [106], [83].

En relación con la reducción de los tiempos de servicio se encuentra el transporte de mercancías perecederas. La calidad de los productos perecederos es dependiente de los tiempos que van desde la provisión y suministro de materias primas hasta el servicio al cliente final. Los productos frescos y perecederos pierden calidad con el paso del tiempo, tienen un ciclo de vida corto y exigen dispositivos específicos de conservación que permiten el sostenimiento de la cadena de frío. Por ello las operaciones de transporte requieren recogidas y entregas con premura. Las recogidas y entregas de productos perecederos con retrasos causan pérdidas derivadas de la degradación de la calidad del producto. En la literatura es posible encontrar trabajos relativos a la planificación de rutas de mercancías perecederas [98], [31], [24], [110], [65], [84].

2.6.2. Problemas de rutas recogida de residuos

La producción de residuos está creciendo en la sociedad actual, convirtiéndose en un importante problema ambiental [59]. La preocupación por el medioambiente y el desarrollo sostenible lleva a dedicar importantes recursos a las políticas y acciones de planificación y gestión de residuos. La gestión de residuos es un tema crítico para la mayoría de las regiones y ciudades de todo el mundo [86]. Una gestión eficiente de los residuos reduce los efectos negativos en el medioambiente y garantiza la seguridad y la calidad de vida de los ciudadanos. El proceso de gestión implica el manejo del ciclo de vida de varios tipos de residuos e incluye un conjunto de actividades que van desde la recolección hasta el proceso de reciclaje. Específicamente el proceso de recogida de residuos depositados en contenedores y su posterior vaciado en las plantas de procesamiento es una de las actividades fundamentales de la gestión eficiente. En la literatura se encuentran diferentes trabajos sobre las operaciones de gestión de residuos con diferentes enfoques. Uno de los enfoques más extendidos se basa en el tipo de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

residuos a tratar. En este sentido, los tipos principales son los residuos residenciales [53], los residuos industriales [108], los residuos de atención médica [1] y los residuos reciclables.

La logística y transporte es una de las actividades con mayor coste e impacto medioambiental, producido por las emisiones de CO₂ y consumo energético. Esta preocupación ha llevado a trabajar y diseñar soluciones en este ámbito, surgiendo lo que se denomina como *logística verde* [87]. Una logística y transporte preocupada por la reducción del impacto medioambiental [57]. La planificación de rutas verdes se considera como una actividad de la logística verde que tiene en cuenta explícitamente las externalidades negativas derivadas del uso de vehículos con el objetivo de minimizarlas a través de una mejor planificación [7]. En la literatura es posible encontrar diferentes variantes del VRP relacionadas con la logística verde. Las más relevantes son el VRP verde (*Green Vehicle Routing Problem*, GVRP) que tiene como objetivo minimizar la energía requerida, el problema de rutas de polución (*Pollution Routing Problem*, PRP) que aborda la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero, y el VRP de logística inversa (*Vehicle Routing Problem in Reverse Logistics*, VRPRL) que está relacionado con los aspectos de distribución de logística inversa [75]. Algunos trabajos interesantes en la línea de GVRP publicados en los últimos años son [73], [103] y [119]. Los principales objetivos abordados en la literatura son el impacto ambiental [117], el número de vehículos [63], el personal requerido [63], la longitud de las rutas de recolección [122], el tiempo total de operación [3], el balance de las longitudes de ruta realizadas por diferentes empleados [79], o el costo total del servicio [3]. Una revisión exhaustiva de los métodos y criterios de optimización puede ser encontrada en [61] y [113].

El problema tratado en esta tesis aborda la planificación de rutas para la recolección de residuos de los envases de papel y cartón, y los envases y latas de plástico. El objetivo de minimizar la necesidad de extraer, refinar y procesar materias primas contribuye a la reducción del impacto medioambiental [36]. Se trata de diseñar rutas eficientes que satisfagan los requisitos de servicio de tal manera que los residentes puedan disponer de un punto depósito primario sin interrupción [97]. También a ayudar a cumplir los objetivos de sostenibilidad y mejorar la calidad del servicio percibido por los residentes. El objetivo de la planificación abordada es aumentar la cantidad de desechos reciclables recolectados, priorizando la recolección de aquellos contenedores con el nivel de llenado más alto y susceptibles de desbordarse. Además de mejorar la planificación de rutas de acuerdo a métricas ecoeficientes, como el consumo energético de los vehículos en la realización del servicio.

2.6.3. Problemas de diseño de rutas turísticas

Los turistas que visitan un área turística, durante uno o varios días, enfrentan el problema de seleccionar qué puntos de interés (*Point of Interest*, POI) visitar y qué rutas diseñar para cada día de viaje. Previa a la llegada del turista al destino, este debe invertir tiempo y esfuerzo recopilando información sobre los puntos de interés para planificar sus visitas en los días de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

estadía. En este proceso el turista considera información como qué puntos de interés visitar, la duración de la visita, los tiempos de viaje entre puntos de interés y otros requerimientos para planificar las rutas turísticas de cada día. Este problema que toma en cuenta las preferencias y gustos del turista, así como la información sobre los puntos de interés, es una tarea que requiere esfuerzo y tiempo.

Este problema denominado el problema de diseño de rutas turísticas (*Tourist Trip Design Problem*, TTDP), ha tomado relevancia en la investigación en los últimos años [126]. Los requisitos y expectativas de los turistas son cada vez más elevados buscando maximizar el aprovechamiento del tiempo en el destino visitando los puntos de interés más relevantes o que cazan con sus preferencias. Generalmente las empresas organizadoras de viajes proponen paquetes vacacionales con rutas predefinidas, no obstante a los turistas les resultaría interesante diseñar su itinerario *ad-hoc* teniendo en cuenta sus preferencias. Un viaje que parece ser interesante para alguien puede no ser satisfactorio para otros turistas.

En la literatura es posible encontrar un elevado número de aplicaciones del TTDP modelados como problemas de orientación (*Orienteering Problems*, OP). En los problemas de orientación se dispone de un conjunto de vértices a visitar, los cuales tienen asociado un coste. El objetivo es determinar el itinerario, limitado en tiempo, que visite algunos vértices y maximice la suma de las puntuaciones asociados a los vértices visitados. Puede ser considerado como perteneciente a la familia del conocido problemas de rutas, TSP [4], [68], [5], [29], [72], [55], [56], [56], [101], [107].

Existen diversas variantes del problema de orientación, como el problema de orientación en equipo (*Team Orienteering Problem*, TOP), el cual representa la posibilidad de planificar con varias rutas y encontrar un determinado número de caminos simultáneos, o el problema de orientación con ventanas de tiempo (*Orienteering Problem with Time Windows*, OPTW) y el problema de orientación en equipo con ventanas de tiempo (*Team Orienteering Problem with Time Windows*, TOPTW), modelos donde cada vértice o punto de interés a visitar tiene restringido o limitado los tiempos en los que está disponible o pueden ser visitados, los cuales se aplican en multitud de situaciones reales. Además de estos problemas, en la literatura podemos encontrar otras extensiones asociadas con múltiples restricciones. Una revisión exhaustiva de todos estos modelos, formulaciones y procedimientos de solución pueden ser encontrada en [124], el cual además incluye referencias a las aplicaciones de estos modelos y las principales instancias usadas en la literatura.

Se han propuesto varios métodos de solución exactos y heurísticos para abordar el TOP. Enfoques exactos basados en la generación de columnas se han propuesto en [28] [11]. Un método aproximado ha sido propuesto en [9]. El primer algoritmo greedy se ha propuesto en [27]. Y más recientemente, se han presentado varias metaheurísticas en la literatura como: la búsqueda tabú (*Tabu Search*, TS) [115] [2], algoritmos meméticos [10] y optimización por enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO) [93]. El método actual más

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

avanzado en términos de eficiencia y eficacia computacional es la búsqueda de vecindad grande (*Large Neighbourhood Search*, LNS) [134].

El problema de orientación en equipo con ventanas de tiempo (TOPTW) es adecuado para describir el problema de diseño de rutas turísticas (TTDP) en el que, por lo general, los puntos de interés se caracterizan por tener un horario en el que ser visitados. Debido a la complejidad computacional del problema, la mayor parte de los trabajos sobre este modelo son tratados con algoritmos heurísticos y metaheurísticos. Una metaheurística de búsqueda local fue presentada en [70], mientras que [77] propone un recocido simulado (*Simulated Annealing*, SA) y un procedimiento de búsqueda voraz aleatoria adaptativa (*Greedy Randomized Adaptive Search*, GRASP) hibridizado con algoritmos evolutivos. En [125] se propone una búsqueda local iterada (*Iterated Local Search*, ILS). Se ha abordado una extensión con ventanas de tiempo múltiple en [121]. Montemanni y Gambardella [91] resuelven el problema de orientación en equipo con ventanas de tiempo (TOPTW) utilizando una metaheurística bioinspirada, basada en sistemas de colonias de hormigas (*Ant Colony Systems*, ACS).

2.7. Soft Computing

Soft Computing es un área de la Inteligencia Artificial que aúna, entre otros, un conjunto de métodos y técnicas que contemplan la imprecisión e incertidumbre de información en la resolución de problemas reales y prácticos, así como los métodos de resolución aproximados, heurísticos y metaheurísticos a estos problemas. Se trata de un enfoque opuesto al tradicional *Hard Computing*, en el que se hacen uso de herramientas y técnicas exactas y modelos matemáticos tradicionales para abordar los problemas. El término Soft Computing es acuñado por Zadeh en 1994 [139], no obstante, las ideas básicas que subyacen en la Soft Computing tienen vínculos con influencias anteriores, entre ellas el origen de los conjuntos difusos [138], el análisis de sistemas complejos y procesos de decisión [140] y la teoría de la posibilidad y análisis de datos blandos [141]. La incorporación de las redes y computación neuronal, así como la computación bioinspirada y las metaheurísticas llegó posteriormente. Así, Soft Computing está compuesto por un grupo de métodos y técnicas como son, el razonamiento probabilístico, los sistemas de lógica y conjuntos difusos, la neurocomputación y redes neuronales, y la computación evolutiva donde se incluyen los algoritmos genéticos [130]. Posteriormente se ha identificado la relevancia de técnicas y métodos relativos a sistemas bioinspirados y otras técnicas heurísticas y metaheurísticas para resolución aproximada de problemas, lo que hace de estas una componente más de la Soft Computing [131]. La Soft Computing se nutre de la combinación de los métodos y técnicas que lo componen. La complementariedad y sinergias entre estos, potencia la capacidad de resolución de problemas en la mayoría de situaciones. Es usual por tanto, encontrar en la literatura aplicaciones de la hibridación de múltiples técnicas para mejorar la resolución de problemas complejos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Las metodologías contenidas en Soft Computing desempeñan un rol clave en la definición de modelos para tratar información imprecisa, vaga o la ausencia de la misma, introduciendo expresiones lingüísticas y medidas cualitativas para la resolución de problemas complejos de difícil resolución desde una perspectiva computacional. Estos mecanismos permiten evitar la simplificación que habitualmente se realiza en el desarrollo de modelos para abordar problemas reales [85]. Los sistemas de lógica y conjuntos difusos ofrecen las herramientas necesarias para tratar este tipo de flexibilidad e incertidumbre en la información de los problemas, y que es fruto de la naturaleza ambigua e imprecisa del mundo tal y como lo conocemos. Estas herramientas en combinación con técnicas metaheurísticas para abordar problemas de optimización combinatoria, permiten afrontar problemas de optimización complejos del mundo real que presentan información imprecisa, estimar y evaluar alternativas de solución, y decidir una solución al problema efectiva en tiempo y coste moderados a través de tácticas que hacen uso de conocimientos del problema. El uso de las metaheurísticas permite afrontar problemas de optimización desde una perspectiva suave o relajada en relación con la Soft Computing, en contraposición a la computación tradicional o Hard Computing. La inclusión de las metaheurísticas en Soft Computing ha permitido dar solución a problemas cuya resolución no es posible a través de métodos analíticos tradicionales y potenciar las capacidades de resolución de problemas complejos a través de la sinergia producida de la hibridación entre las diferentes técnicas de Soft Computing [131].

2.7.1. Métodos de optimización difusa

Los conjuntos y sistemas difusos son usados con el objetivo de construir sistemas inteligentes para resolver problemas de decisión y optimización cuyo modelado es difícil de definir con precisión, gestionando la incertidumbre y la imprecisión de la información disponible, así como de la formulación de preferencias, restricciones y objetivos expresados por los decisores. Si hay imprecisión en algunos de los componentes de la formulación del problema de optimización y es posible expresarlo en términos difusos, entonces el problema debe enfrentarse como un problema de optimización difusa. Los debates sobre las soluciones a obtener no se centran en su factibilidad, ni su optimalidad de forma estricta. Se opta por analizar y discutir el grado de factibilidad y optimalidad de la solución. Bellman y Zadeh [8] son los autores que en 1970 introdujeron los fundamentos de los problemas de optimización difusa, donde los objetivos y las restricciones pueden definirse de manera imprecisa y caracterizarse mediante el uso de funciones de pertenencia como los conjuntos difusos. Esta aproximación requiere que la formulación y las soluciones a los problemas se aborden adecuadamente haciendo uso de representaciones de números difusos y sus operaciones.

Un problema de optimización se puede describir como la búsqueda de los valores de las variables de decisión específicas para que la función objetivo identificada alcance su máximo (o mínimo). El valor de las variables está sujeto a las restricciones establecidas por una

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

función. En estos problemas, las funciones objetivo se definen sobre un conjunto de soluciones. Cuando algunos de sus componentes se consideran difusos, nos enfrentamos a un problema de optimización difusa. Entre todos los problemas de optimización, los de programación lineal son aquellos cuya función objetivo y restricciones son expresiones lineales de las variables de decisión. La programación lineal difusa (*Fuzzy Linear Programming*, FLP) constituye la base para resolver problemas de optimización difusa y sus métodos de solución han sido objeto de muchos estudios en el contexto difuso. Se pueden considerar diferentes modelos de FLP de acuerdo con los diferentes componentes que pueden ser difusos [128]. Estos modelos pueden resolverse de forma directa y sencilla, obteniendo soluciones coherentes con su naturaleza difusa.

a) *Modelos con restricciones difusas*. En este caso, existe una cierta tolerancia en el cumplimiento de las restricciones y, en consecuencia, la región factible se puede definir como un conjunto difuso. En particular, Verdegay [127] utilizando el teorema de representación para conjuntos difusos, demuestra una solución que se puede obtener del modelo auxiliar donde al término de la derecha (los recursos) se le añade un término paramétrico conocido como tolerancia.

b) *Modelos con costes difuso*. En este caso, el modelo está descrito de la misma forma que el problema lineal pero donde los coeficientes de la función objetivo o costes son números difusos descrito por la función de pertenencia correspondiente. En [38] se prueba que la solución puede obtenerse con el modelo auxiliar multiobjetivo. También es posible hacer uso de un método simple considerando soluciones difusas que se resuelven con la aplicación de una función ordenadora para las restricciones [64].

c) *Modelos con coeficientes difusos en las restricciones*. Este modelo considera un problema donde los valores de la matriz tecnológica y los coeficientes son números difusos y se describen por su función de pertenencia correspondiente. Delgado et al. [37] también incluye imprecisión en las restricciones. Proponen considerar soluciones difusas que se resuelven con la aplicación de una función ordenadora h para las restricciones. La nueva formulación se expresa mediante el modelo lineal auxiliar donde la relación de comparación que aparece en las restricciones es entre números difusos y las tolerancias son de naturaleza difusa.

2.7.2. Heurísticas y metaheurísticas

En Inteligencia Artificial el término heurístico se emplea para hacer referencia a procedimientos y técnicas que emplean conocimiento de forma inteligente para proveer soluciones de calidad a problemas consumiendo recursos de forma eficiente. En relación a la resolución de problemas de optimización, las heurísticas y metaheurísticas buscan dar solución a problemas con una perspectiva diferente a los métodos exactos que persiguen la búsqueda de la solución óptima. En los procedimientos heurísticos se tiene un alto grado de confianza en encontrar soluciones de alta calidad empleando recursos computacionales razonables sin garantizar

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

la optimalidad de la solución de un problema. En el diseño de heurísticas existen métodos específicos y *ad hoc* en estrecha relación con el problema a resolver y otros más generales. Los métodos específicos hacen uso de toda la información disponible acerca del problema y del modelo para garantizar una alta eficacia y rendimiento en la resolución. Por otra parte, los métodos generales se presentan como técnicas más robustas y adaptables a diversos problemas por su sencillez procedimental.

Las metaheurísticas son técnicas generales que, a diferencia de las heurísticas, no hacen uso de conocimiento propio del problema para su resolución. Las metaheurísticas son la evolución o siguiente paso de los procedimientos heurísticos hacia estrategias inteligentes para mejorar procedimientos heurísticos generales incrementando su rendimiento y efectividad. El concepto de metaheurística surgió primordialmente a propuesta de Fred Glover en 1986 [58] pero ha evolucionado en base a diferentes concepciones y propuestas para diseñar procedimientos inteligentes en la resolución de problemas. Es posible encontrar un amplio número de tipos básicos o generales de metaheurísticas, a lo largo de esta sección se citarán solo aquellos concernientes a las técnicas metaheurísticas empleadas en las contribuciones de la presente tesis. En este sentido los tipos de metaheurísticas generales que se consideran en esta subsección son; metaheurísticas constructivas, metaheurísticas de búsqueda y metaheurísticas evolutivas.

Las metaheurísticas constructivas generan las soluciones al problema adhiriendo nuevos elementos de forma iterativa a la solución, previo análisis de la calidad de un conjunto de los elementos candidatos a formar parte de la solución. Este tipo de metaheurística se caracterizan por la estrategia utilizada para seleccionar los elementos que se incluirán en la solución del problema. Una de las estrategias bien conocidas en el campo es la *greedy* o voraz, que conlleva la selección de los elementos que mejores resultados proveen en el momento de selección, sin considerar una estrategia o visión a largo plazo. Por otra parte, las metaheurísticas de búsqueda son uno de los tipos de metaheurísticas más significativos, estas determinan estrategias para explorar el espacio de soluciones del problema modificando iterativamente soluciones de partida. En este sentido, las búsquedas locales son uno de los tipos más básicos que fundamentan su estrategia en la exploraciones de soluciones del vecindario o entorno de la solución inicial.

La metaheurística de procedimiento de búsqueda voraz aleatoria adaptativa (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, GRASP) combina las características de los dos tipos de metaheurísticas descritas; constructivas y de búsqueda. GRASP es un *framework* metaheurístico que se caracteriza por disponer de dos fases que se ejecutan secuencialmente de forma iterativa [105]. La primera fase se trata de un proceso constructivo voraz en el que se construye una solución inicial introduciendo en cada iteración un nuevo elemento en la solución seleccionado desde una lista de candidatos. En la segunda fase se mejora esta solución inicial a través de una metaheurística de búsqueda local. A lo largo de las diferentes aportaciones de la presente tesis, el GRASP es una metaheurística frecuente como *framework* de referencia para dar solución a diferentes problemas de planificación de rutas. La simplicidad

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

de su estructura permite introducir mecanismos de mejora en la selección de candidatos a formar parte de la solución. Algunos de estos mecanismos propuestos consideran versiones difusas del GRASP y la introducción de sesgo o *bias* en la selección de candidatos a través de diferentes funciones.

Dentro de las metaheurísticas de búsqueda, y con el afán de superar algunos inconvenientes existentes en las búsquedas locales se proponen las búsquedas globales. Las búsquedas globales pretenden dar solución al inconveniente de quedar atrapado en una solución localmente óptima de la que una búsqueda local no podría escapar. Existen diferentes estrategias de búsqueda globales, pero centrandó la atención en las empleadas a lo largo de la tesis, la búsqueda por entornos variables (*Variable Neighborhood Search*, VNS) [62] es una metaheurística frecuente en las aportaciones de esta tesis. Su principio básico es el cambio sistemático de estructura de entornos en la exploración del espacio de soluciones para evitar quedar atrapado en óptimos locales. La versión estándar VNS busca una solución del entorno de la solución inicial, para ello ejecuta una búsqueda monótona local hasta alcanzar una solución óptima local, que sustituirá a la solución actual si la mejora y cambia de estructura de entorno en otro caso. El caso particular de la búsqueda descendente por entornos variables (*Variable Neighborhood Descent*, VND) ejecuta una búsqueda monótona por entornos pero variando sistemáticamente la estructura de entornos cuando se detiene en mínimos locales.

El último de los tipos de metaheurísticas generales tratado, es de las metaheurísticas evolutivas en las que se siguen estrategias para guiar la exploración del espacio de búsqueda a través de conjuntos de soluciones, normalmente llamados poblaciones, con el objetivo de alcanzar la solución óptima con estos elementos. El mecanismo clave de las metaheurísticas evolutivas es la capacidad de interacción entre los elementos poblacionales. Los diferentes tipos de metaheurísticas evolutivas se diferencian principalmente por la forma en que se combinan dichos elementos. En las contribuciones de esta tesis, algunas metaheurísticas evolutivas han sido propuestas para dar solución a problemas de planificación de rutas. Entre ellas encontramos la evolución diferencial (*Differential Evolution*, DE) [35] que evoluciona una población de soluciones candidatas a través de operaciones de recombinación y mutación para generar nuevas soluciones que serán escogidas en función de su bondad. Existen diferentes tipos de metaheurísticas evolutivas, una de las más influyentes son las metaheurísticas genéticas. En relación a este tipo de metaheurísticas y las aportaciones de la tesis, se ha propuesto el uso de una versión particular de una metaheurística genética de enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO) [143]. Originalmente la metaheurística PSO permite generar soluciones a un problema a partir de una población de soluciones candidatas. Asumiendo cada solución como una partícula, estas se mueven por el espacio de búsqueda en función de dos características, su posición y su velocidad. El movimiento de las soluciones se ve influenciado por diferentes factores como el mejor valor de función objetivo o posición local encontrada, la mejor posición global encontrada por el resto de partículas que exploran el espacio de búsqueda, entre otros factores. La dinámica es guiar el enjambre de soluciones para que

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

converja hacia las soluciones de mayor calidad. En las contribuciones de la presente tesis se hace uso de una particular versión discreta del PSO (*Jumping Frogs Optimization*, JFO).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Capítulo 3

Investigación

El presente capítulo expone la descripción de los artículos que componen el compendio de publicaciones de la tesis.

3.1. Quality of Service Objectives for Vehicle Routing Problem with Time Windows

Esta sección hace referencia al artículo que forma parte del compendio de esta tesis y se encuentra en el Apéndice A. La referencia completa es presentada a continuación:

- Airam Expósito-Márquez, Julio Brito-Santana, José Andrés Moreno-Pérez, Christopher Expósito-Izquierdo (2019). Quality of service objectives for vehicle routing problem with time windows. *Applied Soft Computing*, volume 84, 105707, ISSN 1568-4946. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105707>

3.1.1. Resumen

Este trabajo propone una extensión del VRPTW considerando la calidad de servicio desde la perspectiva del cliente. El modelo propuesto, denominado Quality of Service VRPTW (*Quality of Service Vehicle Routing Problem with Time Windows*, QSVRPTW), corresponde a un problema de planificación de rutas que reduce el tiempo de servicio de los clientes. El problema incluye las restricciones del VRPTW, pero incorpora diferentes funciones objetivos destinadas a optimizar la calidad del servicio. La calidad de servicio se entiende como la minimización de los tiempos de servicio al cliente dentro de su ventana de tiempo.

Dada la pertenencia del QSVRPTW a la clase \mathcal{NP} -hard, los enfoques de solución aproximados se identifican como métodos prometedores para obtener soluciones de alta calidad empleando una cantidad de recursos computacionales reducida. En este sentido, se propone una metaheurística híbrida que combina GRASP-VNS y una metaheurística DE para generar soluciones de alta calidad. Adicionalmente se propone la resolución exacta de la formulación

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

MIP del QSVRPTW con propósitos comparativos. La experimentación computacional demuestra que la propuesta algorítmica es efectiva para proporcionar soluciones de alta calidad para instancias de problemas clásicos en tiempos de cómputo razonables. El objetivo de la experimentación es la comparación de las diferentes funciones objetivos definidas para evaluar la calidad de servicio.

3.1.2. Objetivos de investigación

La función objetivo más comúnmente abordada en problemas de planificación de rutas de mercancías es la minimización de costes operativos totales. Sin embargo, el principal objetivo de esta investigación es presentar un problema de planificación de rutas de mercancías que persigue mejorar la calidad del servicio prestado a los clientes. Entendiendo la calidad del servicio como la reducción de los tiempos de servicio al cliente dentro de su ventana de tiempo. En consecuencia, se presenta el QSVRPTW, que incorpora la calidad de servicio como función objetivo con tres métricas alternativas. Debido a la complejidad computacional de este problema se propone un enfoque metaheurístico para abordar el QSVRPTW.

Los objetivos principales de esta investigación se resumen a continuación:

- Presentar una nueva extensión del VRPTW cuyo objetivo es responder a la mejora de la calidad del servicio en el transporte de mercancías.
- Proponer un modelo matemático destinado a resolver el problema de optimización bajo análisis.
- Presentar un enfoque de solución que combina los beneficios del GRASP y la VNS para resolver el QSVRPTW.
- Analizar el impacto de varias métricas para evaluar la planificación de rutas de mercancías en términos de calidad del servicio prestado.

3.1.3. Metodología

La motivación de introducir un modelo para planificación de rutas que considere la calidad de servicio tiene su origen en una falta de referentes claros en la literatura. El primer paso de esta investigación fue el estudio y análisis de la literatura científica de problemas de planificación de rutas que consideraran la calidad del servicio prestado como su objetivo. La búsqueda de la literatura se acotó para aquellos problemas de optimización relativos al VRPTW, lo que permitió limitar el estudio de la literatura a un amplio subconjunto de problemas.

En el estudio de la literatura se detectaron que los problemas estudiados no incorporaban las ventanas de tiempo de los clientes en su propuesta de métricas y funciones objetivo de calidad de servicio. Esta ausencia se toma en cuenta como una forma de proveer nuevas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

3.1 Quality of Service Objectives for Vehicle Routing Problem with Time Windows 39

extensiones del VRPTW más realistas en cuanto a la calidad del servicio desde el punto de vista del cliente. Por lo que se procedió a formalizar el problema teniendo en cuenta tres nuevas métricas de calidad de servicio en la función objetivo.

Para resolver el problema se implementó un modelo MIP en IBM ILOG CPLEX 12.6 y algunas técnicas metaheurísticas. El enfoque de solución aproximado se basó en el diseño de un GRASP-VNS híbrido diseñado para el problema e implementado en Java Standard Edition 8 y una metaheurística DE implementada en el framework jMetal [39].

La experimentación computacional tiene como objetivo la comparativa entre las diferentes métricas de calidad propuestas en el modelo del QSVRPTW. No obstante, previa a esta comparativa se procedió a determinar qué enfoque de solución metaheurístico se comporta mejor. Para determinar la bondad de las metaheurísticas previamente se realizó un estudio del impacto de los valores de los parámetros en el rendimiento de las metaheurísticas. En el siguiente paso se realizó una comparativa entre el rendimiento del método exacto y la metaheurística GRASP-VNS híbrida. Por último, se extendió la experimentación para estudiar y comparar las funciones objetivo propuestas con el nuevo concepto de calidad de servicio.

Con el objetivo de difundir los resultados y progresos realizados, así como los modelos y métodos de resolución propuestos, se presentaron los mismos en diferentes congresos nacionales e internacionales. Finalmente los resultados concluyentes de la investigación fueron publicados en una revista internacional de alto impacto del área temática.

3.1.4. Resultados obtenidos y conclusiones finales

La principal contribución de esta investigación es la propuesta de una nueva extensión del VRPTW que considera la calidad del servicio definida a partir de la ventana de tiempo, formulando tres funciones objetivo para ello.

La experiencia computacional demuestra el buen rendimiento de la propuesta GRASP-VNS híbrida para resolver el QSVRPTW, con instancias clásicas de la literatura en un tiempo razonable obtiene soluciones de alta calidad. Además el procedimiento propuesto presenta mejor rendimiento general que la resolución del modelo MIP de forma exacta y que otras metaheurísticas como DE. Con respecto a la comparativa con la resolución exacta del modelo MIP, los resultados muestran diferentes situaciones en las que el GRASP-VNS híbrido tiene mejor rendimiento que CPLEX. Sin embargo, hay algunos casos en los que CPLEX puede obtener la solución óptima en menor tiempo que la GRASP-VNS, y estos casos coinciden con los de instancias de tamaño inferior.

Los resultados comparativos muestran que DE no es capaz de encontrar soluciones factibles para las instancias del problema bajo análisis, incluso estableciendo grandes tiempos de ejecución. Por lo que se propuso considerar aquellas soluciones infactibles generadas por DE que más cerca se encuentren de ser factibles. Esto se tradujo en medir el grado

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

de incumplimiento de las restricciones del problema. En este sentido, se comprobó que las restricciones más desafiantes son las de ventanas de tiempo.

Por último, con respecto a la comparativa entre las diferentes funciones objetivo propuestas, un análisis de los resultados muestra que, en la mayoría de los casos las mejores soluciones cuando se optimiza con una función objetivo dada coinciden con las mejores soluciones para las funciones objetivo restantes. Esta observación es razonable, dado que hay componentes comunes a las diferentes funciones objetivo. En aquellos casos en los que las mejores soluciones para cada una de las funciones objetivo no coinciden, es apreciable que la función objetivo $fr(5)$ presenta mejores resultados promedios en distancia y porcentaje de ventana de tiempo del cliente que las otras funciones objetivo. En general, parece que la función objetivo $fr(5)$ presenta un mejor rendimiento que las otras.

Para el desarrollo de investigaciones futuras, se abren varias líneas de trabajo. Una de las líneas es la integración del QSVRPTW en el proceso completo de optimización de entrega de mercancías proporcionando un enfoque holístico de esta actividad. Abordar el dinamismo del entorno en la planificación de rutas dado por situaciones como por ejemplo la llegada de nuevos pedidos, fluctuaciones de los tiempos de desplazamiento, entre otros, es otras de las líneas de trabajo futuro propuestas. Por último, la combinación de optimización y simulación es una vía futura interesante para abordar la naturaleza estocástica de este problema llevado a la práctica en escenarios reales.

3.2. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure to Design Waste Collection Routes in La Palma

Esta sección hace referencia al artículo que forma parte del compendio de esta tesis y se encuentra en el Apéndice B. La referencia completa es presentada a continuación:

- Airam Expósito-Márquez, Christopher Expósito-Izquierdo, Julio Brito-Santana, José Andrés Moreno-Pérez (2019). Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in La Palma. *Computers & Industrial Engineering*, volume 137, 106047, ISSN 0360-8352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106047>

3.2.1. Resumen

Este trabajo soluciona un problema real de planificación de rutas para la recogida de las fracciones de residuos azul (envases de papel y cartón) y amarilla (envases de plástico). El problema se enmarca en un proyecto de transferencia cuyo escenario geográfico se sitúa en la isla de La Palma (Islas Canarias, España). La planificación se modela como un problema de optimización denominado problema de rutas de vehículos ecoeficiente (*Eco-efficient Vehicle Routing Problem*, Ee-VRP) formalizado a través de un modelo MIP. El objetivo de optimización es maximizar el volumen de residuo recolectado recogiendo aquellos contenedores con el nivel

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

3.2 Greedy Randomized Adaptive Search Procedure to Design Waste Collection Routes in La Palma 41

de llenado más alto y susceptibles de desbordarse, de forma que minimice el impacto ambiental y evite el desbordamiento de contenedores en las vías públicas.

Debido a la complejidad del problema y a su pertenencia a la clase \mathcal{NP} -hard, se propone para su resolución una metaheurística basada en GRASP que obtiene soluciones en el escenario práctico abordado. La lógica del procedimiento es aumentar la cantidad de desechos reciclables recolectados, priorizando la recolección de aquellos contenedores con el nivel de llenado más alto. Previamente, se realiza una estimación del nivel de llenado de los contenedores a través del análisis de datos históricos. Los experimentos computacionales revelaron que la técnica de optimización propuesta es efectiva y eficiente, mejora el proceso de recolección actual de acuerdo con varios indicadores que miden la ecoeficiencia.

3.2.2. Objetivos de investigación

El proyecto de transferencia tecnológica y de investigación del que forma parte se denomina “Evaluación y diseño de rutas de recogida de residuos y envases en contenedores de los municipios de la isla de La Palma”. Los agentes públicos y privados que participan en la mejora del reciclaje de residuos en La Palma están interesados en la eficiencia de la recolección de residuos. El objetivo principal del proyecto es evaluar y analizar las estrategias y recursos dispuestos actualmente en la recolección y transporte de dos fracciones de desechos reciclables en La Palma: la fracción azul de envases de papel y cartón y la fracción amarilla de envases de plástico y latas. La organización que en España se dedica a recuperación de envases y patrocina la investigación, tiene el objetivo estratégico de aumentar la cantidad de envases recuperados a largo plazo y motivar a los ciudadanos a realizar esta actividad. La información que dispone la organización señala que una de las principales razones que desalienta al ciudadano a reciclar es encontrar los contenedores de reciclaje llenos o desbordados.

Esta investigación pone el foco de atención en los siguientes objetivos prácticos:

1. Ofrecer soluciones óptimas de planificación de rutas de recogida y transporte de las fracciones azul y amarilla de residuos en la isla de La Palma.
2. Modelar y formular el problema actual de la recogida de envases.
3. Resolver el modelo de optimización con una metaheurística simple y adecuada.
4. Evaluar el enfoque de solución propuesto comparando la planificación actual con los resultados obtenidos por la técnica de optimización propuesta.

3.2.3. Metodología

Inicialmente en el proyecto se definió una estrategia de recogida de información sobre los requisitos del problema. Para ello, se realizaron diversas reuniones y entrevistas, tanto presenciales como virtuales, con las entidades responsables y que participan en los procesos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

de gestión, recogida y recuperación de residuos. También se realizaron visitas y reuniones en los centros de trabajo de las empresas recogida, transporte y almacenaje intermedio para reconocer como se realizan la planificación y la gestión de operaciones en la isla. Otras entidades gubernamentales, asociaciones y terceros involucrados e interesados en el proceso de recogida de residuos participaron en estas reuniones para conocer los detalles del proceso, necesidades y demandas.

Realizada la elicitación de requisitos, se procedió al estudio de la literatura científica. Se identifican y determinan los modelos de optimización para la planificación de rutas de recogida de residuos y los métodos de resolución, específicamente aquellos que consideraran aspectos medioambientales en su modelo. A continuación se procedió a la especificación y formalización del problema de optimización. Para ello se propuso una formulación matemática del Ee-VRP que recoge los requerimientos y restricciones identificados.

En la siguiente fase se abordaron diferentes cuestiones relativas al diseño e implementación del método de solución y la información necesaria para encontrar soluciones. Uno de los aspectos clave fue la selección del subconjunto de contenedores que recogerá la flota de vehículos cada día y que depende del nivel de llenado de los contenedores. La solución selecciona el subconjunto con mayor nivel de llenado para priorizar su recogida. Los contenedores de la isla no se encuentran sensorizados, por lo que el nivel de llenado se estima en base a los datos históricos disponibles. EL proceso desarrollado fue calcular una tasa de llenado para cada contenedor en función de los datos históricos. Se asume que los contenedores se llenan linealmente en el tiempo con tasas heterogéneas. En función de la tasa de llenado de cada contenedor, se estima su nivel de llenado una vez que se depositan los residuos durante un número de días desde la última recolección. Otra cuestión importante fue la obtención de los datos de tiempos de desplazamiento entre puntos de localización de los contenedores (los puntos de recogida). En la base de datos históricos proporcionada por la empresa solo existían tiempos de desplazamiento entre puntos de recogida visitados consecutivamente en rutas previas. No se disponía de los tiempos de desplazamiento reales entre todos los pares de puntos de recogida. Además hay tiempos de viaje entre localizaciones que no son fiables o contienen errores. Para resolver este último aspecto, se calculan los tiempos haciendo uso del API Distance Matrix de Google Maps Platform. A estos tiempo obtenidos se les aplicó un factor de corrección y añadió, el tiempo de la operación de recolección en función del número de contenedores en cada localización. El factor de corrección se obtuvo de la relación entre la muestra de tiempos de viaje almacenados en la base de datos históricos y los tiempos de viaje proporcionados por Google Maps Platform para los mismos pares de puntos.

Con la información de entrada necesaria para aplicar los método de resolución, se abordan el diseño de los métodos propuestos para la obtención de rutas para la flota de vehículos disponibles y para cada día dentro del horizonte de planificación. La primera alternativa se basó en el marco general de la metaheurística GRASP, en la que se incorpora una heurística Lin-Kernighan en la fase de mejora de las soluciones. Adicionalmente se implementó el modelo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

3.2 Greedy Randomized Adaptive Search Procedure to Design Waste Collection Routes in La Palma 43

MIP del Ee-VRP en IBM ILOG CPLEX 12.6. Dado que los niveles de llenado diarios dependen de los contenedores recogidos los días anteriores, el modelo resultante no era de programación lineal, por lo que se consideró el modelo reducido correspondiente a un solo día. En este caso, se conoce el nivel de llenado de los contenedores y el modelo matemático es lineal. Una vez que se obtiene la solución proporcionada por CPLEX para el primer día, se actualiza el nivel de llenado de los contenedores para el segundo día y CPLEX resuelve el problema para el segundo día. Este proceso se repite durante los días siguientes hasta que se completa el horizonte de planificación.

Para evaluar el rendimiento de las técnicas de optimización propuestas se realizó una comparación entre las soluciones obtenidas de las soluciones exactas del modelo diario dadas por CPLEX y las soluciones obtenidas aplicando la metaheurística. Los resultados dejan constancia de los inconvenientes del uso de la resolución exacta del modelo diario, en la que se obtienen soluciones de peor calidad que la propuesta de solución metaheurística, con respecto al nivel medio de llenado de los contenedores recogidos y al tiempo computacional empleado. Con el objetivo de comparar la planificación obtenida por el método de solución metaheurístico propuesto y la planificación realizada por la empresa operadora, se seleccionó un periodo de planificación previamente realizado de una semana de tiempo. Las planificaciones realizadas por la empresa operadora presentaban un mayor número de rutas por semana y un mayor número de horas de trabajo en comparación con las establecidas en el método de resolución. Estas condiciones persiguen una reducción de los costes laborales a medio plazo.

Para la difusión de los resultados parciales se presentaron en diferentes congresos nacionales e internacionales a medida que se desarrollaba la investigación. Los resultados finales se publican en una revista internacional de interés para el tema propuesto y con alto impacto en el área.

3.2.4. Resultados obtenidos y conclusiones finales

Como demuestran los resultados de la experimentación, se obtiene una mejora en los diferentes indicadores que miden la ecoeficiencia propuestos conjuntamente con la organización responsable de la recuperación de envases. Concretamente se reduce el tiempo de operación, el consumo de combustible y las emisiones producidas por los vehículos mientras se mantienen e incluso mejoran los niveles de llenado de los contenedores en las tareas de recolección. A pesar de la diferencia de carga de trabajo en la comparativa realizada, la distancia recorrida por los vehículos aumenta a pesar de la reducción de las horas de trabajo. Este hecho está motivado por la selección de contenedores a recolectar con un nivel de llenado más alto con independencia de la distancia a la que se encuentren ubicados. Adicionalmente, los resultados muestran que el nivel de llenado de los contenedores recogidos es superior en la solución propuesta, a pesar de la reducción en el tiempo y el número de rutas a realizar. En base a estos datos, los vehículos aumentan su productividad durante el proceso de recolección. En

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

cuanto a la cantidad de residuos recogidos, la solución propuesta es casi equivalente a las rutas que planifica la empresa operadora, sin embargo, el tiempo requerido y el consumo de combustible de los vehículos se reducen significativamente. En definitiva, se logra una mayor calidad en la prestación del servicio, proveyendo una recolección más eficiente, efectiva y sostenible, y de manera indirecta cumple con otros criterios sin reducir el rendimiento general.

Otro resultado de interés relativo al enfoque de solución propuesto es su flexibilidad para abordar nuevos criterios y restricciones de optimización. Esto permite tomar decisiones basadas en criterios relevantes que no se han impuesto inicialmente. El procedimiento hace uso de la información disponible en cualquier momento para permitir un comportamiento dinámico adaptando su respuesta a los cambios que se detectan mientras se produce el proceso de recolección. El enfoque propuesto permite su integración con otras herramientas tecnológicas para aprovechar la información dinámica. Por último, la flexibilidad del enfoque de solución facilita la extrapolación de su aplicación a otros territorios donde los requisitos y criterios tienen características diferentes.

En lo concerniente a investigaciones futuras, existen varias líneas prometedoras que se encuentran abiertas. Entre ellas la de abordar situaciones excepcionales como la posibilidad de que la empresa de gestión de residuos ofrezca un servicio especial en eventos sociales y deportivos en la isla de La Palma durante todo el año. Esta situación requiere del despliegue temporal de un conjunto de contenedores de gran capacidad destinados a satisfacer la demanda generada. Otra línea de trabajo futuro es la reducción de contaminación acústica y otros efectos perjudiciales para residentes, turistas y el propio entorno. La empresa de gestión de residuos está interesada en añadir franjas horarias específicas para la recogida de desechos en determinadas zonas de la isla. Estas franjas pueden ser tratados como ventanas de tiempo en el modelo del problema. Por último, la operadora está interesada en integrar la información sobre los precios del combustible y la ubicación de la estación de servicio en el diseño de las rutas de recolección, de forma que el consumo de combustible se minimice.

3.3. A Fuzzy GRASP for the Tourist Trip Design with Clustered POIs

Esta sección hace referencia al artículo que forma parte del compendio de esta tesis y se encuentra en el Apéndice C. La referencia completa es presentada a continuación:

- Airam Expósito-Márquez, Simona Mancini, Julio Brito-Santana, José Andrés Moreno-Pérez (2019). A fuzzy GRASP for the tourist trip design with clustered POIs. *Expert Systems with Applications*, volume 127, pages 210-227, ISSN 0957-4174. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.03.004>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

3.3.1. Resumen

En el dominio turístico los sistemas inteligentes centran sus esfuerzos en las tareas de recomendación de puntos de interés y generación de rutas turísticas. Este trabajo pone el foco en las tareas de generación de rutas turísticas considerando las preferencias de los turistas en los puntos de interés a visitar. Este problema se encuentra identificado en la literatura como TTDP. Nuestro trabajo considera supuestos más realistas a modelar, cuyo resultado es una nueva extensión denominada Tourist Trip Design Problem with Clustered POIs (TTDP-Clu). En esta nueva extensión los POIs se organizan en grupos que representan categorías de puntos de interés en rutas turísticas. Por ejemplo, restaurantes, sitios históricos, playas, museos, parques recreativos, etc. En el modelo se introducen nuevas restricciones que consideran límites mínimos y máximos a la cantidad de POIs que pertenecen a una de las categorías que se visitan en la misma ruta.

Tratándose de una nueva extensión del TTDP no abordada previamente, se implementa un generador de instancias para diseñar y crear conjuntos de instancias con los que evaluar la precisión del enfoque de solución propuesto. Para resolver el problema se propone una versión difusa de la metaheurística GRASP en la que se utilizan criterios de evaluación basados en el tiempo de desplazamiento y en la preferencia del punto de interés para guiar la selección de candidatos en la fase de construcción de rutas. Los resultados proporcionados por la metaheurística propuesta se comparan con los obtenidos al resolver la formulación MIP del problema. Los resultados computacionales realizados muestran la efectividad y eficiencia del enfoque metaheurístico propuesto. Adicionalmente, dada la eficiencia del método de solución propuesto, se exhibe su idoneidad para formar parte de guías turísticas electrónicas personalizadas. Estos sistemas generalmente se implementan en dispositivos portátiles a través de aplicaciones móviles o con tecnologías de desarrollo web para ser ejecutados en el navegador, por lo que requieren de bajos esfuerzos computacionales.

3.3.2. Objetivos de investigación

El objetivo principal de este trabajo es generar rutas turísticas desde una perspectiva más realista. Para ello se propone abordar el TTDP introduciendo la categorización de los POIs con una nueva extensión del problema. El TTDP-Clu considera que el conjunto de POIs se agrupa en diferentes categorías que representan diversos tipos de sitios de visita y cuyo propósito es definir un conjunto de rutas factibles, una para cada día de estadía del turista en destino, que maximicen la puntuación total asociada a la visita de los POIs por parte del turista. Las rutas deben comenzar y finalizar en un punto de partida dado asociado con el alojamiento del turista y la duración de cada ruta, teniendo en cuenta tiempos de viaje, de visita y de espera, no puede exceder un valor máximo. Adicionalmente, para cada categoría, el número de POIs que se pueden visitar en un solo día se encuentra limitado con un mínimo y máximo de puntos de esa categoría a visitar.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

En base a lo comentado, los objetivos específicos de la investigación se describen a continuación:

- Definir y diseñar una nueva extensión realista del TTDP, denominada TTDP-Clu, considerando la categorización de los POIs.
- Proponer un nuevo modelo matemático para el problema de optimización propuesto.
- Presentar un enfoque de solución ágil y eficaz capaz de formar parte de guías turísticas electrónicas personalizadas mediante una versión difusa de la metaheurística GRASP.
- Evaluar el rendimiento del enfoque metaheurístico de solución propuesto en diferentes dimensiones. En lo relativo a los resultados de la literatura para la versión estándar del TTDP y con respecto a la resolución del modelo matemático propuesto para los diferentes conjuntos de instancias diseñados.

3.3.3. Metodología

Previo paso a la especificación del nuevo problema se realizó un estudio de los problemas de optimización dentro de la literatura científica en relación con la planificación de rutas turísticas. La búsqueda en la literatura se centró en aquellos problemas de optimización que consideran el TOPTW como modelo. Algunas de las extensiones del TTDP estudiadas presentan nuevas consideraciones sobre el TTDP que aportaban un mayor realismo al problema, incluyendo la introducción de categorías en los POIs pero sin considerar nuevas restricciones o cambios en la función objetivo del modelo matemático.

En base a la revisión de la literatura se considera una nueva extensión del TTDP modelado como TOPTW en origen, pero incorporando la clusterización de los POIs e introduciendo restricciones en el modelo para considerar un número mínimo y máximo de POIs de cada categorías en cada ruta. En las tareas de planificación real de rutas turísticas determinados tipos de POIs son de visita obligatoria, otros de visita recomendada y en otros casos limitada. El resultado es un nuevo modelo denominado TTDP-Clu.

Dada la complejidad del problema se procedió al diseño y desarrollo de técnicas metaheurísticas para abordar el TTDP-Clu. Se asume que la técnica de resolución ha de formar parte de un dispositivo PET, por lo que en el desarrollo de la misma se prima la eficiencia computacional y la calidad de las soluciones obtenidas. Para tal fin se propone una versión difusa de la metaheurística GRASP. Al tratarse de un nuevo problema, se implementa el modelo matemático MIP en el resolutor XPRESS 7.9 para testear y comparar las soluciones exactas con las obtenidas por la metaheurística. Se desarrolla un generador de instancias con el que se diseña un conjunto de 30 instancias pequeñas con 30 POIs, y un segundo conjunto de instancias largas que consta de 72 instancias con 100 POIs. Parte de los datos del conjunto de instancias pequeñas son datos reales relacionados con POIS de la isla de Tenerife.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Y el conjunto de instancias grandes tiene datos basados en las instancias de la literatura desarrolladas por Montemanni & Gambardella en 2009 para la versión estándar del TOPTW. Los parámetros restantes de las instancias como las diferentes categorías y distribución de POIs en ellas, mínimos y máximos de categorías por ruta, entre otros, son establecidos por el generador de instancias en base a un conjunto de valores preestablecidos. Diseñadas las instancias se estudia el impacto de los valores de los parámetros en el rendimiento de la metaheurística. El objetivo era determinar la mejor configuración de parámetros a utilizar en la posterior experimentación. A continuación, se realizó una comparativa de la propuesta de solución y los métodos más eficientes descritos en la literatura para una versión estándar del TTDP modelado como TOPTW, con respecto a las instancias clásicas de Montemanni & Gambardella. Finalmente se realiza una comparación detallada del TTDP-Clu de los resultados computacionales obtenidos por la resolución exacta del modelo y los obtenidos por el GRASP difuso. En estas comparativas demuestra la eficacia del método propuesto frente a los de la literatura y respecto al método exacto.

Los resultados parciales obtenidos a lo largo de esta investigación, así como modelos y métodos de resolución previos han sido presentados en múltiples congresos nacionales e internacionales. En última instancia se ha publicado esta investigación en una revista internacional que se consideraba de interés para la investigación realizada y de alto impacto en el área.

3.3.4. Resultados obtenidos y conclusiones finales

Una de las contribuciones de esta investigación es la nueva propuesta y modelo matemático de problema de diseño de itinerarios que surge en las operaciones de planificación de viajes turísticos. Esta propuesta surge de la necesidad de ofrecer un nuevo modelo más realista y centrado en la necesidades del cliente, el TTDP-Clu.

Otra aportación, es un nuevo conjunto de instancias para evaluar y poner a prueba el problema con una suficiente variedad en cuanto a número de POIs, variaciones en los parámetros de las restricciones de mínimos y máximos por categorías, número de tours a considerar en cada instancias y tiempo máximo de cada tour. Además de contar con el diseñador de instancias para generar nuevas instancias en base a nuevos valores de características que se consideren.

Los resultados computacionales obtenidos demuestran el alto rendimiento del GRASP difuso como método frente al problema estándar TTDP en comparación a los métodos más eficaces en la literatura. En lo relativo a la comparativa de la propuesta de solución metaheurística con la resolución del modelo matemático, los resultados computacionales muestran un excelente desempeño del algoritmo tanto en términos de eficiencia y efectividad en comparación con la resolución exacta del modelo implementado con Xpress 7.9, lo que hace que la propuesta de GRASP difuso sea adecuada para ser incorporada en los PETs.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

En lo que respecto a trabajos futuros, se consideran diferentes líneas de trabajo por las que continuar. Entre ellas el diseño de nuevas metaheurísticas y métodos de solución para resolver el problema, abordando propuestas como VNS o Large Neighborhood Search (LNS) para intensificar la búsqueda de soluciones con mayores esfuerzos computacionales. Esta propuesta no se considera para su incorporación en PETs, se emplearía para planificar por adelantado conjuntos de itinerarios temáticos específicos que permitan componer una cartera de rutas turísticas a sugerir. Otra propuesta futura, es considerar en el problema que las preferencias asociadas a los POIs dependen del tiempo de visita a estos. Por ejemplo, cuando se visitan museos de grandes dimensiones como el Louvre en París, el turista obtiene un mayor grado de satisfacción si dispone de más tiempo para visitar más obras de arte. Por último, la línea de trabajo futura más relevante considera abordar el dinamismo y la estocasticidad del problema en contextos reales a través de varias etapas. En primer lugar considerar heurísticas de reparación de soluciones para abordar situaciones en las que un POI deja de estar disponible en plena ruta. Ante esta situación, se requiere recuperar la calidad de la ruta minimizando la pérdida de satisfacción del cliente con la recomendación de otro POI de similar calidad. En segundo lugar se plantea un conjunto de escenarios diferentes en los que se varía la probabilidad de fallo de los POIs, estos escenarios se aplican a las mejores soluciones obtenidas y se comprueba la capacidad de recuperación del grado de satisfacción turística de cada solución. El siguiente paso es considerar la versión estocástica del problema, incorporando información estocástica en el momento de construir las soluciones, explotando la información de probabilidad de fallo de los POIs directamente en el método de solución. Y como última meta de esta línea de trabajo futura, se plantea un proceso de aprendizaje en el que se extraen las características que hacen que una solución tenga baja capacidad de recuperación del grado de satisfacción turística, de modo que si por ejemplo un determinado POI que falla produce una fuerte pérdida de satisfacción, este POI se puede penalizar artificialmente en posteriores iteraciones de la construcción de las soluciones.

3.4. GRASP-VNS for a periodic VRP with time windows to deal with milk collection

Esta sección hace referencia al artículo que forma parte del compendio de esta tesis y se encuentra en el Apéndice D. La referencia completa es presentada a continuación:

- Airam Expósito-Márquez, Günther R. Raidl, Julio Brito-Santana, José Andrés Moreno-Pérez (2018). GRASP-VNS for a Periodic VRP with Time Windows to Deal with Milk Collection. In: Moreno-Díaz R., Pichler F., Quesada-Arencibia A. (eds) Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2017. EUROCAST 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10671. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74718-7_36

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

3.4 GRASP-VNS for a periodic VRP with time windows to deal with milk collection 49

3.4.1. Resumen

Esta investigación considera la resolución de un problema de planificación de rutas para la recolección de leche fresca de granjas con una flota de vehículos refrigerados. Este problema es formulado como un problema periódico VRPTW (*Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows*, PVRPTW). El problema tiene un horizonte de planificación extendido a un número determinado de días, para cada uno de los cuales se resuelve un VRPTW correspondiente a las tareas de recolección de leche de ese día. La disposición de los clientes a lo largo del horizonte de planificación depende de un conjunto de diferentes combinaciones de días posibles que tiene cada cliente para ser visitado. Y se considera que ninguna granja puede estar más de dos días sin visitar dada la naturaleza perecedera de la leche. La función objetivo del problema está orientada a la mejora de la calidad del servicio, entendida esta como la minimización de los tiempos de comienzo de recogida en el cliente dentro de su ventana de tiempo. De especial importancia al tratar con productos perecederos como la leche fresca. En el caso tratado, esta se encuentra almacenada en pequeñas granjas familiares con instalaciones isotérmicas limitadas. Esta investigación nace de la colaboración con una cooperativa lechera de la isla de Tenerife, España.

Con el objetivo de resolver un problema de alta complejidad como el presente, se propuso una metaheurística híbrida GRASP-VNS. La estrategia seguida para resolver el problema se divide en dos fases. La primera fase consiste en asignar una combinación de días de visita única a cada granja lechera asignando estas a los días del horizonte de planificación correspondiente a la combinación de días. La segunda fase es aplicar la metaheurísticas híbrida GRASP-VNS para cada día del horizonte de planificación con el objetivo de resolver un VRPTW por día. Dada la dificultad de obtener soluciones factibles, durante el proceso de búsqueda las soluciones infactibles son consideradas. Para ello se introducen diferentes funciones de penalización que dependen de la violación de las diversas restricciones del problema.

3.4.2. Objetivos de investigación

La planificación de rutas de transporte de productos perecederos requiere de ciertas especificidades operativas asociadas con la preservación de la calidad de los productos. Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal dar solución a un problema de una cooperativa lechera que desea planificar las rutas realizadas por una flota de camiones refrigerados para la recogida de leche proveniente de pequeñas granjas dispersas geográficamente y con instalaciones isotérmicas limitadas para el almacenamiento del producto. En estas circunstancias, la recolección por parte de la cooperativa exige una organización temporal precisa para preservar la calidad de la leche. La recolección de leche no necesita ser diaria porque las granjas tienen instalaciones para almacenar leche durante dos días y la planificación se realiza en períodos semanales. Con el objetivo de minimizar los tiempos de recogida del producto para preservar

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por:	Fecha:
Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

su calidad, se hace uso de una función objetivo que persigue minimizar el tiempo de inicio de la recogida de leche teniendo en cuenta la ventana de tiempo de cada granja.

Considerando los requisitos previamente comentados, los objetivos principales de esta investigación se resumen a continuación:

- Abordar el problema de planificación de rutas para la recogida de leche fresca con un horizonte de planificación extendido como un modelo PVRPTW.
- Presentar una estrategia de dos pasos para dar solución al problema.
- Evaluar el rendimiento del enfoque de solución propuesto haciendo uso de las instancias de la literatura modificadas con ciertos requerimientos propios del dominio del negocio.

3.4.3. Metodología

Con el fin de especificar los requerimientos del problema se organizó una reunión para determinar qué requisitos y características del mismo. Con esta información se estudió literatura científica para identificar las técnicas de solución y modelos usados para abordar problemas de planificación de rutas con horizonte de planificación extendida. Posteriormente se realiza las tareas de especificación del problema, modelización y formulación matemática. Determinando un equivalente al PVRPTW con una función objetivo adecuada a preservar la calidad de la leche fresca en su recogida.

Atendiendo a la literatura, existen dos enfoques generales a la hora abordar el PVRPTW. El primer enfoque comienza asignando la combinación de días de recolección en cada granja y a continuación se resuelven los problemas de rutas para cada día del horizonte de planificación. En el segundo enfoque, primero se resuelven los problemas de rutas y posteriormente se asignan a días de la semana. En este trabajo de investigación se sigue la estrategia del primer enfoque. Primero, en la selección de combinación de días por granja, se seleccionan granjas con ventanas de tiempo amplias y otras con ventanas de tiempo pequeñas para facilitar la convergencia hacia soluciones factibles en cuanto a las restricciones de ventana de tiempo. A continuación se utiliza una técnica metaheurística GRASP-VND híbrida con el objetivo de resolver un VRPTW en cada día del horizonte de planificación. El GRASP se encarga de generar soluciones de comienzo que serán mejoradas por el VND. Las estructuras de entorno consideradas en el VND son el movimiento e intercambio de granjas en las rutas, y el cambio de combinación de días de visita de una granja. La aplicación de las estructuras de entorno se hace de forma dinámica en base a métricas como la mejora sobre el tiempo y el número de veces que se hace uso de estas. Durante el proceso de búsqueda se consideran soluciones infactibles relajando las restricciones de ventanas de tiempo, capacidad de carga máxima del vehículo durante la ruta y duración máxima de la ruta. Para ello se penalizan las soluciones a través de funciones de penalización pesadas relativas a la violación de cada restricción. El

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

3.4 GRASP-VNS for a periodic VRP with time windows to deal with milk collection 51

peso de cada factor de penalización sigue un doble enfoque, considerando pesos estáticos y dinámicos.

Para la evaluación del enfoque de solución propuesto, se diseñó una experimentación computacional en la que se consideraron instancias básicas de la literatura para el PVRPTW que fueron adaptadas para incorporar información de los requisitos del problema específico. La experimentación computacional obtuvo soluciones factibles y con diferentes tipos de funciones de penalización, que fueron comparadas.

La difusión de los resultados y progresos obtenidos incluyó la presentación de comunicaciones en un congreso nacional y en otro internacional. El artículo adjunto al compendio de esta tesis es una versión extendida del trabajo presentado en el congreso internacional, revisado y publicado en Lecture Notes in Computer Science (LNCS).

3.4.4. Resultados obtenidos y conclusiones finales

La finalidad de esta investigación es la resolución de un problema real y práctico de planificación de rutas de recogida de leche mediante vehículos refrigerados. La leche procede de pequeñas granjas geográficamente dispersas que tienen instalaciones isotérmicas limitadas. La principal contribución es la resolución del problema proponiendo una función objetivo que permite minimizar el tiempo de recogida del producto dentro de la ventana de tiempo de cada granja para preservar la calidad de la leche fresca.

Teniendo en cuenta la experiencia computacional, la estrategia propuesta es capaz de resolver el problema y obtener soluciones factibles al mismo. La experimentación compara varias funciones de penalización consideradas para relajar las restricciones y tener en cuenta soluciones no factibles en el proceso de búsqueda. En concreto se comparan funciones de penalización estáticas y dinámicas con respecto a los pesos usados en los factores de penalización. Adicionalmente se presenta una propuesta que no hace uso de factores de penalización en el proceso de búsqueda. Atendiendo a los resultados, la estrategia de penalización dinámica presenta mejores resultados que las otras.

Las líneas de trabajo futuro, proponen extender la experimentación a otras instancias, entre las cuales se encuentra las instancias reales de la cooperativa de productos lácteos. También se estudiará el comportamiento de otras metaheurísticas para intensificar la búsqueda de soluciones, otras estructuras de vecindario en el VND y otros procedimientos para elegir la combinación de visita inicial por granja. Una línea de trabajo relevante esta relacionada con el uso de otros tipos de funciones de penalización y otras estrategias para considerar las soluciones no factibles en el proceso de búsqueda.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Capítulo 4

Conclusions and Further Research

The current chapter contains an overview of the fundamental conclusions and further research resulting from the thesis at issue.

4.1. Conclusions

Smart mobility management plays an important role for smart islands, cities, and territories. It leads to benefits in diverse areas, including sustainable and efficient development of passenger and freight transport, limitation of the negative environmental impact, and guarantee of the quality of life in the specified geographic area place. Smart mobility management is necessary for the development of today's modern and sustainable economy. Mobility has a direct impact on the prosperity, sustainability, competitiveness, productivity, and efficiency of several economic sectors. Passenger and freight route planning services is one of the key transport operations among other important mobility services. The economic, environmental, and quality of service impact of this operational activity varies considerably depending on the quality of the decisions adopted. Specifically, the optimization of route planning tasks can result in the improvement of several aspects. Examples of these areas are, costs and travel times, quality of service, service flexibility and adaptability in relation to customers, energy consumption, sustainability of mobility services, environmental impact, among others.

Route planning tasks can be approached as combinatorial optimization problems. This task involves considering a multitude of information sources, requirements, constraints, and objectives when mathematically modelling the problem. In practice, the resulting problems are complex and obtaining high-quality solutions that avoid excessive computational times requires smart strategies. In this regard, intelligent transport systems allow transportation services and the mobility of passengers and freight to be planned. This route planning can satisfy aforementioned criteria and provide more personalized and efficient services to citizens, reducing negative aspects such as road congestion, noise pollution, and emission of greenhouse gases. Intelligent transport systems use smart methodologies and techniques

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJpl

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

inherent in Artificial Intelligence and Soft Computing, such as heuristics and metaheuristics. The automation of solving route planning problems in reasonable computational times which take into account several requirements and information is one of the main functions of intelligent transport systems.

Under this scenario, route planning problems can be improved by using smart methodologies and hybrid techniques. This hybridization combines components of Artificial Intelligence and Soft Computing in order to provide the intelligence that search solution processes need. The stated aim and main objective of this thesis is to design, implement, and validate simple, efficient and flexible optimization procedures based on Soft Computing dedicated to improve route planning problems. The specific contexts of these procedure are freight transport, personalized tourist trip planning, and eco-efficient recyclable waste transport. These optimization processes developed as modules can be incorporated into intelligent transport systems to improve route planning operations. The reasons why the optimization of routes planning services are particularly relevant to the scientific community, are listed below:

- Optimizing routes planning operations provides direct benefits; including cost savings, quality of service, travel times, energy consumption, greenhouse gas emissions, among others.
- Finding solutions to most routes planning optimization problems is highly complex and challenging. Most of those problems belongs to the \mathcal{NP} -hard class. Their complexity alone is reason enough to be the subject of many different research areas. A multitude of route planning problems and solution approaches can be found in the literature, using both exact and approximate techniques.

While it is true that there have been many breakthroughs achievements in the design and implementation of exact solution approaches in route planning problems, the heuristic and metaheuristic alternative techniques have been proven as the most effective and efficient solutions methods. These methods report high quality solutions in short computational times. This doctoral thesis has proposed several heuristic and metaheuristic solution approaches to solve route planning problems such as; Vehicle Routing Problem with Time Windows, Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows, Team Orienteering Problem with Time Windows, Tourist Trip Design Problem, and real-world and new variants of these mentioned problems. Other aspects to be considered in the route planning problems addressed are quality of service improvement, customer service orientation, imprecision and uncertainty in information, eco-efficient criteria, user preferences, and clustered locations, among others. For each route planning problem faced, the model is formally defined, a series of optimization techniques is proposed to solve it, and the design of the experimentation to be carried out is introduced. The research and results are disseminated in the scientific community through specific conferences and published articles in specialised journals. Overall, the proposed

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

methods and techniques have been shown to live up to state-of-art approaches, obtaining high quality solutions within short computational times in all problems studied during the thesis. The design and implementation of the techniques has been versatile enough to serve as a foundation for several technological and research transfer projects and to solve real route planning problems.

The contributions of the current thesis have been diverse and can be seen in different dimensions. The first contribution is a brief review of the literature and state-of-the-art about the scope, innovations, interests, and emerging approaches about the discussed route planning problems. This review answers the questions regarding which models of route planning problems and solution approaches are available and they are given more attention throughout the thesis. Another contribution refers to the proposal for modelling and the resolution of route planning problems for delivery and collection of goods, specifically variants with time windows, and periodic or extended planning horizon. New ways to measure the quality of service that consider minimizing the waiting time of the customer within customer time window are proposed for the mentioned problems. These contributions emphasize the design and application of metaheuristics to optimization models that seek to improve the quality of service through different metrics. In addition, other closed and open route planning problems are considered, aimed at combining operations with own vehicles and outsourcing of routes. In relation to the modelling and solving of personalized tourist trip planning problems, different models, and solution approaches are proposed to address the problem. More specifically, a new model that introduces clustering of points of interest to visit is proposed. Novel solution approaches strategies are designed in order to solve the new proposed problem. These solution strategies have been the basis of some research transfer projects. Another contribution of this thesis is the modelling and solving of a real-world problem of route planning for collection and deposit of recyclable waste. The solution developed for this practical problem promotes the flexibility, simplicity, and eco-efficiency of the solutions obtained. Addressing route planning problems in fuzzy contexts considering imprecision and uncertainty in the information is another contribution of the current thesis. Fuzzy optimization is the methodological approach for dealing with imprecision in data and constraints of the problems. In a similar line, metaheuristics with fuzzy enhancement mechanisms are designed.

4.2. Further Research

The research carried out identifies several promising future lines of work which can be defined that attempt to answer research questions that appear in the contexts of route planning problems, solution approaches, and smart methodologies. The contributions and works which appear in the compendium of this thesis have been used as a basis for a set of future lines of work. Overall, several worthy future lines of research lines for the optimization problems addressed are briefly outlined below:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- The integration of the proposed route optimization problems in an integral logistic process. A wide range of optimization problems related to freight management can be found in the literature. In this connection, considering the integration of several optimization problems related to freight management would bring a comprehensive approach of an holistic logistic process.
- Addressing the dynamism of the environment in route planning problems. The dynamic behavior of the logistic and transportation systems in real contexts is intrinsic to their nature. In connection with freight transport, for example, variations in transport times, arrival of new orders, among others, are common. In the case of tourist trip design, it is common that a point of interest is not available for unexpected situations. It is also necessary to consider other points of interest in order to minimize the loss of tourist satisfaction. In both cases, there are unexpected situations which result because of their dynamic nature that adversely affect solutions. This future work will provide mechanism, techniques, and methodologies to manage dynamic situations and provide robust solutions which can be recovered from unexpected situations.
- The study of promising new variants of route planning problems in emerging contexts and real-world applications. On the basis of the optimization problems and solution approaches developed in this doctoral thesis, new problems can be addressed with special emphasis on those with more realistic and practical contexts and applications. Accordingly, the collaboration of experts and companies in the field of logistics that identify practical needs and applied problems is desirable to address other real-world problems.
- The design and development of several metaheuristic frameworks. This future line considers new developments addressing the design of new metaheuristic frameworks and enhancement mechanisms on solution approaches proposed in the current thesis. The extension of the design of new metaheuristic frameworks and improvement mechanisms can lead to new improved techniques and solutions.
- The main goal of optimizing routes planning processes is to assist the decision making process in order to provide more efficient use of available resources. The modules of techniques and methodologies developed in this thesis can be integrated with intelligent transport systems and management software. These modules could optimize individual routing planning problems, run algorithmic techniques or provide statistical indicators, among others. Furthermore, intelligent transport systems could provide an integration of several optimization problems in order to cover an integral logistic process.

The main objective of this thesis and future lines of research is to improve route planning operations in several contexts. The area of optimization of route planning processes is very

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

wide and complex. Academics all over the world are actively studying it and there is an enormous quantity of references in the scientific literature. This thesis contributes to the scientific community through proposals for optimization and improvement of different route planning problems. Consequently, in conjunction with the scientific community, route planning operations are improved, and intelligent mobility and sustainable economic development are promoted. Ultimately, as a result, this thesis makes a modest contribution to the improvement of the quality of life of the region with respect to mobility.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Bibliografía

- [1] Alagöz, A. Z. and Kocasoy, G. (2008). Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in istanbul. *Waste Management*, 28(8):1461–1471.
- [2] Archetti, C., Hertz, A., and Speranza, M. (2007). Metaheuristics for the team orienteering problem. *Journal of Heuristics*, 13:49–76.
- [3] Arribas, C. A., Blazquez, C. A., and Lamas, A. (2010). Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems. *Waste Management & Research*, 28(4):355–363.
- [4] Balas, E. (1989). The prize collecting traveling salesman problem. *Networks*, 19(6):621–636.
- [5] Balas, E. (2007). *The Prize Collecting Traveling Salesman Problem and Its Applications*, pages 663–695. Springer US.
- [6] Ballou, R. (2004). *Business Logistics/supply Chain Management: Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain*. Pearson International edition. Pearson Prentice Hall.
- [7] Bektaş, T., Demir, E., and Laporte, G. (2016). Green vehicle routing. In *Green Transportation Logistics*, pages 243–265. Springer.
- [8] Bellman, R. E. and Zadeh, L. A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. *Management science*, 17(4):B–141.
- [9] Blum, A., Chawla, S., Karger, D., Lane, T., Meyerson, A., and Minkoff, M. (2007). Approximation algorithms for orienteering and discounted-reward tsp. *SIAM Journal on Computing*, 37(2):653–670.
- [10] Bouly, H., Dang, D., and Moukrim, A. (2010). A memetic algorithm for the team orienteering problem. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 8:49–70.
- [11] Boussier, S., Feillet, D., and Gendreau, M. (2007). An exact algorithm for team orienteering problems. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 5:211–230.
- [12] Brandão, J. (1999). Metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows. In Vok, S., Martello, S., Osman, I. H., and Roucairol, C., editors, *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, pages 19–36. Springer US, Boston, MA.
- [13] Brandimarte, P. and Zotteri, G. (2007). *Introduction to Distribution Logistics*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [14] Brito, J., Exposito, A., and Moreno, J. (2017a). Planificación de viajes turísticos con preferencias y restricciones difusas. *Investigación Operacional*, 38:122–131.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por:	Fecha:
Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [15] Brito, J., Expósito, A., and Moreno, J. A. (2016). The team orienteering problem with fuzzy times. In *Libro de Actas ESTYLF2016 XVIII Congreso Español sobre tecnologías y lógica Fuzzy*, pages 154–155. Departamento de Matemática Aplicada. Universidad del País Vasco.
- [16] Brito, J., Expósito, A., Moreno, J. A., and Verdegay, J. L. (2014a). Planificación de rutas orientada a la calidad del servicio con tiempos difusos. In *Libro de Actas ESTYLF2014 XVII Congreso Español sobre tecnologías y lógica Fuzzy*, pages 223–228. Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza.
- [17] Brito, J., Expósito, A., and Pérez, J. A. M. (2015a). Planificación de rutas para productos perecederos utilizando un híbrido grasp-vns. In de Mérida Universidad de Extremadura, C. U., editor, *Libro de Actas Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados MAEB 2015*, pages 305–312.
- [18] Brito, J., Expósito-Márquez, A., and Moreno, J. A. (2017b). A fuzzy GRASP algorithm for solving a tourist trip design problem. In *2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE 2017, Naples, Italy, July 9-12, 2017*, pages 1–6. IEEE.
- [19] Brito, J., Expósito, A., and Moreno, J. (2014b). Discrete pso for vrptw with quality objective. In E.-G. Talbi, R. Ellaia, . K. M., editor, *Proceedings of the 5th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing, META'14*. INRIA.
- [20] Brito, J., Expósito, A., and Moreno, J. A. (2013). Variable neighbourhood search for close-open vehicle routing problem with time windows. *IMA Journal of Management Mathematics*, 27(1):25–38.
- [21] Brito, J., Expósito, A., and Moreno, J. A. (2016). Solving the team orienteering problem with fuzzy scores and constraints. In *2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pages 1614–1620.
- [22] Brito, J., Expósito, A., and Moreno-Pérez, J. (2015b). *Bi-objective Discrete PSO for Service-Oriented VRPTW*, pages 445–460. Springer International Publishing.
- [23] Brito, J., Expósito, A., and Moreno-Pérez, J. (2015c). *Bi-objective Discrete PSO for Service-Oriented VRPTW*, pages 445–460. Springer International Publishing.
- [24] Brito, J., Martínez, F., Moreno-Pérez, J., and Verdegay, J. (2012). Fuzzy optimization for distribution of frozen food with imprecise times. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 11.
- [25] Brito, J., Nieves, D., Expósito, A., and Moreno-Pérez, J. (2018). *Soft Computing Methods in Transport and Logistics*, pages 45–61. Springer International Publishing.
- [26] Bräysy, O. and Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, part i: Route construction and local search algorithms. *Transportation Science*, 39:104–118.
- [27] Butt, S. and Cavalier, T. (1994a). A heuristic for the multiple tour maximum collection problem. *Computers & Operations Research*, 21(1):101–111.
- [28] Butt, S. and Ryan, D. (1999). An optimal solution procedure for the multiple tour maximum collection problem using column generation. *Computers & Operations Research*, 26(4):427–441.
- [29] Butt, S. E. and Cavalier, T. M. (1994b). A heuristic for the multiple tour maximum collection problem. *Computers & Operations Research*, 21(1):101 – 111.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [30] Caro, L. M. and Garcia, J. A. M. (2007). Measuring perceived service quality in urgent transport service. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 14(1):60–72.
- [31] Chen, H.-K., Hsueh, C.-F., and Chang, M.-S. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers & Operations Research*, 36(7):2311 – 2319.
- [32] Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management*. Financial Times Series. Financial Times Prentice Hall.
- [33] Cordeau, J.-F., Laporte, G., and Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *The Journal of the Operational Research Society*, 52(8):928–936.
- [34] Croom, S., Romano, P., and Giannakis, M. (2000). Supply chain management: an analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6(1):67 – 83.
- [35] Das, S. and Suganthan, P. N. (2010). Differential evolution: A survey of the state-of-the-art. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 15(1):4–31.
- [36] Dat, L. Q., Linh, D. T. T., Chou, S.-Y., and Vincent, F. Y. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Systems with Applications*, 39(7):6380–6387.
- [37] Delgado, M., Verdegay, J., and Vila, M. (1989). A general model for fuzzy linear programming. *Fuzzy Sets and Systems*, 29:21–29.
- [38] Delgado, M., Verdegay, J. L., and Vila, M. A. (1987). Imprecise costs in mathematical programming problems. *Control and Cybernet*, 16(2):113–121.
- [39] Durillo, J. J. and Nebro, A. J. (2011). jmetal: A java framework for multi-objective optimization. *Advances in Engineering Software*, 42(10):760 – 771.
- [40] Duval, D. T. (2007). *Tourism and Transport: Modes, Networks and Flows*. Channel View Publications.
- [41] Expósito, A., Brito, J., and Moreno, J. A. (2016). A heuristic-biased grasp for the team orienteering problem. In Luaces, O., Gámez, J. A., Barrenechea, E., Troncoso, A., Galar, M., Quintián, H., and Corchado, E., editors, *Advances in Artificial Intelligence*, pages 428–437, Cham. Springer International Publishing.
- [42] Expósito, A., Brito, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2015). Hybrid grasp-vns for milk collection problem modeled as pvrptw. In *Metaheuristic International Conference (MIC'15) proceedings*.
- [43] Expósito, A., Raidl, G. R., Brito, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2018). Grasp-vns for a periodic vrp with time windows to deal with milk collection. In Moreno-Díaz, R., Pichler, F., and Quesada-Arencibia, A., editors, *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2017*, pages 299–306, Cham. Springer International Publishing.
- [44] Expósito-Márquez, A., Expósito-Izquierdo, C., Brito-Santana, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2018). Solving an eco-efficient vehicle routing problem for waste collection with grasp. In Del Ser, J., Osaba, E., Bilbao, M. N., Sanchez-Medina, J. J., Vecchio, M., and Yang, X.-S., editors, *Intelligent Distributed Computing XII*, pages 215–224, Cham. Springer International Publishing.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [45] Expósito, A., Brito, J., and Moreno, J. (2013). Pso discreto para el vrptw orientado a la calidad del servicio. In *Libro de Actas de la Multiconferencia CAEPIA13*, pages 483–492. Asociación Española para la Inteligencia Artificial.
- [46] Expósito, A., Brito, J., Moreno, J. A., and Expósito-Izquierdo, C. (2019a). Quality of service objectives for vehicle routing problem with time windows. *Applied Soft Computing*, 84:105707.
- [47] Expósito, A., Mancini, S., Brito, J., and Moreno, J. A. (2019b). A fuzzy grasp for the tourist trip design with clustered pois. *Expert Systems with Applications*, 127:210 – 227.
- [48] Expósito, A., Mancini, S., Brito, J., and Moreno-Pérez, J. (2019c). *Solving a Fuzzy Tourist Trip Design Problem with Clustered Points of Interest: Recent Advances and Applications*, pages 31–47. Springer International Publishing.
- [49] Expósito, A., Raidl, G. R., Brito, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2017). Un grasp/vns para un problema de recogida de leche modelado como pvrptw. In *Proceeding of the Metaheuristics International Conference (MIC 2017) and the XII Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2017) Conference*. Barcelona, Universitat Pompeu Fabra.
- [50] Expósito-Izquierdo, C., Expósito-Márquez, A., and Brito-Santana, J. (2017). *Mobility as a Service*, chapter 15, pages 409–435. John Wiley & Sons, Ltd.
- [51] Expósito-Márquez, A., Expósito-Izquierdo, C., Brito-Santana, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2019). Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in la palma. *Computers & Industrial Engineering*, 137:106047.
- [52] Francis, P., Smilowitz, K., and Tzur, M. (2008). *The Period Vehicle Routing Problem and its Extensions*, volume 43, pages 73–102. Springer US.
- [53] Garvin, B. J., Cohen, M. B., and Dwyer, M. B. (2011). Evaluating improvements to a meta-heuristic search for constrained interaction testing. *Empirical Software Engineering*, 16(1):61–102.
- [54] Gavalas, D., Konstantopoulos, C., Mastakas, K., and Pantziou, G. (2014). A survey on algorithmic approaches for solving tourist trip design problems. *Journal of Heuristics*, 20(3):291–328.
- [55] Gendreau, M., Laporte, G., and Semet, F. (1998a). A branch-and-cut algorithm for the undirected selective traveling salesman problem. *Networks*, 32(4):263–273.
- [56] Gendreau, M., Laporte, G., and Semet, F. (1998b). A tabu search heuristic for the undirected selective travelling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 106(2):539 – 545.
- [57] Giusti, L. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste management*, 29(8):2227–2239.
- [58] Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5):533 – 549. Applications of Integer Programming.
- [59] Guerrero, L. A., Maas, G., and Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste management*, 33(1):220–232.
- [60] Gulczynski, D., Golden, B., and Wasil, E. (2011). The period vehicle routing problem: New heuristics and real-world variants. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(5):648 – 668.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [61] Han, H. and Ponce Cueto, E. (2015). Waste collection vehicle routing problem: literature review. *Promet-Traffic&Transportation*, 27(4):345–358.
- [62] Hansen, P., Mladenović, N., and Moreno-Pérez, J. A. (2010). Variable neighbourhood search: Methods and applications. *4OR*, 175:367–407.
- [63] Hansmann, R. S. and Zimmermann, U. T. (2009). Integrated vehicle routing and crew scheduling (ivrcs) in waste management part i. In *Dagstuhl Seminar Proceedings 09261 Models and Algorithms for Optimization in Logistics*.
- [64] Herrera, F. and Verdegay, J. (1995). Three models of fuzzy integer linear programming. *European Journal of Operational Research*, 83(3):581–593.
- [65] Hiassat, A., Diabat, A., and Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of Manufacturing Systems*, 42:93 – 103.
- [66] Kanoh, H. and Nakamura, N. (2000). Route guidance with unspecified staging posts using genetic algorithm for car navigation systems. In *ITSC2000. 2000 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No. 00TH8493)*, pages 119–124. IEEE.
- [67] Kara, I., Kara, B. Y., and Yetis, M. K. (2007). Energy minimizing vehicle routing problem. In *International Conference on Combinatorial Optimization and Applications*, pages 62–71. Springer.
- [68] Kataoka, S. and Morito, S. (1988). An algorithm for single constraint maximum collection problem. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 31(4):515–531.
- [69] Kumar, P. M., G], U. D., Manogaran, G., Sundarasekar, R., Chilamkurti, N., and Varatharajan, R. (2018). Ant colony optimization algorithm with internet of vehicles for intelligent traffic control system. *Computer Networks*, 144:154 – 162.
- [70] Labadi, N., Mansini, R., Melechovsky, J., and Wolfler Calvo, R. (2012). The team orienteering problem with time windows: An LP-based granular variable neighborhood search. *European Journal of Operational Research*, 220(1):15–27.
- [71] Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4):408–416.
- [72] Laporte, G. and Martello, S. (1990). The selective travelling salesman problem. *Discrete Applied Mathematics*, 26(2):193 – 207.
- [73] Leggieri, V. and Haouari, M. (2017). A practical solution approach for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104:97–112.
- [74] Li, L. Y. O. and Fu, Z. (2002). The school bus routing problem: a case study. *Journal of the Operational Research Society*, 53(5):552–558.
- [75] Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T., Chung, S. H., and Lam, H. (2014). Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4):1118–1138.
- [76] Lin, C.-H., Yu, J.-L., Liu, J.-C., and Lee, C.-J. (2008). Genetic algorithm for shortest driving time in intelligent transportation systems. In *2008 International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering (mue 2008)*, pages 402–406. IEEE.
- [77] Lin, S. and Yu, V. (2012). A simulated annealing heuristic for the team orienteering problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 217(1):94–107.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [78] Litescu, S. C., Viswanathan, V., Aydt, H., and Knoll, A. (2016). The effect of information uncertainty in road transportation systems. *Journal of Computational Science*, 16:170 – 176.
- [79] López-Sánchez, A., Hernández-Díaz, A. G., Gortázar, F., and Hinojosa, M. A. (2018). A multiobjective grasp-vnd algorithm to solve the waste collection problem. *International Transactions in Operational Research*, 25(2):545–567.
- [80] Lumsdon, L. and Page, S. (2004a). *Progress in Transport and Tourism Research: Reformulating the Transport-Tourism Interface and Future Research Agendas*, pages 1–27. Elsevier Ltd.
- [81] Lumsdon, L. and Page, S. (2004b). *Tourism and Transport: Issues and Agenda for the New Millennium*. Advances in tourism research series. Elsevier.
- [82] Luo, Z., Qin, H., and Lim, A. (2014). Branch-and-price-and-cut for the multiple traveling repairman problem with distance constraints. *European Journal of Operational Research*, 234(1):49–60.
- [83] Lysgaard, J. and Wohlk, S. (2014). A branch-and-cut-and-price algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 236(3):800–810.
- [84] Ma, Z.-J., Wu, Y., and Dai, Y. (2017). A combined order selection and time-dependent vehicle routing problem with time windows for perishable product delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 114:101–113.
- [85] Magdalena, L. (2010). What is soft computing? revisiting possible answers. *International Journal of Computational Intelligence Systems - INT J COMPUT INTELL SYST*, 3.
- [86] Marshall, R. E. and Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33(4):988–1003.
- [87] McKinnon, A., Browne, M., Whiteing, A., and Piecyk, M. (2015). *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. Kogan Page Publishers.
- [88] Menouar, H., Guvenc, I., Akkaya, K., Uluagac, A. S., Kadri, A., and Tuncer, A. (2017). Uav-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(3):22–28.
- [89] Miller, C. E., Tucker, A. W., and Zemlin, R. A. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems. *J. ACM*, 7(4):326–329.
- [90] Min, H. and Zhou, G. (2002). Supply chain modeling: Past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2):231–249.
- [91] Montemanni, R. and Gambardella, L. M. (2009). Ant colony system for team orienteering problems with time windows. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 34:287–306.
- [92] Muriel, A. and Simchi-Levi, D. (2003). Supply chain design and planning – applications of optimization techniques for strategic and tactical models. In *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*, volume 11 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, pages 15 – 93. Elsevier.
- [93] Muthuswamy, S. and Lam, S. (2011). Discrete particle swarm optimization for the team orienteering problem. *Memetic Computing*, 3:287–303.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [94] Márquez, A. E., Mancini, S., Brito, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2018). Dynamic stochastic tourist trip design problem with clustered poi. In *Proceeding of the 29th European Conference on Operational Research (EURO 2018)*. Valencia, EURO. The Association of European Operational Research Societies.
- [95] Narasimhan, R. and Mahapatra, S. (2004). Decision models in global supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 33, 21-27. *Industrial Marketing Management*, 33:21–27.
- [96] Nucamendi-Guillén, S., Martínez-Salazar, I., Angel-Bello, F., and Moreno-Vega, J. M. (2016). A mixed integer formulation and an efficient metaheuristic procedure for the k-Travelling Repairmen Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 67(8):1121–1134.
- [97] Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., and Bräysy, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, 30:223–232.
- [98] Osvald, A. and Stirn, L. Z. (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. *Journal of Food Engineering*, 85(2):285 – 295.
- [99] Pacheco, J. and Martí, R. (2006). Tabu search for a multi-objective routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 57(1):29–37.
- [100] Park, J. and Kim, B.-I. (2010). The school bus routing problem: A review. *European Journal of Operational Research*, 202(2):311–319.
- [101] Pekny, J. F. and Miller, D. L. (1990). An exact parallel algorithm for the resource constrained traveling salesman problem with application to scheduling with an aggregate deadline. In *Proceedings of the 1990 ACM Annual Conference on Cooperation, CSC '90*, page 208–214, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [102] Pirkwieser, S. and Raidl, G. (2008). A variable neighborhood search for the periodic vehicle routing problem with time windows. In Prodhon, C., e. a., editor, *Proceedings of the 9th EU/MEeting on Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing*, pages 23–24, Troyes, France.
- [103] Poonthalir, G. and Nadarajan, R. (2018). A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (f-gvrp). *Expert Systems with Applications*, 100:131 – 144.
- [104] Post, I. and Swamy, C. (2015). Linear programming-based approximation algorithms for multi-vehicle minimum latency problems. In *Proceedings of the Twenty-Sixth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pages 512–531. SIAM.
- [105] Resende, M. and Ribeiro, C. (2016). *Optimization by GRASP: Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*. Springer New York.
- [106] Ribeiro, G. M. and Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39(3):728–735.
- [107] Righini, G. and Salani, M. (2009). Incremental state space relaxation strategies and initialization heuristics for solving the orienteering problem with time windows with dynamic programming. *Computers & Operations Research*, 36(4):1191 – 1203.
- [108] Sahoo, S., Kim, S., Kim, B.-I., Kraas, B., and Popov Jr, A. (2005). Routing optimization for waste management. *Interfaces*, 35(1):24–36.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [109] Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2):254–265.
- [110] Song, B. D. and Ko, Y. D. (2016). A vehicle routing problem of both refrigerated- and general-type vehicles for perishable food products delivery. *Journal of Food Engineering*, 169:61 – 71.
- [111] Souffriau, W. (2010). *Automated Tourist Decision Support*. PhD dissertation, Centre for Industrial Management, Katholieke Universiteit Leuven.
- [112] Stadtler, H., Kilger, C., and Meyr, H. (2015). *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*. Springer Texts in Business and Economics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [113] Sulemana, A., Donkor, E. A., Forkuo, E. K., and Oduro-Kwarteng, S. (2018). Optimal routing of solid waste collection trucks: A review of methods. *Journal of Engineering*, 2018.
- [114] Tan, K., Lee, L. H., Zhu, Q., and Ou, K. (2001). Heuristic method for vehicle routing problem with time windows. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15:281–295.
- [115] Tang, H. and Miller-Hooks, E. (2005). A tabu search heuristic for the team orienteering problem. *Computers & Operations Research*, 32(6):1379–1407.
- [116] Taniguchi, E. and Shimamoto, H. (2004). Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(3):235 – 250. Intelligent Transport Systems: Emerging Technologies and Methods in Transportation and Traffic.
- [117] Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., and Carvalho, M. d. G. (2009). Optimisation of msw collection routes for minimum fuel consumption using 3d gis modelling. *Waste Management*, 29(3):1176–1185.
- [118] Tejero, J. and Martín, S. (2007). *Innovación y mejora de procesos logísticos: Análisis, diagnóstico e implantación de sistemas logísticos*. Libros profesionales. ESIC.
- [119] Tirkolae, E. B., Hosseinabadi, A. A. R., Soltani, M., Sangaiah, A. K., and Wang, J. (2018). A hybrid genetic algorithm for multi-trip green capacitated arc routing problem in the scope of urban services. *Sustainability (2071-1050)*, 10(5).
- [120] Toth, P. and Vigo, D., editors (2002). *The vehicle routing problem*, volume 9 of *Monographs on Discrete Mathematics and Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics Publishing.
- [121] Tricoire, F., Romauch, M., Doerner, K., and Hartl, R. (2010). Heuristics for the multi-period orienteering problem with multiple time windows. *Computers & Operations Research*, 37(2):351–367.
- [122] Ustundag, A. and Cevikcan, E. (2008). Vehicle route optimization for rfid integrated waste collection system. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 7:611–625.
- [123] Vansteenwegen, P. (2008). *Planning in tourism and public transportation*. PhD dissertation, Centre for Industrial Management, Katholieke Universiteit Leuven.
- [124] Vansteenwegen, P., Souffriau, W., and Oudheusden, D. V. (2011). The orienteering problem: A survey. *European Journal of Operational Research*, 209(1):1 – 10.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [125] Vansteenwegen, P., Souffriau, W., Vanden Berghe, G., and Van Oudheusden, D. (2009). Iterated local search for the team orienteering problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 36:3281–290.
- [126] Vansteenwegen, P. and Van Oudheusden, D. (2007). The mobile tourist guide: An opportunity. *Operational Research Insight*, 20(3):21–27.
- [127] Verdegay, J. L. (1982). Fuzzy mathematical programming. *Fuzzy information and decision processes*, 231:237.
- [128] Verdegay, J. L. (1995). Fuzzy optimization: models, methods and perspectives. In *In proceeding 6th IFSA-95 World Congress.*, pages 39–71.
- [129] Verdegay, J. L. (2005a). Una revisión de las metodologías que integran la soft computing. In *Actas del Simposio sobre Lógica Fuzzy y Soft Computing (LFSC2005)*, pages 151–156, Granada.
- [130] Verdegay, J. L. (2005b). Una revisión de las metodologías que integran la soft computing. In LFSC2005, editor, *Actas del Simposio sobre Lógica Fuzzy y Soft Computing (LFSC2005)*, pages 151–156. Granada.
- [131] Verdegay, J. L., Yager, R. R., and Bonissone, P. P. (2008). On heuristics as a fundamental constituent of soft computing. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(7):846 – 855. Theme: Fuzzy Models and Approximation Methods.
- [132] Vergara, A. and de las Rivas, J. L. (2004). *Territorios Inteligentes*. Fundación Metrópoli.
- [133] Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., Lahrichi, N., and Rei, W. (2012). A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. *Operations Research*, 60:611–624.
- [134] Vidal, T., Maculan, N., Ochi, L., and Vaz Penna, P. (2015). Large neighborhoods with implicit customer selection for vehicle routing problems with profits. *Transportation Science*, 50(2):720–734.
- [135] Wang, C., Li, X., Wang, A., Yang, F., and Zhou, X. (2013). An intelligent transportation system using rfid based sensors. In *2013 IEEE 10th International Conference on High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*, pages 337–344. IEEE.
- [136] Wang, C., Li, X., Zhou, X., Wang, A., and Nedjah, N. (2016). Soft computing in big data intelligent transportation systems. *Applied Soft Computing*, 38:1099 – 1108.
- [137] Yu, B. and Yang, Z. Z. (2011). An ant colony optimization model: The period vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(2):166–181.
- [138] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338 – 353.
- [139] Zadeh, L. (1994). Fuzzy logic (abstract): Issues, contentions and perspectives. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Computer Science Conference on Scaling up: Meeting the Challenge of Complexity in RealWorld Computing Applications: Meeting the Challenge of Complexity in RealWorld Computing Applications*, CSC 94, page 407, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- [140] Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(1):28–44.
- [141] Zadeh, L. A. (1981). *Possibility theory and soft data analysis*. Westview Press, Inc., Boulder, Colo.
- [142] Zadeh, L. A. (1998). Some reflections on soft computing, granular computing and their roles in the conception, design and utilization of information/intelligent systems. *Soft Computing*, 2:23–25.
- [143] Zhang, Y., Wang, S., and Ji, G. (2015). A comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Apéndices

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Apéndice A

Quality of service objectives for vehicle routing problem with time windows

Expósito, A., Brito, J., Moreno, J. A., and Expósito-Izquierdo, C. (2019). Quality of service objectives for vehicle routing problem with time windows. *Applied Soft Computing*, 84:105707, ISSN 1568-4946. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105707>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Soft Computing Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/asoc



Quality of service objectives for vehicle routing problem with time windows

Airam Expósito*, Julio Brito, José A. Moreno, Christopher Expósito-Izquierdo

Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas, Instituto Universitario de Desarrollo Regional, Universidad de La Laguna, Spain



ARTICLE INFO

Article history:
Received 8 October 2018
Received in revised form 26 June 2019
Accepted 8 August 2019
Available online 13 August 2019

Keywords:
Metaheuristics
Transport
Quality of service
Vehicle routing problem with time windows
Greedy randomized adaptive search procedure
Variable neighbourhood search

ABSTRACT

In this paper we tackle a variant of the vehicle routing problem from the perspective of the quality in customer service. The proposed model corresponds to a routing planning problem where, in addition to the efficiency in the use of resources and time, the delivery process requires to reduce the response time to satisfy the customer demands. The problem includes the constraints of the well-known Vehicle Routing Problem with Time Windows but incorporates objective functions aimed at optimizing the service quality. The quality is here associated with the time the vehicles reach the existing customers within their time windows. Due to the complexity of the optimization problem under analysis, approximate approaches are identified as promising candidates to obtain high-quality solutions within reasonable computational times in realistic scenarios. In this regard, we propose a hybrid metaheuristic that combines the features of the Greedy Randomized Adaptive Search Procedure and the Variable Neighbourhood Search in order to generate efficient solutions of the optimization problem. The computational experiments demonstrate our algorithmic proposal is highly effective in providing high-quality solutions of classic problem instances and requires short computational times.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Over the last decades, supply chain planning has attracted significant attention by the scientific community due to its high impact on customer service, cost effectiveness, productivity, and competitiveness in increasingly demanding global markets [1]. Nowadays, the successful management of supply chains focuses on cost reduction and a determined transition to new approaches aimed at increasing customer satisfaction. As strategies for competing in markets, the former places emphasis on the interests and profits of companies whereas the latter on customer needs. The scope of both objectives in the performance of transportation providers is essential. In this context, the planning of supply and distribution routes as well as the tactical and operational management activities of the supply chain play an important role that is associated with improving the Quality of Service (QoS), increasing customer satisfaction, and reducing costs.

In an environment characterized by a high level of technical expertise, globalization, and rise in customer demands, existing companies are increasingly interested in implementing customer service oriented strategies. In fact, quality has been regarded as a priority for management in order to increase competitiveness

and support growth [2]. Customer service in transportation and distribution of goods enables and ensures a product or service to be on time and place in an efficient way [3]. As regards distribution, quality as a differentiator and value generating element is associated with the delivery terms of the product, its availability, punctuality, and delivery time reduction [4].

The main stakeholders in transportation are interesting in the delivery of goods in the best possible conditions. Also, these must be delivered as soon as possible by the agreed date. These conditions must also consider the possibility of whether or not goods are perishable, which imply urgent distribution. Thus, addressing the urgency in freight transport is necessary because the transported goods lose value or deteriorate over time, giving rise to lower quality goods and accelerating their expiration dates. Meat, fish, vegetables, and fruits are examples of fresh and high replacement products that need urgent freight transport. These perishables must arrive as soon as possible to markets [5]. Other examples are daily products with dated short shelf life, everyday consumer products such as newspapers, with associated value in novelty of the news or health products such as drugs, organs, or analytic samples.

The most common objective function associated with distribution route planning problems in the literature is to determine the feasible set of routes to be performed by the existing fleet of delivery vehicles in such a way that the total operating cost, usually measured in terms of distance travelled or time, is minimized [6]. By contrast, the main motivation of this paper is to

* Corresponding author.

E-mail addresses: aexpósito@ull.edu.es (A. Expósito), jbrito@ull.edu.es (J. Brito), jamoreno@ull.edu.es (J.A. Moreno), cexposito@ull.edu.es (C. Expósito-Izquierdo).

<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105707>
1568-4946/© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por:	Fecha:
Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

reduce the service times for customers as a way to improve the service quality provided. The service provided to each customer is given within a window of time, which ensures a minimum quality of service. In particular, the Quality-of-service (QoS) approach implies the earliest possible arrival within the established time window. Furthermore, this paper also addresses urgency in transportation and distribution of goods. Urgency in the context of this paper refers to quick response in face of product deterioration. This response is evaluated as the elapse of time between the onset of the need and the time an effective response is provided. That is, it is the speed with which it responds according to the importance of the need.

As a result, planning distribution routes must consider the service time window and the customer service at the earliest within this time window. Consequently, we introduce the Quality of Service Vehicle Routing Problem with Time Windows (QSVRPTW), which incorporates this particularity in its objective. We consider three main ways to measure the quality of service that consider minimize the waiting time of the customers by taking into account that the service is given within the customer time window. One of the corresponding optimization criteria is equivalent to that of the cumulative vehicle routing problem [7]. That is, minimizing the sum of arrival times of the customers. In addition, two new objectives for the QSVRPTW are then introduced. Both consider the instant in which the customers are served within their time windows.

Due to the computational complexity of distribution route planning problems that arise in industrial applications, it is not straightforward to obtain high-quality solutions for the practical scenarios of this type of problems in reasonable amount of computational time [8]. Several soft computing components, such as probabilistic reasoning, fuzzy logic and sets, neural networks and metaheuristics, have emerged as promising tools to support decision making in this kind of tasks [9]. Among them, metaheuristics must be highlighted as pertinent techniques to deal with these complex optimization problems due to the fact that they are usually able to report high-quality solutions by using limited computational resources [10]. In particular, we propose a metaheuristic approach for the aforementioned QSVRPTW to improve the service quality while taking into account customer satisfaction.

On the basis of the previous discussion, it can be claimed that the main goals of this paper are the following:

- Introducing the QSVRPTW, which aim is to respond to the improvement of service quality in freight transportation.
- Proposing a mathematical model aimed at solving the optimization problem under analysis.
- Presenting a solution approach that combines the benefits of the general framework of the Greedy Randomized Adaptive Search Procedure and Variable Neighbourhood Search to solve the QSVRPTW.
- Analysing the impact of several metrics to evaluate the planning of distribution routes in terms of the quality of service provided.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 reviews the main applications and models found in the literature that are associated with our proposal. Section 3 is aimed at introducing the description of the optimization problem under analysis and a mathematical model for it. A hybrid method for solving the proposed optimization problem is presented in Section 4 whereas the computational experiments carried out in this work are discussed and analysed in Section 5. Finally, Section 6 summarizes the main contributions of the paper and discusses several lines for further research.

2. Related work

The Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) is one the most studied variants of the well-known Vehicle Routing Problem (VRP). This is due to several reasons. It is an \mathcal{NP} -hard problem [11], and therefore it is a challenge to the scientific community. But, at the same time, it has a wide range of practical applications in many fields such as transportation, logistics, distributions, communications, and manufacturing, among others.

Many approaches, including exact methods, heuristics, and metaheuristics, and hybrid of these, have been proposed since the 1980s in order to solve this optimization problem. On the one hand, exact methods can solve relatively small problem instances, with up to 100 customers. However, the large number of computational resources required to solve real-life scenarios of the VRPTW makes using exact methods unfeasible. For this reason, most of practitioners apply approximate techniques, such as heuristic and metaheuristic procedures in these environments. These procedures do not guarantee the optimality of the solutions reported, but they require reasonable computational times. Several comprehensive literature reviews in which these procedures are analysed have been already published over the last years. The interested reader is referred to [12], and [13] to obtain more information.

There are some works in the literature that focus on the objectives of VRP models regarding the quality of service provided to the customer. Several of those problems are applied to situations of school transport, logistics in natural disasters, transport of perishable freight and maintenance services. A common element in all of these applications is the need to consider the urgent supply of goods. In addition they can be formulated with models similar to the one proposed. In this regard, [14] studies the customer perceptions when measuring the performance of companies in the urgent transport service sector. However, the literature presents a clear lack of definitions of quality of service in transportation. Some of the few definitions that can be found are provided in [15]. The authors introduces several definitions of quality in the service sector and provides various measurement scales.

Examples of such models are the Multiple Travelling Repairmen Problem (MTRP), also called the Delivery Man Problem (DMP) and the Minimum Latency Problem (MLP) for multiple routes. In them, repairmen visit a set of nodes whose objective is to minimize total latency, customer waiting time or maximize collected revenue. In [16], a real-world planned maintenance scheduling problem with an adaptive memory Tabu Search (TS) heuristic is solved. In [17], another proposal that used an approximation algorithm is presented. This proposal solved a generalized version where each customer has an associated repair time. They also introduced a new version with a latency bound. Later, [18] proposed a polynomial linear integer formulation and a two-phase heuristic method based on a k -means clustering algorithm first and routing second. More recently, [19] introduced a new MTRP variant that considers a distance constraint. The objective is to minimize the total waiting time of all customers and the authors used a branch-and-price-and-cut for its solution. In [20], an effective approach to address the multi-vehicle and multi-depot using approximation algorithms that exploit various Linear Programming (LP) relaxations is presented whereas [21] proposes a mixed integer formulation and a metaheuristic method in its solution, denoting it as an iterated greedy algorithm.

Moreover, [22] formulates the optimization problem with time windows as an homogeneous Travelling Repairmen Problem with Time Windows (TRPTW). The author solves the problem of operational control of an automated guided vehicle fleet and proposes

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

an insertion-based heuristic algorithm for its solution. In [23], a variant of the TRPTW where some tasks are absent in the system at the beginning of a planning horizon is considered. This problem, denoted as hetTRPTW, considers an heterogeneous fleet of repairmen and is solved by the authors with a heuristic based on a VNS.

The Bus School Routing Problem (BSRP) is another problem that uses a similar model, specifically denoted the bus routing, route scheduling and school bus driver sub-problems. The objectives in these problems are, among others, to reduce the time or distance that students spent in arriving to the school. Effectiveness and service criterion are measured by the total travel time spent by students in buses. In [24], a multi-objective approach in which the number of buses, the travel time of the buses and the travel times of the students are minimized, is presented. A heuristic algorithm is proposed based on the shortest route algorithms. In [25], multi-objective optimization school routing problems in a rural environment which minimize the number of buses and the time that a student stays in the bus are also tackled. The former introduces a Scatter Search (SS) metaheuristic to improve the initial solutions generated by two heuristics based on clustering mechanisms. The second presents a TS heuristic with a path relinking procedure to obtain solutions. A comprehensive review of this problem is found in [26]. In the literature some models use time windows constraints on the starting and ending arrival time of a bus at schools. In [27], a measure called the child time loss, the travel time spent in directly driving from the home to the school is used. They address a multi-school problem and propose a heuristic approach whose routes are constructed by using a greedy method and improved by Simulated Annealing (SA) or a TS heuristic.

Concerning perishable freight transport, in [28] a real-life delivery problem often encountered by urban perishable product delivery problem is solved. Mismanaged deliveries cause losses to suppliers, such as loss or degradation of product quality or disobeying customers time windows. The combination of order selection and time-dependent VRPTW in a framework of perishable product delivery allows to maximize the profits. In order to solve the problem, a hybrid Ant Colony Optimization (ACO) is proposed. Furthermore, a novel multi-objective VRPTW model that decouples the minimization of the distribution costs from the maximization of the freshness state of the delivered products is presented in [29]. In this case, a constraint method and a multi-objective evolutionary algorithm were implemented for solve the problem with different set of instances.

Another important extension of these service oriented models is the Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem (CCVRP), a problem with an objective function aimed at minimizing the arrival times to the customers subject to vehicle capacity constraints. The simplified model of energy minimization in vehicle routing problems is equivalent to cumulative vehicle routing problems [30]. In [7], a similar problem that minimizes the maximum arrival time (minmax) and minimizes the average arrival time (minavg) to demonstrate the potential impact of using these new objective functions in the classical Travelling Salesman Problem (TSP) and VRP is presented. In [31], an extension of the CCVRP, termed CumVRP, considers as objective function the minimization of the sum of the product of arrival times and demand of the node considered. Different methodological proposals to solve this problem can be found in the literature. In [32], an Adaptive Large Neighbourhood Search (ALNS) heuristic to solve the problem is proposed. An Iterated Local Search (ILS) metaheuristic was proposed in [33]. In [34], a two-phase metaheuristic was proposed. It combines different perturbations and operators for solution improvement. In [35], the first exact method, a branch-and-cut-and-price algorithm for obtaining solutions, is proposed.

Recently, in [36], a set cover type formulation for CCVRP using a column generation approach is solved. These models not consider time window constraints. Hence to the best of our knowledge, there are no papers in the literature regarding time windows in CCVRP.

The paper at hand is clearly distinguishable from the existing literature according to two main aspects. On the one hand, in contrast to the aforementioned works, such as [14] and [15], we propose several definitions of quality of service in transportation based on the position of the service times within the corresponding time windows of the customers. Some of these definitions are related to the cumulative variant of the VRP but limiting the waiting times to the individual time windows of the customers instead of the whole planning horizon, as done in the works such as [7] and [31], among others. On the other hand, our solution approach is the first GRASP-VNS to solve the optimization problem under analysis and it presents several highlighted differences with other GRASP-VNS-based proposals found in the literature, such as [37], or [38], from the algorithmic standpoint.

In this case, the design of these proposals give rise to their performance is not significantly impacted by the order in which the neighbourhood structures are applied. This eases their parameter setting but it bounds their exploration. However, as demonstrated in the computational experiments, the performance of our solution approach is influenced by the way in which the neighbourhood structures are selected. For this reason, we perform an analysis that allows to determine the best one. Also, unlike the other proposals, we limit the number of potential candidates when building the solutions in order to reduce the computational time required by the solution approach.

3. Problem description

This paper addresses the Quality of Service Vehicle Routing Problem with Time Windows (in short, QSVRPTW). This optimization problem consists of determining the best possible routes to be used by a fleet composed of k vehicles with the aim of picking up or delivering freights to a set of n known points (*i.e.*, customers) while optimizing some criteria associated with the service quality. The main feature of this variant of the VRP is related to the delivery times. In this regard, the routes must be designed in such a way that each point is visited within its given time interval (*i.e.*, time windows). Indeed, the time when a customer is visited within the time window is used to measure the quality of service. In addition, the following assumptions are also considered in the QSVRPTW:

- Each customer is visited by one and only one vehicle.
- Each route departs and arrives at a known depot.
- Each vehicle has a container with a maximum capacity and the total loading of each vehicle cannot exceed this capacity.
- Each customer is served within its time window.

In order to formalize the problem, we introduce the following parameters and indices:

- $k = 1, \dots, m$ is the index that represents the vehicles.
- $i = 1, \dots, n$ is the index that represents the customers.
- $i = 0$ represents the depot.
- q_i is the demand of customer i , $i = 1, \dots, n$.
- C_k is the capacity of vehicle k , $k = 1, \dots, m$.
- t_{ij} is the travel time from i to j , $i, j = 0, \dots, n$.
- c_{ij} is the cost of travelling from i to j , $i, j = 0, \dots, n$.
- u_i is the unloading time at customer i , $i = 1, \dots, n$.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- $[e_i, l_i]$ is the time window of customer i , $i = 1, \dots, n$. e_i and l_i are the earliest and latest time for serving customer i , respectively.

The decision variables that determine the routes are the binary variables x_{ij}^k that takes $x_{ij}^k = 1$ if vehicle k goes from i to j and $x_{ij}^k = 0$ otherwise; $i, j = 0, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$. In order to measure the quality of service we also consider the continuous variables s_i^k representing the time in which vehicle k starts to serve customer i , $i = 0, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$. In addition, in order to check the capacity limits, we also consider the continuous variables r_i^k representing the total unloaded quantity by vehicle k when it leaves customer i , $i \in [0 \dots n]$, $k \in [1 \dots m]$.

The classic objective of the VRPTW is to minimize the total operational cost. This can be formulated as:

$$\min f(x) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

The objective function of the corresponding cumulative variant of the problem [7] is the total service time:

$$\min f_c(x) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n s_i^k \quad (2)$$

The cumulative objective function measures the total time that the customers have to wait to be served from the starting time of the routes.

In this paper, we propose several ways to measure the quality of service by taking into account the position of the service times within the corresponding time windows. The total waiting time within the time windows is the sum of the times that all customers are waiting to be served within their times windows. That is:

$$\min f_e(x) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (s_i^k - e_i) \quad (3)$$

The minimization of this function is equivalent to minimize the cumulative objective function, expressed by means of Eq. (2), because the difference is the sum of all earliest times of the customer time windows that is a constant.

The following objective function measures the quality of service by maximizing the sum of the slack times of the customers time windows. This is obtained by the sum of the differences between the closing times of the windows and the times when the customers are served. That is,

$$\max f_s(x) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (l_i - s_i^k) \quad (4)$$

However, the waiting times should be weighted by the length of the customers time windows. We propose using the average of the relative time that customers have to wait within their time windows for service. This can be seen as the proportion (or percentage) of the time windows that the customers are waiting to be served. This can be expressed as follows:

$$\min f_r(x) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{s_i^k - e_i}{l_i - e_i} \quad (5)$$

In summary, we propose three objective functions aimed at measuring the Quality-of-Service (QoS): the cumulative objective function f_c (2) to be minimized, the slack objective function f_s (4) to be maximized, and the relative objective function f_r (5) to be minimized.

The QSVRPTW is a distribution route planning problem that can be modelled as an extension of the Vehicle Routing Problem

with Time Windows (VRPTW), a variant of the well-known Vehicle Routing Problem (VRP) [39]. Consequently, since the VRP is a special case of the QSVRPTW and is known to be \mathcal{NP} -hard [40], the QSVRPTW is also \mathcal{NP} -hard.

3.1. Optimization model

The QSVRPTW is hereafter formalized by means of an Mixed-Integer Linear Programming (MILP) optimization model.

The variables of the model are as follows:

- x_{ij}^k , binary variables where $x_{ij}^k = 1$ if vehicle k goes from i to j and $x_{ij}^k = 0$ otherwise; $i, j = 0, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$.
- r_i^k , continuous variables representing the total unloaded quantity by vehicle k when it leaves customer i , $i = 0, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$. If vehicle k goes from the depot to customer i ($x_{0i}^k = 1$) then $r_i^k = q_i$ and if it goes from i to j ($x_{ij}^k = 1$) then $r_j^k = r_i^k + q_j$. Moreover, if customer i is not in the route of vehicle k then $r_i^k = 0$. In addition, for the validity of the recursive formula and constraints used later, r_0^k is set to 0 for each vehicle k .
- s_i^k , continuous variables representing the time in which vehicle k starts to serve customer i , $i = 0, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$. Also, for each vehicle $s_0^k = 0$ and if $x_{ij}^k = 1$ then $s_j^k = \max\{e_j, s_i^k + u_i + t_{ij}\}$. Moreover, if customer i is not in the route of vehicle k then $s_i^k = e_i$. Analogously, for the validity of the recursive formula and constraints used later, s_0^k is set to 0 for each vehicle k .

The constraints of the optimization model are expressed as follows:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ij}^k = 1, \quad j = 1 \dots n \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ji}^k = 1, \quad j = 1 \dots n \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij}^k = \sum_{i=0}^n x_{ji}^k = 1, \quad j = 1 \dots n, k = 1 \dots m \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{0i}^k = 1, \quad k = 1 \dots m \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0}^k = 1, \quad k = 1 \dots m \quad (10)$$

$$r_j^k - q_j - r_i^k \leq M(1 - x_{ij}^k), \quad i = 0 \dots n, j = 1 \dots n, k = 1 \dots m \quad (11)$$

$$r_i^k \leq Q_k, \quad i = 1 \dots n, k = 1 \dots m \quad (12)$$

$$s_j^k + t_{ij} + u_i - s_i^k \leq M'(1 - x_{ij}^k), \quad i = 0 \dots n, j = 1 \dots n, k = 1 \dots m \quad (13)$$

$$e_i \leq s_i^k, s_i^k + u_i \leq l_i, \quad i = 1 \dots n, k = 1 \dots m \quad (14)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, r_i^k, s_i^k \geq 0, \quad i, j = 0 \dots n, k = 1 \dots m \quad (15)$$

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Table 1
Data of the illustrative example.

Customer	Time window	Service time
D1 ^a	[0...100]	0
C2	[20...30]	8
C3	[5...60]	17
C4	[10...70]	3
C5	[30...50]	10

^aDepot

Table 2
Time matrix of the illustrative example.

	1	2	3	4	5
1	0	22	21	23	35
2	22	0	10	33	6
3	21	10	0	14	13
4	23	33	14	0	5
5	35	6	13	5	0

Constraints (6) and (7) ensure that every customer is served exactly once. Constraint (8) states the flow conservation conditions that ensure the continuity of the route. Constraints (9) and (10) provide that vehicle k leaves the depot and ends at it, ensuring that no vehicle is used more than once. Constraint (11), where M is a large enough constant, determines the relationship between the r_i^k variable of consecutive customers in each route. Constraint (12) ensures that the capacity of each vehicle k is not exceeded. Constraint (13), where M' is a large enough constant, determines the relations between the service times of consecutive customers in each route. Constraint (14) ensures that each customer is served within the corresponding time window. Finally, the definition of the variables is provided in (15).

3.2. Illustrative example

A practical example is developed in this subsection in order to clearly illustrate the objective functions aimed at measuring the quality of service proposed in the paper. The illustrative example consists of the solution of a practical case of the QSVRPTW using a greedy solution method guided by the objective functions f (1), f_r (4), and f_s (5).

The data associated with the customers visited in the practical example are shown in Tables 1 and 2. Table 1 contains basic data such as time windows and service times of the customers, whereas Table 2 contains the matrix of travel times between points. The practical example is illustrated in Fig. 1. Fig. 1 depicts the solutions of the practical example following a greedy selection of customers visited based on the aforementioned objective functions. In the solutions obtained, the time in which the vehicle arrives to the customers within its time window is provided. Additionally, the percentage of customer time windows in which the vehicle starts to serve the customer and the total average, are also shown.

Regarding the percentage of customer time windows by solution mentioned above, the average show that, in the case of objective functions f_r (4) and f_s (5), the vehicles arrive before to serve the customers compared to the solution obtained with objective f (1). This fact coincides with the definition of quality of service proposed in this paper. The quality of service defined as the reduction of the time that customers have to wait to be served within this time window.

4. Solution approach

In order to solve the QSVRPTW introduced in the previous section, we hereafter propose and assess a metaheuristic approach

Algorithm 1 GRASP construction phase

```

1: Initialize the partialSolution with  $m$  empty routes
2: while (it is possible to visit new customers) do
3:    $CL = \emptyset$ 
4:   for all customer  $i$  do
5:     Find the best position  $j$  to insert customer  $i$  in the best
       route  $k$  in partialSolution according to objective function
        $f_g$  and keeping time windows and capacity feasibility
       constraints.
6:     Add  $(i, j, k)$  to the Candidate List  $CL$ 
7:   end for
8:   Create the Restricted Candidate List,  $RCL$ , with the best
        $sizeRCL(i, j, k)$  from  $CL$  according to  $f_g$ 
9:   Select  $(i, j, k)$  from  $RCL$ 
10:  Update partialSolution by inserting customer  $i$  at position  $j$ 
       in its best route  $k$ 
11: end while
12: return partialSolution

```

that combines a Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) and a Variable Neighbourhood Search (VNS).

GRASP is an efficient multi-start two-phase metaheuristic. Consequently, it can be checked that it has been applied to a wide range of optimization problems over the last years in the scientific literature. This metaheuristic algorithm was presented in [41], but many sophisticated variants have been developed with the aim of tackling challenging optimization problems. The interested reader is referred to the book [42] to obtain an in-depth analysis about its foundations and main application fields. In addition, [43] provides a comprehensive review about the metaheuristics. Broadly speaking, the basic GRASP is split into two consecutive phases: a construction phase and an improvement phase. The former is aimed at building a feasible solution of the optimization problem to solve, whereas the second is dedicated to improve this solution. In this case, we propose to use a VNS for this improvement phase. In the first phase of its execution, the metaheuristic builds a feasible solution gradually by selecting a new random element from a Restricted Candidate List (RCL) and introducing it into the solution in progress.

Initially, the candidate list from which the elements are selected is sorted based on a greedy function as lines 4–7 in Algorithm 1 reflect. In line 8, the RCL is generated by limiting the size of the candidate list in $sizeRCL$ candidates. As lines 9 and 10 indicate, at each step, a candidate is randomly selected from the RCL to form part of the current partial solution. This probabilistic component is characterized by a random selection of the element that is not necessarily the top candidate of the RCL. The construction step is iterated until a feasible solution is obtained. In this case, the proposed solution approach uses f_g as a greedy function to evaluate the potential candidates of the corresponding QoS objective functions: the cumulative objective function f_c (2), the slack objective function f_s (4), or the relative objective function f_r (5). Furthermore, the pseudo-code of the construction phase is described in Algorithm 1.

In the first step of the construction phase a new *partialSolution* is initialized with m routes without customers as line 1 in Algorithm 1 indicates. The empty solution involves to set, for each route k , $x_{i0}^k = 1$ and $s_i^k = e_i$ for each customer i ; and all the remainder variables set to 0. The construction step implies to insert a new customer in one of the m partial routes. We consider two insertion operations of a new customer in a partial route k to be used in the GRASP algorithm: the *final* insertion operation and the *best* insertion operation. The final insertion operation inserts the new customer i as the last customer in route k . Furthermore,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguilar Aguilar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

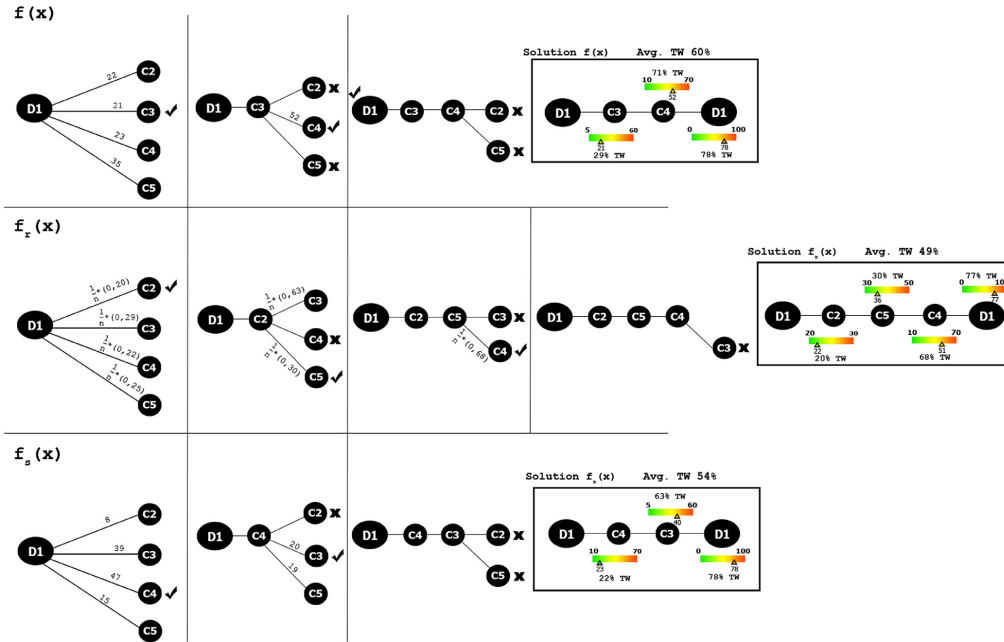


Fig. 1. Illustrative example.

the best insertion operation inserts the new customer i in the best feasible position of a partial route of the current solution. It should be noted that, with the final insertion operation, only the values of the variables r_i and s_i^k for the new customer have to be computed. Also, a single time window constraint (14) and a single capacity constraint (12) have to be checked for feasibility and a single term has to be added to the corresponding addition of the objective function f_g . However, if another insertion position is chosen according to the best insertion operation, the values of the corresponding variables r_i and s_i^k for the later customers in the selected route k have to be computed again. Then, several time window constraints (14) have to be checked. In addition, the corresponding terms of the objective function also have to be computed.

Moreover, insertion entails to visit the new customer j just after customer i in the partial route k . Therefore, the new solution is obtained by setting the decision variables x_{ij}^k and x_{jh}^k to 1 and for the only index h such that x_{ih}^k is 1; this variable x_{ih}^k is also set to 0. Then, the variables s_j^k and r_j^k for the next customers in this route k have to be computed by using the iterative formula derived from Eqs. (11) and (13), respectively. These formulas are as follows:

$$\begin{aligned} r_j^k &= r_i^k + q_i \\ s_j^k &= \max\{e_j, s_i^k + u_i + t_{ij}\} \end{aligned} \quad (16)$$

The feasibility is checked by both the corresponding capacity constraints (12) and time window constraints (14). The insertion operations are assessed according to the greedy objective function f_g , corresponding to the cumulative (2), slack (4) or relative (5) QoS objective function in the partial solution after the insertion is applied.

The improvement phase in a GRASP is usually carried out by means of a Local Search (LS). In particular, this is applied

with the aim of improving the quality of the solution provided by the construction phase. The execution of the LS explores the neighbourhood of the current solution and finishes when a local minimum is found. In this case, we replace the LS by a Variable Neighbourhood Descent (VND), which is an efficient version of the VNS. The VNS is an effective metaheuristic proposed in [44]. It is based on the idea of systematically changing the neighbourhood structure during the search [45]. The rationale behind the VND is that the local optimum defined by one neighbourhood structure is not necessarily the local optimum of another neighbourhood structure. Therefore, the search can methodically cross over different search spaces defined by different neighbourhood structures. The different neighbourhoods are usually associated with types of moves or a transformation of the current solution that states the neighbourhood structure. The VND involves to change the neighbourhood structure when no improving move is found. The VND uses a series of neighbourhood structures $N_k(\cdot)$, $k = 1, \dots, k_{max}$ that are usually ordered from the easiest to the most complex. The pseudo-code of the proposed VND is described in Algorithm 2.

This work considers the moves described below to define the neighbourhood structures $N_k(\cdot)$, $k = 1, \dots, k_{max}$ used in the VND:

- **k -chain move (CH).** A k -chain move takes a chain of the solution with length k and moves it to another part of the solution. Given that k is fixed, two positions i and j of the solution vector are selected and the k elements at positions $j, j + 1, j + 2, \dots, j + k - 1$ are moved after position i .
- **k -edge interchange move (ED).** A k -edge interchange move consists in replacing k edges in the solution by k edges that are not in the solution. The edge interchange with $k = 1$ is

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Algorithm 2 VNDS Improvement phase

```

1: function VND( $X, k_{max}$ )
2:  $k = 1$ 
3: while ( $k \leq k_{max}$ ) do
4:   Find the best solution  $X'$  in  $N_k(X)$ 
5:   if ( $X'$  is better than  $X$ ) then
6:     Take  $X = X'$  and  $k = 1$ 
7:   else
8:     Take  $k = k + 1$ 
9:   end if
10: end while
11: end VND
    
```

not possible. If $k = 2$ and the replaced edges are $[i, j]$ and $[k, l]$ the replacing edges have to be $[i, k]$ and $[j, l]$. The case of $k = 3$ is equivalent to a chain move; the replaced edges are $[s_i, s_{i+1}]$, $[s_{i+k}, s_{i+k+1}]$, $[s_j, s_{j+1}]$.

- **k -swap interchange move (SW).** The swap move consists in interchanging the position of two chains with length k in the solution. In the most basic move, $k = 1$, both chains have only one customer; it consists in swapping two customers. When both customers belong to the same route, it is an intra-route move. On the other hand, if customers belong to two different routes it is an inter-route move.

The proposed neighbourhood structures for our VND are combinations of the neighbourhood structures described above. For each k , let $CH(k)$ be the set of k -chain moves, $ED(k)$ be the set of k -edge interchange moves and $SW(k)$ be the set of k -swap interchange moves. Therefore $N_k(x)$ is the set of solutions obtained from a solution x by one of these types of moves or by a combination of them. In this case, we consider three single combinations: CH, ED and SW by taking $N_k = CH(k)$, $N_k = ED(k)$ and $N_k = SW(k)$. In addition, we consider the following six combinations from three single moves; $N_k = SW(k) - ED(k) - CH(k)$, $N_k = SW(k) - CH(k) - ED(k)$, $N_k = ED(k) - SW(k) - CH(k)$, $N_k = ED(k) - CH(k) - SW(k)$, $N_k = CH(k) - ED(k) - SW(k)$, and $N_k = CH(k) - SW(k) - ED(k)$. As demonstrated in the computational experiments the application of different orders of the single moves impact on the quality of the solutions obtained.

5. Computational experiments

This section describes the computational experiments that were carried out in our study and the results obtained. The aims of the computational experience are described as follows:

- Obtaining optimal solutions by means of the optimization model proposed in the paper and discuss its applicability in realistic scenarios. This is carried out in Section 5.4.
- Studying the impact of the parameters on the performance of the solution approach and determining the best parameter setting to used in the existing problem instances. This is presented in Section 5.2.
- Assessing the computational performance of the GRASP-VNS proposed in this paper when solving a wide range of problem scenarios. This study is introduced in Section 5.4.
- Analysing the suitability of our solution approach to solve the problem under analysis by comparing its performance with that of other metaheuristic proposed in the literature.
- Studying and comparing the proposed objective functions. This is presented in Section 5.5.

Table 3

Parameter values used in parameter setting of the GRASP-VNS hybrid.

Parameter	Values
GRASP Insertion	$I \in \{\text{bestins, finalns}\}$
Size of RCL	$sRCL \in \{3, 4, 5, 6\}$
VND parameter	$k_{max} \in \{3, 4, 5\}$
Move combinations	$C \in \{\text{SW, ED, CH, SW-ED-CH, SW-CH-ED, ED-SW-CH, ED-CH-SW, CH-ED-SW, CH-SW-ED}\}$

The solution approach was implemented using the C++ language. Java SE 8.0 and IBM ILOG CPLEX 12.6 were used to code and solve the MIP model. In addition, all the tests were carried out in a PC equipped with an Intel Core 2 Duo with 3.16 GHz and 4 GB RAM.

5.1. Problem instances

The benchmark suite used in this section is based on the classical set of problem instances introduced in [46]. These problem instances are used to analyse the solution approaches introduced in this paper. A wide corpus of works in the literature use this benchmark suite. Some examples are [47], and [48].

The benchmark suite is composed of six sets of instances. It is worth mentioning that the design of the problem instances is based on four design principles: geographical data, percentage of time-constrained customers, number of customers to serve by each vehicle, and tightness and positioning of the time windows. Regarding the geographical data, there are three kinds of instances: instances with clustered customers (C), instances with random customers (R), and a mixture of random and clustered customers (RC). Regarding the number of customers served by a vehicle, it is low in the instances of set 1 whereas the instances included in set 2 allow more customers per route. Thus, a total of instances belonging to six classes (i.e., C1, R1, RC1, C2, R2, and RC2) are available.

For each type of instance (i.e., R, C, and RC), the positions of the customers are the same. The main difference of the instances is related to the width of the time windows, ranging from very tight to wide time windows. The number of customers is 25, 50, or 100. This benchmark considers travel times equal to the euclidean distances between points.

5.2. Parameter setting

The first phase of the experimentation focuses on determining the best combination of parameter values for the GRASP-VNS hybrid. In this phase, we need to state the parameters of the metaheuristic whose values are to be determined and the candidate parameter values. This step is termed in [49] refers to this phase as the definition of factors (parameters) and treatments (parameter values). Parameter tuning of the GRASP-VNS hybrid in this paper considers four factors:

1. The type I of insertion in GRASP
2. The size $sRCL$ of the GRASP restricted candidate list
3. The number k_{max} of neighbourhood structures used for VND
4. The move combinations C in the VND

Table 3 shows the factors and treatments (i.e., the parameters and their values) to assess during the GRASP-VNS parameter setting.

In [50] two different ways for parameter setting are considered.

On the one hand, the parameter values are previously setted to the start of the metaheuristic execution.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 08/06/2020 01:07:10

José Andrés Moreno Pérez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 02:01:01

Julio Antonio Brito Santana
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 11:26:21

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:53:09

Table 4
 Friedman test results for GRASP and objective function f_r (5).

Insertion	sRCL	Rank sum	Groups M
finalIns	5	281	a
finalIns	3	277	a
finalIns	4	272	a
finalIns	6	270	a
bestIns	6	139	b
bestIns	5	123	bc
bestIns	4	109	c
bestIns	3	77	c

On the other hand, the online strategy fits the parameter values during the algorithm execution. This paper uses an of-line strategy that was performed to get the best combination of parameter values. The GRASP-VNS hybrid was run with all combinations of parameter values listed in Table 3.

A wide range of research in computational intelligence is related to the evaluation of parameter influence on the performance of algorithms using statistical tests. These tests are used in design and analysis of experiments with the aim of determining the performance of the algorithm to evaluate under different combinations of parameter values and selecting the best of them [51]. Usually, statistical tests are categorized into two types, parametric and nonparametric tests. Nevertheless, the parametric tests are based on assumptions which are breached when analysing data of stochastic algorithms [52].

In this paper, the Friedman nonparametric statistical test [53] designed to detect differences among the treatments is used to analyse differences in the performance of the GRASP-VNS hybrid with the parameter values used in the experiment.

In the literature there are some examples of this use of the Friedman nonparametric statistical test for comparing algorithms such as [54] and [55].

One of the keys to developing a good parameter setting is to avoid parameter overfitting with regards to the instances. An usual strategy to avoid overfitting is to divide the set of instances into a training subset and a test subset.

Studies of this nature typically divide the instances into two parts. Here we randomly select 80% for training and the remaining 20% for testing. This parameter analysis was conducted separately for GRASP and VNS. Firstly, the Friedman test was applied to each of the three objective function values of the GRASP with corresponding parameter values described in Table 3. Subsequently the same procedure was repeated for VNS. Target values for each of these functions were obtained, separately by running GRASP and VNS 10 times for each of the randomly selected instances. In the case of VNS, initial solutions were obtained through a GRASP with a random combination of parameter values. In both cases, a maximum number of routes were established to obtain the solutions. This was the number of routes in the optimal solution of the classical VRPTW,¹ plus 15%. Moreover, iterations that include each heuristic to obtain feasible solutions were limited to 10 iterations. The significance level Friedman test has been set at $\alpha = 0.05$. In both cases, GRASP and VNS, the Friedman test shows that there are statistically significant differences in the executions of the algorithms with different combinations of parameter values.

The results of the Friedman test for GRASP and for VNS using the relative QoS objective function f_r (5) are shown in Table 4 and in Table 5, respectively. The first two columns show the parameter values. The third column is the sum of ranks obtained in the comparisons with the results of the other values. The

¹ <http://w.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>.

Table 5
 Friedman test results for VNS and objective function f_r (5).

k_{max}	Move combinations	Rank sum	Groups M
3	CH	1061.0	a
4	CH	1010.0	a
5	CH	956.0	a
3	SW	834.0	b
5	SW	787.0	bc
4	SW	765.0	bcd
3	ED	747.0	bcde
4	ED	705.5	cde
3	ED-SW-CH	653.0	def
3	SW-ED-CH	645.0	efg
5	ED	640.0	efgh
4	ED-SW-CH	583.0	fghi
4	SW-ED-CH	546.0	fghij
3	SW-CH-ED	534.0	ghij
3	CH-SW-ED	526.0	hijk
3	CH-ED-SW	525.0	hijk
5	SW-ED-CH	507.5	ijkl
5	ED-SW-CH	505.0	ijklm
3	ED-CH-SW	502.0	ijklm
4	CH-SW-ED	476.0	ijklmn
4	SW-CH-ED	459.0	klmno
4	CH-ED-SW	409.0	klmno
5	ED-CH-SW	396.0	lmno
5	CH-ED-SW	388.5	mno
5	CH-SW-ED	374.5	no
4	ED-CH-SW	374.0	no
5	SW-CH-ED	344.0	o

Table 6
 Results of the Friedman test for GRASP.

Objective function	I	sRCL
f_r (5)	{bestInsertion}	{3, 4, 5, 6}
f_s (4)	{bestInsertion}	{3, 4, 5}
f_c (2)	{bestInsertion}	{3, 4, 5, 6}

Table 7
 Results of the Friedman test for VNS.

Objective function	k_{max}	C
f_r (5)	{4, 5}	{SW + CH + ED, ED + CH + SW, CH + ED + SW}
f_s (4)	{4, 5}	{SW + CH + ED, ED + CH + SW, CH + ED + SW, CH + SW + ED}
f_c (2)	{5}	{SW + CH + ED, ED + CH + SW, CH + ED + SW, CH + SW + ED}

fourth column shows the significant differences between groups of combination at $\alpha = 0.05$ level. The results are sorted in descending order, so that the combinations of parameters located at the bottom of the tables present better results. The raw experiment data and the table for the other QoS objective functions are available at Google Drive.²

In general terms, the results of the Friedman test for GRASP-VNS hybrid metaheuristics are shown below. Tables 6 and 7 show the selected combinations of parameter values with the significantly best performance for GRASP and for VNS, respectively.

Once the best parameter values for the proposed solution approach have been studied, we have carried out a computational experiments in order to briefly analyse the complexity and the execution time of the solution approach for instances with large dimensions. The instances used in this brief complexity analysis are a random subset of the 400 customer instances of Gehring & Homberger's extended VRPTW benchmark [56]. Specifically, the instances R110 and C100 were selected. For both instances, the solution approach has been iteratively executed considering a

² <https://goo.gl/5gkW2j>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

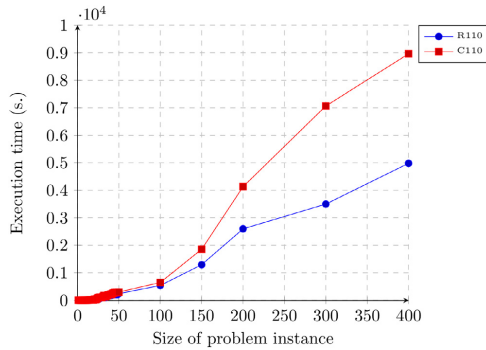


Fig. 2. Comparison of execution times by increasing the size of the R110 and C100 instances.

single customer and adding a new customer of the instance in each new iteration. Once the process reaches 50 customers, the process increases the number of customers in 100, 150, 200, 300 and 400 customers, respectively. We storage the execution times for each number of customers and instance in order to analyse the increasing evolution of the execution time.

The Fig. 2 shows for both instances the increasing evolution of the execution time. As might be expected, as the number of customers of the instances increase, the execution time of the solution approach increases. Specially, the rapid increase in execution times can be seen in cases where the instances have 50, 100, 150, 200, 300 and 400 customers. In order to compare R110 and C100 instances, Fig. 2 shows that as the size of the instance grows, the execution time of C100 increases faster than the execution time of R110. And it can be seen that this trend continues and increases with each increase of the size of the instances.

5.3. Comparison with other metaheuristic frameworks

This subsection reports a computational comparison between the proposed GRASP-VNS and other metaheuristic frameworks in order to check the competitiveness of the solution approach. Specifically, the well-known Differential Evolution (DE) [57] is compared with our GRASP-VNS. The DE metaheuristic was implemented using the tool jMetal [58]. jMetal is an object-oriented Java-based framework for multi-objective optimization with metaheuristics, but it also provides single-objective versions of metaheuristics such as DE.

The instances used in the comparison are a random subset of the Solomon benchmark. Specifically, the instances R107, RC203, and C109 were selected. In the previous section, the parameter setting of our solution approach was studied. Therefore, the values selected for the parameters used in the computational experiments carry out in this section are those specified in the previous section. Regarding the parameter values of the DE, we use the following classic setting. The stopping criterion is the execution time of the metaheuristic, the size of the population is 100, the weighting factor is $F = 0.5$, and the cross-over probability is $C = 0.5$. In order to perform the comparative experiments we have selected the objective function (5).

We have increased the execution time of the metaheuristic DE in 1 h, 2 h, and 3 h. This temporal increase is derived from the fact that no feasible solutions are reported for none of the execution time values considered. In view of this situation, we

Table 8
GRASP-VNS and DE comparison.

	Best solution		Best unfeasible solution DE (3 h exec. time)			
	GRASP-VNS	TW constraints	Capacity constraints			
	f_r (5)	Time (s.)	Nº fail	Av. % excess	Excess	Excess
R107	0.063	79	14	115.53	48.21	0
RC203	0.033	124	3	42.70	51.22	120
C109	0.011	93	13	83.45	305.97	0

set out to verify which of the constraints of the problem gives rise to obtain feasible solutions a challenge or even impossible using the execution times commented above. In this experimental analysis, we discover that time windows constraints are more challenging than the other constraints associated with the problem. Therefore, this section presents a comparison of those solutions reported by the DE with the lowest level of infeasibility. In this regard, the infeasibility level is measured in terms of the number of unsatisfied constraints.

Table 8 reports the comparison of the solutions obtained by our solution approach and the best solutions obtained by DE. The first column of the table provides the instances used in the comparison. The second (f_r (5)) and third columns (Time (s.)) show the values of the objective function and execution times in which GRASP-VNS obtained the best solution for the corresponding instance. Afterwards, the fourth column (Nº fail) reports the number of time windows that fail. Also, the fifth column (Av. % excess) provides the average percentage of time windows constraints that fail was exceed and it is calculated as indicated in (17) where $twFail$ is the number of time windows that fail. The next column (Excess) represents average time of time windows constraints that fail was exceed and it is calculated as indicated in (18) where $twFail$ is the number of time windows that fail. The last column (Excess) shows the total quantity that capacity constraints that fail was exceed.

$$P_{tw} = \left(\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n P_{ik} \right) / twFail, \quad (17)$$

where,

$$P_{ik} = \begin{cases} 0 & \text{if } e_i < (s_i^k + u_i) \leq l_i \\ \frac{(s_i^k - e_i) * 100}{l_i - e_i} & \text{if } (s_i^k + u_i) > l_i \end{cases}$$

$$E_{tw} = \left(\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n E_{ik} \right) / twFail \quad (18)$$

where,

$$E_{ik} = \begin{cases} 0 & \text{if } e_i < (s_i^k + u_i) \leq l_i \\ s_i^k + u_i - l_i & \text{if } (s_i^k + u_i) > l_i \end{cases}$$

As can be seen in the computational results, unlike our GRASP-VNS, DE is not able to report feasible solutions for the problem instances under analysis even considering large execution times. The level of infeasibility is extremely large in terms of time window constraints. This gives rise to require additional repair algorithms or hybrid this approach with other techniques to obtain feasible solutions.

5.4. Comparison with exact methods

This subsection reports the results of a series of computational experiments for the comparison of the GRASP-VNS hybrid and CPLEX 12.6 solver for the mathematical formulation presented

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 08/06/2020 01:07:10

José Andrés Moreno Pérez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 02:01:01

Julio Antonio Brito Santana
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 11:26:21

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:53:09

Table 9

Results of instance RC106 for size 25.

CPLEX			GRASP-VNS			
Limit time	Exec. time	Fitness	GAP	Av.	Best	Time
Objective function f_r (5)						
3600 s	3600 s	0.2961	79.64%	0.176	0.097	47.40 s
7200 s	7200 s	0.2961	79.64%	0.176	0.097	47.40 s
10800 s	10800 s	0.2961	74.81%	0.176	0.097	47.40 s
Objective function f_s (4)						
3600 s	3600 s	1055.75	7.87%	1398.78	1452.01	38.21 s
7200 s	7200 s	1055.75	7.16%	1398.78	1452.01	38.21 s
10800 s	10800 s	1055.75	6.72%	1398.78	1452.01	38.21 s
Objective function f_c (2)						
3600 s	3600 s	2018.39	0%	2018.39	2018.39	40.56 s
7200 s	7200 s	2018.39	0%	2018.39	2018.39	40.56 s
10800 s	10800 s	2018.39	0%	2018.39	2018.39	40.56 s

in Section 3.1. A random set of instances from the Solomon benchmark was selected for the comparative purposes mentioned earlier. The values selected for the parameters of the GRASP-VNS hybrid are those specified in the previous section for each of the objective functions studied.

Since CPLEX 12.6 has difficulties in obtaining exact solutions to the problem we introduce an execution time limit configuration. Specifically, three reasonable time limits were established: 3600 s, 7200 s and 10800 s. It is expected that the above MIP formulation can only be used to solve small-size instances. Numerical results shown in this section when trying to solve different test instances with CPLEX 12.6 solver confirm this expectation. Even for instances of 50 customers, CPLEX is not able to obtain solutions at reasonable times in most of the selected instances. It must be emphasized that this work has been limited to developing the model of Section 3.1 with CPLEX without including additional sophisticated techniques that facilitate the solution of the mathematical model.

The results for instances RC106, C201 and RC203 of size 25 are shown in Tables 9–11, respectively. The first column of the tables includes the limit execution time of CPLEX. The second column shows the execution time in which CPLEX obtained the solution. The next column represents the fitness of the solution obtained by CPLEX. The fourth column shows the GAP of CPLEX. The remaining columns are labelled “Av.”, “Best”, and “Time” and represent average fitness, best fitness and the average execution time of the solutions obtained by the GRASP-VNS hybrid. The remaining experimental data are available in Google Drive.³ In general terms, the results show different situations in which the GRASP-VNS hybrid performs better than CPLEX. Nevertheless, there are some instances for which CPLEX can obtain the optimal solution faster than the heuristic.

Sections 5.3 and 5.4 show that GRASP-VNS metaheuristic framework is highly efficient to solve the proposed problem. This leads us to think in a new open line for future research, the application of the GRASP-VNS to other related optimization problems.

5.5. Objective function comparison

This section presents a comparison of the proposed QoS objective functions. The best solutions obtained by each of the presented quality objectives are compared. To that end, computational experiments are carried out using two instances for each kind instance of the Solomon Benchmark. More specifically,

³ <https://goo.gl/pXStrU>.

Table 10

Results of instance C201 for size 25.

CPLEX			GRASP-VNS			
Limit time	Exec. time	Fitness	GAP	Av.	Best	Time
Objective function f_r (5)						
3600 s	0.16 s	0.024	0%	0.113	0.101	32 s
7200 s	0.16 s	0.024	0%	0.113	0.101	32 s
10800 s	0.16 s	0.024	0%	0.113	0.101	32 s
Objective function f_s (4)						
3600 s	0.14 s	3903.75	0%	3903.75	3903.75	25 s
7200 s	0.14 s	3903.75	0%	3903.75	3903.75	25 s
10800 s	0.14 s	3903.75	0%	3903.75	3903.75	25 s
Objective function f_c (2)						
3600 s	0.23 s	39392	0%	39392	39392	24 s
7200 s	0.23 s	39392	0%	39392	39392	24 s
10800 s	0.23 s	39392	0%	39392	39392	24 s

Table 11

Results of instance RC203 for size 25.

CPLEX			GRASP-VNS			
Limit time	Exec. time	Fitness	GAP	Av.	Best	Time
Objective function f_r (5)						
3600 s	3600 s	0.0343	91.94%	0.1059	0.0325	124 s
7200 s	7200 s	0.0343	90.70%	0.1059	0.0325	124 s
10800 s	10800 s	0.0343	88.45%	0.1059	0.0325	124 s
Objective function f_s (4)						
3600 s	3600 s	12506.73	1.82%	12185.50	12866.75	126 s
7200 s	7200 s	12506.73	1.72%	12185.50	12866.75	126 s
10800 s	10800 s	12506.73	1.70%	12185.50	12866.75	126 s
Objective function f_c (2)						
3600 s	3600 s	6066.07	2.80%	6979.54	6776.53	102 s
7200 s	7200 s	6525.82	2.74%	6979.54	6776.53	102 s
10800 s	10800 s	6525.82	2.74%	6979.54	6776.53	102 s

instances R110 and R207 of kind R, RC203 and RC206 of kind RC, and C109 and C104 of kind were used C. For each of the selected instances, the proposed metaheuristic is run 10 times using the different objective functions proposed in Section 3.1. A comparison for the best solutions using ten executions is carried out. This comparison considers the best solutions for all of the objective functions. This experimentation aims to detect the differences between quality objective functions proposed and how they can influence on solutions by comparing them.

The solutions obtained using several objective functions to be compared with each other, are the best solutions obtained during 10 executions.

The first comparative criterion is to know if the best solutions obtained for each objective function during ten executions are the same solution. The first criterion reveals information on how the proposed objective functions differs among themselves with respect to the design of the solutions. Two other comparative criteria between best solutions are also used: the total distance of the solution and the average percentage of the customer time windows the vehicle starts to serve the customer. The last two criteria allow for comparisons of the quality of the best solutions when they are different for each of the objective functions during ten executions.

Tables 12 and 13 show a sample of the comparative results for some of the instances of the Solomon benchmark considering different sizes. Information give in Tables 12 and 13 is column one, labelled Solution, gives the number of the best solution for each specified objective function of the ten solutions obtained by proposed metaheuristics. Column two gives the distance of the best solution obtained by the specified objective function, and the third column gives the average percentage of customer

Table 12
 Results of 25 size instances.

	Solution			Distance			% TW average		
	f_r (5)	f_s (4)	f_c (2)	f_r (5)	f_s (4)	f_c (2)	f_r (5)	f_s (4)	f_c (2)
R110									
f_r (5)	8	8	8	531.33	531.33	531.33	18.68	18.68	18.68
f_s (4)	0	8	8	522.92	534.22	534.22	19.96	22.38	22.38
f_c (2)	9	5	5	484.82	530.74	530.74	20.22	21.47	21.47
RC206									
f_r (5)	5	5	5	667.00	667.00	667.00	8.64	8.64	8.64
f_s (4)	1	1	1	667.00	667.00	667.00	8.64	8.64	8.64
f_c (2)	9	9	9	760.77	760.77	760.77	9.54	9.54	9.54
C109									
f_r (5)	5	5	5	237.10	237.10	237.10	10.78	10.78	10.78
f_s (4)	0	0	0	225.30	225.30	225.30	10.78	10.78	10.78
f_c (2)	5	5	5	168.50	168.50	168.50	22.75	22.75	22.75

Table 13
 Results of 50 size instances.

	Solution			Distance			% TW average		
	f_r (5)	f_s (4)	f_c (2)	f_r (5)	f_s (4)	f_c (2)	f_r (5)	f_s (4)	f_c (2)
R110									
f_r (5)	5	5	5	1012.98	1012.98	1012.98	19.33	19.33	19.33
f_s (4)	2	2	2	1130.43	1130.43	1130.43	9.91	9.91	9.91
f_c (2)	8	8	8	975.80	975.80	975.80	15.81	15.81	15.81
RC206									
f_r (5)	8	7	7	1137.54	1220.89	1220.89	13.52	16.75	16.75
f_s (4)	2	2	2	1353.59	1353.59	1353.59	14.43	14.43	14.43
f_c (2)	3	3	3	964.58	964.58	964.58	28.43	28.43	28.43
C109									
f_r (5)	2	2	2	589.29	589.29	589.29	10.77	10.77	10.77
f_s (4)	4	4	4	607.63	607.63	607.63	12.55	12.55	12.55
f_c (2)	2	2	2	541.48	541.48	541.48	26.93	26.93	26.93

time windows in which the vehicle begins to serve the customer. The intermediate rows indicate the instance used, and just below these are the rows that indicate the different objective functions set to optimize using the proposed metaheuristic. It is important to note that the rows with the objective function on the left side, give the objective functions used to optimize with the proposed metaheuristics, and the objective functions in the upper row are those used to evaluate the solutions obtained by metaheuristics. The remaining experimental data are available in Google Drive.⁴

An examination of the results show that in most cases the best solutions when optimized with a given objective function coincide with the best solutions for the remaining objective functions. This observation is reasonable, since there are common components to the different objective functions. In those cases in which the best solutions for each of the objective functions are not the same solution, the objective function f_r (5) presents a better average in distance and average percentage of customer time windows than the other objective functions. Overall, it appears that the objective function f_r (5) presents better performance than the remaining ones.

6. Conclusions and further research

In this study, we introduce the Quality of Service Vehicle Routing Problem with Time Windows (QSVRPTW). It is a variant of the well-known VRPTW that takes into account the quality of service provided to the existing customers and with a wide

range of practical applications. The quality of service is related to the reduction in the times that the customers have to wait to be served. In particular, we study three objective functions to optimize.

We propose a mathematical model to formalize the QSVRPTW and solve it to optimality with mathematical programming tools. However, due to the large computational times required when solving realistic scenarios, its implementation in practice is limited. In order to overcome this, we also propose a hybrid metaheuristic approach that combines a GRASP and a VNS with the goal of generating high-quality solutions for the problem within reasonable times.

The computational experiments seek to assess the performance of the hybrid GRASP-VNS proposed in this paper and also to study and compare the objective functions proposed to measure the quality of service. The performance of the hybrid GRASP-VNS was evaluated by comparing the results of the optimization model solved using IBM ILOG CPLEX. The computational experiment confirms that the approach proposed is highly efficient when solving the problem scenarios under analysis.

Moreover, the main purpose of this work is to study and compare the objective functions proposed to measure the quality of service provided to the existing customers in a given scenario. A comparison of the best solutions of the optimization problem under the defined objective functions has been performed. According to the computational experiments, it can be concluded that the objective function f_r (5) presents better performance than the remaining ones.

On the basis of the contributions presented in this paper, several promising lines are still open for further research. Some of these lines are briefly summarized in the following:

- *Integrating the QSVRPTW with other problems.* As indicated in Section 2, there is a wide range of optimization problems related to the delivery of freights. In this regard, taking into account the optimization of related processes would provide a holistic approach of the delivery environment.
- *Addressing the dynamism of the environment.* Logistic and transportation systems have a dynamic behaviour inherent to their nature. For example, arrival of new orders and fluctuations in transport times, among others, are usual. For this reason, appropriate solution approaches must be designed with the aim of tackling them.
- *Combination of optimization and simulation.* A large number of optimization problems have a stochastic nature in practice. Therefore, combining simulation with the algorithm proposed in this paper would support decision making under uncertainty.
- *Changing the perspective from which the QSVRPTW is tackled.* In this case, we have addressed the problem from the perspective of the customers. However, considering the optimization of the existing resources and balance both perspectives would give rise to increase the interest of all the stakeholders.

Declaration of competing interest

No author associated with this paper has disclosed any potential or pertinent conflicts which may be perceived to have impending conflict with this work. For full disclosure statements refer to <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105707>.

⁴ <https://goo.gl/xdAQhp>.

Acknowledgements

This work has been partially funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness with FEDER funds (TIN2015-70226-R) and by Fundación Cajacanarias research funds (project 2016TUR19).

Contributions by Airam Expósito are also supported by the Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información de la Consejería de Economía, Industria, Comercio y Conocimiento and by Fondo Social Europeo (FSE) for the financial support he receives through his post-graduate grant.

References

[1] G. Giaglis, I. Minis, A. Tatarakis, V. Zaimpekis, Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies. Research to date and future trends, *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manage.* 34 (9) (2004) 749–764.

[2] G. Sureshchandar, C. Rajendran, R. Anantharaman, The relationship between management's perception of total quality service and customer perceptions of service quality, *Total Qual. Manag.* 13 (1) (2002) 69–88.

[3] J.T. Mentzer, W. DeWitt, J.S. Keebler, S. Min, N.W. Nix, C.D. Smith, Z.G. Zacharia, Defining supply chain management, *J. Bus. Logist.* 22 (2) (2001) 1–25.

[4] J.T. Mentzer, D.J. Flint, G.T.M. Hult, Logistics service quality as a segment-customized process, *J. Mark.* 65 (1) (2001) 82–104.

[5] S. James, C. James, J. Evans, Modelling of food transportation systems – a review, *Int. J. Refrig.* 29 (6) (2006) 947–957, Issue with Special Emphasis on Data and Models on Food Refrigeration.

[6] M. M. Solomon, J. Desrosiers, Survey paper—time window constrained routing and scheduling problems, *Transp. Sci.* 22 (1) (1988) 1–13.

[7] A.M. Campbell, D. Vandenbussche, W. Herrmann, Routing for relief efforts, *Transp. Sci.* 42 (2) (2008) 127–145.

[8] P. Toth, D. Vigo, *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, second ed., MOS-SIAM Series on Optimization, vol. 18, SIAM, 2014.

[9] J. Brito, D. Nieves, A. Expósito, J.A. Moreno Pérez, Soft computing methods in transport and logistics, in: *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, Springer, 2018, pp. 45–61.

[10] J.L. Verdegay, R.R. Yager, P.P. Bonissone, On heuristics as a fundamental constituent of soft computing, *Fuzzy Sets and Systems* 159 (2008) 846–855.

[11] J.K. Lenstra, A.H.G.R. Kan, Complexity of vehicle routing and scheduling problems, *Networks* 11 (2) (1981) 221–227.

[12] M. Gendreau, C.D. Tarantilis, Solving Large-Scale Vehicle Routing Problems with Time Windows: The State-of-the-Art, Cirrelt, 2010.

[13] K. Braekers, K. Ramaekers, I. Nieuwenhuys, The vehicle routing problem: State of the art classification and review, *Comput. Ind. Eng.* 99 (2016) 300–313.

[14] L.M. Caro, J.A.M. Garcia, Measuring perceived service quality in urgent transport service, *J. Retail. Consum. Serv.* 14 (1) (2007) 60–72.

[15] J. Paquette, J.-F. Cordeau, G. Laporte, Quality of service in dial-a-ride operations, *Comput. Ind. Eng.* 56 (4) (2009) 1721–1734.

[16] H. Tang, E. Miller-Hooks, R. Tomastik, Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment, *Transp. Res. E* 43 (5) (2007) 591–609.

[17] R. Jothi, B. Raghavachari, Approximating the k-traveling repairman problem with repair times, *J. Discrete Algorithms* 5 (2) (2007) 293–303.

[18] I.O. Ezzine, S. Elloumi, Polynomial formulation and heuristic based approach for the k-traveling repairman problem, *Int. J. Math. Oper. Res.* 4 (5) (2012) 503–514.

[19] Z. Luo, H. Qin, A. Lim, Branch-and-price-and-cut for the multiple traveling repairman problem with distance constraints, *European J. Oper. Res.* 234 (1) (2014) 49–60.

[20] I. Post, C. Swamy, Linear programming-based approximation algorithms for multi-vehicle minimum latency problems, in: *Proceedings of the Twenty-Sixth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, SIAM, 2015, pp. 512–531.

[21] S. Nucamendi-Guillén, I. Martínez-Salazar, F. Angel-Bello, J.M. Moreno-Vega, A mixed integer formulation and an efficient metaheuristic procedure for the k-traveling repairman problem, *J. Oper. Res. Soc.* 67 (8) (2016) 1121–1134.

[22] R. Van der Meer, Operational Control of Internal Transport (Ph.D. thesis), (TTS;T2000/5) E, 2000.

[23] N. Bjelić, M. Vidović, D. Popović, Variable neighborhood search algorithm for heterogeneous traveling repairmen problem with time windows, *Expert Syst. Appl.* 40 (15) (2013) 5997–6006.

[24] L.Y.O. Li, Z. Fu, The school bus routing problem: a case study, *J. Oper. Res. Soc.* 53 (5) (2002) 552–558.

[25] J. Pacheco, R. Martí, Tabu search for a multi-objective routing problem, *J. Oper. Res. Soc.* 57 (1) (2006) 29–37.

[26] J. Park, B.-I. Kim, The school bus routing problem: A review, *European J. Oper. Res.* 202 (2) (2010) 311–319.

[27] M. Spada, M. Bierlaire, T.M. Liebling, Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem, *Transp. Sci.* 39 (4) (2005) 477–490.

[28] Z.-J. Ma, Y. Wu, Y. Dai, A combined order selection and time-dependent vehicle routing problem with time widows for perishable product delivery, *Comput. Ind. Eng.* 114 (2017) 101–113.

[29] P. Amorim, B. Almada-Lobo, The impact of food perishability issues in the vehicle routing problem, *Comput. Ind. Eng.* 67 (2014) 223–233.

[30] I. Kara, B.Y. Kara, M. Yetis, Energy minimizing vehicle routing problem, in: *International Conference on Combinatorial Optimization and Applications*, Springer, 2007, pp. 62–71.

[31] I. Kara, B.Y. Kara, M. Yetis, Cumulative vehicle routing problems, in: *Vehicle Routing Problem*, InTech, 2008.

[32] G.M. Ribeiro, G. Laporte, An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem, *Comput. Oper. Res.* 39 (3) (2012) 728–735.

[33] P. Chen, X. Dong, Y. Niu, An iterated local search algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem, in: H. Tan (Ed.), *Technology for Education and Learning*, in: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 136, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 575–581.

[34] L. Ke, Z. Feng, A two-phase metaheuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem, *Comput. Oper. Res.* 40 (2) (2013) 633–638.

[35] J. Lysgaard, S. Wøhlk, A branch-and-cut-and-price algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem, *European J. Oper. Res.* 236 (3) (2014) 800–810.

[36] D.R. Gaur, R.R. Singh, Cumulative vehicle routing problem: a column generation approach, in: *Conference on Algorithms and Discrete Applied Mathematics*, Springer, 2015, pp. 262–274.

[37] J. Brito, F.J. Martínez, J.A. Moreno Pérez, J.L. Verdegay, A GRASP-VNS hybrid for the fuzzy vehicle routing problem with time windows, in: *International Conference on Computer Aided Systems Theory*, Springer, 2009, pp. 825–832.

[38] A. Salehipour, K. Sörensen, P. Goos, O. Bräysy, Efficient GRASP+VND and GRASP+VNS metaheuristics for the traveling repairman problem, *4OR* 9 (2) (2011) 189–209.

[39] O. Bräysy, M. Gendreau, Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics, *Transp. Sci.* 39 (2005) 119–139.

[40] G. Laporte, The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms, *European J. Oper. Res.* 59 (3) (1992) 345–358.

[41] T. A.F. eo, M. G.C.R. esende, A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem, *Oper. Res. Lett.* 8 (2) (1989) 67–71.

[42] C.C.R. Mauricio G.C. Resende, *Optimization By GRASP*, Springer-Verlag New York, 2016.

[43] M.G. Resende, C.C. Ribeiro, Grasp: Greedy randomized adaptive search procedures, in: *Search Methodologies*, Springer, 2014, pp. 287–312.

[44] N. Mladenović, P. Hansen, Variable neighborhood search, *Comput. Oper. Res.* 24 (11) (1997) 1097–1100.

[45] P. Hansen, N. Mladenović, J.A. Moreno Pérez, Variable neighbourhood search: methods and applications, *Ann. Oper. Res.* 175 (1) (2010) 367–407.

[46] M.M. Solomon, Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Oper. Res.* 35 (2) (1987) 254–265.

[47] F. Hernandez, D. Feillet, R. Giroudeau, O. Naud, Branch-and-price algorithms for the solution of the multi-trip vehicle routing problem with time windows, *European J. Oper. Res.* 249 (2) (2016) 551–559.

[48] M. Schneider, The vehicle-routing problem with time windows and driver-specific times, *European J. Oper. Res.* 250 (1) (2016) 101–119.

[49] M. Birattari, J. Kacprzyk, *Tuning Metaheuristics: A Machine Learning Perspective*, Vol. 197, Springer, 2009.

[50] E.-G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*, Vol. 74, John Wiley & Sons, 2009.

[51] I.G. del Amo, D.A. Pelta, SRCS: a technique for comparing multiple algorithms under several factors in dynamic optimization problems, in: *Metaheuristics for Dynamic Optimization*, Springer, 2013, pp. 61–77.

[52] J. Derrac, S. García, D. Molina, F. Herrera, A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms, *Swarm Evol. Comput.* 1 (1) (2011) 3–18.

[53] M. Friedman, The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance, *J. Amer. Statist. Assoc.* 32 (200) (1937) 675–701.

[54] J. Xu, S.Y. Chiu, F. Glover, Fine-tuning a tabu search algorithm with statistical tests, *Int. Trans. Oper. Res.* 5 (3) (1998) 233–244.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHjpl

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

A. Expósito, J. Brito, J.A. Moreno et al. / *Applied Soft Computing Journal* 84 (2019) 105707

13

- [55] N. Veccek, M. Mernik, B. Filipic, M. Crepinsek, Parameter tuning with Chess Rating System (CRS-Tuning) for meta-heuristic algorithms, *Inform. Sci.* 372 (2016) 446–469.
- [56] H. Gehring, J. Homberger, A parallel hybrid evolutionary metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows, in: *Proceedings of EUROGEN99*, 1999.
- [57] K.R. Opara, J. Arabas, Differential evolution: A survey of theoretical analyses, *Swarm Evol. Comput.* 44 (2019) 546–558.
- [58] J.J. Durillo, A.J. Nebro, Jmetal: A Java framework for multi-objective optimization, *Adv. Eng. Softw.* 42 (10) (2011) 760–771.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Apéndice B

Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in La Palma

Expósito-Márquez, A., Expósito-Izquierdo, C., Brito-Santana, J., and Moreno-Pérez, J. A. (2019). Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in La Palma. *Computers & Industrial Engineering*, 137:106047, ISSN 0360-8352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106047>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

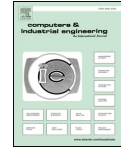
Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Contents lists available at ScienceDirect

Computers & Industrial Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/caie



Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in La Palma



Airam Expósito-Márquez^{*}, Christopher Expósito-Izquierdo, Julio Brito-Santana, J. Andrés Moreno-Pérez¹

Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas, Instituto Universitario de Desarrollo Regional, Universidad de La Laguna, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Container
Recyclable waste
Collection route
Optimization model
GRASP

ABSTRACT

This paper seeks to analyze application of a metaheuristic in the improvement in the design of routes for the collection of recyclable waste in the island of La Palma (Canary Islands, Spain). This work is a partial result of a technological and research transfer project aimed to analyze the route planning for collecting two portions of the recyclable waste, specifically paper and cardboard packaging and plastic packaging and cans, in this context. This scenario is modelled by an optimization problem termed Eco-efficient Vehicle Routing Problem. A mathematical model is proposed to formalize this problem. A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) is applied to obtain approximate solutions in real-life scenarios. Its goal is to increase the amount of recyclable waste collected, prioritizing the collection of those containers with the highest fill level. Moreover, a fill level estimation of the containers based on an historical data analysis is also developed and integrated into the solution approach. The results obtained in the computational experiments reveal that the proposed solution approach is highly efficient and able to improve the current route planning according to eco-efficient metrics.

1. Introduction

The current waste management involves a large number of relevant challenges for modern society (Al-Salem, Lettieri, & Baeyens, 2009). Some of them are derived from the shortage of financial resources, the absence of multilateral agreements between local, regional, or national governments, the resistance from the population to live close to waste facilities, or the complexity to design and maintain waste collection strategies that satisfy the real demand, among others. These challenges are unavoidable associated with an unstoppable growth of waste generation worldwide. In fact, according to the data taken up in the report by Kaza, Yao, Perinaz, and Van Woerden (2018) for the World Bank Group, global waste generation is predicted to be kept growing during the next 30 years. The main reasons behind this fact are several factors such as urbanization, population increase, and standard of living, among others. All these issues have given rise to that the waste treatment is nowadays one of the most relevant challenges. This situation makes the management of solid waste a major environmental problem (Guerrero, Maas, & Hogland, 2013).

Cities, regions, and local governments are responsible to manage

solid waste in their geographical areas. Consequently, they have the concern to implement an efficient and competitive process to manage solid waste. The need to provide a high quality service to the citizens and the importance of the environment and sustainable development make it necessary to devote large amounts of resources to the efficient management of urban solid waste. In fact, the management of solid waste is a critical affair for local governments around the world and sustainable development (Marshall & Farahbakhsh, 2013), especially in regions with reduced dimensions such as islands or areas with archipelagic conditions. Notwithstanding, local governments face problems that go beyond their resources and capabilities.

This work constitutes part of a technological and research transfer project. Its purpose is to evaluate and improve the management of recyclable waste at one of the major islands in the Canary Islands (Spain), specifically the island of La Palma. The public and private agents involved in the improvement of the waste recycling in La Palma have among their objectives to increase the recyclable waste collection efficiency. In this context, there are two main agents involved in the project. First, the national waste management company responsible for environmental care through recycling and the eco-design of packaging.

^{*} Corresponding author.

E-mail addresses: aexposim@ull.edu.es (A. Expósito-Márquez), cexposit@ull.edu.es (C. Expósito-Izquierdo), jbrito@ull.edu.es (J. Brito-Santana), jamoreno@ull.edu.es (J.A. Moreno-Pérez).

¹ 38271 La Laguna, Spain.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106047>

Received 2 January 2019; Received in revised form 16 August 2019; Accepted 5 September 2019

Available online 10 September 2019

0360-8352/ © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por:	Fecha:
Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

This company seeks to ensure the sustainable medium- and long-term development of the recyclable waste management system, as well as its optimal operation so as to satisfy the current and future packaging waste and processing demands placed on those involved by society and government. The other relevant agent is the operator company, which is in charge of the logistics operations of recyclable waste collection. Both agents cooperate with each other to ensure an adequate management of recyclable waste.

The technological and research transfer project aims to evaluate and analyze the current strategies, aspects, principles, and resources involved in the collection and transport of two portions of recyclable waste around La Palma; the blue portion consisting of paper and cardboard packaging as well as the yellow portion that consists of plastic packaging and cans. This project is a pilot project carried out in a geographically limited area, such as La Palma, but with the premise that the developed solution approach can be eventually adapted to address features from other contexts and obtain high performance by taking into account new appropriated criteria and considerations. This project includes the study and treatment of data provided by the waste management company and the local authorities on the current recyclable waste collection process in the island of La Palma to propose improvements in its planning. The information related to the demand of recyclable waste collection, containers locations and their characteristics, routes details, time and cost of the routes performed by the operator company and the resulting volumes of recyclable waste in containers and vehicles, together with the constraints of the available resources allow to offer and assess potential alternatives in the planning of the recyclable waste collection routes. The national waste management company promotes this project with the strategic objective of increasing the amount of recycling waste in the long term and encouraging citizens to recycle. This is done by motivating them to transfer their non-recyclable waste to recyclable waste. In this regard, one of the main reasons that discourage the citizen to recycle waste is to find the recycling containers full or overflowing. This is one of the key elements that are taken into account in the proposed solution approach.

According to the previous discussion, this paper focuses on the collection of recyclable waste from the blue and yellow containers (the blue containers should contain paper and cardboard packaging and the yellow containers should contain plastic packaging and cans) and their delivery to the waste processing plants. More specifically, this work proposes a solution approach to improve the route planning from an eco-efficient perspective. We propose a waste collection model that aims to maximize the amount of paper and cardboard packaging and plastic packaging and cans collected in such a way that the environmental impact is minimized. For this purpose, the developed solution approach give collection priority to those containers whose fill level is estimated as high. This allows to reduce the probability of having full or overflowing containers, and the consequent dumping of waste outside the containers. Also, the reduction of fuel consumption that can be achieved through lower time per route, and accordingly designing greener and shorter routes, is compatible with our goal.

The scenario under analysis is addressed as an optimization problem termed Eco-efficient Vehicle Routing Problem (Ee-VRP). It involves the design of routes to be carried out by a fleet of vehicles considering an extended planning horizon of several working days. The problem can be considered as a multi-depot routing problem whose starting and ending route locations are known. Specifically, there are three starting and ending points for the routes, whose locations are in three municipalities of La Palma: Breña Alta, Mazo, and Los Llanos. In connection with this, the routes depart from starting depots and finishes in the ending waste processing plants. In a feasible solution of the Ee-VRP, each vehicle in the fleet must carry out a route for each day within the planning horizon. Each route is defined as a sequence of waste collection points to be visited by the vehicle. All the recyclable paper and cardboard packaging or plastic packaging and cans must be collected in each visit.

The main contributions of this paper can be described as follows:

1. Addressing the real optimization problem of recyclable waste collection and transport in the island of La Palma (Canary Islands, Spain) within the framework of technological and research transfer project.
2. Proposing a mathematical formulation to model the current collection problem in order to formalize the problem mathematically.
3. Proposing an approximate optimization technique based on the general framework of Greedy Randomized Adaptive Search Procedure to solve the Ee-VRP.
4. Assessing the solution approach proposed by comparing the current routing scheme to the results of the proposed optimization technique.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 provides a literature review of the most highlighted works about waste management, especially those related to route planning. Section 3 describes the optimization problem. A mathematical formulation of the Ee-VRP is later presented in Section 4. Afterwards, Section 5 introduces the solution approach aimed at solving the Ee-VRP. Later, the computational experiments are presented and discussed in Section 6. Finally, the main conclusions and future works are included in the last Section 7.

2. Literature review

The papers found in the literature about waste management can be classified according to multiple criteria. On the one hand, one of the most extended is based on the type of waste to be treated. In this regard, the main types are residential waste (or garbage), industrial waste, recyclable waste, and health-care waste. The residential waste refers to a heterogeneous set composed of materials that are differentiated by their composition, which is derived from the community as well as its degree of industrialization and commercialism (Garvin, Cohen, & Dwyer, 2011). The industrial waste is that obtained as result of an industrial activity (Sahoo, Kim, Kim, Kraas, & Popov, 2005). Furthermore, recyclable waste contributes positively to protect the environment, minimizes the need for extracting, refining, and processing raw materials (Dat, Linh, Chou, & Vincent, 2012). Lastly, health-care waste poses a risk to human health when handled improperly (Alagöz & Kocasoay, 2008). In this paper, we focus our attention on the treatment of recyclable waste, mainly produced domestically and to a lesser extent by small retail businesses in the island.

On the other hand, location in which the waste collection is carried out is another relevant criterion when classifying papers found in the literature. In this regard, a wide range of problem variants can be identified. Firstly, the local governments in some cases establish a local waste facility shared by the community in which recycling is performed (Tung & Pinnoi, 2000). Secondly, kerbside collection (Sniezek & Bodin, 2006) is referred to the collection of household waste through containers with small dimensions near the houses. Despite this clear distinction on the basis of location, in this paper we address an intermediate scenario in which waste containers are dedicated to collect recyclable waste produced by residents in a neighbourhood, a few streets, etc. (Bodin, Mingozzi, Baldacci, & Ball, 2000).

Moreover, the environmental damage is joint to the gradual increase in the volume of waste generation. Taking into account the impact on the environment of the logistics operations associated with a given activity such as the waste management is gaining greater weight in recent years. In fact, this concern has given rise to the term *green logistics* (McKinnon, Browne, Whiteing, & Piecyk, 2015). This is a multi-level concept that encourages all stakeholders to assess and minimize the impact of logistics operations within a supply chain (Giusti, 2009). In this scenario, transportation is one of the harmful activities and with the highest environmental cost, expressed by means of CO₂ emissions and energy consumption. In particular, road transportation is one of the main contributors to fuel consumption and carbon dioxide equivalent

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

emissions. Nowadays, the main stakeholders in the field of waste management are committed strongly to design more sustainable solutions. In this regard, green vehicle routing is considered as a branch of green logistics that takes into account explicitly externalities derived from the use of vehicles (e.g., carbon dioxide-equivalents emissions) with the goal of minimizing them as much as possible through better planning (Bektaş, Demir, & Laporte, 2016).

In general terms, collecting waste by means of a fleet of trucks involves to design efficient routes that satisfy the service requirements in such a way that residents can dispose waste at a primary collection point without interruption (Nuortio, Kytöjoki, Niska, & Bräysy, 2006). Unfortunately, most of the initiatives aimed at collecting waste are nowadays focused on emptying containers on the basis of predefined schedules. However, it has been amply demonstrated that these approaches are highly inefficient. In particular, predefined schedules give rise to high fuel consumption, low use of existing assets, and collection of half-full containers, among others. For these reasons, a large number of municipalities and regional governments have clearly staked achieve convergence towards alternative proposals based on route optimization that considers tracking of waste levels and operational analytics. These proposals allow to reduce operative costs, recover investment costs, help to meet sustainability goals, and improve quality of service perceived by the residents.

The generation of routes is a well-studied optimization problem introduced by Dantzig and Ramser (1959) and termed Vehicle Routing Problem (VRP). Broadly speaking, this problem is aimed at designing routes for a fleet of vehicles in order to satisfy the demands of a set of customers while optimizing some criteria. In this study, the goal is to collect a set of waste containers. Also, it is worth mentioning that, in real-life scenarios, the routes are subject to length and temporary constraints, among others. It is known that the VRP and its many variants have been of the most broadly studied in the scientific literature over the last decades (Braekers, Ramaekers, & Van Nieuwenhuysse, 2016). The most conventional objective of the problem is to minimize the total cost traveled by the vehicles. However, this criterion can be guided in terms of reduction of negative externalities and eco-efficiency. This encourages to find suitable trade-offs between environmental cost and economic impact in routing problems.

According to the green perspective, the variants of the VRP can be classified as (i) the Green VRP (GVRP), (ii) the Pollution Routing Problem (PRP), and (iii) the VRP in Reverse Logistics (VRPRL). GVRP is aimed at minimizing the required energy, PRP tackles the minimization of greenhouse gas emissions, whereas VRPRL is related to the distribution aspects of reverse logistics (Lin, Choy, Ho, Chung, & Lam, 2014). In the following we review some relevant works about GVRP published over the last years. A mixed-integer linear formulation and a reduction procedure for the GVRP are presented by Leggieri and Haouari (2017). This formulation offers compactness and flexibility in comparison to previous proposals found in the literature. Furthermore, Poonthahir and Nadarajan (2018) propose a bi-objective fuel efficient Green Vehicle Routing Problem with varying speed constraint. A Particle Swarm Optimization is proposed to solve the problem. Tirkolaee, Hosseinabadi, Soltani, Sangaiah, and Wang (2018) propose a new model for the multi-trip Green Capacitated Arc Routing Problem in order to minimize the total cost, which includes the cost of generation and emission of greenhouse gases. In this case, the problem is solved by means of a hybrid genetic algorithm.

The waste management industry involves a large number of stakeholders. Some of these are citizens, authorities, companies aimed at collecting waste, agencies impacted by the collection activity, etc. Unfortunately, the goals of these collectives are usually conflicting. From the optimization perspective, the main objectives addressed in the literature are the environmental impact (Tavares, Zsigraiova, Semiao, & Carvalho, 2009), the number of vehicles (Hansmann & Zimmermann, 2009), the required staff (Hansmann & Zimmermann, 2009), the length of the collection routes (Ustundag & Cevikcan, 2008), the total time

(Arribas, Blazquez, & Lamas, 2010), the balance of route lengths performed by different employees (López-Sánchez, Hernández-Díaz, Gortázar, & Hinojosa, 2018), or the service total cost (Arribas et al., 2010). The interested reader is referred to the works by Han and Ponce Cueto (2015) and Sulemana, Donkor, Forkuo, and Oduro-Kwarteng (2018) to obtain a comprehensive review of methods and optimization criteria. In this paper and according to the particular objectives of the waste management company, we focus our attention on firstly maximizing the fill level of the collected containers. In spite of this, we also assess the impact of the proposed routes in terms of fuel consumption, distance, and time, among others.

Finally, it is worth mentioning that, over the last years, some innovative and promising initiatives to optimize the waste collection based on Internet of Things systems and devices have appeared on the market (Navghane, Killedar, & Rohokale, 2016). An example is to use sensors that allow to monitor indicators such as fill level, tilt, and temperature of the containers (Ramos, de Morais, & Barbosa-Póvoa, 2018). In spite of the fact that these initiatives are gaining popularity because of their effectiveness, they are still highly expensive, and therefore not open to most of the scenarios. The objective of sensor-based systems is to obtain and report confident data about the whole waste collection process (Faccio, Persona, & Zanin, 2011). However, in the absence of such systems, it is necessary to exploit knowledge extracted from historical data in order to estimate the status of the process, and therefore to anticipate best strategies. Some highlighted examples can be found in the works by Lu, Chen, Peng, and Shen (2015) and Lu, Chen, Ho, and Wang (2016). In this regard, we use historical data about the collection process with the aim of estimating the fill level of the containers, and therefore designing routes to collect containers selectively.

3. Problem description

This section is aimed at describing the Eco-efficient Vehicle Routing Problem, in short Ee-VRP. This optimization problem consists of designing routes to be followed by a fleet of vehicles for each day within a planning horizon H of several days. Each vehicle of the fleet is required to follow a route in each day of the planning horizon. In this regard, a feasible route is a sequence composed of waste collection points to be visited by a collection vehicle. The objective function of the Ee-VRP aims to maximize the recyclable waste collected from containers during the planning horizon.

The Ee-VRP can be formally described by means of a complete directed graph, $\mathcal{G} = (\Theta, A)$. The definition of \mathcal{G} includes $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$, which is a set of n locations and $A = \{(\theta_i, \theta_j) : \theta_i, \theta_j \in \Theta, i \neq j\}$. Also, $P \subset \Theta$ represents the set of m waste collection points and is defined as $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$. Furthermore, the set E is defined as $E = \{e_1, e_2, \dots, e_r\}$, where each element $e_i \in E$ is the start or end location of the routes. Hence, $\Theta = E \cup P$, whereas $E \cap P = \emptyset$. A distance $d_{ij} \geq 0$ and a travel time are known for each arc $(\theta_i, \theta_j) \in A$.

A waste collection point, $P_i = \{c_1^i, c_2^i, \dots, c_{l(i)}^i\}$, is composed of $l(i)$ containers, where c_j^i is the j -th container that belongs to the i -th waste collection point. This way, the set of all the containers is defined as follows:

$$C = \bigcup_{i=1}^m P_i \quad (1)$$

The containers in a waste collection point are dedicated to collect waste of similar type: paper and cardboard packaging (blue containers) or plastic packaging and cans (yellow containers). This means that containers of different types do not belong to the same waste collection point.

The set of waste collection points are collected by means of a fleet of vehicles denoted as $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$. Each vehicle can collect only one type of container: paper and cardboard or plastic packaging and cans.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 08/06/2020 01:07:10

José Andrés Moreno Pérez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 02:01:01

Julio Antonio Brito Santana
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 11:26:21

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:53:09

Therefore, $P(v)$ is defined as the set of waste collection points that can be collected by vehicle $v \in \mathcal{V}$. It is worth mentioning that all the containers included into $P(v)$, $\forall v \in \mathcal{V}$ are dedicated to collect recyclable waste of similar type. We consider a horizon H consisting of several days; $\mathcal{H} = \{h_1, \dots, h_f\}$. The origin location of vehicle $v \in \mathcal{V}$ is denoted as $o(v) \in E$, whereas $t(v) \in E$ denotes its target location. In addition, when a waste collection point is visited in a route, all its containers are collected. The vehicles in the Ee-VRP have unlimited capacity, in such a way that they can collect waste from the collection points with no limit. In practice, this means that the volume and weight of the collected waste is significantly lower than the capacity of the vehicles. However, the maximum duration of the route of the vehicle $v \in \mathcal{V}$ in day $h \in H$ is defined as W_{vh} , expressed in hours and derived from the working day of the truck drivers who perform the collection of recyclable waste.

Each container $c \in C$ has associated several parameters and information about its status. More specifically, every container $c \in C$ has a fill level $f(c, d)$, which indicates the normalized percentage of container capacity filled by waste and where d is the number of days since the last collection and a fill rate $q(c) \geq 0$ that determines the increase in the normalized percentage of container capacity by day. It is therefore assumed that each container $c \in C$ is filled over days according to $q(c)$. That is:

$$f(c, d) = \max(1, q(c) \cdot d + b(c)), \quad (2)$$

where $b(c)$ is the level of the container after collected. It should be noted that the larger the time period from the last collection, the higher the fill level. Also, the containers can be full, and thus no additional waste is allowed. $q(c) \cdot d + b(c) > 1$ indicates the container $i \in C$ is overflowing after d days since its last collection. Furthermore, each container $c \in C$ requires a collection time $s(c) \geq 0$. In practice, this time is mainly derived from the location of the container in the waste collection point and the driver skills. Accordingly, the time required to collect the waste included into the containers belonging to the waste collection point $i \in P$ is defined as follows:

$$s_i = \sum_{j=1}^{I(i)} s(c_j^i), \quad (3)$$

where $s(c_j^i)$ corresponds to the collection time of container c_j^i , and $s_i = 0, \forall i \in E$. Similarly,

$$f_i(d) = \frac{1}{I(i)} \sum_{j=1}^{I(i)} f(c_j^i, d), \quad (4)$$

corresponds to the fill level of the waste collection point i where $f(c_j^i, d)$ is the fill level of container c_j^i . In addition, it is assumed that each waste collection point $i \in P$ has been collected $d_i \geq 1$ days before the beginning of the planning horizon. For example, if a given waste collection point $i \in P$ has been collected the last Friday of a week and it is required to define the routes to be followed during the next week, $d_i = 3$, corresponding to the elapse of time between Friday and Monday.

In summary, the Ee-VRP consists of designing feasible routes for each day of the planning horizon and type of recyclable waste that will be carried out by the fleet \mathcal{V} of vehicles that collect recyclable waste while maximizing the fill level of collected containers. In spite of the presence of this primary objective, the waste management company is also interested in, when possible, reducing the current number of routes, the fuel consumption, and the number of overflowing containers.

4. Mathematical formulation

Once the Ee-VRP has been described in Section 3, in the current section the sets of variables and restrictions that determine a feasible solution of the problem are formally defined. Therefore, the Ee-VRP can be formulated by means of a Mixed-Integer Programming (MIP) as follows. First of all, we herein define the variables used in the model:

- X_{ijh}^v , binary variable set to 1 if vehicle v goes from location i to j in day h , $X_{ijh}^v = 0$ otherwise, $\forall i \neq j \in \Theta, v \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H}$.
- Y_{ih}^v , binary variable set to 1 if location i is visited by vehicle v in day h , $Y_{ih}^v = 0$ otherwise, $\forall i \in \Theta, v \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H}$.
- T_{ih} , real variable that represents the start time of the collection of waste at collection point $i, \forall i \in P$, during day $h, h \in \mathcal{H}$.

The constraints that state values of these variables that correspond to feasible solutions are the following.

$$\sum_{j \in P} X_{o(v)jh}^v = \sum_{j \in P} X_{t(v)jh}^v = 1, v \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H} \quad (5)$$

$$\sum_{j \in \Theta} X_{ijh}^v = \sum_{j \in \Theta} X_{jih}^v, i \in P, v \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \Theta} X_{ijh}^v \leq Y_{ih}^v, i \in P, v \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H} \quad (7)$$

$$T_{jh} \geq T_{ih} + s_i + t_{ij} - M \cdot \left(1 - \sum_{v \in \mathcal{V}} X_{ijh}^v \right), i, j \in \Theta, h \in \mathcal{H} \quad (8)$$

$$T_{ih} + s_i + t_{u(v)} \leq W_{vh}, i \in \Theta, v \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H} \quad (9)$$

$$um_{v \in \mathcal{V}} Y_{ih}^v \leq 1, i \in P, h \in \mathcal{H} \quad (10)$$

$$X_{ijh}^v \in \{0, 1\}, i, j \in \Theta, v \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H} \quad (11)$$

$$Y_{ih}^v \in \{0, 1\}, i \in P, v \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H} \quad (12)$$

$$T_{ih} \geq 0, i \in \Theta, h \in \mathcal{H} \quad (13)$$

Firstly, constraints (5) specify the start and end of each route at point o and t respectively, whereas the flow balancing at waste collection point is guaranteed by constraints (6). Constraints (7) determine that a waste collection point can be visited by a route only if this waste collection point has been assigned to that route. Constraints (8) ensure the connectivity of the routes while constraints (9) guarantee that the maximum working time is respected by all routes. Each waste collection point can be assigned to at most one route, as stated by constraints (10). Finally, constraints (11)–(13) define the variables domains.

Moreover, the set of days in the planning horizon in which the collection point $i \in P$ has been collected before day $h \in \mathcal{H}$ can be computed as follows:

$$\mathcal{D}_{ih} = \left\{ d < \frac{h}{\sum_{v \in \mathcal{V}} Y_{ih}^v} \right\} \quad (14)$$

The number of days since the last collection of the point $i \in P$ in day $h \in \mathcal{H}$ is defined as follows:

$$\eta_{ih} = \begin{cases} h - \max(k: k \in \mathcal{D}_{ih}), & \mathcal{D}_{ih} \neq \emptyset \\ \mathcal{H}_1 + h, & \mathcal{D}_{ih} = \emptyset \end{cases} \quad (15)$$

On the basis of the previous discussion the objective function of the Ee-VRP can be formally defined as follows:

$$\min \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{i \in P} \sum_{h \in \mathcal{H}} f_i(\eta_{ih}) \cdot Y_{ih}^v \quad (16)$$

where $f_i(\eta_{ih})$ is the fill level of the waste collection point $i \in P$ at day h after η_{ih} days since its last collection given by Eq. (4).

5. Solution approach

In this section, an approximate optimization technique aimed at solving the Ee-VRP is presented. Its design is encouraged by two main issues. Firstly, as discussed in the computational experiments, La Palma has several hundreds of collection points and the mathematical formulation proposed in Section 4 has a limited applicability in scenarios with such dimensionality as this. Secondly, in the middle term, the

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

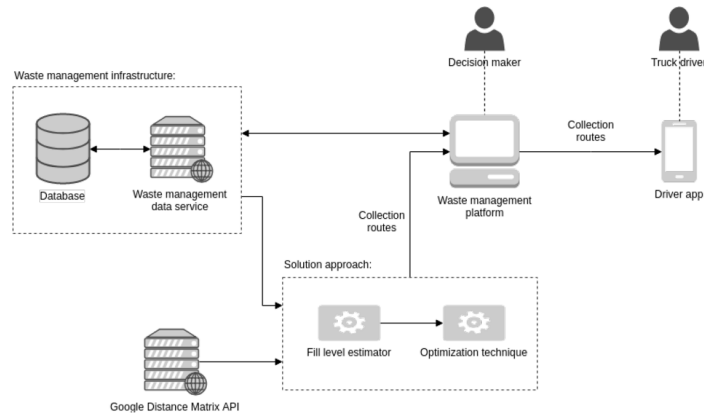


Fig. 1. General scheme of the solution approach integrated into the current technological infrastructure.

waste management company is highly interested in considering dynamic information of the environment, state of the traffic, main incidents, etc. when designing the collection routes. This means that the proposed technique should be inherently flexible to handle such information. For these reasons, it is required to count on versatile techniques able to report high quality solutions in short computational times.

In general terms, determining the set of collection points to be visited in each day of the planning horizon by each vehicle is the main decision to take in the optimization problem. However, it should be noted that the collection of containers in a day has a high impact on subsequent days of the planning horizon. This is derived from the fact that the containers are completely emptied when collected, and therefore the fill level of the involved containers is reduced to zero. At the same time, the larger the time period from the last collection, the higher the amount of recyclable waste, but increasing the risk of obtaining full or overflowing containers. This means that the decisions taken in a certain day give rise to changes in the quality of the collection routes in subsequent days. An intuitive framework based upon designing individual collection routes for each day of the planning horizon is hereafter discussed.

The proposed solution approach is integrated into the daily activity of the operator company as depicted in Fig. 1. The operator company owns a private waste management platform to monitor the collection and transport of recyclable waste to the existing waste processing plants. This platform is also used by the decision makers of the company to design the daily collection routes by hand. Nowadays, the routes are usually designed for weeks on end. Then, the routes are obtained by the truck drivers through a mobile application. The data gathered in the collection of containers is stored in a database system provided by the waste management company. These data can be consumed by means of web service endpoints, which enable to be integrated into other tools. In particular, our solution approach is embedded into the existing technological infrastructure as a black box. As can be seen in the figure, it exploits data stored by the waste management company and provides the collection routes to be followed by the truck drivers. Also, we use information provided through the Google Distance Matrix API² in order to obtain more accurate estimations about the travel times and distances in the routes. The proposed

collection routes are checked by the decision maker of the operator company before sending to the truck drivers. It is worth mentioning that, in spite of the fact that, the decision maker is still present in the scheme, its role as route designer has been replaced and reduced to tackle unexpected events.

The proposed solution approach seeks to design the set of routes to be followed by the fleet of vehicles for each day within the planning horizon. It is based on the general framework of the Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (Feo & Resende, 1995), hereafter GRASP. GRASP is a consistent multi-start two-phase meta-heuristic that has been applied for solving a wide range of real and large variants of routing problems. The scientific literature contains a large amount of combinatorial optimization problems solved by GRASP. The interested reader is referred to the work by Resende and Ribeiro (2010).

The pseudo-code of the solution approach is depicted in Algorithm 1. Firstly, it is required to know the distances and travel times between all the waste collection points (lines 1–2). The procedure is described in Section 5.2. The solution approach repeatedly gets good solutions by building a collection of routes (lines 4–18), and keeps the best in S_{best} , while the stopping criterion is not satisfied. It should be noted that at each step the solution under construction, s , is initially empty (line 5). This means that no feedback between consecutive iterations of the algorithm is considered. Then the solution approach builds a collection of routes (lines 8–12). These routes are designed in each day of the planning horizon, $h \in \mathcal{H}$ (line 6), for every vehicle, $v \in \mathcal{V}$ (line 7). This way, kh routes are built by the solution approach to obtain a feasible solution, s . In order to build a route, the set of waste collection points that can be collected by the vehicle v must be determined, $P(v)$ (line 8). This is the subset of all the points composed of containers aimed at collecting recyclable waste of the type collected by the vehicle v . In practice, v is not able to collect the recyclable waste associated with all the containers in $P(v)$ without breaking constraints derived from the maximum time of the routes. For this reason, it is firstly required to know the number of days since the last collection of the containers (line 9), and then a selection of waste collection points must be carried out. With this goal in mind, the fill level of all the containers included into $P(v)$ is determined (line 10). This process is described in Section 5.1. Furthermore, the individual routes are built by means of the method described in Section 5.3. Once a feasible route, r , is obtained, it is added to the solution under construction, s . In this regard, s will be feasible when a route for each vehicle and each day is defined.

² <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/start>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Algorithm 1. Pseudo-code of the proposed Greedy Randomized Adaptive Search Procedure aimed at solving the Ee-VRP

```

Output:  $s_{best}$ . Best solution found during the search
1  $d_{ij} \leftarrow$  Compute distances between  $P$ 
2  $t_{ij} \leftarrow$  Compute travel times between  $P$ 
3  $s_{best} \leftarrow \emptyset$ 
4 while stopping criterion not satisfied do
5    $s \leftarrow \emptyset$ 
6   for  $h \in \mathcal{H}$  do
7     for  $v \in \mathcal{V}$  do
8        $P(v) \leftarrow$  Waste collection points that can be collected by  $v$ 
9        $h(c), \forall c \in C \leftarrow$  Days since the last collection of container  $c$ 
10       $f(c, h(c)), \forall c \in C \leftarrow$  Determine fill level of containers
11       $r \leftarrow$  Build route for  $v$  during day  $h$ 
12      Add  $r$  to  $s$ 
13    end
14  end
15  if  $s$  is better than  $s_{best}$  then
16     $s_{best} \leftarrow s$ 
17  end
18 end
19 return  $s_{best}$ 
    
```

The construction method used to build individual solutions (Section 5.3) is non-deterministic. This means that, even using the same input data, different routes can be potentially reported in each execution. In this scenario, a multi-start procedure that repeatedly applies the construction method and outputs the best solution found over all trials is considered (lines 4–18). In each iteration, the last built solution, s , is compared with the best solution found by the algorithm, s_{best} . If s has a higher objective function value than s_{best} (Eq. (16)), or it has similar objective function but shorter total travelled distances or lower number of overflowing containers, the best solution is replaced by s . The multi-start procedure iterates until a given stopping criterion is met.

5.1. Estimated fill level

One of the most relevant elements when designing the collection routes of the waste management company is to establish the subset of containers to be collected by the fleet of vehicles in each day. In this regard, the company is interested in collecting only those containers with the highest fill level, in such a way that the optimization criterion can be maximized, but while avoiding the existence of overflowing containers. With the goal of determining the attractiveness of the containers to be collected, their fill levels are used. Unfortunately, due to the lack of sensorization associated with the containers in the

environment under analysis, their fill levels must be estimated on the basis of the historical data stored by the waste management company or from other sources.

The estimated fill level of a container $c \in C$ after h days since the last collection is computed by means of Eq. (2). However, in order to compute the estimated fill level, a fill rate, $q(c)$, is required to be known. In this case, according to the data stored by the company, it is reasonable to assume that the containers are filled lineally over time, but with heterogeneous fill rates. Fig. 2 depicts two examples of container with different fill rates. More advanced models that take into account social or geographic aspects, seasonal concerns, etc. are an open line for further research. As can be seen, the container is full after 5 days when the fill rate is 0.181 (red line), whereas this time is longer when fill rate is 0.073 (blue line). In this regard and as indicated in Section 3, a container c is estimated to be overflowing when $q(c) \cdot h + b(c) > 1$ after h days. This is useful for decision makers because this function allows to estimate the amount of recyclable waste not collected as well as the time during the container has been full before its collection.

5.2. Estimated distances and travel times

In spite of the fact that maximizing the fill level of the collected containers is the optimization criterion in the problem, the decision makers are also interested in obtaining routes with reasonable distance. In addition, the routes are constrained by the working day of the drivers. For these reasons, the distance and travel times between each pair of collection points should be known to design efficient routes.

Most of the aforementioned data to design new routes are obtained from the routes that vehicles carried out previously and that are stored in the database of the waste management company. Unfortunately, the waste management company has no data about most of the distances and travel times in its database. This is because of the routes that include those collection points for which there are no historical travel times have never been designed. Additionally, there are travel times between points that are not reliable, updated, or contain errors. In order to solve the cases of lack or erroneous information, Google Maps Platform, and specifically its API Distance Matrix, have been used to compute and correct travel times.

Overall, it was essential to apply a correction factor and add the collection time of a container to the travel times between collection points. The correction factor has been obtained from the relation between a large sample of travel times stored in the database of the

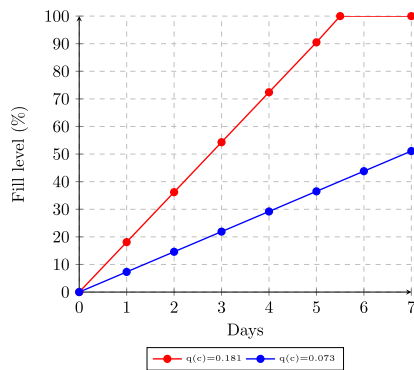


Fig. 2. Examples of fill rate.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

company route planning systems and the travel times provided by Google Maps Platform for the same pairs of points. This value indicates that vehicles use, in general terms, around 50% more time than those provided by the Google Distance Matrix API. As mentioned above, the collection time of containers have been added to the travel times. It is assumed that once the vehicle has stopped in front of the container, the time required to empty its contents in the vehicle and locate the container in the same place to continue the route is stable. In other words, this time is similar for all containers regardless of their content and location, among others. The values stored in the database of the waste management system and the information extracted from the interview phase with the agents responsible for the waste collection, establish a reasonable time of 120 s.

5.3. Designing routes

As indicated before, a new collection route must be designed at each step of the GRASP. With this goal in mind, we propose a flexible semi-greedy constructive method. Its pseudo-code is depicted in Algorithm 2.

Algorithm 2. Pseudo-code of the method used to build routes of the GRASP

```

Input :  $v$ . Vehicle used in the route
          $P(v)$ . Set of waste collection points that can be collected by  $v$ 
          $\kappa$ . Size of the restricted candidate list
Output:  $r$ . Collection route of vehicle  $v$ 
1  $r \leftarrow (o(v), t(v))$ 
2 while improvement do
3   while  $P(v)$  is not empty and constraints are satisfied do
4     Evaluate the candidate elements in  $P(v)$ 
5      $RCL \leftarrow$  Build the restricted candidate list
6      $p \leftarrow$  Select an element from the  $RCL$ 
7     Add waste collection point of  $p$  to route  $r$ 
8     Update the set of candidate elements
9   end
10  Apply improvement strategy to  $r$ 
11 end
12 return  $r$ 
    
```

It receives the vehicle to be used in the route, the set of waste collection points that can be collected by it as well as the size of the restricted candidate list as input parameters. Each route is here defined as a sequence of waste collection points to be visited by the corresponding vehicle. The first step in the design process is to build a route, r , composed of the starting and ending locations for vehicle v and with no waste collection points (line 1). Then, the impact of each available waste collection point on the objective function value when included in each potential position of the route is evaluated (line 4). According to this evaluation, a restricted candidate list composed of those waste collection points and position in the route with the highest increment of the objective function value is built (line 5). This list is sorted by the increment of the objective function value, in such a way that those candidates with the highest increment have higher probability of being used to update the route. The size of this list is restricted by the parameter κ , whose value is set by the user. One of the candidates, p , in the restricted candidate list is selected by a roulette wheel selection (line 6). The corresponding point is added to the route under construction (line 7). Once the point has been added to the route, the set of candidate elements is updated (line 8). This process is repeated until no additional waste collection point can be added to the route while fulfilling the constraints imposed by the optimization problem (lines 3–9). It should be noted that, due to the maximum duration constraints of the route,

some waste collection points cannot be included without exceeding this bound. These waste collection points are consequently ruled out from the selection process.

Moreover, the semi-greedy constructive method reports feasible solutions of the optimization problem under analysis. However, the quality of the routes could be enhanced by applying some improvement strategy. In this case, the Lin-Kernighan heuristic proposed for the Traveling Salesman Problem is used (Helsgaun, 2000). Applying this technique allows to reduce the distance traveled by the vehicle when visiting the sequence of waste collection points. This potential improvement enables to add new waste collection points to the route under construction (lines 2–11). Finally, the process is finished by returning the built route, r (line 12), when any improvement can be obtained.

6. Computational results

This section is dedicated to present the computational experiments carried out in this work. The main objectives of the computational experiments are described as follows:

1. Evaluating the solution approach used to propose improvements on

route planning for collection of recyclable waste from eco-efficient perspective.

2. Comparing the current routing scheme carried out in the past by the operator company to the results of the proposed optimization technique.
3. Analyzing several eco-efficient indicators that are of the interest for the waste management company.

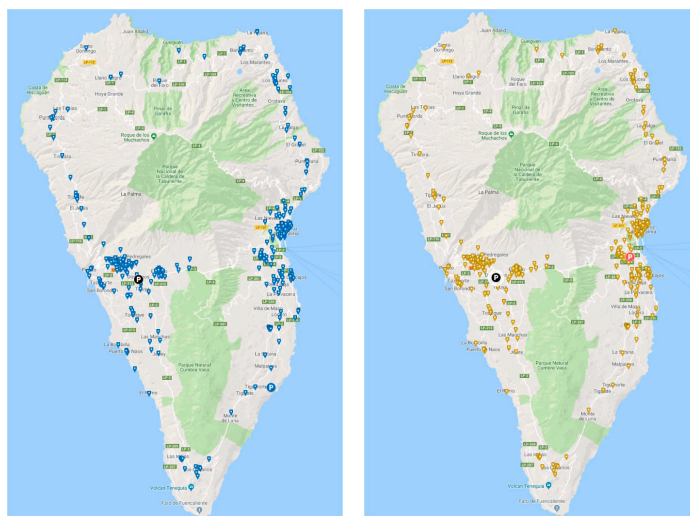
The computational results referred to throughout this section were performed by a personal computer equipped with an Intel Core 2 Duo E8500 3.16 GHz and 4 GB of RAM. The solution approach was development using the Java SE 8.0 language. The computational time that the solution approach requires to solve the scenario under analysis stands at around 1 min. Notwithstanding, the computational times are not very relevant for the waste management company. This is partly due to the fact that the process of planning routes would be performed the night before the first day of the planning horizon. The stopping criterion used in the solution approach is defined based on the number of iterations. Hence, the search of solutions is repeated a certain number of iterations, specifically 10 iterations in the computational experiments carried out, and the best solution obtained after the defined number of iterations is returned.

The current section is split into the following subsections. Firstly,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



(a) Paper and cardboard packaging containers and waste processing plants (b) Plastic packaging and cans containers and waste processing plants

Fig. 3. Containers and waste processing plants distribution in La Palma.

Section 6.1 introduces the characteristics of the geographical scenario in which the route planning is performed. Then, Section 6.2 describes the data used to design the real case instances addressed in this work, including the containers location, the distances and travel times between containers, and other relevant information. Finally, the analysis and comparison of the solutions provided by the proposed solution approach and the previous planning scenarios are presented in Section 6.4.

6.1. Scenario under analysis

It is necessary to describe the geographical context in which the

project is developed in order to understand the particularities of the data cited above. The island of La Palma has an area of 708.32 km² and their territory is very rugged, reaching 2426 m. at Roque de los Muchachos, the highest point on the island. It is the second island with the highest altitude in the Canary Islands. Additionally, it is one of the Canary Islands with the largest forest area. The total population is 87,324 inhabitants. Around 25% of the total population of La Palma is in the municipality of Los Llanos de Aridane, and about 40% in El Valle de Aridane. The population is highly concentrated in two cities, Santa Cruz de La Palma (eastern side) and Los Llanos de Aridane (western side). In addition, La Palma registers a high level of unclassified population, which shows the number of tourists it receives annually. Concerning



(a) Paper and cardboard packaging (b) Plastic packaging and cans
 (c) Truck scale display (d) Truck scale platform

Fig. 4. Waste recycling plant in the island of La Palma.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

A. Expósito-Márquez, et al.

Computers & Industrial Engineering 137 (2019) 106047

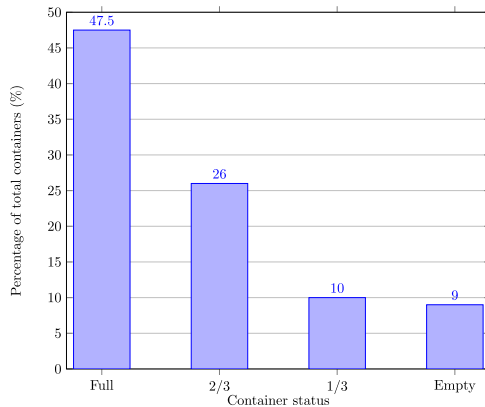


Fig. 5. Fill level of containers.

transport infrastructure, the roads of La Palma constitute a network of 510.06 km. Most of the roads are paved and in reasonable conditions, although practically all have many curves. The main roads are described below. The roads, LP-1 and the LP-2, compose the main ring road of La Palma with 157.88 km. The LP-3 road, with an extension of 25.9 km, is a mountain road that crosses the island from east to west passing through two excavated tunnels. A 47.84 km road, LP-4, ascends to the Roque de los Muchachos, going down the northern slope of the island. The LP-20, is a 3.70 km ring road that avoids the passage through the urban area of one of its cities with largest population, Santa Cruz de La Palma. The road network is completed with 47 more secondary roads.

6.2. Data summary

Most of the input data used in this work comes from the real case study in La Palma, Canary Islands, Spain. Therefore, a huge portion of the computational experiments input data are real data used in the application context of recycle waste collection described in this work. The main input data are related to containers location, ending/starting points as depots and waste processing plants, the distances and travel times between containers and vehicle operations, and the fill level of the containers.

The distribution of the containers across the island of La Palma is organized in collection points. The instance based on real data of the technology and research transfer project addressed has 774 containers distributed in 338 collection points. The containers can be split into 399 containers for recyclable plastic packaging waste and 375 containers for recyclable paper and cardboard waste. Fig. 3 shows the containers distribution around La Palma. The capacity of all containers is homogeneous, specifically 3000l. Regarding the starting depots and waste processing plants, there are three known starting and ending points. In particular, there are three points whose locations are found in Breña Alta, Mazo, and Los Llanos, municipalities of La Palma. Fig. 4 shows one of the waste processing plants located in La Palma, specifically the two types of recyclable waste and the truck scale and its display respectively. The real data of the containers, collection points, and starting and ending points belonging the instances are taken from the private waste management platform of the operator company in charge of designing the routes and managing the resources used in them.

The other essential data set for the design of recyclable waste collection routes is composed of the costs or travel times of the vehicles and distance between the collection points, and starting and ending points. Hence, the cost data are structured in two square matrices, $M_d = (d_{ij})$ and $M_t = (t_{ij})$, relative to distances and times between

Table 1
 Summary of the comparison carried out between the mathematical model and the heuristic approach.

	Mathematical model		Heuristic solution		
	Paper	Plastic	Paper	Plastic	
Day 0:	Pickup points visited:	122.00	112.00	81.00	75.00
	Containers visited:	173.00	158.00	115.00	111.00
	Total Distance (m.):	93102.00	99299.00	117429.00	141474.00
	Total Time (s.):	23391.73	23397.79	23382.92	23382.22
	Fill Level (%):	77.05	61.81	90.44	71.27
Day 1:	Pickup points visited:	98.00	92.00	24.00	38.00
	Containers visited:	147.00	129.00	37.00	49.00
	Total Distance (m.):	89629.00	142891.00	148410.00	152071.00
	Total Time (s.):	23352.56	23383.54	23397.72	23388.41
	Fill Level (%):	49.84	39.16	88.51	66.77
Day 2:	Pickup points visited:	119.00	80.00	58.00	42.00
	Containers visited:	167.00	107.00	81.00	60.00
	Total Distance (m.):	104786.00	121183.00	140483.00	152698.00
	Total Time (s.):	23367.76	23305.24	23389.38	23360.33
	Fill Level (%):	46.70	36.85	86.74	72.29
Day 3:	Pickup points visited:	103.00	93.00	83.00	58.00
	Containers visited:	148.00	131.00	103.00	79.00
	Total Distance (m.):	112359.00	113072.00	113375.00	136794.00
	Total Time (s.):	23392.88	23355.64	23357.65	23397.78
	Fill Level (%):	45.10	46.76	87.53	66.86
Day 4:	Pickup points visited:	108.00	96.00	56.00	47.00
	Containers visited:	150.00	134.00	81.00	72.00
	Total Distance (m.):	92495.00	146495.00	131091.00	150099.00
	Total Time (s.):	23388.84	23395.02	23398.82	23385.59
	Fill Level (%):	50.01	41.27	84.33	75.166

collection points respectively. These matrices have size of $N \times N$, with N equivalent to the sum of the collection points number and starting and ending points with $1 \leq i, j \leq N$. Both matrices have the following characteristics:

- The entries in the main diagonal are all zero, $d_{ii} = 0$ and $t_{ii} = 0$ for all $1 \leq i, j \leq N$.
- All the off-diagonal entries are positive, $d_{ij} > 0$ and $d_{ij} > 0$, if $i \neq j$.
- The matrices are not symmetric, $d_{ij} \neq d_{ji}$ and $t_{ij} \neq t_{ji}$ for some $1 \leq i, j \leq N$.

Due to the complicated orography of the region with a rugged terrain and high altitudes, the road network presents abrupt changes in altitude with high inclines and many curves. This fact can be seen in the no direct proportion between entries d_{ij} and t_{ij} of the road distance matrix and travel times matrix, respectively.

Regarding the fill level of the containers, and as previously mentioned in Section 5, a function has been developed to estimate the fill level of the containers. However, in order to study the historical data available through the private waste management platform of the operator company, the routes carried out by the vehicles and the fill levels in the collection of the containers were analyzed. The relative percentages of times that a full container is collected is 50%, 25% for containers at 2/3 of its capacity, and 12,5% for containers at 1/3 of its capacity and vacuum. In other values, of every 8 container collected, 4 are full, 2 to 2/3 of its capacity, one to 1/3 of its capacity and another empty. The Fig. 5 illustrates the historical fill level of the containers.

6.3. Comparison of mathematical model and heuristic solution approach

The mathematical model proposed in this paper (Section 4) provides a mean to formally define the optimization problem under analysis without ambiguity. However, since the daily fill levels depend on the

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Table 2
 Summary of the comparison carried out between the proposed algorithmic approach and the current scenario during the first week of October.

Indicator	Proposed Scenario	Current Scenario
Routes	10	13
Time (h)	65	128.9
Time per route (h)	6.5	9.915
Distance (km)	1383.924	1162.534
Distance per route (km)	138.392	89.426
Containers	788	1215
Container by day	157.6	243
Overflowing containers	115	Unknown
Fill level (%)	78.995	61.113
Kilograms (kg)	15792.94	18563.074
Kilograms by hour (kg/h)	243.134	144.011
Consumption (l)	624.225	1238.729
Consumption by kilogram (l/kg)	0.040	0.067
Distance by kilogram (km/kg)	0.088	0.063
Time by kilogram (m/kg)	0.247	0.427

Table 3
 Routes duration.

Week day	Month day	Operation time
Monday	October 2	12.985 h
Tuesday	October 3	15.470 h
Wednesday	October 4	10.290 h
Thursday	October 5	10.805 h
Friday	October 6	14.900 h
Average		12.89 h

Table 4
 Routes distance.

Week day	Month day	Historical distance	Solution distance
Monday	October 2	72.087 km	129.451 km
Tuesday	October 3	84.947 km	150.240 km
Wednesday	October 4	137.778 km	146.590 km
Thursday	October 5	80.204 km	125.084 km
Friday	October 6	85.156 km	140.595 km
Average		89.426 km	138.392 km

Table 5
 Number of collected containers.

Week day	Month day	Historical number	Solution number
Monday	October 2	242	226
Tuesday	October 3	304	86
Wednesday	October 4	145	141
Thursday	October 5	198	182
Friday	October 6	326	153
Total		1215	788

containers collected the previous days, the mathematical optimization model is not a linear programming problem, and thus it cannot be implemented directly through MIP solvers such as IBM ILOG CPLEX.³

An alternative way of using the mathematical model is to consider only the reduced model corresponding to a single day. In this case, the fill level of the containers are known and the mathematical model is linear. Hence, the reduced model can be solved by CPLEX or any other

³ <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>.

Table 6
 Average fill level of containers collected.

Week day	Month day	Historical fill level	Solution fill level
Monday	October 2	69.588%	80.857%
Tuesday	October 3	62.228%	77.646%
Wednesday	October 4	53.594%	79.522%
Thursday	October 5	54.189%	77.203%
Friday	October 6	58.479%	79.749%
Total		61.113%	78.995%

MIP solver. Therefore, once the solution provided by CPLEX for the first day is obtained, the fill level of containers for the second day are updated, and CPLEX solves the problem for the second day. This process is repeated for the following days until the planning horizon is completed.

Accordingly, a small computational experimentation has been carried out to test this alternative solution approach with the reduced model formulation and it has been found that CPLEX has difficulties to provide high quality solution when the problem reaches the dimensions corresponding to the scenario presented in this work. This method has been applied to the real case analyzed in this work and the results show its deficiency. Table 1 describes the data of the comparison.

In the case of paper and cardboard waste collection, where the instance has 375 containers to collect, the results provided by CPLEX 12.9 for the planning horizon are worse than those provided by our heuristic solution approach. It can be seen that the fill level of the solutions obtained by CPLEX are considerably lower than those obtained by the heuristic solution approach. The maximum execution time used by CPLEX is two hours for each day of the planning horizon whereas the heuristic solution approach execution time requires around 1 min. As regards instance of plastic packaging waste collection, the number of containers reaches 399. The solutions provided by CPLEX using a maximum of 2 h of execution time per day of the planning horizon are worse than those obtained by the heuristic solution approach.

6.4. Analysis and solution comparison

In this section, an analysis and solution comparison is carried out between the proposed solution approach and that implemented by the operator company along a given planning horizon. In order to perform the comparison, the route planning carried out by the operator company is extracted for a one-week planning horizon. Specifically, the first week of October, from Monday 2 to Friday 6.

Another relevant input information refers to the moment of the last containers collection at the time of planning the routes in the beginning of the planning horizon. The objective is to take into account the precise time during which each container has been collecting recyclable waste deposited. This information is obtained from the private waste management platform of the operator company that indicates the days that have passed since the last collection of each container until the beginning of the planning horizon. If this information is not available, in order to determine the initial value of the number of days a container has not been collected, we use the information that contains the containers and the last day of the week in which they usually are collected. Based on this information, the days until the day before the beginning of the planning horizon are counted.

Regarding to the characteristics of the available vehicles fleet, some important data are the number of vehicles, type of recyclable waste that can collect and capacity of each vehicle. It is assumed that, for practical purposes, vehicles have unlimited capacity since in case of operating the maximum time allowed and collecting full containers there would be sufficient capacity. Additionally, there are two vehicles for each day of the planning horizon, one for each type of recyclable waste.

The comparative results are shown for the week of October 2–6,

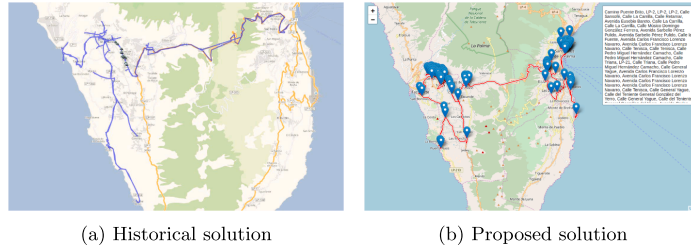


Fig. 6. Monday, October 2. Paper and cardboard packaging.

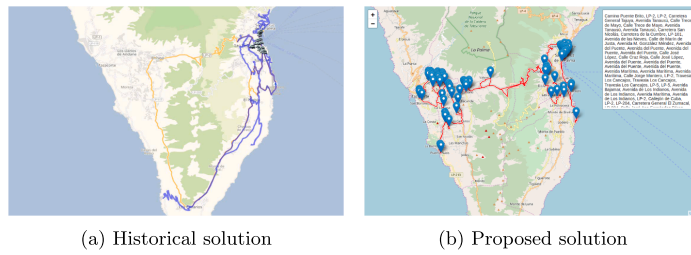


Fig. 7. Monday, October 2. Plastic packaging and cans.

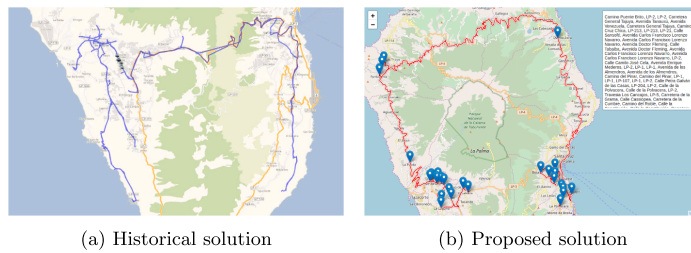


Fig. 8. Tuesday, October 3. Paper and cardboard packaging.

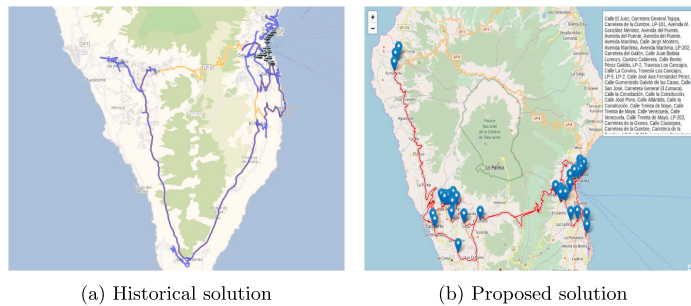


Fig. 9. Tuesday, October 3. Plastic packaging and cans.

which is a week without holidays on La Palma and whose previous week does not have holidays either, in order to avoid that special circumstances may affect the comparison in a decisive way. The comparison is carried out with the results of the route planning carried out by the operator company as it is reflected in their private waste

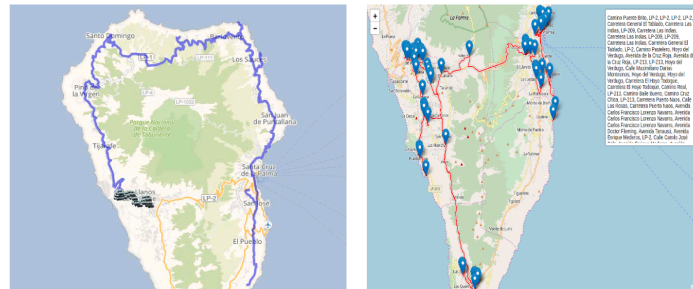
management platform. The maximum working time is set to 6,5 h per route.

The global indicators that summarizes the computational results achieved by the solution approach introduced in Section 5 and the selected route planning carried out by the operator company on first

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

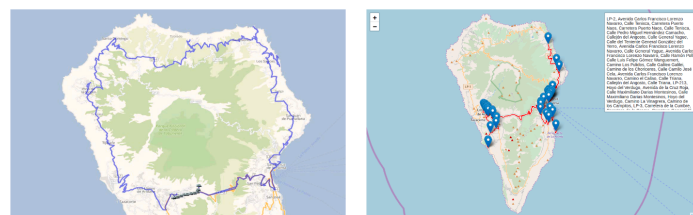
Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJpl

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



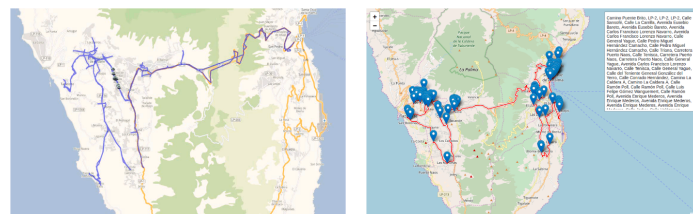
(a) Historical solution (b) Proposed solution

Fig. 10. Wednesday, October 4. Paper and cardboard packaging.



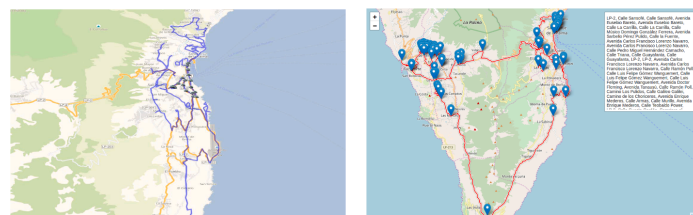
(a) Historical solution (b) Proposed solution

Fig. 11. Wednesday, October 4. Plastic packaging and cans.



(a) Historical solution (b) Proposed solution

Fig. 12. Thursday, October 5. Paper and cardboard packaging.



(a) Historical solution (b) Proposed solution

Fig. 13. Thursday, October 5. Plastic packaging and cans.

October week, are described in the Table 2.

The summary table shows indicators related to logistics aspects and environmental impact of route planning for collection of recyclable waste. The indicators presented are widely used by the national waste

management company to evaluate the actions of recyclable waste collection throughout the country. Three groups are established to differentiate and group the presented indicators. The first group consists of indicators related to distance, duration, and number of routes to be

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2528892	Código de verificación: tpBnHJp1
Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

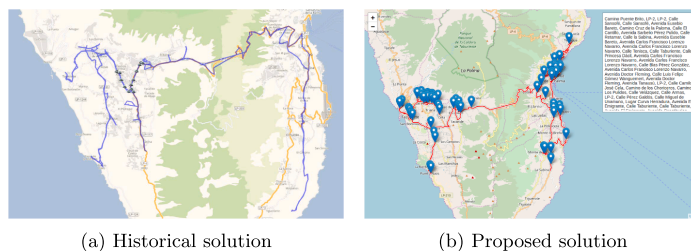


Fig. 14. Friday, October 6. Paper and cardboard packaging.

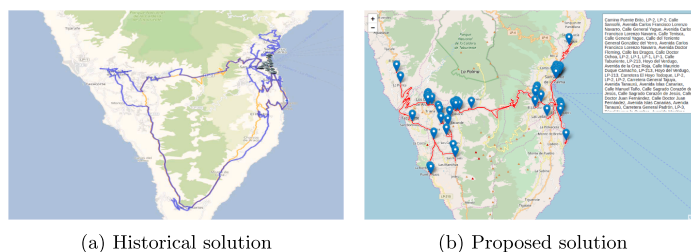


Fig. 15. Friday, October 6. Plastic packaging and cans.

carried out. Consequently, the second group contains indicators related to the fill level and the number of containers collected. The environmental impact of the recycling process is included in the last group of indicators. The time and distance required to collect one kilogram of recyclable waste, the amount of recyclable waste collected, and fuel consumption are some of the indicators collected in the last group.

In Table 2, it can be seen that the use of the solution approach described in Section 5 allows to improve a large part of the indicators used by the national waste management company to evaluate the actions of collecting recyclable waste. The maximum duration of each route carried out by a vehicle each day is 6.5 h. This requirement was established by the waste management company in order to study the feasibility of collecting the containers within a working day of a driver per vehicle. Assuming a normal working day of 8 h, the remaining 1.5 h are covered by possible unexpected events (e.g., weather conditions, traffic jams, etc.) and rest periods.

Currently, the waste management company makes use of more than 10 routes during a week (e.g., 13 routes in the current analysis comparison). Consequently, this requires a high amount of working hours. As a result, the requirement of reduce maximum duration seeks to reduce labor costs in the medium term. Regarding to the current case, a total of 128.9 h instead of 65 h proposed by the solution approach. Nonetheless, the distance traveled by the vehicles is increased due to the working hours reduction. This fact is motivated by the strategy that exists in the selection of the collection points used by the meta-heuristics. More specifically, the containers collected are those with the highest fill level, regardless of distance to which they are located.

Additionally, the fill level of the containers is better in the proposed solution (78.995% compared to 61.113%), notwithstanding the reduction in time and number of routes to be carried out. According to the comparative data, vehicles increase their productivity during the collection process. Regarding the amount of recyclable waste collected, the proposed solution is nearly equivalent to the routes planning the operator company, however, the time required and the fuel consumption of the vehicles to collect the recyclable waste is significantly reduced. These data describe a reduction of the environmental impact that is especially important for national waste management company.

The Tables 3–6 present the data of the comparison according to each day of the week for the selected planning horizon.

Figs. 6–15 show several examples of the routes obtained by the proposed solution approach for the selected planning horizon in comparison with the route planning proposed by the operator company. The figures shows that the proposed route planning have larger routes and lower number of containers collected across La Palma. Nonetheless, the mechanism of selecting the most convenient containers to collect increases the amount of recyclable waste in each collection, increasing the distance traveled by the vehicles.

7. Conclusions and further research

This paper proposes a solution approach to solve a hard waste collection problem in La Palma (Spain). In light of the implementation and results derived from the project, it has to be firstly emphasized that the existing data about the whole waste management process is a major asset, both for waste management and operator companies. In this regard, one of the fundamental advantages associated with data availability is the possibility of evaluating multiple collection strategies. The main objective of evaluating strategies from the data is to select the best options in decision making processes. At the same time, as a consequence of the evaluation processes of alternatives or decision support, new opportunities are opened to focus the activities. In fact, the processes of evaluation of alternatives and optimization of decisions based on a continuous data update allow converting decision making into a process of continuous performance improvement.

As demonstrated in the computational experiments, the availability of data allows to design efficient optimization techniques to solve the optimization problem under analysis. In this regard, we propose a technique based on the general framework of Greedy Randomized Adaptive Search Procedure. It firstly carries out a container selection strategy that obeys the main optimization objective: maximizing the fill level of the collected containers. For this purpose, the containers with the best estimated fill level are selected. Subsequently, an improvement strategy is used to reduce the travel time of the routes, which allows to insert new containers. The selection of containers can be modulated to

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

meet other types of criteria. The most direct effect of the use of these smart strategies is to obtain a cost reduction to achieve equivalent or better performance levels in the selective collection. As a result of the optimization of the collection routes, an improvement in the different environmental indicators is obtained by reducing the operating time, fuel consumption, and emissions produced by the vehicles while the levels of collection are maintained and even improved. As a final result, a higher quality in the service delivery is achieved as the collection is more efficient and effective, and in an indirect way it can meet other criteria without reducing the overall performance.

Moreover, a very relevant aspect of the proposed solution approach is its great adaptability to tackle new optimization criteria and constraints. The technique offers a variety of alternatives that meet the applied criteria and imposed requirements but that differ in other collateral aspects. This allows to make decisions based on relevant characteristics of the proposals that have not been initially imposed. Furthermore, the technique takes advantage of the available information at any time to allow a dynamic behavior adapting his response to the changes that are detected while the collection process occurs. Therefore, the changes in the context that are reflected in the updates of the input data are directly assumed by the solution approach to adapt its proposal. Also, adding new requirements is done automatically by adapting the container selection criteria and the evaluation of the route improvement movements, giving rise to high quality proposals respecting the constraints. At the same time, the particularities of the proposed approach allow its easy and effective integration with other technological tools to take advantage of the dynamic information, and thus quickly provide solutions that can be applied directly. Lastly, this high adaptability of the developed solution approach allows the extrapolation of its good performance to other territories where the requirements and applicable criteria have different characteristics.

On the basis of the contributions presented in this paper, several promising lines are still open for further research. The waste management company provides special service to several social and sporting events in the island throughout the year. These require the deployment and collection of a set of temporary containers aimed at fulfilling the demand generated by the events. The changes in the availability of resources, traffic flows, etc. are still an open problem to be analyzed and solved by the company. Also, the waste management company is interested in reducing the impact of the collection process on the rest of the residents and tourists as well as on helping to other public services. For this reason, it requires to consider time slots to collect certain containers in the middle term. Lastly, the operator company is highly interested on integrating the information about fuel prices and location of fuel station in the design of the collection routes, in such a way that the fuel consumption will be eventually minimized.

Acknowledgements

This work has been partially funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness with FEDER funds (TIN2015-70226-R) and by Fundación CajaCanarias research funds (project 2016TUR19). Airam Expósito-Márquez would like to thank the Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información and the Fondo Social Europeo (FSE) for the financial support he receives through his post-graduate grant.

Appendix A. Notations

\mathcal{G}	Graph
Θ	Set of nodes in G
A	Set of arcs in G
H	Planning horizon, expressed in number of days
E	Set of start and end points
\mathcal{V}	Set of collection vehicles
k	Number of vehicles

m	Number of waste collection points
n	Number of locations
r	Number of start and end locations
$o(v)$	Origin location of vehicle $v \in \mathcal{V}$
$t(v)$	Target location of vehicle $v \in \mathcal{V}$
$l(i)$	Number of containers in the waste collection point $i \in P$
P	Set of waste collection points
P_i	Set of containers in waste collection point i
$P(k)$	Set of waste collection points that can be collected by vehicle $k \in \{1, 2, \dots, K\}$
c_j^i	Container j that belongs to waste collection point $i \in P$
C	Set of containers
$f(c, h)$	Fill level of container $c \in C$ since h days from the last collection
$g(c)$	Fill rate of container $c \in C$
$b(c)$	Fill level of the container $c \in C$ after collected
$f_i(h)$	Fill level of waste collection point $i \in P$ since h days from the last collection
$s(c)$	Collection time of container $c \in C$
s_i	Collection time of the containers found in location $i \in V$
t_{ij}	Travel time between waste collection point i and j
d_{ij}	Distance between waste collection point i and j
W_{kd}	Maximum working time of vehicle $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ in day $d \in \{1, 2, \dots, H\}$
D_{ih}	Set of days in the planning horizon in which the collection point $i \in P$ has been collected before day $h \in \{1, 2, \dots, H\}$
η_{ih}	Number of days since the last collection of the point $i \in P$ in day $h \in \{1, 2, \dots, H\}$
M	Big constant

References

- Al-Salem, S., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (psw): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643.
- Alagöz, A. Z., & Kocasoğlu, G. (2008). Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in Istanbul. *Waste Management*, 28(8), 1461–1471.
- Arribas, C. A., Blazquez, C. A., & Lamas, A. (2010). Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems. *Waste Management & Research*, 28(4), 355–363.
- Bektaş, T., Demir, E., & Laporte, G. (2016). Green vehicle routing. *Green transportation logistics* (pp. 243–265). Springer.
- Bodin, L., Mingozzi, A., Baldacci, R., & Ball, M. (2000). The Rollon-Rolloff vehicle routing problem. *Transportation Science*, 34(3), 271–288.
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80–91.
- Dat, L. Q., Linh, D. T. T., Chou, S.-Y., & Vincent, F. Y. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Systems with Applications*, 39(7), 6380–6387.
- Faccio, M., Persona, A., & Zanin, G. (2011). Waste collection multi objective model with real time traceability data. *Waste Management*, 31(12), 2391–2405.
- Feo, T. A., & Resende, M. G. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6(2), 109–133. <https://doi.org/10.1007/BF01096763>.
- Garvin, B. J., Cohen, M. B., & Dwyer, M. B. (2011). Evaluating improvements to a meta-heuristic search for constrained interaction testing. *Empirical Software Engineering*, 16(1), 61–102.
- Giusti, L. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*, 29(8), 2227–2239.
- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220–232.
- Han, H., & Ponce Cueto, E. (2015). Waste collection vehicle routing problem: Literature review. *Promet-Traffic&Transportation*, 27(4), 345–358.
- Hansmann, R. S., & Zimmermann, U. T. (2009). Integrated vehicle routing and crew scheduling (ivrcs) in waste management part I. *Dagstuhl seminar proceedings 09261 models and algorithms for optimization in logistics*.
- Helsingaun, K. (2000). An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic. *European Journal of Operational Research*, 126(1), 106–130.
- Kaza, S., Yao, L., Perinaz, B.-T., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050.
- Leggieri, V., & Haouari, M. (2017). A practical solution approach for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 97–112.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T., Chung, S. H., & Lam, H. (2014). Survey of green vehicle

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 08/06/2020 01:07:10

José Andrés Moreno Pérez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 02:01:01

Julio Antonio Brito Santana
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 11:26:21

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:53:09

A. Expósito-Márquez, et al.

Computers & Industrial Engineering 137 (2019) 106047

routing problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1118–1138.

López-Sánchez, A., Hernández-Díaz, A. G., Gortázar, F., & Hinojosa, M. A. (2018). A multiobjective grasp-vnd algorithm to solve the waste collection problem. *International Transactions in Operational Research*, 25(2), 545–567.

Lu, W., Chen, X., Ho, D. C., & Wang, H. (2016). Analysis of the construction waste management performance in Hong Kong: The public and private sectors compared using big data. *Journal of Cleaner Production*, 112, 521–531.

Lu, W., Chen, X., Peng, Y., & Shen, L. (2015). Benchmarking construction waste management performance using big data. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 49–58.

Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33(4), 988–1003.

McKinnon, A., Browne, M., Whiteing, A., & Piecyk, M. (2015). *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. Kogan Page Publishers.

Navghane, S., Killedar, M., & Rohokale, D. V. (2016). Iot based smart garbage and waste collection bin. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 5(5), 1576–1578.

Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., & Bräysy, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, 30(2), 223–232.

Poonthallir, G., & Nadarajan, R. (2018). A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (f-gvrp). *Expert Systems with Applications*, 100, 131–144.

Ramos, R. T. P., de Moraes, C. S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2018). The smart waste collection routing problem: Alternative operational management approaches. *Expert Systems with Applications*, 103, 146–158. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417418301404>.

Resende, M. G., & Ribeiro, C. C. (2010). Greedy randomized adaptive search procedures: Advances, hybridizations, and applications. *Handbook of metaheuristics* (pp. 283–319). Springer.

Sahoo, S., Kim, S., Kim, B.-I., Kraas, B., & Popov, A., Jr (2005). Routing optimization for waste management. *Interfaces*, 35(1), 24–36.

Sniezek, J., & Bodin, L. (2006). Using mixed integer programming for solving the capacitated arc routing problem with vehicle/site dependencies with an application to the routing of residential sanitation collection vehicles. *Annals of Operations Research*, 144(1), 33–58.

Sulemana, A., Donkor, E. A., Forkuo, E. K., & Oduro-Kwarteng, S. (2018). Optimal routing of solid waste collection trucks: A review of methods. *Journal of Engineering*, 2018.

Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. d. G. (2009). Optimisation of msw collection routes for minimum fuel consumption using 3d gis modelling. *Waste Management*, 29(3), 1176–1185.

Tirkolaee, E. B., Hosseinabadi, A. A. R., Soltani, M., Sangaiah, A. K., & Wang, J. (2018). A hybrid genetic algorithm for multi-trip green capacitated arc routing problem in the scope of urban services. *Sustainability* (2071–1050), 10(5).

Tung, D. V., & Pinnoi, A. (2000). Vehicle routing–scheduling for waste collection in hanoi. *European Journal of Operational Research*, 125(3), 449–468.

Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2008). Vehicle route optimization for rfid integrated waste collection system. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 7(04), 611–625.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Apéndice C

A fuzzy GRASP for the tourist trip design with clustered POIs

Expósito, A., Mancini, S., Brito, J., and Moreno, J. A. (2019). A fuzzy GRASP for the tourist trip design with clustered POIs. *Expert Systems with Applications*, 127:210 – 227, ISSN 0957-4174. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.03.004>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Contents lists available at ScienceDirect

Expert Systems With Applications

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eswa



A fuzzy GRASP for the tourist trip design with clustered POIs

Airam Expósito^{a,*}, Simona Mancini^b, Julio Brito^a, José A. Moreno^a

^a Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas, Instituto Universitario de Desarrollo Regional, Universidad de La Laguna, Spain
^b Department of Mathematics and Computer Science, University of Cagliari, Italy



ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 September 2018

Revised 3 March 2019

Accepted 3 March 2019

Available online 4 March 2019

Keywords:

Tourist trip design problem

Clustered point of interests

The team orienteering problem with time windows

Fuzzy greedy randomized adaptive search procedure

ABSTRACT

In tourist sector, expert and intelligent systems should perform at least two main tasks or services: point of interest recommendation and route generation. In this regard, the personalized electronic tourist guide, generally implemented on hand-held device, such as mobile applications or in web. These tools must work like an expert and intelligent system that perform the services mentioned above then they should need low computation effort. In this paper we focus on the route generation based on scores of the points of interest and the distance or time between them. We consider a new extension of the Tourist Trip Design Problem, named Tourist Trip Design Problem with Clustered Points of Interest, where points of interest are grouped in clusters representing different types of attraction sites. Moreover, minimum/maximum limits are imposed on the number of points of interest belonging to the each clusters that are visited in the same route. Since it is a novel problem, we generate two sets of instances in order to evaluate the accuracy of our solution approach. A Fuzzy GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), in which both distance based and score based evaluation criteria are used to guide the candidates selection in the construction phase is proposed. The results provided by our heuristic are compared with those obtained by solving the MIP formulation. Computational results carried out on real and real-like instances show the effectiveness and efficiency of the proposed approach and its suitability to be part of a Personalized Electronic Tourist Guide in hand-held devices.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The Tourists visiting a touristic area, for one or several days, face the problem of selecting which points of interest (POIs) to visit and to design a route for each trip day. Before the tourist arrive to destination they have to spend time in compile information about POIs in destination in order to planning visits in the staying days. They have to consider the POIs to visit, their visit time, traveling times between POIs, and other information to planning their touristic route for each day of staying. This issue that taking into account the preferences of the tourist and several information about POIs is a time-consuming task.

In tourism industry the application of expert and intelligent systems play an important role in tourist satisfaction (Kabassi, 2010). Expert and intelligent systems are one of the prominent research domains of Artificial Intelligence and they are specially applicable to tourism services. Broadly, this systems include two main services; recommendation of point of interest and route generation. In tourist services, the Personalized Elec-

tronic Tourist Guides (PETs) is an integrated solution that performs two services discussed above on a hand-held device. An extensive review of PETs can be found in Vansteenwegen (2008a) and Souffriau (2010).

In this paper we focus on the task of route generation combining heuristic solution approach and a new problem of tourist routes. The planning of tourist routes is a challenging quest involving a number of issues such as visiting time required for each POI, POI's opening time windows, traveling distance among POIs and time available for sightseeing for each day. Each POI is associated to a score, which represent its level of attractiveness and touristic interest. The basic version of the Tourist Trip Design Problem (TTDP) has been modeled in the literature as a Team Orienteering Problem with Time Windows (TOPTW) (Gavalas, Konstantopoulos, Mastakas, & Pantziou, 2014). However, real applications involve further several issues therefore to provide a more realistic representation of the reality, additional constraints need to be addressed. In this paper, we present the Tourist Trip Design Problem with Clustered POIs (TTDP-Clu), in which we consider that the set of POIs are clustered by categories representing different types of visiting sites (museum, amusement park, beach, restaurant, etc.). The goal is to define a set of feasible routes, one for each day of staying, that maximize the total score collected. The routes must start and end

* Corresponding author.

E-mail addresses: aexposim@ull.edu.es (A. Expósito), simona.mancini@unica.it (S. Mancini), jbrito@ull.edu.es (J. Brito), jamoreno@ull.edu.es (J.A. Moreno).

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.03.004>

0957-4174/© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

at a given starting point (which represent the hotel) and the duration of each route, (computed considering both travel, visit and waiting times) cannot exceed a maximum value. In addition, for each category the number of POIs that can be visited on a single day may be bounded or even fixed. For instance, for the category of restaurants for lunch the number of visits for each route must be exactly one, while for other categories we can have only one side limits.

Due to the computational complexity of TTDP we propose a metaheuristic approach for solve the aforementioned problem. Specifically we propose a fuzzy version of standard GRASP metaheuristic. The fuzzy GRASP proposed differs from standard GRASP for consider a fuzzy set of promising POIs to be include in the solution. The proposed metaheuristic is compared with the results obtained by solving the MIP formulation of the proposed problem.

The remainder of the present paper is organized as follows. Section 2 reviews the main models of the TTDP and their applications in the literature. Sections 3 and 4 is dedicated to the presentation of the problem formulation and associated objectives. A Fuzzy Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (Fuzzy GRASP) metaheuristic for the resolution of the proposed problem is introduced in Section 5. The computational experiments are discussed and analyzed in Sections 6 and 7. Finally, the main conclusions and several lines for further research are provided in Section 8.

2. Literature review

The TTDP has becoming an interesting topic of research in the last years (Vansteenkeweg & Van Oudheusden, 2007). Tourists requests and expectations have become higher than in the past. This information is used to plan their trip in details in order to exploit their time in the most productive way visiting the most interesting visiting sites. Travel agencies generally propose thematic predefined routes but tourists would like to construct their suited ad-hoc itinerary taking into account their own preferences and interests. A trip that seems to be interesting for somebody cannot be satisfactory for other tourists. Moreover, in order to properly enjoy a site, a minimum visit time is requested. For instance, it is not satisfactory to visit the Louvre in Paris for just half an hour since several hours are necessary to actually appreciate the museum in its totality. The TTDP belongs to the category of Vehicle Routing Problems (VRPs) with Profit, i.e. particular version of the VRP in which each node is associated with a profit and in which it is not mandatory to visit all nodes. For a complete survey on VRPs with Profit we refer the reader to Archetti, Speranza, and Vigo (2014). Problems belonging to this family may be grouped in three distinct categories. The first category is one known as Capacitated Profitable Tour Problems (CPTPs) presented for the first time in Tang and Wang (2006). CPTPs aim at maximizing the difference between collected profit and travel costs. The second one, the Prize-Collecting VRPs (PCVRPs) introduced by Archetti, Feillet, Hertz, and Speranza (2009), aims to minimize the total travel costs guaranteeing a collected profit higher than a prefixed threshold. The last category and the most addressed in the literature is known as Team Orienteering Problems (TOPs) (Chao, Golden, & Wasil, 1996). The objective of TOPs consists of maximizing the collected profit respecting a maximum travel time (or travel cost) for each route. The TTDP can be described as an extension of the TOP, therefore the following literature review is focused on the third category of problems. Several exact and heuristic solution methods have been proposed to address the TOP. Two exact approaches based on Column Generation have been proposed in Butt and Ryan (1999) and Boussier, Feillet, and Gendreau (2007). An approximated method has been presented in Blum et al. (2007). The first greedy algorithm has been proposed

in Butt and Cavalier (1994). More recently, several metaheuristics have been presented in the literature: Tabu Search (Archetti, Hertz, & Speranza, 2007; Tang & Miller-Hooks, 2005), Memetic Algorithms (Bouly, Dang, & Moukrim, 2010) and Particle Swarm Optimization (Muthuswamy & Lam, 2011). The current state-of-the-art method in terms of computational efficiency and effectiveness is the Large Neighborhood Search (Vidal, Maculan, Ochi, & Vaz Penna, 2015).

The TOPTW is an extension of the TOP where nodes can be visited only within a specific Time Window. This problem is more suitable to describe TTDP in which, typically, POIs are characterized by an opening time window. Due to the complexity of the problem, the greatest part of papers on this subject deal with heuristic algorithms. A Local Search algorithm has been presented in Labadi, Mansini, Melechovsky, and Wolfler Calvo (2012), while Lin and Yu (2012) proposes a Simulated Annealing and a GRASP hybridized with evolutionary algorithms. The current state-of-the-art algorithm is the Iterated Local Search designed by Vansteenkeweg, Souffriau, Vanden Berghe, and Van Oudheusden (2009). A Multiple Time Windows extension has been addressed in Tricoire, Romauch, Doerner, and Hartl (2010).

In Garcia, Linaza, Arbelaitz, and Vansteenkeweg (2009), a Time Dependent version of the TOPTW (TDTOPTW) has been presented. This problem better describes TTDPs in which travel times between locations may sensibly vary during the day due to traffic congestion or to public service frequency changes (Garcia, Vansteenkeweg, Arbelaitz, Souffriau, & Linaza, 2013). A real touristic application with data coming from the city of Athens in Greece has been presented in Gavalas, Konstantopoulos, Mastakas, Pantziou, and Vathis (2015).

Further extensions of the TOP have been studied in the literature such as the Capacitated Team Orienteering Problem (CTOP). In CTOP each node is associated with a profit as well as a weight, and to each vehicle is associated a maximum weight to be carried (Archetti et al., 2009). Although this problem is worthing of interest, this is not suitable for tourist trip design problem. This problem is more adapted to describe application in freight delivery, door-to-door selling and waste collection.

From a tourist trip design perspective, the most interesting extension is the Multi-Constrained Team Orienteering Problem with Time Windows (MCTOPTW) introduced in Sylejmani, Dorn, and Musliu (2012). In MCTOPTW each POI is associated with a score for different categories (like: touristic interest, cost, etc.). Additionally, for each route, the total score collected in each category must not exceed a given maximum value specific for the category. The problem has been solved by a Tabu Search. A further extension of the MCTOPTW that considers multiple time windows has been presented in Souffriau, Vansteenkeweg, Vanden Berghe, and Van Oudheusden (2013).

In recent years, many real applications of TTDP tools have been addressed (Vansteenkeweg, 2008b). Different personalized electronic tour guides (PETs) have been proposed. The first one is described in Garcia, Linaza, and Arbelaitz (2012), while in Gavalas, Kenteris, Konstantopoulos, and Pantziou (2012) a guide dealing with single-day tours (DAILYtrip) has been proposed. A web application termed City Trip Planner presented in Vansteenkeweg, Souffriau, Vanden Berghe, and Van Oudheusden (2011) is able to provide itineraries for a multi-day trip. The application is currently working with real data coming from 5 cities in Belgium.

Migliorini, Carra, and Belussi (2018) developed a tourist trip recommendation system in which the focus is to exploit real-time information about crowding at POIs, with a consequent potential increment of visiting time due to queuing phenomena. Nevertheless, their approach shows some differences respect to ours. They focus on a single trip, while we provide a multi-days planning.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Their goal is mainly to maximize the number of visited POIs discarding that some of them may be more interesting to be visited respect to others. Moreover, they are not making difference between categories of POIs, therefore their system is less customizable, since it does not take into account users preferences on category of POIs to be visited (museums, beaches, amusement parks).

3. Problem description

In this section we report a detailed description of the TTDP-Clu. To each POI i is associated a score or profit p_i , a visit time v_i , an opening time window $[e_i, l_i]$ and the category, c , to which it belongs. The index $i = 0$ denotes the starting and ending point that usually corresponds to the hotel, apartment or other kind of accommodation of the tourist. This point and the POIs are considered as the vertices or nodes of a connected graph. Each POI can be included in at most one route. The sets of POIs of each category $c \in C$ constitute a partition of the set of POIs I . The minimum and maximum number of visited POIs of category c is bounded by given values N_c^{\min} and N_c^{\max} . The number of visits to a given cluster can be fixed by using equal bounds $N_c^{\min} = N_c^{\max}$. We can also model one side limits by choosing N_c^{\min} to 0 or N_c^{\max} to the number of POIs of category c .

For each pair of nodes, i and j , is known the travel time t_{ij} . The graph is directed, i.e. t_{ij} may be different from t_{ji} . The total score is given by the sum of the score or profit p_i of all the visited POIs i . The total time of each route cannot exceed T_{\max} . This time is computed as the sum of the corresponding travel times plus the visit times of the POIs included in the route.

The number of routes to be constructed is fixed and known in advance.

4. Mathematical formulation

The TTDP-Clu can be formulated as a Mixed-Integer Programming (MIP) as follows. Let us first define the following sets, parameters and variables.

Sets:

- C set of categories
- K set of routes
- I set of POIs
- I^c set of POIs belonging to category c
- I^0 set of nodes ($I = I^0 \setminus \{0\}$)

Parameters:

- p_i POI i score or profit, $\forall i \in I$
- t_{ij} travel time between point i and j , $\forall i, j \in I^0$
- v_i visit time for POI i , $\forall i \in I$
- T_{\max} maximum route duration, $\forall k \in K$
- $[e_i, l_i]$ opening time windows for POI i , $\forall i \in I$
- N_c^{\min} minimum number of POIs belonging to cluster c to be included in each route, $\forall c \in C$
- N_c^{\max} maximum number of POIs belonging to cluster c to be included in each route, $\forall c \in C$

Variables:

- X_{ij}^k binary variable; $X_{ij}^k = 1$ if route k goes from i to j , $X_{ij}^k = 0$ otherwise, $\forall i \neq j \in I^0, k \in K$
- Y_i^k binary variable; $Y_i^k = 1$ if POI i is included in route k , $Y_i^k = 0$ otherwise, $\forall i \in I, k \in K$
- T_i nonnegative variable; T_i is the start time of the visit to POI i , $\forall i \in I$

The starting time of the trips T_0 is arbitrary set equal to 0 as well as its visit time v_0 . The TTDP with Clustered POIs is the problem:

• Maximize:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} p_i Y_i^k \quad (1)$$

• subject to:

$$\sum_{j \in I^0} X_{0j}^k = \sum_{j \in I^0} X_{j0}^k = 1 \quad k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in I^0} X_{ij}^k = \sum_{j \in I^0} X_{ji}^k \quad i \in I, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in I^0} X_{ij}^k \leq Y_i^k \quad i \in I, k \in K \quad (4)$$

$$T_j \geq T_i + v_i + t_{ij} - M(1 - \sum_{k \in K} X_{ij}^k) \quad i \in I^0, j \in I \quad (5)$$

$$T_i + v_i + t_{i0} \leq T_{\max} \quad i \in I \quad (6)$$

$$e_i \leq T_i \leq l_i - v_i \quad i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} Y_i^k \leq 1 \quad i \in I \quad (8)$$

$$N_c^{\min} \leq \sum_{i \in I^c} Y_i^k \leq N_c^{\max} \quad k \in K, c \in C \quad (9)$$

$$X_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad i, j \in I^0, k \in K \quad (10)$$

$$Y_i^k \in \{0, 1\} \quad i \in I, k \in K \quad (11)$$

$$T_i \geq 0 \quad i \in I^0 \quad (12)$$

A solution of the problem consisting of the $m = |K|$ routes is identified by the variables $X_{ij}^k, i, j \in I^0, k \in K$. Then the variables Y_i^k that identify the POIs visited for each routed can be obtained by $Y_i^k = \sum_{j \in I^0} X_{ij}^k$. The objective function concerns the maximization of the collected profit and is reported in (1).

To ensure that the routes constitutes a feasible solution we need to get values for the variables $T_i, i \in I$ that satisfy the above constraints. Constraints (2) state the start and end of each route at point 0 (the hotel or accommodation). Constraint 3 guarantee the route continuity by ensuring that if a vehicle arrives at a POI then it will also depart from it; and conversely. Constraints (4) impose that a POI can be visited by a route only if this POI has been assigned to that route. Constraints (5) relates the arrival time of two consecutive POIs i and j , while constraints (6) guarantee that the maximum route duration is respected by all routes. M is a constant large enough to make constraints (5) not binding when POI j is not visited just after POI i . We set constant M to T_{\max} . In this way whenever the term $(1 - \sum_{k \in K} X_{ij}^k)$ is equal to 1, i.e. when j is not visited immediately after i , the constraint becomes not binding. Constraints (7) guarantee that time windows are respected. Each POI can be assigned to at most one route, as stated by constraints (8). Constraints (9) impose that, for each cluster c , the number of POIs are visited in each route is between N_c^{\min} and N_c^{\max} . Finally, constraints (10)–(12) specify the variables domains.

A feasible solution is given by the assignment of values for all the variables X_{ij}^k, Y_i^k and T_i that satisfies all these constraints. However, a solution consisting of $m = |K|$ routes given by the assignment of values for the variables X_{ij}^k can be not feasible due to

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

the combination of the time windows constraints and cluster minimum constraints (7) and (9).

Given $m = |K|$ the number of routes and $n = |I|$ the number of POIs, this model has $n^2 + 2nm + 5n + 2m + |C|$ constraints and $n^2 + nm + n + 2$ variables.

5. Solution approach

In order to return high quality solutions for the defined optimization problem, a Fuzzy GRASP has been used. The standard GRASP is a two-phase metaheuristic, consisting of a construction phase and a local search improvement phase (Resende & Ribeiro, 2016). It is executed a number of *maxIterations* times in a multistart strategy and the best solution found is kept. The standard GRASP construction phase provides a feasible solution by iteratively randomly selecting a new POI from a Restricted Candidate List (RCL) with size given by the parameter *RCLsize*. Subsequently, the neighborhood of the solution is explored until a local maximum is found in the local search phase. The pseudo-code shown in Algorithm 1 illustrates the main phases of a standard GRASP pro-

Algorithm 1 Pseudocode of a GRASP.

```

1: function GRASP(maxIterations, RCLsize)
2: readInput()
3: for i:=1 to maxIterations do
4:   solution = GRASPConstructionPhase(RCLsize)
5:   solution = localSearch(solution)
6:   updateSolution(solution, bestSolution)
7: end for
8: return bestSolution
9: end GRASP

```

cedure where *maxIterations* is the number of iterations and *RCLsize* is the size of the Restricted Candidate List used in the constructive phase.

Algorithm 1 first reads the input data (line 2). For *maxIterations* times the GRASP constructive procedure obtains a new solution that is stored in variable *solution* (line 4). Then this solution is improved by the local search procedure *localSearch* (line 5). If the solution is better than the best solution found so far and stored in variable *bestSolution* then it is updated by procedure *updateSolution* (line 6). Once the *maxIterations* iterations are completed, Algorithm 1 returns the best solution obtained and stored in variable *bestSolution* (line 8).

The detailed pseudo-code of the construction phase of the standard GRASP procedure designed for the TTDP-Clu is shown in Algorithm 2. The algorithm starts with an initial solution consisting of $m = |K|$ routes with the necessary POIs visited to satisfy the N_{min}^c constraints. This initial solution is returned by Algorithm 3 that start with an initial solution consisting of $m = |K|$ empty routes. In order to initialize the solution *partialSolution*, Algorithm 3 follows several steps similar to those described below for the Algorithm 2. If the Restricted Candidate List becomes empty during the construction phase it fails to provide a feasible solution and a new iteration must be performed.

In the steps below of the construction phase, the solution construction mechanism builds a solution step-by-step by adding a new POI to the current partial solution under construction without destroying feasibility.

Each position to insert POI j is given by a triplet (j, i, k) where $Y_i^k = 1$. This insertion consists in visiting POI j just after i in partial route k ; i.e., between POI i and the next point h in this route. This insertion is termed feasible if the resulting solution satisfy the time windows and time limit constraints. Each new POI j ($Y_j^k = 0, \forall k$) is always inserted in the best feasible position of a partial route;

Algorithm 2 Pseudocode of the Construction Phase of the standard GRASP for the TTDP with Clustered POIs.

```

1: function GRASPConstructionPhase(RCLsize)
2: Initialize partialSolution = minClusterConstructive(RCLsize)
3: while (it is possible to visit new POIs) do
4:   CL = ∅
5:   for all POI j ∈ I do
6:     Find the best feasible triplet (j, i, k) to insert this new POI j in partialSolution according to greedy time function f(j, i, k)
7:     Add the feasible triplets (j, i, k) to the Candidate List CL
8:   end for
9:   Create the Restricted Candidate List, RCL, with the best RCLsize triplets (j, i, k) from CL according to f
10:  Select a random triplet (j, i, k) from RCL
11:  Update the variables of route k by inserting the POI j at position i
12: end while
13: return partialSolution
14: end GRASPConstructionPhase

```

Algorithm 3 Pseudocode of the constructive algorithm for minimum cluster constraints.

```

1: function minClusterConstructive(RCLsize)
2: Initialize the partialSolution with m empty routes
3: Create set P = {all POI j ∈ I, with N_{min}^c ≠ 0} of POIs
4: while ((it is possible to visit new POIs) and (N_{min}^c constraints are not satisfied)) do
5:   CL = ∅
6:   for all POI j ∈ P do
7:     Find the best feasible triplet (j, i, k) to insert this new POI j in partialSolution according to greedy time function f(j, i, k)
8:     Add the feasible triplets (j, i, k) to the Candidate List CL
9:   end for
10:  Create the Restricted Candidate List, RCL, with the best RCLsize triplets (j, i, k) from CL according to f
11:  Select a random triplet (j, i, k) from RCL
12:  Update the variables of route k by inserting the POI j at position i
13: end while
14: return partialSolution
15: end minClusterConstructive

```

i.e., that feasible position with the lowest increasing of the route duration. It is important to note that the first and the last nodes of each route are fixed and coincide with the hotel. Therefore the new POI j can never be inserted as first or last position in a route. The new solution is obtained by first setting the decision variables Y_j^k, X_{ij}^k and X_{jh}^k to 1, and then, for the only index h such that X_{jh}^k is 1, this variable X_{jh}^k is set to 0. Therefore, the start time of the visit for this new POI j is computed by $T_j = \max\{e_j, T_i + v_i + t_{ij}\}$. The starting times of the route are computed iteratively using this formula, replacing i by j and j by its next point, until j becomes the end point ($j = 0$). The feasibility is tested by the corresponding time limit constraints (6) for this route and by the time window constraints (7) of the inserted POIs and the next ones. The triplets are evaluated by a greedy time function f that computes the increment of the route travel time due to the corresponding insertion.

Most of the times, the value of this function is given by $f(j, i, k) = t_{ij} + v_j + w_j + t_{jh} - t_{ih}$ for the above index h , where w_j is the waiting time for visiting time windows opening at point j . This waiting time is equal 0 if $T_i + t_{ij} \geq e_j$ while $w_j = e_j - T_i + t_{ij}$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

otherwise. However it also depends on the waiting times of the remainder POIs of this route.

The standard GRASP metaheuristic uses the greedy function f to construct a RCL with the POIs to be inserted in the solution. The standard GRASP builds the RCL by selecting $RCLsize$ feasible insertion triplets (j, i, k) with best values for the greedy function f . This work proposes a fuzzy extension of this standard GRASP by considering the only the fuzzy set of good POIs to insert in the triplets of RCL. This fuzzy set is based on the scores or profits of the POIs (Moreno-Pérez & Moreno-Vega, 2003). Let the membership function $\mu(\cdot)$ of this set be stated by $\mu(j) = p_j/p_{max}$, where p_j is the score associated with POI j and p_{max} is the highest score of all POIs that are in the RCL. Then the set RCL^* of the best POIs in RCL is constructed by the α -cut of RCL associated with $\mu(\cdot)$, with $\alpha \in [0, 1]$.

$$RCL^* = \{(j, i, k) \in RCL : \mu(p_j) \geq \alpha\}$$

The new POI that is inserted in the current partial solution is chosen at random from RCL^* instead of from RCL. The parameter α is fixed by the decision maker in order to state the relative quality requirements of the POIs, maximizing the score, to be inserted in the partial solution.

The proposed pseudocode of the Fuzzy GRASP construction phase is shown in Algorithm 4. The Algorithm 3 is modified in the

Algorithm 4 Pseudocode of the Construction Phase of the Fuzzy GRASP for the TTDP with Clustered POIs.

```

1: function GRASPFuzzyConstructionPhase(RCLsize,  $\alpha$ )
2: Initialize partialSolution = minClusterFuzzyConstructive(RCLsize)
3: while (it is possible to visit new POIs) do
4:   CL =  $\emptyset$ 
5:   for all POI  $j \in I$  do
6:     Find the best position  $i$  to insert  $j$  in a partial route  $k$ 
       of the partialSolution according to greedy time function
        $f(j, i, k)$ 
7:     Add the feasible triplets  $(j, i, k)$  to the Candidate List CL
8:   end for
9:   Create the Restricted Candidate List, RCL, with the RCLsize
       triplets  $(j, i, k)$  from the top CL
10:  Get  $RCL^* = \{(j, i, k) \in RCL : \mu(p_j) \geq \alpha\}$ 
11:  Select a random triplet  $(j, i, k)$  from  $RCL^*$ 
12:  Update the variables of route  $k$  by inserting the POI  $j$  at po-
       sition  $i$ 
13: end while
14: return partialSolution
15: end GRASPFuzzyConstructionPhase
    
```

same way.

In essence, the candidate list is generated from the selection of the best insertion position of every new POI in a partial route. This position is determined by their evaluation according to a greedy evaluation function that computes the increase in time by the incorporation of the POI into the route. The procedure locates the best position in which to insert a candidate POI for all routes, minimizing the resulting total time after the insertion. The list of candidates is sorted in ascending order according to this increase so that the candidates with the lowest increase are placed at the top of the candidate list. The RCL is generated by limiting the candidate list size to $RCLsize$. In the next step, RCL^* is obtained as the α -cut that considers the POIs with best scores. The value of α is selected by the decision maker. As may be seen, the procedure combines the criterion of minimizing travel times in RCL construction and maximizing score in RCL^* construction. Through this procedure, RCL^* is formed by the best POIs in travel time and score. Therefore, the incorporations of POIs to the current partial solution

are among those with the smallest incremental travel time and the highest score. Next, a POI is randomly selected from RCL^* and it is incorporated into the partial solution. Thus this POI is excluded for future candidate lists and incremental travel times of the insertion of other POIs are re-evaluated. The construction phase ends with a feasible solution.

Regarding the different values that $RCLsize$ can take, we have selected the following reasonable set of values {3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}. These values are analyzed in Section 6 as part of the tuning parameter of the algorithm. The influence of the $RCLsize$ values is evaluated using nonparametric statistical tests. In advance, in terms of computational times and accuracy of the solutions, the statistical tests result do not indicate large differences between the $RCLsize$ values for the different kinds of instances used. These data can be seen in detail in Section 6.

On the other hand, the values of α that we use in the computational experiments are {0.2, 0.4, 0.6, 0.8}. The evaluation of values influence on the performance of the Fuzzy GRASP are assessment as part of the tuning parameter in Section 6. As a preview of the tuning parameter, the statistical tests result that values {0.2, 0.4} have significantly best performance. The detail information is available in Section 6.

After the construction phase a local search phase is applied to improve the solution. Usually a local search algorithm works interactively by replacing the current solution with a better solution obtained in the neighborhood. The procedure ends when no better solution is found in the neighborhood. Algorithm 5 shows a basic

Algorithm 5 Fuzzy GRASP improvement phase.

```

1: function localSearch(solution)
2:  $s = solution$ 
3: repeat
4:   Find the best neighbor  $n$  of current solution  $s$  according the
       total time
5:   if (TotalTime( $n$ )  $\leq$  TotalTime( $s$ )) then
6:      $s = n$ 
7:   end if
8: until TotalTime( $n$ )  $\geq$  TotalTime( $s$ ) for all neighbor  $n$ 
9: return  $s$ 
10: end localSearch
    
```

local search algorithm. Our local search uses exchange movements between POIs of different routes in order to reduce the total time. This neighborhood search uses a best-improving strategy, all neighbors are explored and the current solution is replaced by the best neighbor. If the first steps in the local search are able to reduce the route travel time, then the local search tries to insert a new POI in the solution in order to maximize the total score.

In general terms, the Fuzzy GRASP try to maximize the total score of the solution. This two-phase process is iterated, continuing until the user termination is met. The main novelty of the Fuzzy GRASP approach respect to a standard GRASP is that two criteria are taken into consideration to construct the RCL, the insertion cost (computed as increment of time) and the increment of profit. Standard GRASP generally use only one evaluation criteria which is related solely to the insertion cost. This approach works well on VRPs but yields to poor quality solutions for VRPs with Profit, since it tends to insert nearest nodes even if they have small scores while discarding farther nodes with very high scores. On the contrary, the Fuzzy GRASP is well suited to deal with these kind of problems.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

6. Computational experiments

The computational experiments carried out in our study are described in this section. The aim of the experiments is to evaluate the accuracy of the Fuzzy GRASP metaheuristic proposed to solve the newly introduced TTDP-Clu. Since this is the first time that a solution procedure is proposed for this problem, the results provided by our heuristic are compared with those obtained by solving the MIP formulation. Prior to the aforementioned computational experiments, a parameter analysis was performed to determine the combinations of parameters values with better performance in Fuzzy GRASP, and a comparative experimentation of Fuzzy GRASP performance with other metaheuristics of the literature for the TOPTW was carried out.

For this purpose, we generate two sets of instances: (a) the first set of instances contains 30 small instances with 30 POIs, and (b) the second set of instances consists of 72 large instances with 100 POIs.

The POIs belonging the small instances are taken from real data related to touristic attractions in the island of Tenerife in Spain. Travel times are computed on a real road network. We consider a set 30 POIs clustered into 4 different categories. For each POI the visiting time and the opening time windows are taken from real data and they are fixed for all the instances. The number of routes to be designed varies from 1 to 5 ($m = |K| \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$) and the maximum route duration is 5, 7.5 or 10 h ($T_{\max} \in \{300, 450, 600\}$). For each combination of m and T_{\max} we generate two instances, one, named *flexible* in which the minimum/maximum number of POIs to be selected for each category are not strictly binding, and one, named *tight* in which the value of N_{\min} and N_{\max} are tighter, and in at least one case, $N_{\min} = N_{\max}$, for a total of 30 small instances.

The benchmark of large instances generated is based on the geographical data of instances set introduced by Montemanni and Gambardella (2009) for standard TOPTW. Regarding the geographical data, there are three kind of instances: instances with clustered customers (C), instances with random customers (R) and a mixture of random and clustered customers (RC). An specific instance has been randomly selected from each of these three geographical data sets, namely the instances r205, c201, and rc207. All these instances have 100 customers that are the POIs of the generated instances. Based on the geographical data of these instances, several new instances have been generated according to different combinations of parameters described below.

Several parameters of the TTDP-Clu such as number of categories, earliest and latest time of the time windows, visit times, minimum and maximum number of visited POIs of a certain category, and maximum time per route must be set in order to generate a new instance. The process of generating instances considers 4, 6, or 8 categories. The data relating to time windows, visit times, and minimum and maximum number of visited POIs of a certain category was defined based on the specific category. In addition and related to N_{\min} and N_{\max} , two kind of instances was generated; *flexible* instances in which the minimum/maximum number of POIs to be selected for each category are not strictly binding, and *tight* instances in which the value of N_{\min} and N_{\max} are tighter. Tables 1 and 2 show the specification data of the generated instances for each category.

The maximum time of each route is based on the maximum time of the original selected instances of Montemanni and Gambardella, nevertheless, four instances have been generated by reducing the original maximum time T_{\max} . Specifically, the maximum times used are: T_{\max} , $T_{\max} - \Delta$, $T_{\max} - 2\Delta$, and $T_{\max} - 3\Delta$ where $\Delta = (8.5 * 720/100)$. The distribution of the POIs in the categories is random. However, we ensure that, for each category c , at least

Table 1
Categories features for large instances.

Category	e_i	l_i	v_i
Restaurant	12 – 13	14 – 16	30' – 1h30'
Beach	8 – 9	18 – 20	1h – 2h
Museum	9 – 10	16 – 20	1h – 3h
Cultural Events	0	20	strict time
Green Zones	8 – 9	18 – 20	30' – 2h
Amusement Parks	9 – 11	18 – 20	2h – 3h
Shops	9 – 10	19 – 20	1h – 3h
Historical Sites	8 – 9	18 – 20	30' – 1h

Table 2
 N_{\min} & N_{\max} values for categories for large instances.

Category	Tight		Flexible	
	N_{\min}	N_{\max}	N_{\min}	N_{\max}
Restaurant	1	1	0	1
Beach	0	2	0	3
Museum	1	3	1	4
Cultural Events	0	1	0	2
Green Zones	1	1	0	4
Amusement Parks	0	1	0	2
Shops	0	2	1	4
Historical Sites	1	2	1	4

Table 3
Parameter values used in parameter setting of the Fuzzy GRASP.

Parameter	Values
Size of RCL	$RCLsize \in \{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$
Candidate selections	$S \in \{ \text{Random, Fuzzy better, Fuzzy } \alpha\text{-cut } 0.2, \text{ Fuzzy } \alpha\text{-cut } 0.4, \text{ Fuzzy } \alpha\text{-cut } 0.6, \text{ Fuzzy } \alpha\text{-cut } 0.8 \}$

$m \times N_c^{\min}$ points are generated, in order to ensure the feasibility of the instance.

Considering the use of 3 instances layout (random, clustered and random and clustered), 3 numbers of categories, (4, 6 and 8), 2 levels of tightness and 4 different maximum times, a total of 72 different instances are obtained. The number of routes is fixed equal to 3 for all the instances.

6.1. Parameter setting

Multitude of heuristic approaches have been designed to tackle optimization problems. Usually, this heuristic approaches have several parameters whose values could affect the heuristic performance. In this regard, the process of finding the best combination of parameter values of a given heuristic is termed as parameter tuning.

Accordingly, the first step of the computational experiments is to determine the best combination of parameters values for the proposed Fuzzy GRASP. Consequently it is necessary to state the parameters of the Fuzzy GRASP whose values are to be determined and the candidate parameter values. In Birattari (2009), this is the definition of factors (parameters) and treatments (parameter values).

We consider two factor for the parameter tuning of the Fuzzy GRASP:

1. The size $RCLsize$ of the Fuzzy GRASP restricted candidate list
2. The type of candidate selection S in RCL.

Table 3 shows the factors and treatments to assess during the Fuzzy GRASP parameter setting.

Regarding to the parameter of the candidate selection S , this work presents a Fuzzy GRASP that constructs the set RCL^* by the α -cut of RCL associated with $\mu(\cdot)$, with $\alpha \in [0, 1]$. However, in the parameter setting we have included the candidate selection of

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Table 4
 Results of the Friedman test.

	S	RCLsize
Small instances	{Fuzzy better, Fuzzy α -cut 0.2, Fuzzy α -cut 0.4}	{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}
Large instances	{Fuzzy better, Fuzzy α -cut 0.2, Fuzzy α -cut 0.4}	{5, 6, 7, 8, 9, 10}

the standard GRASP termed *Random* in Table 3, and the candidate selection termed *Fuzzy better* where the candidate selected is the one with the highest membership function $\mu(p_i)$ value.

Two different strategies for parameter setting are proposed in Talbi (2009). The first strategy, termed offline strategy, sets the parameter values before starting the algorithm execution. Alternatively, the online strategy fits the parameter values during the algorithm execution. We use an offline strategy that was performed to get the best combination of parameter values. The Fuzzy GRASP was run with all combinations of parameter values listed in Table 3.

The evaluation of parameter influence on the performance of algorithms can be evaluated using statistical tests. Generally, statistical tests can be categorized as parametric and nonparametric tests. Nevertheless, in this work we analyze data of stochastic algorithm for which parametric tests are not entirely valid (Derrac, García, Molina, & Herrera, 2011). Accordingly, in this paper we use Friedman nonparametric statistical test (Friedman, 1937). The aim is analyze differences in the performance of Fuzzy GRASP with the parameter values used in the computational experiments.

The first step to developing the parameter setting is the division of the instances set into a training subset and a test subset. The purpose of the division of the instances set is to avoid parameter overfitting with regards to the instances. That is why we randomly select 80% of the instances for training and 20% for testing. The Friedman test was applied to the results of the Fuzzy GRASP with corresponding parameter values described in Table 3. Target values

were obtained by running Fuzzy GRASP 10 times for each of the randomly selected instances. A value of $\alpha = 0.05$ has been established for the significance level of the statistical test. The results indicate that there are statistically significant differences among the combinations of parameter values.

Table 4 shows the selected combinations of parameters values with the significantly best performance for Fuzzy GRASP with large and small instances.

6.2. Literature comparison

In order to evaluate the performance of the Fuzzy GRASP approach, this is compared with other heuristics of the state of the art for the TOPTW. The instances presented in Montemanni and Gambardella (2009) and Vansteenwegen et al. (2009) are used for the comparison. Specifically, the scores obtained by our solution approach is compared to ACO (Ant Colony Optimization) heuristic of Montemanni and Gambardella (2009), ILS (Iterated Local Search) heuristic of Vansteenwegen et al. (2009), and VNS (Variable Neighborhood Search) of Tricoire et al. (2010).

Our algorithm is designed for the TTDP-Clu that is a version of the TOPTW with new constraints. Therefore it is expected that the performance of this algorithm does not improve the results obtained with the best heuristic for the TOPTW. However, the results show that it is quite near to the best heuristics from the recent literature for this problem.

The Tables 5–11 compare the scores. Column one denotes the instance name. Column two is the best known solution obtained by the three heuristics with which we compare the Fuzzy GRASP. The third and fourth columns are the average score and computational time obtained by the ACO. The fifth and sixth columns present the score obtained by the ILS and its computational time. The seventh and eighth columns present the average score and computational time obtained by the VNS. The ninth and tenth columns present the best score obtained by the Fuzzy GRASP and its computational time. The computational times are measured in seconds. The re-

Table 5
 Comparison of heuristics for 1 route.

ID	BKS	ACO	T(s)	ILS	T(s)	VNS	T(s)	Fuzzy GRASP	T(s)
c101	320	320.0	0.5	320.0	72.2	320.0	72.2	320	0.2
c102	360	360.0	0.7	360.0	102.2	360.0	102.2	360	1.1
c103	400	400.0	16.9	390.0	106.2	398.0	106.2	390	1.7
c104	420	420.0	33.5	400.0	124.3	418.0	124.3	400	83.0
c105	340	340.0	0.9	340.0	87.1	340.0	87.1	340	0.1
c106	340	340.0	1.0	340.0	86.7	340.0	86.7	340	0.1
c107	370	370.0	2.1	360.0	88.7	370.0	88.7	370	4.6
c108	370	370.0	0.8	370.0	99.3	370.0	99.3	370	0.2
c109	380	380.0	0.8	380.0	118.7	380.0	118.7	380	0.2
r101	198	198.0	0.1	182.0	49.9	198.0	49.9	198	51.0
r102	286	286.0	11.1	286.0	77.9	285.2	77.9	286	47.0
r103	293	292.6	640.6	286.0	90.2	293.0	90.2	293	70.0
r104	303	303.0	164.0	297.0	95.9	303.0	95.9	303	39.0
r105	247	247.0	3.0	247.0	85.4	247.0	85.4	247	95.0
r106	293	293.0	86.3	293.0	89.6	292.2	89.6	293	36.0
r107	299	294.6	922.6	288.0	105.5	299.0	105.5	296	2.7
r108	308	306.0	696.1	297.0	119.1	308.0	119.1	308	359.0
r109	277	277.0	28.0	276.0	77.4	277.0	77.4	277	72.0
r110	284	283.2	617.6	281.0	86.0	284.0	86.0	281	53.0
r111	297	296.6	484.4	295.0	95.4	297.0	95.4	297	113.0
r112	298	297.4	947.1	295.0	97.0	297.9	97.0	297	291.0
rc101	219	219.0	0.2	219.0	61.3	219.0	61.3	219	13
rc102	266	266.0	30.9	259.0	53.3	266.0	53.3	266	42.0
rc103	301	301.0	57.2	265.0	62.9	266.0	62.9	266	36.0
rc104	301	301.0	29.4	297.0	58.0	301.0	58.0	301	118.0
rc105	244	244.0	9.7	221.0	78.6	244.0	78.6	244	6.8
rc106	252	252.0	308.6	239.0	71.9	252.0	71.9	252	71.0
rc107	277	277.0	502.1	274.0	69.6	277.0	69.6	277	122.0
rc108	298	298.0	207.5	288.0	66.1	297.0	66.1	298	21.0

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Table 6
 Comparison of heuristics for 1 route.

ID	BKS	ACO	T(s)	ILS	T(s)	VNS	T(s)	Fuzzy GRASP	T(s)
c201	870	870.0	507.8	840	1.1	870.0	507.8	870	95.0
c202	930	928.0	454.8	910	2.8	928.0	454.8	930	219.0
c203	960	960.0	614.3	940	1.7	960.0	614.3	920	480.0
c204	980	972.0	484.0	950	1.6	972.0	484.0	960	280.7
c205	910	908.0	645.4	900	1.2	908.0	645.4	910	416.2
c206	930	927.0	616.5	910	1.6	927.0	616.5	920	33.2
c207	930	930.0	599.5	910	2.1	930.0	599.5	930	132.3
c208	950	949.0	558.9	930	1.6	949.0	558.9	940	65.7
r201	797	796.7	1021.7	788	1.2	796.7	1021.7	782	559.8
r202	915	905.6	1057.5	880	1.4	905.6	1057.5	915	1232.4
r203	1016	1007.9	1139.9	980	1.6	1007.9	1139.9	977	1302.4
r204	1081	1076.3	1253.5	1073	1.7	1076.3	1253.5	1059	860.5
r205	953	952.6	745.1	931	1.4	952.6	745.1	953	545.6
r206	1022	1014.0	1168.1	996	1.5	1014.0	1168.1	962	643.5
r207	1072	1061.5	1065.3	1038	2.0	1061.5	1065.3	1010	447.0
r208	1112	1101.5	1160.8	1069	1.6	1101.5	1160.8	1043	1519.2
r209	950	947.8	925.9	926	2.4	947.8	925.9	947	1342.4
r210	978	975.9	1065.6	958	1.9	975.9	1065.6	975	1305.2
r211	1042	1024.2	1120.7	1023	1.6	1024.2	1120.7	992	1015.3
rc201	795	795.0	640.8	780	1.0	795.0	640.8	774	173.0
rc202	936	925.6	951.5	882	1.3	925.6	951.5	925	1437.1
rc203	1003	988.2	938.4	960	2.7	988.2	938.4	960	795.2
rc204	1136	1120.8	970.3	1117	2.3	1120.8	970.3	1056	860.8
rc205	857	845.9	726.6	840	1.0	845.9	726.6	822	619.1
rc206	895	878.4	838.7	860	1.1	878.4	838.7	866	641.7
rc207	983	960.8	893.5	926	1.3	960.8	893.5	960	765.8
rc208	1053	1043.5	995.5	1037	2.3	1043.5	995.5	1037	960.8

Table 7
 Comparison of heuristics for 2 routes.

ID	BKS	ACO	T(s)	ILS	T(s)	VNS	T(s)	Fuzzy GRASP	T(s)
c101	590	588.0	110.8	590	1.4	587.0	83.8	590	109.8
c102	660	660.0	1427.4	650	0.9	653.0	100.0	660	83.9
c103	720	710.0	938.9	700	1.2	717.0	93.8	680	15.3
c104	760	754.0	1355.0	750	1.5	759.0	96.7	670	373.4
c105	640	640.0	1436.6	640	0.8	640.0	68.9	640	15.1
c106	620	620.0	104.6	620	0.8	620.0	95.8	620	0.9
c107	670	670.0	76.0	670	1.4	669.0	92.5	670	34.8
c108	680	680.0	95.3	670	0.8	680.0	89.7	680	60.3
c109	720	720.0	1817.3	710	0.9	719.0	70.6	720	550.1
r101	349	349.0	36.5	330	0.4	349.0	35.3	349	28.2
r102	508	506.6	2006.6	508	0.9	498.5	64.1	501	58.9
r103	522	518.8	1095.1	513	0.9	515.4	51.0	511	187.2
r104	549	540.0	2291.8	539	1.5	542.5	66.9	546	183.0
r105	453	453.0	1037.3	430	0.8	451.5	66.8	453	57.6
r106	529	523.8	2034.7	529	0.9	518.1	66.4	529	190.7
r107	535	527.4	2357.6	529	1.0	529.0	73.9	527	328.0
r108	556	553.6	1906.2	549	1.4	547.3	63.7	556	825.1
r109	506	505.4	1386.6	498	0.5	505.0	66.3	495	388.0
r110	525	523.4	1180.2	515	1.0	509.4	62.5	511	449.2
r111	544	535.6	1726.2	535	0.6	537.4	71.4	544	573.8
r112	544	541.6	1653.6	515	0.5	535.2	73.2	530	716.4
rc101	427	427.0	27.9	427	0.6	419.0	54.9	427	235.1
rc102	505	497.2	1496.9	494	0.8	504.1	61.1	505	59.8
rc103	524	510.2	1965.9	519	1.1	519.0	53.1	496	6.8
rc104	575	568.8	2381.3	565	0.7	568.2	53.0	575	475.3
rc105	480	478.4	1676.7	459	0.8	479.8	45.3	452	91.5
rc106	483	480.2	1865.1	458	0.6	477.9	57.5	467	211.3
rc107	534	530.2	771.5	515	0.5	519.3	63.2	534	187.2
rc108	556	541.6	821.0	546	0.6	535.8	53.2	556	337.6

sults are organized according to the number of routes in one, two, three and four routes.

7. Results analysis

In this subsection we report a detailed comparison of computational results obtained by solving the mathematical model

proposed in Section 4 and those obtained by running the Fuzzy GRASP. The mathematical model MIP is solved with the commercial software Xpress 7.9 with a timelimit of 1 h; i.e., 3600 s. The Fuzzy GRASP has been run on a machine equipped with a processor Intel Core i7-3610QM CPU at 2.30GHz and 16 GB RAM while the MIP is executed on a machine equipped with a Intel i7-5500U at 2.4GHz with 16 GB of Ram. The data from the computational

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Table 8
 Comparison of heuristics for 2 routes.

ID	BKS	ACO	T(s)	ILS	T(s)	VNS	T(s)	Fuzzy GRASP	T(s)
c201	1460	1452.0	508.6	1400	2.7	1447.0	634.5	1440	819.7
c202	1460	1446.0	1568.2	1430	5.1	1457.0	658.7	1460	1513.1
c203	1480	1446.0	2334.8	1430	3.8	1471.0	568.9	1440	434.7
c204	1480	1436.0	1373.2	1460	4.2	1480.0	420.3	1450	546.3
c205	1460	1452.0	925.4	1450	3.1	1457.0	593.4	1460	1643.7
c206	1470	1460.0	1876.4	1440	2.8	1464.0	509.4	1460	305.1
c207	1480	1452.0	1434.0	1450	3.2	1469.0	496.6	1470	2.4
c208	1480	1462.0	1164.2	1460	2.8	1473.0	483.3	1470	218.3
r201	1250	1236.0	2693.6	1231	2.1	1232.1	1401.6	1194	88.1
r202	1338	1298.6	2482.2	1270	2.3	1333.5	1421.5	1338	2960.2
r203	1407	1349.4	3057.4	1377	1.9	1402.7	1148.4	1348	3058.3
r204	1458	1399.0	2713.5	1440	3.4	1455.3	785.2	1428	940.3
r205	1378	1342.0	2593.7	1338	2.8	1366.8	1276.0	1378	229.8
r206	1427	1373.8	2954.4	1401	2.8	1422.4	1015.9	1376	354.3
r207	1458	1385.0	2624.1	1428	1.7	1453.6	723.2	1413	407.2
r208	1458	1425.4	2828.9	1458	1.6	1458.0	448.7	1455	960.2
r209	1405	1350.6	2988.9	1345	2.6	1393.0	1076.0	1372	1250.7
r210	1423	1355.4	2423.9	1365	1.9	1408.6	912.0	1379	2398.2
r211	1457	1403.0	2726.1	1422	1.9	1457.0	957.5	1424	810.1
rc201	1376	1365.4	1654.3	1305	1.9	1359.7	897.1	1335	922.5
rc202	1500	1464.8	2619.6	1461	2.1	1487.6	909.1	1401	245.8
rc203	1621	1542.2	2176.2	1573	2.0	1593.4	821.0	1512	928.3
rc204	1716	1614.8	2561.8	1656	2.1	1710.2	740.8	1639	1687.1
rc205	1455	1417.4	2115.2	1381	3.2	1436.3	766.8	1348	525.8
rc206	1546	1495.6	2105.1	1495	1.9	1523.4	769.6	1491	494.2
rc207	1566	1523.0	2937.5	1531	2.7	1552.2	835.9	1491	1282.7
rc208	1691	1608.4	2572.3	1606	1.7	1676.1	698.2	1630	1590.8

Table 9
 Comparison of heuristics for 3 routes.

ID	BKS	ACO	T(s)	ILS	T(s)	VNS	T(s)	Fuzzy GRASP	T(s)
c101	810	810.0	1515.6	790	1.1	810.0	67.0	810	187.4
c102	920	918.0	442.8	890	2.1	916.0	89.3	920	175.1
c103	980	972.0	1415.3	960	2.2	972.0	91.4	970	50.1
c104	1030	1004.0	681.7	1010	1.3	1020.0	78.9	1020	468.6
c105	870	870.0	1010.0	840	1.0	858.0	93.8	850	34.0
c106	870	870.0	1132.3	840	1.1	867.0	89.5	860	327.8
c107	910	910.0	892.7	900	1.5	905.0	91.8	890	40.2
c108	920	912.0	971.2	900	1.2	913.0	85.3	920	142.8
c109	970	954.0	1327.5	950	2.0	967.0	82.3	950	751.3
r101	484	481.0	240.6	481	0.8	482.3	42.9	475	122.6
r102	691	682.0	2435.4	685	1.0	681.7	66.9	661	96.0
r103	747	729.8	2694.9	720	2.0	726.6	61.2	716	242.8
r104	777	760.6	2531.4	765	1.5	759.7	60.2	762	304.9
r105	620	619.2	796.0	609	2.3	619.2	52.7	605	40.9
r106	726	715.0	755.5	719	2.1	717.4	65.7	726	215.1
r107	760	751.6	1998.9	747	1.1	755.8	60.7	748	344.8
r108	797	781.8	2388.5	790	3.1	781.2	70.9	790	628.1
r109	710	701.8	1098.8	699	1.8	703.9	64.0	695	420.8
r110	737	732.6	1708.5	711	1.4	721.9	63.5	730	150.4
r111	773	755.4	1286.7	764	1.8	763.4	65.0	757	616.2
r112	771	758.8	2091.2	758	1.1	760.0	69.2	742	90.9
rc101	621	620.4	195.7	604	1.4	619.8	58.7	583	152.5
rc102	711	698.8	1145.5	698	1.3	710.3	60.4	698	328.4
rc103	747	741.4	2754.0	747	1.1	746.5	67.3	721	60.9
rc104	833	813.2	2277.0	822	1.3	824.5	59.8	795	690.8
rc105	682	677.8	1092.0	654	0.8	677.2	63.8	635	396.2
rc106	705	692.4	1748.3	678	1.0	686.2	49.7	682	358.4
rc107	773	748.0	1158.5	745	0.9	761.6	58.2	761	561.4
rc108	795	768.2	1443.7	757	1.1	778.0	66.9	778	792.6

experiments for the tuning of some of the Fuzzy GRASP parameters are available at Google Drive.¹ After a tuning process we have selected to run the Fuzzy GRASP for 100 iterations. This is a good compromise between effectiveness and efficiency. In fact, an increment on the number of iterations would provide a very small improvement in the solution quality while sensibly increasing the computational times.

¹ <https://goo.gl/LWjyA4>

7.1. Small instances

In Table 13 we report the instances features as name, number of routes and maximum route duration, T_{max} , the best solution (LB) and the best upper bound, (UB), found by the model, the GAP computed as $UB - LB/LB$, and the computational time. Optimal values are reported in bold. As can be deduced from those tables the most critical parameter is T_{max} . In fact, for small values of T_{max} the model is able to quickly solve to the optimality the problems,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892

Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 08/06/2020 01:07:10

José Andrés Moreno Pérez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 02:01:01

Julio Antonio Brito Santana
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

08/06/2020 11:26:21

María de las Maravillas Aguilar Aguilar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:53:09

Table 10
 Comparison of heuristics for 3 routes.

ID	BKS	ACO	T(s)	ILS	T(s)	VNS	T(s)	Fuzzy GRASP	T(s)
c201	1810	1810.0	259.2	1750	2.2	1810.0	256.5	1810	524.2
c202	1810	1784.0	1603.2	1750	2.0	1810.0	321.5	1790	1751.3
c203	1810	1738.0	1039.9	1760	2.0	1810.0	185.4	1810	388.2
c204	1810	1758.0	1025.8	1780	1.5	1810.0	201.6	1810	1388.5
c205	1810	1796.0	2007.3	1770	2.5	1809.0	236.6	1810	67.5
c206	1810	1788.0	1862.0	1770	1.5	1810.0	265.9	1810	99.20
c207	1810	1784.0	1223.0	1810	3.4	1810.0	233.3	1810	49.6
c208	1810	1786.0	1542.7	1810	2.4	1810.0	231.8	1810	19.4
r201	1436	1428.4	1400.0	1408	2.4	1428.2	814.4	1421	223.4
r202	1458	1445.6	1966.2	1443	2.7	1453.7	519.7	1435	3479.7
r203	1458	1452.4	2564.3	1458	1.6	1458.0	257.3	1458	186.9
r204	1458	1458.0	174.7	1458	1.0	1458.0	211.7	1458	88.7
r205	1458	1454.8	1830.7	1458	1.1	1458.0	296.3	1458	24.7
r206	1458	1456.8	1328.8	1458	1.1	1458.0	240.3	1458	71.5
r207	1458	1458.0	598.6	1458	1.0	1458.0	220.1	1458	81.40
r208	1458	1458.0	425.6	1458	0.8	1458.0	216.6	1458	12.1
r209	1458	1456.8	1163.7	1458	1.1	1458.0	272.0	1458	31.4
r210	1458	1456.2	1428.1	1458	1.2	1458.0	289.9	1458	40.7
r211	1458	1457.8	7.3	1458	1.0	1458.0	200.1	1458	11.8
rc201	1698	1672.0	1084.9	1625	1.9	1689.4	786.6	1655	451.7
rc202	1719	1701.4	2230.7	1686	1.7	1711.6	491.2	1690	311.1
rc203	1724	1719.6	1213.2	1724	2.9	1724.0	313.9	1724	779.4
rc204	1724	1722.2	1261.3	1724	1.0	1724.0	222.8	1724	58.8
rc205	1709	1672.2	1439.8	1659	2.4	1696.7	573.2	1682	1214.2
rc206	1724	1712.6	2185.2	1708	1.3	1724.0	339.9	1724	1257.1
rc207	1724	1714.8	2553.9	1713	1.5	1724.0	295.1	1724	2945.3
rc208	1724	1722.2	893.9	1724	1.1	1724.0	209.5	1724	13.2

Table 11
 Comparison of heuristics for 4 routes.

ID	BKS	ACO	T(s)	ILS	T(s)	VNS	T(s)	Fuzzy GRASP	T(s)
c101	1020	1018.0	1049.1	1000	3.8	1013.0	78.5	1020	484.9
c102	1150	1142.0	1211.3	1090	1.8	1139.0	90.1	1090	166.7
c103	1190	1186.0	2329.6	1150	2.5	1180.0	93.8	1180	1339.5
c104	1260	1226.0	1493.9	1220	3.0	1248.0	79.7	1230	1652.8
c105	1060	1052.0	716.5	1030	1.8	1055.0	85.0	1030	201.1
c106	1080	1058.0	556.8	1040	2.1	1062.0	82.2	1070	52.1
c107	1120	1114.0	411.3	1100	2.0	1108.0	83.3	1090	322.7
c108	1130	1112.0	820.1	1100	3.6	1123.0	70.4	1120	289.2
c109	1190	1172.0	916.0	1180	2.5	1174.0	73.8	1150	270.5
r101	611	608.0	55.1	601	1.4	610.2	40.4	605	128.5
r102	840	825.6	1924.5	807	1.7	828.4	59.4	828	840.2
r103	921	902.2	2622.2	878	2.2	909.9	68.8	864	774.5
r104	972	944.2	2343.9	941	3.8	954.8	62.9	930	805.2
r105	778	766.0	838.5	735	2.9	768.0	62.5	758	27.3
r106	905	889.8	929.5	870	3.5	890.9	63.7	854	1223.5
r107	938	932.4	2660.9	927	3.3	930.4	62.6	896	1201.5
r108	994	976.2	2596.2	982	3.2	973.2	60.4	953	1038.9
r109	884	876.6	1374.5	866	2.1	870.5	55.3	832	93.7
r110	914	900.0	926.3	870	2.0	898.1	70.7	868	181.8
r111	949	932.4	1896.4	935	2.0	936.6	63.8	921	519.5
r112	971	947.6	1662.6	939	3.1	964.4	63.6	907	83.4
rc101	811	805.4	1324.3	794	1.9	777.2	55.3	748	280.9
rc102	903	899.4	2218.8	881	2.3	893.4	67.0	876	698.7
rc103	950	941.8	2005.2	947	2.0	945.4	64.1	936	346.5
rc104	1059	1013.2	2139.3	1019	1.7	1033.5	64.8	1030	373.9
rc105	875	867.2	1052.3	841	1.5	859.0	53.6	858	840.4
rc106	909	901.4	2106.7	874	2.5	894.4	49.6	891	443.2
rc107	980	959.2	1763.1	951	1.9	958.0	53.8	945	1427.5
rc108	1025	1000.2	2222.3	998	2.0	1011.5	59.6	985	333.2

whichever number of routes are requested, while for higher values of T_{max} only instances with a very small number of routes can be solved within the timelimit. More over, as expected, tight instances are much easier respect to flexible ones, which can be closed to the optimality within only for the smallest value of T_{max} .

In Table 14 we report the value of the best solution and the computational time obtained by the MODEL and by the Fuzzy GRASP. These results show an excellent performance of the Fuzzy GRASP which is able to strongly outperform the MODEL obtaining

an average improvement of 2.5% on the flexible and of 3% on tight instances, in very short computational times (0.15 and 0.07 s, respectively). The comparison of objective function obtained by the MODEL and Fuzzy GRASP are shown in Figs. 1 and 2.

7.2. Large instances

In Tables 15–17 we report a comparison between results obtained by the model, with a timelimit of 3600 s, and by the Fuzzy

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguilar Aguilar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Table 12
 Comparison of heuristics for 4 routes.

ID	BKS	ACO	T(s)	ILS	T(s)	VNS	T(s)	Fuzzy GRASP	T(s)
c201	1810	1810.0	1.2	1810	1.1	1810.0	92.5	1810	2.5
c202	1810	1810.0	8.9	1810	1.1	1810.0	114.8	1810	3.3
c203	1810	1810.0	43.9	1810	1.0	1810.0	84.7	1810	4.7
c204	1810	1810.0	1.3	1810	1.0	1810.0	107.0	1810	14.1
c205	1810	1810.0	0.3	1810	1.0	1810.0	106.6	1810	2.6
c206	1810	1810.0	0.1	1810	1.0	1810.0	109.3	1810	3.1
c207	1810	1800.0	5.8	1810	1.0	1810.0	115.0	1810	3.7
c208	1810	1810.0	0.2	1810	0.8	1810.0	108.4	1810	3.3
r201	1458	1458.0	376.4	1458	1.3	1458.0	294.6	1458	38.9
r202	1458	1458.0	936.2	1458	1.1	1458.0	171.5	1458	242.5
r203	1458	1458.0	73.9	1458	0.9	1458.0	137.3	1458	7.2
r204	1458	1458.0	0.0	1458	0.6	1458.0	135.9	1458	8.3
r205	1458	1458.0	1.3	1458	0.9	1458.0	153.6	1458	4.2
r206	1458	1458.0	0.0	1458	0.9	1458.0	131.9	1458	5.7
r207	1458	1458.0	0.0	1458	0.8	1458.0	111.9	1458	7.4
r208	1458	1458.0	0.0	1458	0.5	1458.0	127.0	1458	11.3
r209	1458	1458.0	0.0	1458	1.0	1458.0	139.0	1458	5.4
r210	1458	1458.0	3.1	1458	0.9	1458.0	140.9	1458	5.8
r211	1458	1458.0	0.0	1458	0.7	1458.0	114.6	1458	12.2
rc201	1724	1724.0	2327.4	1724	2.1	1724.0	231.9	1724	401.4
rc202	1724	1724.0	1095.8	1724	1.1	1724.0	208.8	1724	127.1
rc203	1724	1724.0	308.6	1724	0.9	1724.0	157.5	1724	5.0
rc204	1724	1724.0	53.3	1724	0.8	1724.0	120.3	1724	6.9
rc205	1724	1724.0	1313.7	1724	2.1	1724.0	192.9	1724	116.2
rc206	1724	1723.6	2.8	1724	1.0	1724.0	145.5	1724	4.8
rc207	1724	1722.4	72.1	1724	1.0	1724.0	135.1	1724	6.3
rc208	1724	1724.0	0.0	1724	0.9	1724.0	124.3	1724	11.3

Table 13
 Model results on flexible and tight 30 POIs instances.

ID	m	T _{max}	Flexible				Tight			
			LB	UB	GAP	Time	LB	UB	GAP	Time
1_30_1_300	1	300	34	34	0%	0, 032	18	18	0%	0, 03
1_30_2_300	2	300	59	59	0%	0, 272	35	35	0%	0, 1
1_30_3_300	3	300	82	82	0%	0, 271	52	52	0%	0, 1
1_30_4_300	4	300	100	100	0%	0, 754	66	66	0%	0, 1
1_30_5_300	5	300	117	117	0%	0, 461	80	80	0%	0, 1
1_30_1_450	1	450	54	54	0%	16,758	38	38	0%	0, 6
1_30_2_450	2	450	99	151	52, 5%	3600	73	73	0%	4, 6
1_30_3_450	3	450	140	265	89, 3%	3600	106	106	0%	124, 1
1_30_4_450	4	450	171	298	74, 3%	3600	137	137	0%	2223
1_30_5_450	5	450	207	304	46, 9%	3600	165	199	20, 6%	3600
1_30_1_600	1	600	72	72	0%	3400	61	61	0%	227, 8
1_30_2_600	2	600	131	212	61, 8%	3600	116	139	19, 8%	3600
1_30_3_600	3	600	180	265	47, 2%	3600	158	209	32, 3%	3600
1_30_4_600	4	600	222	299	34, 7%	3600	204	246	20, 6%	3600
1_30_5_600	5	600	258	311	20, 5%	3600	232	278	19, 8%	3600

Table 14
 Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 30 POIs flexible and tight instances.

ID	Flexible				Tight			
	MODEL		Fuzzy GRASP		MODEL		Fuzzy GRASP	
	OF	Time	OF	Time	OF	Time	OF	Time
1_30_1_300	34	0, 032	34	0,170	18	0, 03	18	0,020
1_30_2_300	59	0, 272	59	0,090	35	0, 1	35	0,010
1_30_3_300	82	0, 271	82	0,010	52	0, 1	52	0,020
1_30_4_300	100	0, 754	100	0,010	66	0, 1	66	0,020
1_30_5_300	117	0, 461	117	0,010	80	0, 1	80	0,210
1_30_1_450	54	16, 758	54	0,014	38	0, 6	38	0,010
1_30_2_450	99	3600	99	0,590	73	4, 6	73	0,070
1_30_3_450	140	3600	142	0,490	106	124, 1	106	0,230
1_30_4_450	171	3600	179	1,570	137	2223, 0	137	0,570
1_30_5_450	207	3600	209	2,020	165	3600	165	0,810
1_30_1_600	72	3400	72	0,260	61	227, 8	54	0,010
1_30_2_600	131	3600	132	0,700	116	3600	119	0,170
1_30_3_600	180	3600	187	1,290	158	3600	170	0,600
1_30_4_600	222	3600	235	1,920	204	3600	221	0,890
1_30_5_600	258	3600	274	1,140	232	3600	255	0,600

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJpl

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

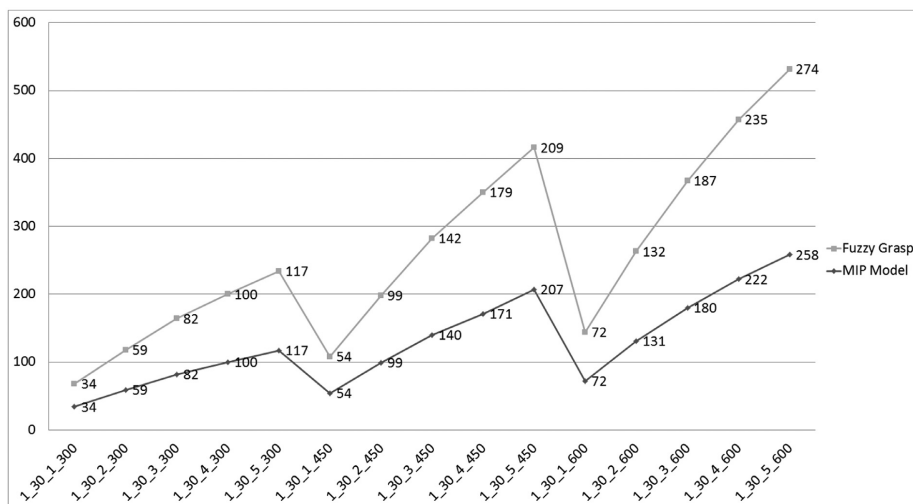


Fig. 1. Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 30 POIs flexible instances.

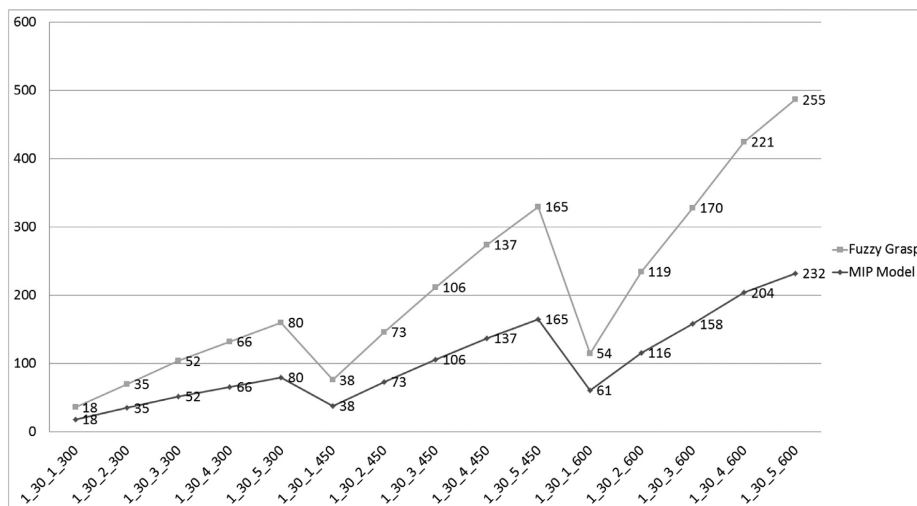


Fig. 2. Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 30 POIs tight instances.

GRASP run for 100 iterations. For each instance we report the name in which are contained information about instance layout, number of categories and maximum route duration, and LB and UB obtained by solving the model. For the Fuzzy GRASP we report the value of the best solution obtained, and the computational time. We do not explicitly reports computational times for the model, because it always reach the timelimit without finding an optimal solution, therefore computational time elapsed by the model is equal to 3600 s for all the instances. The number of routes is equal to 3 for all the instances. As can be deduced by

the results reported in the Tables, Fuzzy GRASP strongly outperform the model improving the best solution of around 28% with an average computational time of few seconds. The comparison of objective function obtained by the MODEL and the Fuzzy GRASP for large instances are shown in Figs. 3–8.

As the computational results demonstrates, the heuristic solution approach offers improved performance respect to the model results. Regarding TTDP-Clu, these results present a series of interesting implications with respect to the applicability of the proposed model and solution approach:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Table 15
 Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs flexible and tight c201 instances.

ID	Flexible				Tight				
	LB	UB	Fuzzy GRASP	Time	LB	UB	Fuzzy GRASP	Time	
4_538	214	379	232		6, 27	214	331	257	2,93
4_587	249	485	292		6, 73	229	347	240	2,68
4_641	248	452	294		3, 17	238	334	250	4,03
4_700	231	363	266		5, 07	250	309	286	3,88
6_538	175	570	248		3, 22	218	442	276	3,18
6_587	252	617	273		7, 99	244	416	272	2,69
6_641	234	488	275		8, 93	253	434	287	3,93
6_700	249	609	299		10,12	281	429	323	2,98
8_538	0	729	249		2, 68	500	536	232	1,98
8_587	139	764	245		5, 97	0	589	305	3,30
8_641	152	687	254		5, 32	229	573	314	4,15
8_700	208	768	306		9, 98	0	497	327	3,62

Table 16
 Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs flexible and tight r205 instances.

ID	Flexible				Tight				
	LB	UB	Fuzzy GRASP	Time	LB	UB	Fuzzy GRASP	Time	
4_767	288	450	289		3,20	286	374	369	2,08
4_838	241	415	321		6,93	286	360	285	4,14
4_915	274	419	301		6,16	278	325	305	3,22
4_1000	266	412	328		5,15	329	379	293	4,16
6_767	281	603	362		4,18	281	412	265	1,32
6_838	281	528	353		9,98	298	420	293	3,40
6_915	291	617	326		7,37	274	405	303	4,29
6_1000	320	581	338		10,09	260	407	306	3,22
8_767	274	822	355		9,90	317	534	290	4,30
8_838	214	788	381		12,22	0	540	358	4,96
8_915	241	783	342		12,51	321	536	318	1,86
8_1000	159	791	329		9,84	235	451	376	4,44

Table 17
 Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs flexible and tight rc207 instances.

ID	Flexible				Tight				
	LB	UB	Fuzzy GRASP	Time	LB	UB	Fuzzy GRASP	Time	
4_767	266	434	305		5,64	266	434	269	3,92
4_838	272	358	307		3,27	272	358	239	3,27
4_915	267	355	295		4,74	267	355	260	3,70
4_1000	263	418	308		7,72	263	418	291	3,76
6_767	271	650	373		8,96	271	650	336	4,30
6_838	241	662	330		9,54	241	662	313	3,42
6_915	240	534	334		3,63	240	534	333	4,66
6_1000	320	634	312		10,04	320	634	284	4,21
8_767	185	614	338		6,06	185	614	286	4,24
8_838	211	775	266		9,42	211	775	322	4,20
8_915	151	843	319		12,00	134	843	354	4,37
8_1000	233	704	387		6,49	222	704	262	1,57

- The efficiency and efficacy of the heuristic solution approach proposed is suitable for hand-held devices and specifically for PETs. The short computing times required to obtain quality solutions support this fact.
- In the tourist domain, the information about POIs such as open and close hours, travel times between POIs, and other available information from real world are often imprecise and change unexpectedly. And usually the tourists require a high degree of flexibility in order to optimizing their time and improving the experience of touristic routes. These realities lead us to the need to consider the dynamism in our solution approach. And in this context, the efficiency and efficacy of the proposed method make it a candidate to be applied in a dynamic version of the TTDP-Clu that requires re-planning of POIs.

8. Conclusions and further research

In this paper we have defined a new itineraries design problem arising in tourist trip planning operations. The problem, named TTDP-Clu, is an extension of the TTDP where POIs are grouped in clusters representing different types of attraction sites and a minimum/maximum limit is imposed on the number of POIs, belonging to the same cluster, that must/can be visited in the same route. This problem came out from specific needing arising in tourist trip planning operations, in which the current trend is to offer customer-centered solutions. The goal of the paper is to introduce, formalize and mathematically model the problem and to provide a fast and effective algorithm able to provide quickly a high quality solution. The method must be very fast in order to be consider as

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

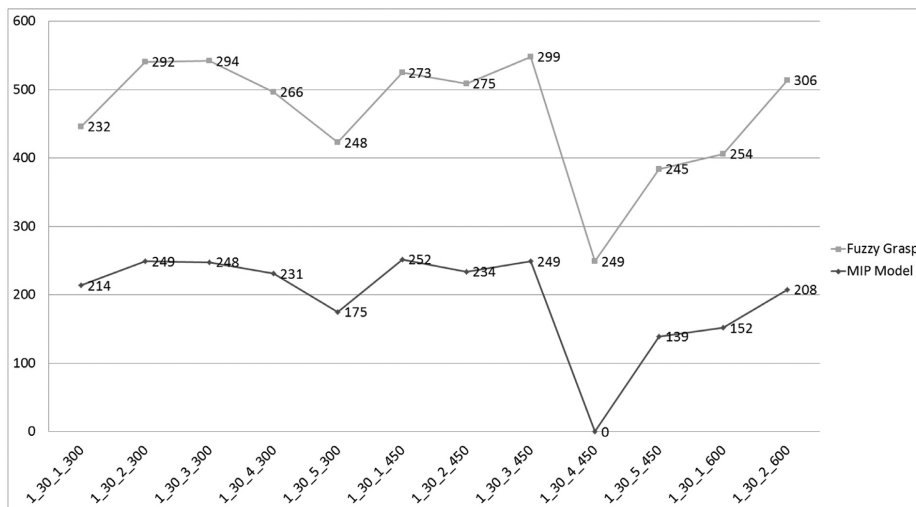


Fig. 3. Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs flexible c201 instances.

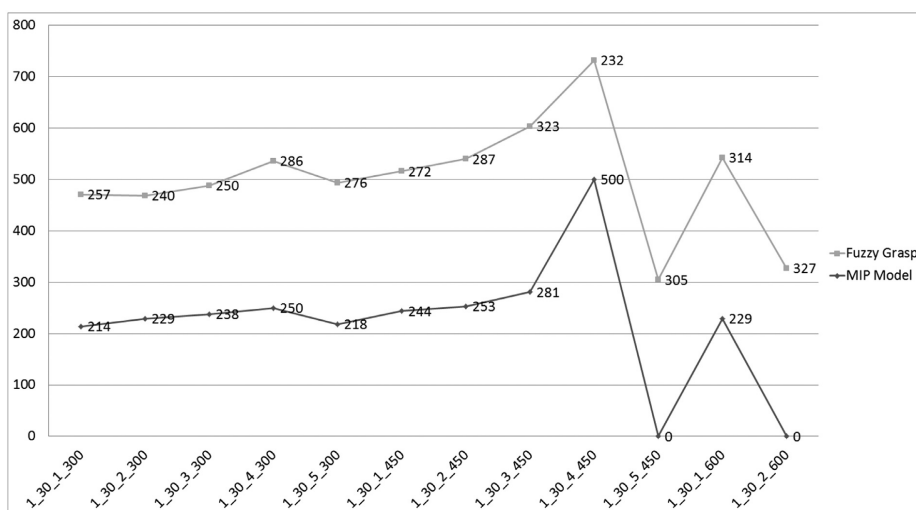


Fig. 4. Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs tight c201 instances.

a tool to be exploited by a user to quickly obtain a valid touristic itinerary proposal matching his/her specific preferences and requirements.

We propose a mathematical model to formalize the optimization problem and solve it with mathematical programming tools. Notwithstanding, due to the large computational times required when solving specific scenarios and the complexity of the instances, its implementation in practice is limited. In order to beaten this issue, we also propose a Fuzzy GRASP heuristic ad-hoc tailored for the specific features of the problem with the goal of

generating high-quality solutions for the problem within reasonable times.

An extended computational campaign on instances of different size and typology has been carried out. The computational experiments seek to assess the performance of the Fuzzy GRASP proposed. The performance of the Fuzzy GRASP was evaluated by comparing the results of the optimization model solved using Xpress 7.9. In order to select the combinations of parameter values with the best performance for the metaheuristic proposed, a statistical study of parameter was performed. The computational results

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguilar Aguilar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

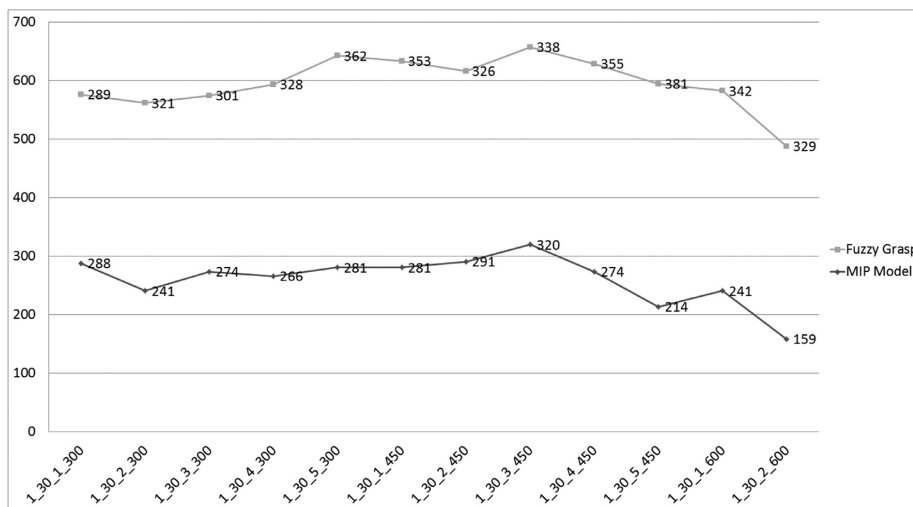


Fig. 5. Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs flexible r205 instances.

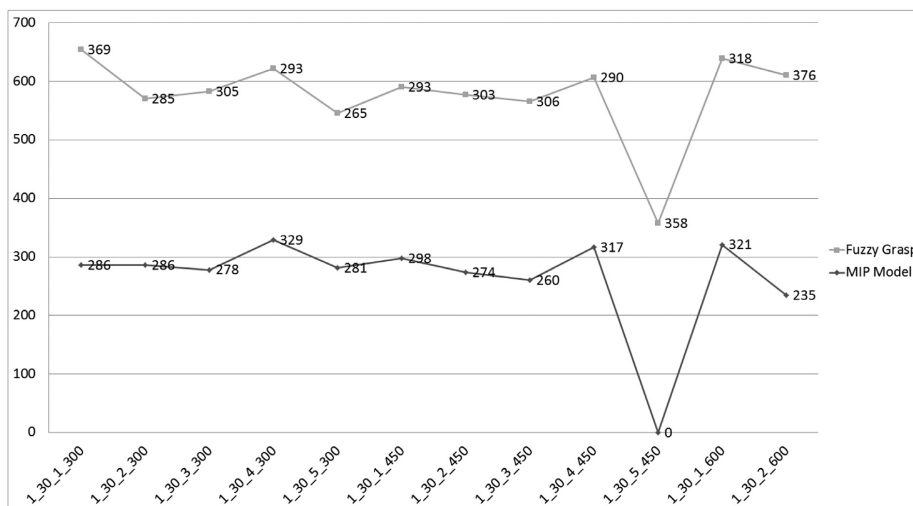


Fig. 6. Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs tight r205 instances.

show an excellent performance of the algorithm both in terms of efficiency and effectiveness in comparison with the model implemented with Xpress 7.9, making the Fuzzy GRASP a perfectly suitable tool to be incorporated in PETs.

On the basis of the contributions and implications presented in this paper, several solid research directions are still open for further research. Several of these research directions are summarized in the following lines:

- *Application of several metaheuristic frameworks.* From a methodological point of view, future developments could address the design of metaheuristic framework such as VNS or Large Neigh-

borhood Search (LNS) able to provide more competitive solutions, even if with larger computational efforts. These algorithms would not be adapted to be incorporated in a PET which should provide a quick answer on the fly, but they could be exploited to plan in advance specific thematic itineraries to compose a portfolio of suggested trips to propose to the tourists.

- *Score depending on the visit time.* From an application point of view it could be interesting, in order to make the problem more realistic, a variation of the score achieved by visiting a site, depending on the visit time. There are many real cases in which this issue holds, as for example, when visiting very large and important museums such as the Louvre in Paris, we obtain a

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

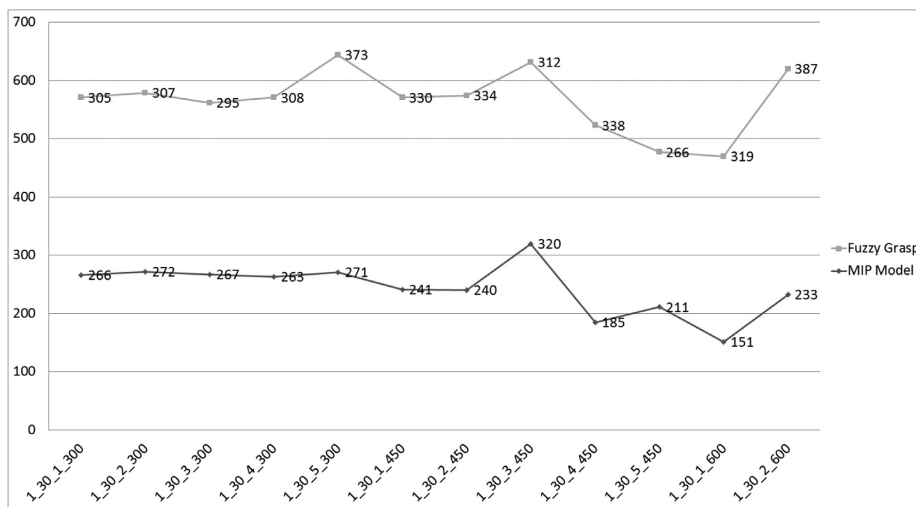


Fig. 7. Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs flexible rc207 instances.

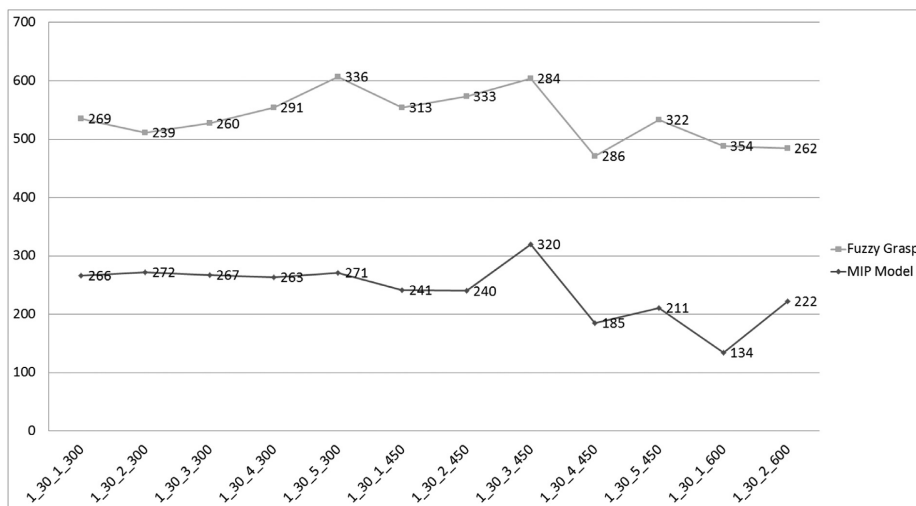


Fig. 8. Comparison of results of the Fuzzy GRASP and the model on 100 POIs tight rc207 instances.

higher satisfaction degree if we have time to visits all the expositions. On the other hand, even if we can devote only a limited amount of time, it would be somehow profitable to visit even only the main attraction of the museum. For naturalistic sites, longer visit times may give access to different ways to enjoy the site. For instance, if we visit a beach for one hour, we can enjoy the view, take some pictures, etc., but if our visit last longer, we can swim, surf and make other outdoor activities which will strongly increase the level of enjoyment. The resulting problem would become much more difficult address, since visiting times become themselves decision variables in the process.

- *Detailed tourist requests.* In order to take into account more detailed tourist requests, several considerations regarding maximum and minimum number of POIs of a given category could be implemented:
 - A maximum and minimum number of POIs of a given category across all the days could be considered.
 - A maximum and minimum number of days in which a POI of a given category is visited, e.g., we have one week but I want to spend no more than two days visiting beaches.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- Several categories that cannot be inserted in the same day, e.g., if we are dressed to go to the beach we can not enter a mosque or a church.
- *Addressing the dynamism and stochasticity of the environment.* Actually we are working on deal with dynamism and stochasticity in real contexts related to planning tourist routes. In this respect, we have organized the research lines that we want to carry out in the steps that are briefly described below:
 1. *Repair Heuristic.* Our first approach to deal with dynamism is related to develop a repair heuristic that is used each time a POI failure occurs. This heuristic will try to insert a new POI, directly replacing the unavailable POI, or later in the route, in order to minimize the loss of score in the route.
 2. *Scenarios evaluation.* We create a set of scenarios, each one associated with a realization probability. Each scenario represent a set of failures in availability of POIs. We use the Fuzzy GRASP to optimize the static problem, and then, each time we have found a potential good candidate solution, we test how this solution can recover in each scenario. At the end of the optimization process we can keep a pool of the best solutions and test them on a much larger set of scenarios in order to strongly test their robustness.
 3. *Stochastic version.* In the previous steps, we do not use any stochastic information while constructing the solutions, we only evaluate them a posteriori. In this step, we exploit information to the failure probability of POI directly in the solution approach.
 4. *Learning Process.* After a given number of solution approach iterations we evaluate the obtained solutions, and for those which are not robust, we identify the cause of this loss of score, e.g., the POI which failure has produced a strong loss of score. In these cases, we artificially penalize the score associated to this POI.

Credit authorship contribution statement

Airam Expósito: Conceptualization, Investigation, Resources, Validation, Software, Writing - original draft, Writing - review & editing. **Simona Mancini:** Formal analysis, Conceptualization, Investigation, Resources, Validation, Software, Writing - original draft, Writing - review & editing. **Julio Brito:** Formal analysis, Conceptualization, Investigation, Resources, Validation, Writing - original draft, Writing - review & editing. **José A. Moreno:** Formal analysis, Conceptualization, Investigation, Resources, Validation, Writing - original draft, Writing - review & editing.

Acknowledgment

This work has been partially funded by **Ministerio de Economía y Competitividad** (Spanish Government) with FEDER funds, grant TIN2015-70226-R, and by **Fundación CajaCanarias** (Ref. 2016TUR19). Airam Expósito-Márquez would like to thank the **Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información** and the **Fondo Social Europeo** (FSE) for the financial support he receives through his post-graduate grant.

References

Archetti, C., Feillet, D., Hertz, A., & Speranza, M. (2009). The capacitated team orienteering and profitable tour problems. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 831–842.

Archetti, C., Hertz, A., & Speranza, M. (2007). Metaheuristics for the team orienteering problem. *Journal of Heuristics*, 13, 49–76.

Archetti, C., Speranza, M., & Vigo, D. (2014). Vehicle routing problems with profits. In P. Toth, & D. Vigo (Eds.), *Vehicle routing: problems, methods, and applications* (pp. 273–298). SIAM. number 18 in MOS-SIAM Series on Optimization

Birattari, M. (2009). *Tuning metaheuristics - A machine learning perspective* (1st ed.). Springer Publishing Company, Incorporated.

Blum, A., Chawla, S., Karger, D., Lane, T., Meyerson, A., & Minkoff, M. (2007). Approximation algorithms for orienteering and discounted-reward TSP. *SIAM Journal on Computing*, 37(2), 653–670.

Bouly, H., Dang, D., & Moukrim, A. (2010). A memetic algorithm for the team orienteering problem. *40R: A Quarterly Journal of Operations Research*, 8, 49–70.

Boussier, S., Feillet, D., & Gendreau, M. (2007). An exact algorithm for team orienteering problems. *40R: A Quarterly Journal of Operations Research*, 5, 211–230.

Butt, S., & Cavalier, T. (1994). A heuristic for the multiple tour maximum collection problem. *Computers & Operations Research*, 21(1), 101–111.

Butt, S., & Ryan, D. (1999). An optimal solution procedure for the multiple tour maximum collection problem using column generation. *Computers & Operations Research*, 26(4), 427–441.

Chao, I., Golden, B., & Wasil, E. (1996). The team orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, 88(3), 464–474.

Derrac, J., García, S., Molina, D., & Herrera, F. (2011). A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1), 3–18.

Friedman, M. (1937). The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *Journal of the American Statistical Association*, 32(200), 675–701.

García, A., Linaza, M., & Arbelaitz, O. (2012). Evaluation of intelligent routes for personalised electronic tourist guides. In M. Fuchs, F. Ricci, & L. Cantoni (Eds.), *Information and communication technologies in tourism* (pp. 284–295). Springer Vienna.

García, A., Linaza, M., Arbelaitz, O., & Vansteenkoven, P. (2009). In W. Hoken, U. Gretzel, & R. Law (Eds.), *Intelligent routing system for a personalised electronic tourist guide* (pp. 185–197). Springer.

García, A., Vansteenkoven, P., Arbelaitz, O., Souffriau, W., & Linaza, M. (2013). Integrating public transportation in personalised electronic tourist guides. *Computers & Operations Research*, 40(3), 758–774.

Gavalas, D., Kenteris, M., Konstantopoulos, C., & Pantziou, G. (2012). Web application for recommending personalised mobile tourist routes. *IET Software*, 6(4), 313–322.

Gavalas, D., Konstantopoulos, C., Mastakas, K., & Pantziou, G. (2014). A survey on algorithmic approaches for solving tourist trip design problems. *Journal of Heuristics*, 20(3), 291–328.

Gavalas, D., Konstantopoulos, C., Mastakas, K., Pantziou, G., & Vathis, N. (2015). Efficient heuristics for the time dependent team orienteering problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 62, 36–50.

Kabassi, K. (2010). *Personalizing recommendations for tourists*. *Telematics and Informatics*, 27, 51–66. doi:10.1016/j.tele.2009.05.003.

Labadi, N., Mansini, R., Melechovsky, J., & Wollfer Calvo, R. (2012). The team orienteering problem with time windows: An LP-based granular variable neighborhood search. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 15–27.

Lin, S., & Yu, V. (2012). A simulated annealing heuristic for the team orienteering problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 217(1), 94–107.

Migliorini, S., Carra, D., & Belussi, A. (2018). Adaptive trip recommendation system: Balancing travelers among POIs with mapreduce. In *Proceedings of the IEEE international congress on big data (bigdata congress)* (pp. 255–259).

Montemanni, R., & Gambardella, L. (2009). An ant colony system for team orienteering problems with time windows. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 34(4), 287–306.

Moreno-Pérez, J. A., & Moreno-Vega, J. M. (2003). Fuzzy constructive heuristics. *Fuzzy Sets Based Heuristics for Optimization. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 83–96.

Muthuswamy, S., & Lam, S. (2011). Discrete particle swarm optimization for the team orienteering problem. *Memetic Computing*, 3, 287–303.

Resende, M., & Ribeiro, C. (2016). *Optimization by GRASP: Greedy randomized adaptive search procedures*. Springer New York.

Souffriau, W. (2010). *Automated Tourist Decision Support*. PhD thesis, Centre for Industrial Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Souffriau, W., Vansteenkoven, P., Vanden Berghe, G., & Van Oudheusden, D. (2013). The multi-constraint team orienteering problem with multiple time windows. *Transportation Science*, 47(1), 53–63.

Sylejmani, K., Dorn, J., & Musliu, N. (2012). A tabu search approach for multi constrained team orienteering problem and its application in touristic trip planning. In *Proceedings of the 12th international conference on hybrid intelligent systems (HIS2012)* (pp. 300–305).

Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics : From design to implementation*. Wiley Series on Parallel and Distributed Computing. Wiley.

Tang, H., & Miller-Hooks, E. (2005). A tabu search heuristic for the team orienteering problem. *Computers & Operations Research*, 32(6), 1379–1407.

Tang, L., & Wang, X. (2006). Iterated local search algorithm based on very large-scale neighborhood for prize-collecting vehicle routing problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29, 1246–1258.

Tricoire, F., Romauch, M., Doerner, K., & Hartl, R. (2010). Heuristics for the multi-period orienteering problem with multiple time windows. *Computers & Operations Research*, 37(2), 351–367.

Vansteenkoven, P. (2008a). *Planning in tourism and public transportation*. Centre for Industrial Management, Katholieke Universiteit Leuven Ph.D. dissertation.

Vansteenkoven, P. (2008b). *Planning in tourism and public transportation - attraction selection by means of a personalised electronic tourist guide and train transfer scheduling*. Katholieke Universiteit Leuven Ph.D. thesis.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/		
Identificador del documento:	2528892	Código de verificación: tpBnHJp1
Firmado por:	Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
	José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
	Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
	María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

A. Expósito, S. Mancini and J. Brito et al./Expert Systems With Applications 127 (2019) 210–227

227

- Vansteewegen, P., Souffriau, W., Vanden Berghe, G., & Van Oudheusden, D. (2009). Iterated local search for the team orienteering problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 36, 3281–3290.
- Vansteewegen, P., Souffriau, W., Vanden Berghe, G., & Van Oudheusden, D. (2011). The city trip planner: An expert system for tourists. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6540–6546.
- Vansteewegen, P., & Van Oudheusden, D. (2007). The mobile tourist guide: An opportunity. *Operational Research Insight*, 20(3), 21–27.
- Vidal, T., Maculan, N., Ochi, L., & Vaz Penna, P. (2015). Large neighborhoods with implicit customer selection for vehicle routing problems with profits. *Transportation Science*, 50(2), 720–734.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Apéndice D

GRASP-VNS for a Periodic VRP with Time Windows to Deal with Milk Collection

Expósito A., Raidl G.R., Brito J., Moreno-Pérez J.A. (2018) GRASP-VNS for a Periodic VRP with Time Windows to Deal with Milk Collection. In: Moreno-Díaz R., Pichler F., Quesada-Arencibia A. (eds). *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2017*. EUROCAST 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10671. Springer, Cham, pages 299–306. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74718-7_36

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

GRASP-VNS for a Periodic VRP with Time Windows to Deal with Milk Collection

Airam Expósito¹(), Günther R. Raidl², Julio Brito¹,
and José A. Moreno-Pérez¹

¹ Department of Computer and Systems Engineering, Universidad de La Laguna,
38271 La Laguna, Canary Islands, Spain
{aexposito, jbrito, jamoreno}@ull.es

² Institute of Computer Graphics and Algorithms, TU Wien,
Favoritenstraße 9–11/1861, 1040 Vienna, Austria
raidl@ac.tuwien.ac.at

Abstract. This paper considers the planning of the collection of fresh milk from local farms with a fleet of refrigerated vehicles. The problem is formulated as a version of the Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows. The objective function is oriented to the quality of service by minimizing the service times to the customers within their time windows. We developed a hybrid metaheuristic that combines GRASP and VNS to find solutions. In order to help the hybrid GRASP-VNS find high-quality and feasible solutions, we consider infeasible solutions during the search using different penalty functions.

Keywords: Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows
Quality of service · Milk collection · GRASP · VNS · Penalty functions

1 Introduction

Logistics and transport management systems for perishable products have operational specificities associated with demands, handling, storage equipment and transport infrastructure. Models to solve the problems of collecting, sharing and distributing these products must adapt to new objectives and constraints. The minimization of total travel cost is an important logistics and transport objective and is the main criterion for the optimization of supply and distribution chains. Nevertheless, there are further important aspects to consider than just the special importance of the costs in perishable products. Quality assurance of service of perishable products constitute the main criteria for the optimization of supply and distribution chains for this kind of goods.

In this work we specifically address specifically the problem of planning the collection of fresh milk from local farms through a fleet of refrigerated trucks. The scattered small-scale family farms type have limited isothermal facilities for storing milk. In these circumstances the collection by the industry demands a precise temporal organization to preserve the quality of the product [4]. Milk

© Springer International Publishing AG 2018
R. Moreno-Díaz et al. (Eds.): EUROCAST 2017, Part I, LNCS 10671, pp. 299–306, 2018.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-74718-7_36

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

collection needs not be daily because the farms have facilities to store milk for one to three days. The collection planning is done in weekly periods [2].

The problem to determine the most appropriate routes for collecting milk from a set of known farms in a given planning period of several days, including a time window for each pick up, is modelled as a Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows (PVRPTW).

The rest of the paper is organized as follows. The next section describes the PVRPTW model and the objective function. Section 3 explains the proposed solution approach to solve the problem. In Sect. 4 computational experiments and results are described and analyzed. Finally, some conclusions and future works are included in the last section.

2 Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows

The PVRPTW, first mentioned in [3], ask for a number of routes for each day over a given planning horizon with the aim of minimizing the total travel cost while satisfying the constraints on vehicle capacity, route duration, customer service time windows, and customer visit requirements [5,6].

The PVRPTW is defined on a complete directed graph $G = (V, A)$, where $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ is the vertex set and $A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ is the arc set. The planning horizon considers t days, also referred to as set $T = \{1, \dots, t\}$. Vertex v_0 represents the depot with time window $[e_0, l_0]$ at which are based m vehicles that have capacity limited to Q and maximum working time D . Each vertex $v_i \in V, i \neq 0$, corresponds to a customer and has an associated demand $q_i \geq 0$, a service duration $d_i \geq 0$, a time window $[e_i, l_i]$, a service frequency f_i and a set $C_i \subseteq T$ of allowable combinations of visit days. For each arc $(v_i, v_j) \in A$ there is a cost $c_{ij} \geq 0$. The problem then consists in selecting a single visit combination per customer and designing (at most) m feasible vehicle routes for each of the t days on G [5,6].

With respect to our application in milk collection, we consider a special version of the PVRPTW with an objective function focused on quality of service, since it is in practice hard to meet the farms ideal milk collection time windows. The quality of service is improved by reducing the time that farms have to wait to be served within their time windows. This new objective is based on variables s_{ik} representing the time when vehicle k arrives at farm i , and e_i and l_i corresponding to the the earliest start time of service and the latest start time of service at the farm i , and n is the number of farms.

The consecutive values of the variable s_{ik} are computed iteratively in each route by $s_{jk} = \max(e_i, s_{ik}) + u_i + c_{ij}$, if vehicle k goes from v_i to v_j , with u_i as the time it takes to perform the service on the farm i . The objective function of the S solution is defined as follows:

$$f(S) = \min \frac{1}{n} \sum_k \sum_j \frac{\max\{(s_{jk} - e_j), 0\}}{l_j - e_j} \quad (1)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

The objective function thus aims at maximizing milk quality by minimizing the lateness of the collection at each farm.

3 Solution Method

VRPs in general are known to be also difficult to solve in practice. PVRPTW and obviously also our variant of the problem are NP-hard. Accordingly, metaheuristic methods are appropriate to optimize our model for the milk collection problem and a real-world process.

We propose a hybrid metaheuristic that combines GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) [7] and VNS (Variable Neighborhood Search) [8]. GRASP is an iterative two-phase metaheuristic made up of a construction phase, in which a feasible solution is produced, and a post-optimization phase, in which this feasible solution is improved. The GRASP solution construction mechanism builds a solution step-by-step by adding at random a new node from a restricted candidate list (RCL). We use a variant of VNS, VND (Variable Neighborhood Descent).

VND consists in changing the neighbourhoods each time the local search is trapped in a local optimum with respect to current neighbourhoods. VND is basically iteratively determining a better solution from the current solution by some transformation or movement. Standard VND considers several neighborhood structures of solution S as $N_k(S)$ for $k = 1, \dots, k_{max}$, being k_{max} the number of neighborhood structures. Nevertheless, in our method we use the value of k for control the size of movements that will be described later.

This hybrid approach uses GRASP as an outer framework for diversification and VND for intensification, i.e., for locally improving and post-processing constructed solutions as shown in Fig. 1.

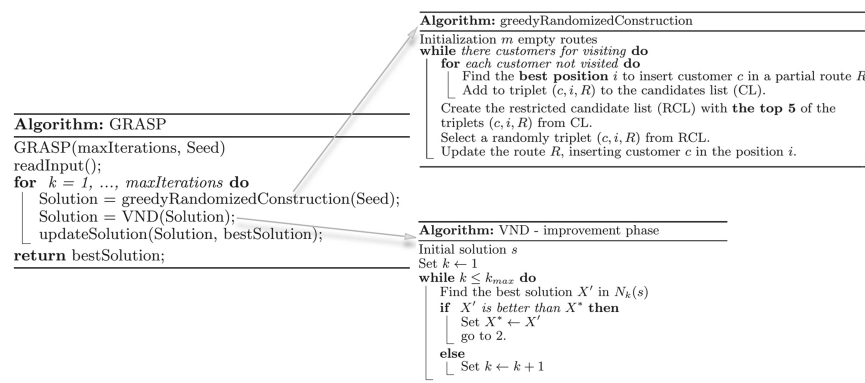


Fig. 1. General solution approach: GRASP-VND hybrid

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2528892	Código de verificación: tpBnHJp1
Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Generally two approaches which deal with PVRPTW are offered in the literature. The first one begins by assigning days to dairy farms and in a second step the routing problem for every single day is solved using classical techniques for solving the VRP [9]. In the second approach, routes are developed and then assigned to days of the week. The method we present here follows the second approach and consists of the following two steps as shown in Fig. 2.

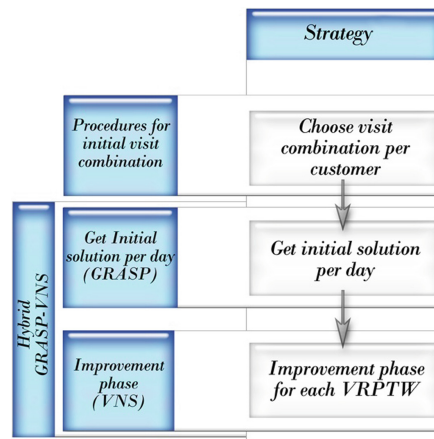


Fig. 2. General solution approach

The first step of our method consists in assigning a single visit combination to each dairy farm. Customers are then assigned to the corresponding days of the planning horizon. A list of customers is created in descending order relative to the time window size. Customers are assigned to a single visit combination alternatively in descending and ascending order with respect to this list.

In the second step, a hybrid GRASP-VND is used to solve the Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) for each day of the planning horizon. In the first step we allow infeasible VRPTW due to violation of constraints as total duration of the routes, farm time windows or vehicle capacity. In order to help the hybrid GRASP-VND find high-quality and feasible solutions, we consider infeasible solutions during the search. Capacity, duration, and time window constraints can be violated and are penalized by including proportional penalty terms in the objective function. As a specific focus of our work, we experimentally compare different kinds of penalty functions. The penalty functions are described in the next subsection.

Following the second step, the GRASP is used to obtain an initial solution to each day of the planning horizon. This GRASP tries to satisfy the constraints. If this is not possible the GRASP procedure assigns customers that do not satisfy constraints to the last route. The initial solutions obtained by GRASP are improved by using a VND with three different movements:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

- *Change visit combinations.* Change the visit combination of a farm with a new combination. The farm then has to be removed from routes of the days in the first combination that are not in the second one and inserted in the routes of the days that are in the new combination and not in the previous one.
- *k-chain moves.* Take a chain of k consecutive farms in a route of the solution and move it to another part of the same route or in other route.
- *k-swap moves.* Interchange the position of two chains with length k in the solution. Both chains can be in the same route or in different routes.

We consider a dynamic neighbourhood order to obtain high-quality solutions. We use a composition of h neighborhood structures, where $h = 9, N_1, \dots, N_9$. The neighborhood structures *k-swap chain*, *k-move chain* and *change visit combination*. The nine neighborhood structures are the different combinations of the movements described above. A weight is assigned to each neighbourhood structure, this weight reflects the performance during the search.

This weight considers two measures; the improvement over time it_h^j and the utilization u_h^j of the neighbourhood structure. Given that a solution S^j at iteration j , let S^* be the solution obtained by $N_h(S^j)$ and t_h^j the CPU time spent, the measures are defined as follows:

- Improvement over time: $it_h^j = \frac{f(S^j) - f(S^*)}{t_h^j}$
- Utilization: u_h^j of N_h , the number of times neighborhood structure N_h has been applied.

In this way, when a neighborhood N_h is applied at iteration j , we calculate:

- $in_h^{j+1} = \delta \cdot in_h^j + (1 - \delta) \cdot it_h^j, \delta \in [0, 1)$ being a strategy parameter.
- $u_h^{j+1} = u_h^j + 1$.

The corresponding weight of neighbourhood structure N_h is calculated as

$$r_h = \frac{in_h^j}{u_h^j}. \quad (2)$$

And the probability of selecting N_h as neighborhood structure to be applied is

$$p_h = \frac{r_h}{\sum_{h=1}^k r_h} \quad (3)$$

3.1 Penalized Cost Functions

To guide the search and help the hybrid GRASP-VNS find high-quality and feasible solutions we explicitly allow infeasible solutions during the search process. We relax the constraints related with vehicle capacity Q , maximum working time D , and time windows.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

For a solution S , we denote the quality of service objective function as

$$qos(S) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \frac{s_{ik} - e_i}{l_i - e_i}, \quad (4)$$

total violation of load constraints as $q(S)$ calculated considering the maximum Q_k , total violation of time windows constraints $tw(S)$ calculated as

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \max\{0, s_{ik} - l_i\}, \quad (5)$$

where s_{ik} is the time when vehicle k arrives to farm i , and total violation of duration constraints $rlt(S)$ calculated considering D_k . The objective function is defined as $f(S) = qos(S) + \alpha \cdot q(S) + \beta \cdot tw(S) + \gamma \cdot rlt(S)$, where α , β and γ are positive weight factors that depend on the kind of penalty function.

We propose two different kinds of penalty functions. The first one is a static penalty function where the penalty terms do not depend on the current iteration of the search process, therefore, remain constant during the entire search. Secondly a dynamic penalty function is proposed where the penalty term depends on the solutions obtained during the search. In both kind of penalty functions the values of α, β, γ are defined as follow:

$$\begin{aligned} - \alpha &= (q(S)_{max} - q(S)_{min})/q(S)_{avg} \\ - \beta &= (tw(S)_{max} - tw(S)_{min})/tw(S)_{avg} \\ - \gamma &= (rlt(S)_{max} - rlt(S)_{min})/rlt(S)_{avg}. \end{aligned}$$

In the case of the static penalty function the maximum, minimum and average bounds of the violation of the constraints were obtained by preliminary computational experiments. In the dynamic penalty function the bounds are updated with the values obtained during the search.

4 Experimentation and Results

This section describes the results from the computational experiments that were carried out in our study. The aim of the experiment is to test the practical feasibility of the proposed hybrid procedure GRASP-VNS to solve the milk collection problem and compare the hybrid GRASP-VNS that considers infeasible solutions to the GRASP-VNS that discard infeasible solutions.

Only some characteristics from daily milk collection real-world data are known to us so far but no concrete instances are presently available. Therefore, we adapted benchmark instances for PVRPTW [3]. Specifically we use the instances p01, p07, p11 and p17 because the characteristics are similar to the real data. The data provides the position of a set of farms with service duration, demand and time windows, and we changed the visit combination for each dairy farm by setting it as company data. The number of days of the planning horizon and the maximum number of routes for each day of the planning horizon is also included. For more details concerning the used instances, see Table 1.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

Table 1. Characteristics of instances, taken from Cordeau et al. [3]

Instances	Farms	Routes per day	Max. time per day	Max. load of truck	Days
<i>p01</i>	48	3	500	200	4
<i>p07</i>	72	5	500	200	6
<i>p11</i>	48	3	500	200	4
<i>p17</i>	72	4	500	200	6

Regarding the parameter of the hybrid GRASP-VNS, the size of the restricted candidate list is fixed to 5 and k_{max} for VND is set to 3. The solution approach was run 100 times for each of the instances and parameters used in experimentation. The results of the computational experiments can be seen in Table 2, where the hybrid GRASP-VNS with two kinds of penalty functions and the hybrid GRASP-VNS that discards infeasible solutions are compared. It can be seen that the results of the hybrid GRASP-VNS with dynamic penalized function are better.

Table 2. Results on benchmark instances from Cordeau et al. [3]

		Penalty function	p01	p07	p11	p17
<i>GRASP-VND</i>	<i>Average</i>	Static	1.19	1.13	1.06	1.05
	<i>Best</i>		1.10	0.93	0.87	0.91
<i>GRASP-VND</i>	<i>Average</i>	Dynamic	1.17	1.05	0.98	0.95
	<i>Best</i>		1.06	0.89	0.81	0.72
<i>GRASP-VND</i>	<i>Average</i>	None	1.43	1.48	1.19	1.12
	<i>Best</i>		1.25	1.13	0.95	0.89

5 Conclusions and Further Research

In this study, we presented a heuristic solution approach for the planning of the collection of fresh milk from local farms with a fleet of refrigerated vehicles, modeled as a variant of the PVRPTW. The proposed objective function is oriented towards the quality of service in order to preserve the quality of fresh milk. In order to solve the problem to get high quality solutions in reasonable time a hybrid GRASP-VNS metaheuristic has been used. The approach considers infeasible solutions during the search relaxing constraints and smoothing the search space, using two kind of penalty functions. The computational experiments confirm that the proposed approach is reasonable to practically solve this model. Future work will extend experimentation with other instances, among which some will be real cases. The behavior of other metaheuristics, other neighbourhood structures in VND procedure and other procedures for choosing

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09

initial visit combination per customer will also be studied. A special future line is related to using other kinds of penalty functions and other techniques to deal with infeasible solutions.

Acknowledgment. This work has been partially funded by the Spanish Ministry of Economía y Competitividad with FEDER funds (TIN2015-70226-R) and by Fundación Cajacanarias (2016TUR19).

Contributions from Airam Expósito-Márquez are supported by la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información de la Consejería de Economía, Industria, Comercio y Conocimiento and by the Fondo Social Europeo (FSE).

References

1. De Armas, J., Lalla, E., Expósito, C., Landa, D., Melián, B.: A hybrid GRASP-VNS for ship routing and scheduling problem with discretized time windows. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **45**, 350–360 (2015)
2. Claassen, G., Hendriks, T.: An application of special ordered sets to a periodic milk collection problem. *Eur. J. Oper. Res.* **180**(2), 754–769 (2007)
3. Cordeau, J.F., Laporte, G., Mercier, A.: A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *J. Oper. Res. Soc.* **52**(8), 928–936 (2001)
4. Lahrichi, N., Gabriel Crainic, T., Gendreau, M., Rei, W., Rousseau, L.M.: Strategic analysis of the dairy transportation problem. *J. Oper. Res. Soc.* **66**(1), 44–56 (2015)
5. Pirkwieser, S., Raidl, G.: A variable neighborhood search for the periodic vehicle routing problem with time windows. In: *Proceedings of the 9th EU/MEeting on Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing*, pp. 23–24 (2008)
6. Pirkwieser, S., Raidl, G.R.: Multiple variable neighborhood search enriched with ILP techniques for the periodic vehicle routing problem with time windows. In: Blesa, M.J., Blum, C., Di Gaspero, L., Roli, A., Sampels, M., Schaerf, A. (eds.) *HM 2009*. LNCS, vol. 5818, pp. 45–59. Springer, Heidelberg (2009). https://doi.org/10.1007/978-3-642-04918-7_4
7. Feo, T.A., Resende, M.G.C.: Greedy randomized adaptive search procedures. *J. Global Optim.* **6**, 109–133 (1995)
8. Hansen, P., Mladenović, N., Moreno, J.A.: Variable neighbourhood search: methods and applications. *Ann. Oper. Res.* **175**(1), 367–407 (2010)
9. Beltrami, E.J., Bodin, L.D.: Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks* **4**(1), 65–94 (1974)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2528892 Código de verificación: tpBnHJp1

Firmado por: Airam Expósito Márquez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 08/06/2020 01:07:10
José Andrés Moreno Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 02:01:01
Julio Antonio Brito Santana UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	08/06/2020 11:26:21
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:53:09