

**Tesis Doctoral**

**Ingeniería Industrial**

**Optimización Sostenible y Gestión  
Eficiente de Flotas Urbanas**



**Autor: Rafael Grosso de la Vega**

**Director: Jesús Muñuzuri Sanz**

Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

2017





Tesis Doctoral  
Ingeniería Industrial

# Optimización Sostenible y Gestión Eficiente de Flotas Urbanas

Autor:

Rafael Grosso de la Vega

Director:

Jesús Muñuzuri Sanz

Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Tesis doctoral: Optimización Sostenible y Gestión Eficiente de Flotas Urbanas

Autor: Rafael Grosso de la Vega

Tutor: Jesús Muñuzuri Sanz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



*A todas las mujeres de mi vida, sin ellas nada tendría sentido... sobre todo a ti linda Li, y a nuestras niñas Olga y Mar.*

*Mamá, Papá, Enrique, Javier, María... no dejéis nunca de hacer las cosas a grosso modo... mi GRAN FAMILIA.*

*Una vez alguien me dijo: "haz bien con tu vida", después de aquello no lo volví a ver, falleció... allí donde estés te digo: continuó intentándolo.*

*Gracias a todas las personas que pasaron y pasarán por mi vida, sin ellas no sería ni seré lo que fui.*



---

# Agradecimientos

---

El día que me llamó mi director de tesis, en aquel momento sólo era el que me había dirigido mi proyecto fin de carrera, había hecho dos entrevistas de trabajo. Con la carrera terminada y con un par de experiencias como becario en sendas empresas estaba dándole vueltas a mi futuro. En esa tesitura el futuro te parece muy lejano, un lugar al que se tardará aún mucho tiempo en llegar y que por tanto las decisiones que se toman no se piensa que serán relevantes en él. Pero eso no es así, o al menos eso creo ahora. Aquellas decisiones que tomé aquel día marcaron mi futuro a corto y medio plazo... en el largo plazo no me quiero aventurar por ahora viendo el mundo cómo va. Y la demostración de que lo marcaron la tiene usted en las manos. Le puedo asegurar que en ese momento realizar una tesis no era una posibilidad para mí, tanto es así que mis primeros pensamientos tras terminar la carrera fueron cómo alejarme lo máximo posible de aquella escuela que me las había hecho pasar tan canutas. Pero al descolgarle el teléfono a aquel profesor empecé a cambiar mi futuro. Aquel día había recibido otra llamada antes de la de mi director de tesis, en ella me comunicaban que había sido seleccionado para un puesto de trabajo después de la entrevista que había hecho esa mañana. Era una muy buena noticia, pero justo después me llamó mi futuro director de tesis... y terminé llamando a aquella empresa para rechazar el puesto de trabajo. Vaya por delante que mientras escribo esto no tengo ningún futuro asegurado en el mundo académico, un camino recorrido en esa dirección sí, pero nada seguro; y que a aquella empresa que quiso contratarme la engulló la crisis. Así y todo, debo agradecerlo: gracias Jesús por darme la oportunidad de elegir.

No se me puede olvidar dar las gracias al departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II (DOIGE II) al completo, en especial dar las gracias a Luis, Pablo, Pepe, Alejandro y Pablo. Mi familia académica.

Y por supuesto no puedo pasar por alto a mi familia de verdad: Gracias papá por la

integridad, gracias mamá por la ironía, gracias Enrique por la lealtad, gracias Javi por el sentido del humor, gracias Maria por la responsabilidad, gracias Lidia por la dulzura y la familia, gracias Olga por el amor, gracias Mar por el futuro...

*Rafael Grosso de la Vega*

*El Puerto de Santa Maria, 2016*

# Resumen

---

En esta tesis, dentro del marco de la logística urbana y la sostenibilidad, se presentan y se resuelven dos nuevas variantes de la familia de los Vehicle Routing Problem (VRP) además de una novedosa política de recogida de residuos sólidos basados en información en tiempo real del nivel de llenado de los contenedores. Los nuevos VRP, de los que se incluyen sus respectivos modelos matemáticos, son el Vehicle Routing Problem with Access Time Window (VRPATW) y el Rich Vehicle Routing Problem with zone-dependent transportation cost (RVRPZD). Además de estos VRP inéditos se presenta también una variante de VRP para resolver el problema de recogida de residuos sólidos urbanos. Para solucionar estos problemas, todos ellos ubicados en la ciudad de Sevilla, se diseñan, implementan y calibran diferentes heurísticas y metaheurísticas tales como Algoritmos genéticos, búsquedas Tabú y algoritmos greedy. Estas herramientas de resolución se usan para resolver cientos de experimentos diseñados sobre un modelo de más de 1200 nodos de la ciudad de estudio. Y con los resultados obtenidos se sacan conclusiones relevantes sobre la mejora de la sostenibilidad de la logística urbana, el ahorro y la optimización de las flotas urbanas y la inclusión del concepto de sostenibilidad en la empresa privada, entre otras cosas.



# Abstract

---

This thesis, after introducing the framework of urban logistics and sustainability, presents two new variants of the family of the Vehicle Routing Problem (VRP), along with a new policy for solid waste collection based on real-time information concerning the fill level of the containers. The document defines and formulates the mathematical models for the Vehicle Routing Problem with Access Time Window (VRPATW) and the Rich Vehicle Routing Problem with zone-dependent transportation cost (RVRPZD), and also includes the description of the recyclable waste collection problem with real-time data. To solve these problems for the case study of the city of Seville, the thesis shows the design, implementation and calibration of different heuristics and metaheuristics based on genetic algorithms, tabu search and greedy algorithms. These resolution tools are used to solve hundreds of experiments designed on a model with more than 1200 nodes of the city of study. With the results the author draws relevant conclusions on how to improve the sustainability of urban logistics, the optimization of urban fleets, and the inclusion of the concept of sustainability in a private transportation company.



---

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xxi</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>25</b>
<b>2. Marco paradigmático</b>	<b>27</b>
2.1. <i>¿Qué es la Logística Urbana?</i>	33
2.2. <i>La logística urbana en la ciudad sostenible</i>	35
2.2.1. Actores involucrados.	36
2.2.2. Políticas adoptadas por las autoridades locales.	38
2.3. <i>Logística urbana de mercancías en el centro histórico de Sevilla.</i>	40
2.3.1. Acercamiento a la logística urbana en España.	40
<b>3. Respondiendo a las Preguntas</b>	<b>47</b>
3.1. <i>¿Son las políticas sostenibles realmente sostenibles?</i>	47
3.2. <i>¿Cómo hacer más sostenibles las flotas urbanas?</i>	48
3.3. <i>¿Puede ser sostenible la empresa privada de transporte?</i>	49
<b>4. Estimación de los costes adicionales impuestos a los vehículos de reparto por una ventana temporal de acceso en una ciudad</b>	<b>51</b>
4.1. <i>Descripción del problema</i>	55
4.1.1. Caso general	59
4.1.2. Entrada en la Zona Restringida	60

4.1.3.	Salida de la zona restringida	63
4.1.4.	El modelo del VRPATW	65
4.1.5.	Problemas a comparar	67
4.2.	<i>Métodos de resolución</i>	70
4.2.1.	El algoritmo genético	70
4.2.2.	El Algoritmo Clarke y Wright modificado	74
4.2.3.	La Búsqueda Tabú	76
4.3.	<i>Calibración</i>	79
4.3.1.	Descripción de la red de prueba	80
4.3.2.	Experimentos y resultados	80
4.4.	<i>Caso de estudio</i>	87
4.4.1.	Descripción del caso de estudio	87
4.4.2.	Comparativa de métodos de resolución	99
4.5.	<i>Conclusiones</i>	102
5.	<b>Optimización de la recogida de residuos reciclables utilizando información en tiempo real</b>	<b>107</b>
5.1.	<i>Descripción del problema</i>	109
5.2.	<i>Método de resolución</i>	111
5.3.	<i>Caso de estudio</i>	114
5.4.	<i>Conclusiones</i>	119
6.	<b>Cálculo de rutas de vehículos con los costes de transporte dependientes de las zonas de reparto</b>	<b>121</b>
6.1.	<i>Descripción del problema</i>	122
6.1.1.	Caracterización del problema	123
6.1.2.	El modelo del RVRPZD. Descripción matemática del problema	126
6.2.	<i>Métodos de resolución</i>	130
6.2.1.	Heurística Greedy	133
6.2.2.	La Búsqueda Tabú	137
6.3.	<i>Calibración</i>	138
6.4.	<i>Caso de estudio</i>	139
6.5.	<i>Conclusiones</i>	148
7.	<b>Conclusiones</b>	<b>151</b>
8.	<b>Conclusion</b>	<b>155</b>
9.	<b>Aportaciones realizadas y trabajos futuros</b>	<b>159</b>

**10. Referencias****161**



# Índice de Figuras

Figura 2.1. Esquema ilustrativo de la composición de la movilidad urbana.....	29
Figura 2.2. Gráfico aproximado de la evolución de la de explosión urbana.....	30
Figura 2.3. Vista esquemática de los “tres pilares” de la sostenibilidad .....	33
Figura 2.4. La Sostenibilidad Urbana como intersección de la sostenibilidad global y la creciente urbanización .....	35
Figura 4.1. Representación esquemática de una ciudad en la que se aplica un VRPATW.....	56
Figura 4.2. línea de tiempo que muestra el inicio y el final del horizonte temporal, y el inicio y el final de la ventana temporal de acceso ( $TW$ ) .....	56
Figura 4.3. Estructura de costes de los arcos que entran, salen y cruzan la $RZ$ .....	57
Figura 4.4. Representación de los tiempos de llegada y salida en el cliente $i$ en la ruta de un vehículo.....	59
Figura 4.5. Representación de la entrada a la zona restringida .....	60
Figura 4.6. Distancias (en términos temporales) cubiertas dentro y fuera de la $RZ$ al viajar entre los clientes $i$ e $i + 1$ .....	61
Figura 4.7. Reajuste del tiempo de llegada al cliente $i + 1$ con el fin de asegurarse de que el vehículo no esté dentro de la $RZ$ mientras la ventana de tiempo esté cerrada. ....	61
Figura 4.8. Reajuste del tiempo de llegada del cliente $i$ lo más cerca posible al tiempo de llegada al cliente $i + 1$ .....	61
Figura 4.9. Reajuste de un grupo de clientes que se encuentran dentro de la $RZ$ ( $PRZ$ ) para ubicarlos después de que la ventana de tiempo este abierta de nuevo .....	62

Figura 4.10. Reajuste del cliente de referencia cuando está precedido por otro cliente situado en el interior de la zona restringida .....	63
Figura 4.11. Reajuste del cliente de referencia y de sus antecesores desplazados en el tiempo lo máximo posible en busca de reducir la duración total de la ruta .....	63
Figura 4.12. Trayecto entre un cliente ubicado dentro de la zona restringida a otro situado fuera .....	64
Figura 4.13. Salida de la zona restringida si la ventana de tiempo está abierta.....	64
Figura 4.14. Trayecto factible, ya que el vehículo sale de la RZ antes de que se cierre la ventana de tiempo.....	65
Figura 4.15. Trayecto inviable, ya que el vehículo circula dentro de la RZ cuando la ventana de tiempo aun esta cerrada.....	65
Figura 4.16. Reajuste del tiempo de llegada al cliente $i$ lo más cerca posible a la re-apertura de la ventana de tiempo o $tOTW$ .....	65
Figura 4.17. Posibles situaciones que surgen en el cálculo de las matrices de distancia del TDVRP. La distancia entre los nodos 1 y 2 (ambos fuera de la zona restringida) es igual a D1 tanto en <i>LongitudRutas</i> y <i>LongitudRutasVcerr</i> . La distancia entre 2 y 3 es igual a D2 en <i>LongitudRutas</i> y D3 en <i>LongitudRutasVcerr</i> . Por último, la distancia entre 2 y 4 es igual a D4 en <i>LongitudRutas</i> y una cantidad muy grande en <i>LongitudRutasVcerr</i> .....	68
Figura 4.18. Proceso de cálculo del Fitness para el TDVRP .....	69
Figura 4.19. Proceso de cálculo del Fitness para el VRPTW .....	69
Figura 4.20. Representación esquemática de la función Fitness que se utiliza en las tres implementaciones.....	71
Figura 4.21. Estructura general del algoritmo genético utilizado.....	72
Figura 4.22. Pseudocódigo del enfoque algoritmo genético (Muñuzuri et al, 2013) 74	
Figura 4.23. Pseudocódigo del algoritmo genético enfoque que incorpora la rutina de búsqueda local finales.....	74
Figura 4.24. Pseudocódigo del algoritmo de ahorro Clarke y Wright modificado adaptado a la VRPATW .....	75

---

Figura 4.25. Pseudocódigo del procedimiento de búsqueda Tabú implementado..	78
Figura 4.26. Representación esquemática de la red de prueba utiliza para calibrar el algoritmo .....	81
Figura 4.27. Los nodos de la red del área metropolitana de Sevilla. El nodo marcado muestra la ubicación del almacén de la empresa caso de estudio .....	89
Figura 4.28. Incremento de costes debido a las variaciones en la duración de la ventana temporal de acceso en el caso de estudio .....	98
Figura 4.29. tiempos de cálculo en función del número de clientes para los tres métodos implementados .....	102
Figura 5.1. Pseudocódigo del algoritmo diseñado para la propuesta .....	114
Figura 5.2. Pseudocódigo de la política a comparar .....	114
Figura 6.1. Diagrama de flujos de la heurística diseñada.....	134
Figura 6.2. Mapa de situación y de la zona de influencia de la empresa.....	140
Figura 6.3. Costes proporcionales por distrito .....	142
Figura 6.4. Diferencia porcentual entre el coste total de transporte de los tres algoritmos con respecto a la solución de la compañía .....	146
Figura 6.5. Diferencia porcentual entre el número de vehículos requeridos por los tres algoritmos con respecto a los de la solución de la compañía .....	147
Figura 6.6. Diferencia porcentual entre los factores de carga medios para los tres algoritmos con respecto a la solución de la compañía .....	147



# Índice de tablas

Tabla 2.1. Relación de actores y sus intereses .....	37
Tabla 4.1. Resultados de los experimentos realizados con el GA sobre la Red de Prueba para el VRPATW .....	83
Tabla 4.2. Resultados de los experimentos realizados con el GA sobre la Red de Prueba para el TDVRP .....	84
Tabla 4.3. Resultados de los experimentos realizados con el GA sobre la Red de Prueba para el VRPTW .....	85
Tabla 4.4. Valores de los parámetros del GA usados en la resolución de los experimentos .....	85
Tabla 4.5 Resultados de los experimentos realizados con la búsqueda Tabú sobre la Red de Prueba para el VRPTW .....	87
Tabla 4.6. Parámetros de los 300 problemas resueltos para el caso de estudio, se muestra el n° de clientes que se encuentren dentro de la RZ para cada uno de ellos .....	91
Tabla 4.7. Valores de los parámetros utilizados para cada configuración de problemas y el tiempo de computación promedio necesarios para ellos.....	92
Tabla 4.8. Resultados de los experimentos del caso de estudio para 50 clientes .....	93
Tabla 4.9. Resultados de los experimentos del caso de estudio para 100 clientes ....	94
Tabla 4.10. Resultados de los experimentos del caso de estudio para 150 clientes ..	95
Tabla 4.11. Comparativa entre los tres planteamientos considerados .....	96
Tabla 4.12. Incrementos medios de Distancia recorrida y de Coste con respecto al escenario sin RZ.....	97

Tabla 4.13. Resultados obtenidos de la aplicación de las diferentes metodologías de solución de 60 casos de problemas del caso de estudio. Para cada caso, se muestran la longitud total de la ruta (fitness), medida en kilómetros, y el número de vehículos necesarios ( $N^{\circ}V$ ).....	100
Tabla 5.1 Valores de los parámetros de los experimentos realizados.....	117
Tabla 5.2. Resultados obtenidos de los experimentos realizados sobre el modelo con la política propuesta. $\sigma \equiv$ Desviación, $RL \equiv$ Nivel de llenado limite, $Km \equiv$ Distancia total recorrida, $N^{\circ}C \equiv$ Número de contenedores totales, $N^{\circ}RT \equiv$ Número de rutas totales, $NlMV \equiv$ Nivel de llenado medio de los vehículos, $DS \equiv$ Demanda satisfecha, $k \equiv$ valor del parámetro en cuestión, $CT \equiv$ Coste total .....	117
Tabla 5.3. Resultados obtenidos de los experimentos realizados sobre el modelo con la política a comparar. $CT \equiv$ Coste total en función del valor de $k$ .....	118
Tabla 6.1. Características de los diferentes VRP .....	126
Tabla 6.2. Datos reales correspondientes al acuerdo entre la empresa distribuidora y los conductores subcontratados, incluyendo la capacidad de transporte, tiempos de conducción y los costes de transporte en función del distrito de destino. En este caso $p = 8, m = 25, t = 6, m1 = 4, m2 = 7, m3 = 3, m4 = 5, m5 = 3, m6 = 3$ .....	143
Tabla 6.3. Características de la semana representativa estudiada .....	144
Tabla 6.4. Inputs de los clientes a servir el miércoles de la semana .....	144
Tabla 6.5. Comparativa entre las soluciones de la empresa y métodos de resolución utilizados .....	145

---

# 1. INTRODUCCIÓN

---

*"Cuando el objetivo te parezca difícil, no cambies de objetivo; busca un nuevo camino para llegar a él."*

- Confucio -

Con esta tesis lo único que se ha querido hacer es responder preguntas, solventar dudas. Resulta mucho más sencillo aprender algo si ese aprendizaje es fruto de la búsqueda de la respuesta a una pregunta o duda previa. Es por eso que esta tesis se ha estructurado de ese modo, primero planteando las preguntas y después intentando responderlas. Y todo esto, claro está, dentro de un ámbito específico, de un marco. Este marco donde se mueve esta tesis es el marco de la sostenibilidad, de ese modo este trabajo está centrado en la logística urbana vista desde el punto de vista de la sostenibilidad. Partiendo de esas dos temáticas se plantean unas preguntas que buscan de algún modo su integración en una sola. En este trabajo se trata de responder a esas cuestiones. Así pues, esta tesis está estructurada de la siguiente manera: después de este capítulo introductorio se plantea el marco paradigmático en el que se encuadra el trabajo, sin el que no se podría comprender plenamente. En el capítulo 3 se presenta la esencia de la tesis, pues en él se desarrollan las cuestiones que tratarán de responderse en los capítulos siguientes. En los capítulos 4, 5 y 6 se desarrollan las respuestas a las preguntas. Estos tres capítulos se han estructurado como trabajos completamente independientes en su forma, de este modo se estructuran de la forma habitual de un artículo científico: con introducción, descripción del problema, métodos de resolución, caso de estudio y resultados, y finalmente conclusiones. Esta estructura responde a las diferentes publicaciones intermedias realizadas durante el largo desarrollo de la tesis. En el capítulo 7 se exponen las conclusiones generales de todo el trabajo, que no son más que un resumen de las conclusiones de cada uno de los tres capítulos anteriores. Y para finalizar se detallan en el capítulo 9 los trabajos publicados relacionados con la tesis, sin olvidar la siempre imprescindible bibliografía en el capítulo 10.



---

## 2. MARCO PARADIGMÁTICO

---

*“Para todo problema humano  
hay siempre una solución fácil,  
clara, plausible y equivocada”*

- Henry-Louis Mencken -

Multitud de mercancías de diferente tipo entran, transitan y salen constantemente las zonas urbanas. Algunos ejemplos de ellas podrían ser: bienes de consumo, materiales de construcción, residuos, paquetería y envíos de correo, etc. (Dablanc, 2007). Por eso, en parte, la definición exacta para el transporte urbano de mercancías difiere según el autor al que nos referenciamos. El transporte urbano de mercancías se define como "el movimiento de cosas (a diferencia de las personas) hacia, desde y por las zonas urbanas" (McKinnon, 1994). La siguiente definición corresponde a Muñuzuri et al. 2005 "los movimientos de mercancías que se ven afectados por las particularidades asociadas a las zonas urbanas, su tráfico y su morfología". Ambrosini and Routhier 2004 argumentan que esta definición se debería ampliar, de manera que incluya "los trayectos para compras del hogar, el mantenimiento de las vías urbanas y su construcción, la recogida de residuos, etc" y no sólo la circulación de mercancías entre locales y establecimientos. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo u OECD 2003 la define como "el transporte de bienes de consumo (no sólo comerciales, sino también por otros sectores como la producción) en la ciudad y las áreas suburbanas, incluyendo el flujo inverso de bienes usados, en términos de residuos limpios" utiliza una definición bastante más amplia de transporte urbano de mercancías que incluye "(1) todos los tipos y tamaños de vehículos de mercancías y otros vehículos motorizados utilizados para la recogida y entrega de bienes en instalaciones y/o establecimientos de las zonas urbanas, (2) todos los tipos de movimientos de vehículos de mercancías hacia y desde instalaciones urbanas incluyendo la transferencia de mercancías entre instalaciones, el transporte de bienes auxiliares, la

recogida y entrega de dinero, recogida de basuras y las entregas de mercancías a domicilio, y (3) las rutas de vehículos de servicio y otros viajes de vehículos con fines comerciales que son esenciales para el funcionamiento de las instalaciones urbanas".

Como se puede apreciar, viendo las diferentes definiciones de transporte urbano de mercancías, este tipo de transporte se compone de un conjunto muy heterogéneo de mercancías y de diferentes tipos y tamaños de vehículos. Es por eso que su gestión es un reto necesario y a la vez muy complejo de afrontar. Además, un transporte urbano de mercancías eficiente es de vital importancia, no sólo para la supervivencia de muchos proveedores logísticos, sino para la supervivencia y competencia económica de las regiones gracias al ahorro en coste hacia los clientes finales que se deriva de él (Allen et al., 2000; Kytöjoki et al., 2007; Muñuzuri et al., 2005).

Pero en los entornos urbanos no solo se transportan mercancías, como se puede apreciar en la Figura 2.1, así el primer problema con el que choca la gestión eficiente del transporte urbano de mercancías es el propio transporte y su diversidad, es decir el tráfico en general (Figliozzi, 2012).

Debido a la creciente cantidad de tráfico y a una limitada capacidad de la red de carreteras, la congestión del tráfico o atascos se ha convertido en un fenómeno cotidiano. Por aportar algunos datos, en los Estados Unidos, el retraso en los viajes en términos anuales ha crecido desde los 2500 billones de horas en 1995 a los 6900 billones de horas en 2014 (Schrank. et al., 2015). Y estos crecientes retrasos resultan muy costosos tanto para los usuarios privados de las carreteras como para los proveedores de servicios logísticos y de distribución. La organización holandesa para el transporte y la logística (TLN) estima que más del 10% de horas de trabajo de los camioneros se pierden debido a los retrasos consecuencia de la congestión del tráfico. Esto provoca grandes costes en el uso de vehículos adicionales y en la contratación de sus conductores correspondientes al intentar evitar los posibles retrasos en las entregas o recogidas a los clientes, o incluso las violaciones de las normas sobre horas de conducción de los propios conductores. Por tanto, existe un gran potencial de ahorro en el estudio de cómo evitar la congestión del tráfico por parte de la Logística Urbana (Kok et al., 2012).

Un mal diseño en las rutas que siguen los vehículos de carga en las calles y vías congestionadas no sólo provoca un incremento en la cadena logística y en su cadena de costes, sino que también empeora las externalidades asociadas al tráfico de mercancías en las zonas urbanas tales como el ruido y la contaminación del aire. El

tiempo empleado en las rutas entre los clientes y los depósitos resulta ser un factor importante de impacto en la amplificación de los efectos negativos de la congestión del tráfico; además de que dicha congestión afecta también a la estructura de costes de las compañías, al peso relativo de los salarios y a los gastos provocados por el propio reparto (Figliozi, 2012, 2010).

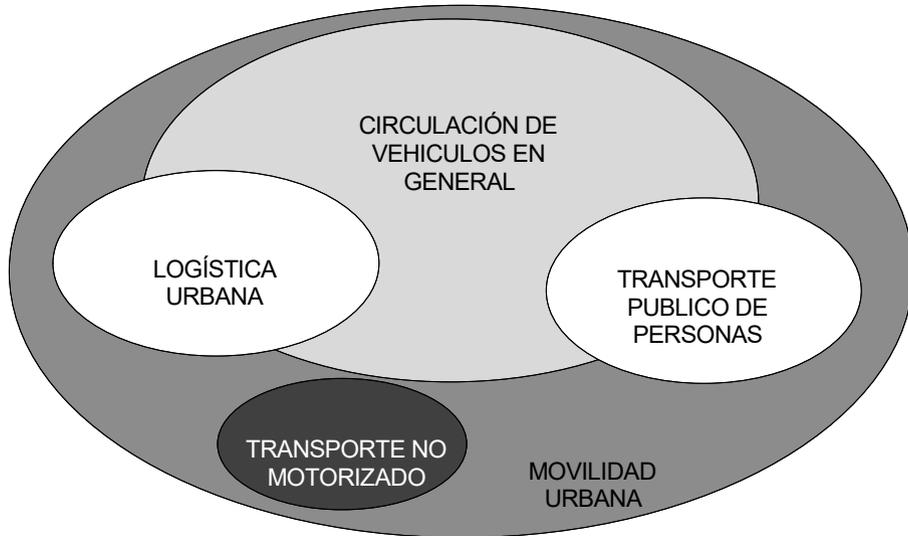


Figura 2.1. Esquema ilustrativo de la composición de la movilidad urbana

Otro problema importante al que se debe enfrentar el transporte urbano de mercancías es la propia morfología de la ciudad, más si nos centramos en el continente europeo. Las ciudades europeas presentan una serie de características comunes que influyen en su movilidad y en sus actividades comerciales, e imponen una serie de restricciones en el flujo asociado a las entregas de mercancías. En primer lugar, la mayoría de estas ciudades tienen una estructura radial, con una concentración muy alta de zonas de tiendas, restaurantes y otros polos de atracción sociales en el centro de la ciudad. Esto genera flujos asimétricos de personas que van a trabajar, comprar, comer o visitar lugares de interés turístico, con flujos similares de bienes asociados. Sin embargo, la morfología de estos centros de las ciudades, heredada de la Edad Media y por tanto con calles estrechas o callejones, no fue diseñado para este tipo de usos, situación que aumenta más aún los problemas de estacionamiento que ya de por sí se encuentran en el centro de prácticamente todas

las zonas urbanas (Ligocki and Zonn, 1984; Muñuzuri et al., 2012b)

Aproximadamente el 80% de los ciudadanos europeos vive ahora en ciudades, y se prevé un aumento de las poblaciones urbanas en las próximas décadas tanto en las regiones del mundo más desarrolladas como en las menos, (European Commission, 2007; UNEP, 2006). En torno a la mitad de la población mundial vive en ciudades (Montgomery and Stren, 2007). En los Estados Unidos las ciudades abarcan más del ochenta por ciento de la población. En el mundo en desarrollo, la urbanización se está produciendo a un ritmo muy acelerado, acompañada por la aparición de inmensas agregaciones urbanas, las mega ciudades, actualmente definidas por la ONU como las ciudades con más de 10 millones de habitantes. Esto se traduce en mayores niveles de demanda para los servicios urbanos de transporte de mercancías (Cherrett et al., 2012). La magnitud y la velocidad de crecimiento urbano son un fenómeno sin precedentes en la historia del mundo (Figura 2.2) que nos lleva a formular dos preguntas fundamentales: ¿será sostenible la urbanización a gran escala? ¿Cuáles son sus impactos sobre la sostenibilidad global?

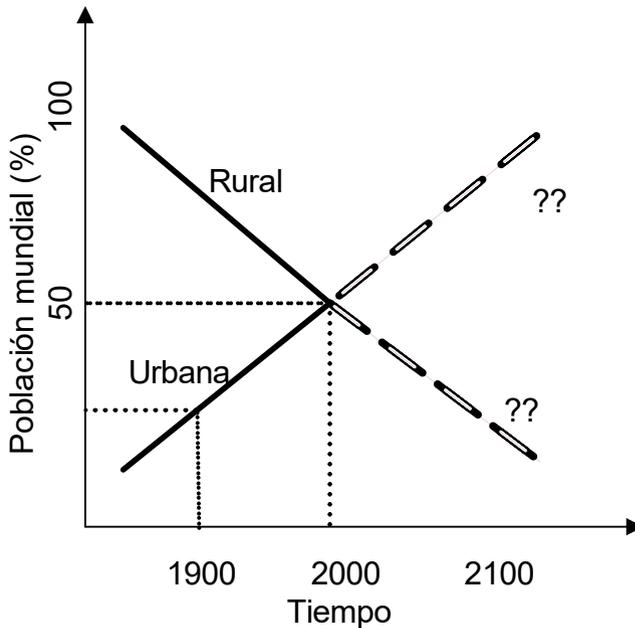


Figura 2.2. Gráfico aproximado de la evolución de la de explosión urbana

---

Obviamente, en el nivel más simple, sostenibilidad significa supervivencia, pero como las organizaciones humanas y las ciudades se complican cada vez más, el concepto de sostenibilidad en sí también se vuelve más complejo (Bugliarello, 2006). Es por eso que las preguntas arriba formuladas presentan una serie de retos tecnológicos y dificultades conceptuales a las que se ha de hacer frente.

Cada vez más, las ciudades se contemplan como a unidades de negocio y se aplican principios de eficiencia empresarial a las administraciones locales. Los espacios que ha de gestionar el urbanismo ya no son físicos sino económicos. El viario y las redes definen el territorio y el espacio se contempla como un bien público escaso. El poder de atracción de las áreas metropolitanas ya no se basa únicamente en su capacidad de oferta de trabajo y vivienda, sino que cada vez tiene mayor importancia la dotación de servicios, tanto en cantidad como en calidad, para "satisfacer al cliente". La ciudad moderna y de calidad, ha de proveer servicios y operaciones, pero quiere también hacerlo de forma eficiente y sostenible.

Una vez asumida cierta racionalidad y experiencia en la construcción de infraestructuras y edificios y en el urbanismo, es la eficiencia en las operaciones la que garantiza la continuidad, entendida como sostenibilidad, de los servicios y permite vencer ineficiencias funcionales y descoordinaciones. En la sociedad del conocimiento, los ciudadanos que contemplan ineficiencias hoy en día pedirán soluciones a sus administraciones. En este sentido hay que tener en cuenta que un viario pensado funcionalmente para todos los usos actuales debería disponer de secciones que difícilmente tiene cabida en la mayoría de las calles de nuestras ciudades. La única posibilidad viable es especializar y compartir los usos del viario público. Es, pues, conveniente comenzar a pensar que el viario público es un bien escaso que hay que asignar de forma conveniente. La ciudad del siglo XXI se distinguirá por la dotación de servicios a sus ciudadanos, en cantidad y en calidad, y a un coste adecuado. El diseño de servicios globales como "productos" para "clientes" conlleva a que la eficiencia en las operaciones urbanas sea una condición necesaria de supervivencia. Y esta eficiencia pasa por un análisis integral que comporte una optimización global (no aislada), sistémica o integral de los servicios de la ciudad.

Desde el informe de la Comisión Brundtland sobre medioambiente y desarrollo del año 1987 (Brundtland, 1987) el concepto de desarrollo sostenible ha venido atrayendo la atención mundial. El desarrollo sostenible ha resultado ser un concepto duradero y convincente porque apunta en una dirección política clara e intuitiva, y

además es lo suficientemente flexible para adaptarse a los nuevos problemas, a las condiciones tecnológicas y económicas y a las aspiraciones sociales. Es un llamamiento a la sociedad en general y a la comunidad científica en particular, ya que implica una visión sistémica de la economía y la ecología, y requiere soluciones integrales que protejan los intereses de las generaciones futuras (Goldman and Gorham, 2006). El desarrollo sostenible satisface las necesidades del presente sin sacrificar la posibilidad de que las generaciones futuras puedan hacer lo mismo. Dentro de estas necesidades está ampliamente aceptado incluir objetivos relacionados con el desarrollo económico, el desarrollo social y humano y la salud medioambiental y ecológica. En el contexto de la política de recursos naturales, sostenibilidad significa limitar el agotamiento de los recursos a niveles en los que estos puedan ser reemplazados o que puedan identificarse alternativas a ellos (Goldman and Gorham, 2006).

Haciendo un análisis más profundo de este concepto destaca el hecho de que, dentro del marco del desarrollo sostenible en general, existen diferentes sistemas ambientales, económicos y sociales que interactúan para su beneficio o detrimento mutuo, dentro de diferentes escenarios y escalas de operación (TRB, 1997). Esta visión multidisciplinar de la sostenibilidad es particularmente compleja y difícil de entender, es por eso que existen en la literatura diferentes trabajos centrados en el desarrollo y visualización de este concepto (Lozano, 2008; OECD & UNDP, 2002), incluyendo los llamados "tres pilares de la sostenibilidad" o el "triple bottom line" (véase Figura 2.3) (Elkington, 1997).

Esta visión "triple" del desarrollo, ya común en nuestra vida cotidiana (aunque no tan común en lo que concierne a lo que se hace en pro de), entiende que el desarrollo debe ser soportable (social y ambientalmente), equitativo (socialmente y económicamente) y viable (ambiental y económicamente) y por lo tanto sostenible y duradero. Dentro de la representación de los "tres pilares de la sostenibilidad" cabe destacar el hecho de que el concepto de sostenibilidad en sí es el resultado de las interacciones entre las tres dimensiones o pilares que se superponen, y es por eso que no se pueden, o más bien no se debe, analizar por separado unos de otros (Rossi et al., 2012).

Es por todo esto que aparece la necesidad de adoptar una postura integral que globalice la planificación y la gestión urbana (Robusté et al., 2000), de tal modo que se puede aventurar la necesidad de una disciplina capaz de considerar de forma conjunta todas las operaciones y servicios, sobre mercancías y pasajeros, presentes

en la ciudad, atendiendo al conjunto y no a las partes que lo integran y, prestando especial atención a la sostenibilidad del sistema, es decir, al desarrollo continuado pero responsable del mismo. Esta disciplina, tendente a la optimización sistémica o integral de los servicios de la ciudad, se denomina Logística Urbana.

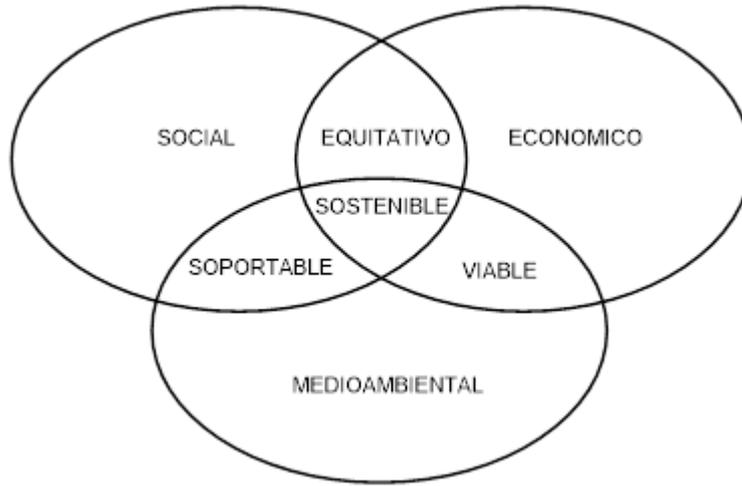


Figura 2.3. Vista esquemática de los “tres pilares” de la sostenibilidad

## 2.1. ¿Qué es la Logística Urbana?

Se trata de replantearse todos los servicios y operaciones de la ciudad adaptando técnicas que se han aplicado con éxito en entornos privados y en muchos ámbitos del transporte y la logística empresarial: la reingeniería de los servicios urbanos. El motivo por el cual se pretende englobar bajo un mismo paradigma toda esta serie de operaciones y servicios urbanos, tradicionalmente diferenciados e independientes, es el hecho de que la lógica de funcionamiento de todas ellas es similar (producción y entregas justo-a-tiempo, entregas en ventanas temporales, servicio a diario, adecuación de servicios a patrones de demanda, previsiones y prioridades, etc.), incidiendo en el uso del viario público y que, mediante una disciplina general capaz de integrarlas a todas, puede lograrse una sinergia conjunta capaz de optimizar los escasos recursos de las áreas metropolitanas atendiendo a la vez a la sostenibilidad del sistema.

Esta es una época de constante desarrollo en las áreas de la informática y las telecomunicaciones, la cual ha propiciado una revolución tecnológica que no solo ha creado nuevos servicios urbanos, sino que ha producido una transformación de los ya existentes. La Logística Urbana, dentro de este contexto, no puede ser ajena a estos cambios y debe servirse de ellos, integrándolos en su desarrollo, ya que el uso de los nuevos servicios telemáticos modifica sustancialmente la forma de diseñar y gestionar un sistema logístico. La posibilidad de transmitir y procesar inteligentemente la información debe ser usada como herramienta para la optimización de las operaciones, a la vez permite intervenir eficazmente en cualquier momento en el proceso de ejecución de dichas operaciones. Lo que en transporte de viajeros ya se viene denominando como Intelligent Transport Systems (ITS), también se ha comenzado a aplicar con éxito al control de accesos a barrios (ventana temporal de acceso implantada y recientemente eliminada en la ciudad de Sevilla), al control de la distribución urbana de mercancías (Fleischmann et al., 2004), a la gestión de flotas de vehículos para servicios de emergencias, a la recogida de basuras, etc. (Arebey et al., 2011; Hannan et al., 2011; Islam et al., 2012; Norouzi et al., 2012).

Aun teniendo todo esto en cuenta, con un somero análisis de los diversos sectores que confluyen en los servicios urbanos se podría llegar a la conclusión de que estos no querrán o no podrán o no sabrán, por sí mismos, optimizar sus operaciones teniendo como objetivo el beneficio social de la colectividad (Anand et al., 2012). Pero es ahí precisamente hacia donde los fundamentos científicos de la Logística Urbana deberán llevarnos.

¿Es la sostenibilidad urbana la capacidad de las ciudades de sobrevivir y prosperar indefinidamente? O bien, dada la creciente población urbana mundial, ¿entendemos por sostenibilidad urbana el impacto de las ciudades sobre el resto del mundo? En efecto, la sostenibilidad urbana se define como la intersección de ambas cuestiones: la creciente urbanización y la sostenibilidad global (Figura 2.4) (Bugliarello, 2006). Así, inevitablemente, la cuestión de la sostenibilidad produce dos grandes conflictos: ciudades frente a entornos rurales y los propios conflictos dentro de las ciudades (centro de la ciudad, suburbios, etc).

En la capacidad de una ciudad para sobrevivir y prosperar indefinidamente intervienen factores como la economía de la ciudad y la disponibilidad de empleos y servicios, la salud y el atractivo del medio ambiente urbano, la disponibilidad de recursos, agua, materiales y energía, así como el espacio para el crecimiento. Cada uno de estos factores se traduce en problemas específicos: desafíos técnicos,

problemas socioeconómicos, la relación entre transporte y uso del suelo, la elaboración de políticas eficaces para fomentar el desarrollo, niveles de ruido, etc. Y por eso se hace necesario desarrollar paradigmas para ayudarnos a comprender mejor estos desafíos y sus dilemas subsiguientes. En este trabajo entendemos que una de las herramientas que nos ayudaran a abordar todos estos retos es la Logística Urbana, entendiendo por ella a la visión sistémica, gestión integral y sostenible del transporte dentro de las ciudades.

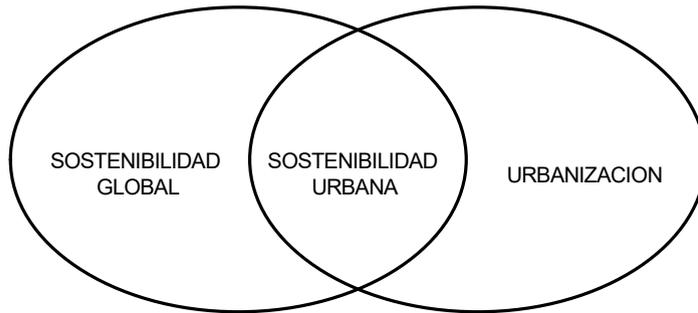


Figura 2.4. La Sostenibilidad Urbana como intersección de la sostenibilidad global y la creciente urbanización

## 2.2. La logística urbana en la ciudad sostenible

Se ha venido desarrollando diferentes conceptos y paradigmas en los apartados previos de este trabajo para en esta sección intentar englobarlos todos bajo una misma visión. Partiendo de la Logística Urbana y llegando a los conceptos de sostenibilidad y de sostenibilidad urbana se pretende llegar a entender mejor la interrelación de todos ellos, sus sinergias y sus conflictos, y así poder llegar a encontrar soluciones plausibles y que respeten, en la medida que sea posible, los diferentes intereses encontrados que surgen al intentar llevar a la práctica todo lo que implica el desarrollo de la Logística Urbana en la ciudad sostenible.

Otra definición de Logística Urbana que nos acerca un poco más a esta idea que se pretende desarrollar es: "la disciplina que adopta la perspectiva de optimizar las actividades de logística y transporte de mercancías de las empresas en las zonas urbanas, teniendo en cuenta el entorno de tráfico, la congestión del tráfico y el consumo de energía en el marco de una economía de mercado" (Taniguchi and Thompson, 2002). En definitiva, la Logística urbana es una disciplina especializada

en hacer frente a los problemas de sostenibilidad encontrados en el transporte urbano de mercancías.

La literatura científica sobre este tema ha ido creciendo en los últimos años dada la importancia que tiene para el futuro del planeta. La investigación en Logística Urbana se realiza para facilitar la existencia de un sistema urbano de suministro de mercancías eficiente y un crecimiento económico sostenible. Una de las herramientas que utiliza la Logística Urbana para realizar dicha función son los modelos urbanos. Los modelos logísticos de las ciudades funcionan como una herramienta de previsión para profundizar sobre el estado actual (y futuro) del transporte de mercancías, del flujo de productos básicos, de las infraestructuras y de las necesidades de información. Este tipo de modelos ayudan a crear una base de conocimientos sobre los flujos de vehículos, los flujos de mercancías, la visión del comportamiento de los diferentes actores involucrados, etc. Esta base de conocimiento se utiliza para entender y predecir las tendencias y los problemas logísticos de la ciudad (Escuín et al., 2012; Ruan et al., 2012; Zhou and Dai, 2012), en un intento de crear medidas políticas e iniciativas destinadas a mejorar el funcionamiento de la logística de la ciudad.

Se pretende mejorar porque, obviamente, existen problemas que se deben solucionar. Los problemas relacionados con la Logística Urbana se hacen visibles a primera vista en el propio tráfico urbano, pero sus raíces están conectadas a la toma de decisiones de los diferentes actores que involucra. Modelar el entorno logístico de la ciudad es importante y necesario, pero no trivial, ya que, para obtener una comunicación eficaz entre los actores involucrados, estos deben interactuar entre sí y compartir un conocimiento común de la terminología y los tipos de decisiones que estén tomando en cada instante. Desde el punto de vista de la semántica, deben utilizar un lenguaje común (al menos un glosario) con el fin de encontrar una coordinación entre usuarios, sistemas y redes de comunicación. Por lo tanto, es importante codificar la semántica de una manera accesible para que sea fácil de interpretar por parte de los usuarios y que los usuarios expertos puedan comunicarse entre ellos sobre temas relevantes (Anand et al., 2012).

### **2.2.1. Actores involucrados.**

Con el desarrollo de la Logística Urbana, algo que ha sido ampliamente aceptado y

que es una característica clave de esta disciplina es el elevado número de actores involucrados y la heterogeneidad de sus necesidades. Esto obliga a una segmentación muy fina de los servicios propuestos, a menudo obviando incluso el escalón mínimo de la viabilidad económica (Macário et al., 2008). Los actores involucrados en el entorno de la logística de las ciudades tienen cada uno sus propios intereses (ver Tabla 2.1) y por lo tanto actúan de forma autónoma, sin ningún tipo de control centralizado. Por ejemplo, entregas de pedidos pequeños pero frecuentes para reducir el coste de inventario, que generan más molestias por parte de los vehículos de transporte de mercancías. Las administraciones locales, por otra parte, imponen reglamentos tales como restricción de peso para mitigar las molestias de los vehículos de transporte de mercancías disminuyendo así los beneficios de los transportistas.

Tabla 2.1. Relación de actores y sus intereses

Actores Involucrados	Intereses
Residentes	Productos y Servicios Impacto medioambiental (Ruido y calidad del aire)
Minoristas	Competitividad Rentabilidad
Autoridades Locales y Servicios Públicos	Accesibilidad Gobernabilidad y legislación Impacto medioambiental (Ruido y calidad del aire)
Proveedores	Crecimiento del mercado Rentabilidad
Distribuidores	Eficiencia Tráfico

Esta situación de poco entendimiento y comunicación es la mayor fuente de problemas del transporte urbano de mercancías (por ejemplo, la escasa sostenibilidad económica y ambiental). En consecuencia, existe una gran necesidad de un enfoque sistémico y analítico que capte la toma de decisiones de los diferentes actores con el fin de entender el transporte urbano de mercancías (Allen et al., 2012; Anand et al., 2015, 2014; Cherrett et al., 2012; Stathopoulos et al., 2012, 2011).

## 2.2.2. Políticas adoptadas por las autoridades locales.

Las autoridades vienen considerando tradicionalmente el transporte de mercancías simplemente como fuente de impactos negativos en el medioambiente, a menudo derivados de las denuncias presentadas por los residentes y otros usuarios de las vías públicas. Como resultado, las políticas sobre la Logística Urbana de mercancías tienden a caer en seis categorías (Stathopoulos et al., 2012), que se exponen a continuación con algunos ejemplos:

- i. Políticas basadas en el mercado: estas apuntan a modificar los precios de mercado de los bienes cuya producción y/o consumo generan costes externos negativos (Maggi, 2007). La ecotasa por congestión representa una medida económicamente atractiva y que repercute positivamente en la congestión del tráfico en los centros de las ciudades (Rotaris et al., 2010). Sin embargo, políticas de fijación de precios al tránsito del transporte de mercancías requiere un entendimiento previo de las funciones complementarias, y a veces contradictorias, de los transportistas y receptores (Holguín-Veras et al., 2006).
- ii. Políticas reguladoras: se refieren a las normas y reglamentos, aplicados por un sistema de control o por las autoridades locales. Las ventanas temporales y las restricciones de acceso, como las ventanas temporales de acceso, son las medidas utilizadas más frecuentemente (Comi et al., 2011; Duin and Muñozuri, 2006). Los resultados de estudios sobre varias ciudades europeas sugieren que la regulación específica sobre el medio ambiente para la entrada de transporte es una de las maneras más eficaces para reducir las emisiones (Dablanc, 2008).
- iii. Políticas de uso del suelo: estas ejercen un gran impacto en la logística de la ciudad, y suelen zonificar las actividades económicas y las no económicas, como la concentración de las actividades comerciales que puede facilitar la racionalización de las entregas, beneficiando así tanto a los operadores como a los residentes (Maggi, 2007). En general, el análisis de los sistemas logísticos como entidades complejas y espacialmente relacionadas es un enfoque cada vez más aceptado (Allen et al., 2012; Hesse, 2004; Taylor and Sloman, 2008). Un reto importante es el análisis de la interacción entre el transporte de mercancías y los movimientos de personas (Russo and Comi, 2010).

- 
- iv. Políticas sobre las infraestructuras: tienen por objeto fomentar el cambio del modo de transporte, se intenta erradicar el dominio de la carretera como principal medio de transporte de mercancías. Una de las políticas más corrientes para racionalizar el flujo de mercancías son las plataformas logísticas orientadas a consolidar las entregas y las recogidas (Marcucci and Danielis, 2008). Aunque la sostenibilidad de estos centros de distribución depende de un delicado equilibrio entre los incentivos privados y públicos, de tal modo que se observa una disminución progresiva de la participación de los distribuidores privados, debido a la baja rentabilidad y la falta de apoyo de los responsables políticos locales (Visser and van Binsbergen, 1999).
  - v. Políticas basadas en la información: este tipo de medidas se centran en el intercambio de información entre los agentes, con el objeto de apoyar la programación y la planificación de las rutas de los vehículos de mercancías (por ejemplo, actuando en tiempo real ante la presencia de atascos) (Giannopoulos, 2002).
  - vi. Políticas de gestión: llevadas a cabo por agentes privados y públicos, y están destinadas a promover la cooperación entre los operadores.

Esta relación nos muestra ejemplos de cómo no se han desarrollado políticas coherentes sobre la Logística Urbana en la misma medida que se ha hecho en el transporte de pasajeros. Sin embargo, en la última década, muchas autoridades urbanas han comenzado a centrar su atención en mayor medida sobre la eficiencia y la sostenibilidad de la Logística Urbana, debido a su importancia económica. Esto ha llevado a que se realicen algunos esfuerzos en desarrollar estrategias y planes de Logística Urbana en algunas ciudades, así como proyectos de investigación, estudios y planes de operación. Estos incluyen la implementación de centros de consolidación urbana en algunas ciudades europeas, incluyendo alguna española, el establecimiento de asociaciones de calidad del transporte de mercancías, el desarrollo de las operaciones de carga y descarga fuera del horario para no influir en el tráfico, el uso variable de las vías en determinadas horas (Barcelona), el uso de triciclos eléctricos para realizar las entregas de paquetería en las zonas céntricas de ciudades como Londres, París y Bruselas, y el uso de consignas y puntos de consolidación en ciudades alemanas, francesas y belgas (Allen et al., 2010, 2007, 2000; Dablanc, 2010; Dasburg and Schoemaker, 2008; Muñuzuri et al., 2005; Stantchev and Whiteing, 2006; Ville et al., 2013).

Cabe destacar, en contra de todo esto, la falta de políticas de recopilación de datos por parte de las autoridades públicas acerca de las operaciones de Logística Urbana, con la excepción de recuentos de tránsito de vehículos que aportan poca información. Esto da lugar, típicamente, a que las autoridades locales tengan una visión bastante limitada de los patrones del transporte urbano de mercancías impidiendo con esto el desarrollo de estrategias y políticas adecuadas.

Ante la visión de todo esto, y haciendo un ejercicio de reflexión se puede llegar a la conclusión de que existe la necesidad de estudiar el efecto de estas políticas, en términos de la vida real, sobre los operadores logísticos, y ver su aceptabilidad y sus reacciones ante ellas. Porque se puede presuponer que algunas de ellas perjudiquen en exceso a estos, en pro de disminuir los impactos sobre la ciudad, haciéndose así necesario medir estos efectos para poder equilibrar mejor los intereses frente a los costes de cada uno de los actores involucrados. Y en esta dirección es por donde transita este trabajo.

## **2.3. Logística urbana de mercancías en el centro histórico de Sevilla.**

Después de haber introducido los paradigmas y conceptos que regirán este trabajo toca ubicarlo geográficamente. La totalidad del contenido de esta tesis versa sobre la ciudad de Sevilla. Es por eso que a continuación se desarrolla un breve acercamiento a la logística urbana en España, para seguidamente hacer un análisis de esta en la ciudad objeto de estudio de este trabajo.

### **2.3.1. Acercamiento a la logística urbana en España.**

La logística urbana de mercancías no ha venido teniendo una atención especial como un concepto singular en España. Esta es probablemente la razón principal para la escasez de datos disponibles sobre el sector. Pocos estudios han analizado esta actividad obteniendo información relevante para el análisis de la distribución urbana de mercancías, y sólo algunas ciudades han abierto esta línea de trabajo recientemente. No consta la existencia de ningún estudio general a nivel español que se haya dedicado a la obtención de datos cuantitativos dirigidos a describir los múltiples aspectos relacionados con la Logística Urbana de Mercancías. El sector del

---

transporte por carretera en España no ha venido considerando la Logística Urbana de Mercancías (LUM) como un subsector de su industria. Por tanto, no existen bancos de datos que muestren la importancia de la actividad. No existen listados de compañías cuyo negocio se centre en la LUM, ni de los ingresos agregados generados por la actividad, ni del número de vehículos utilizados, etc. Por tanto, sólo se puede, en el momento actual, presentar una visión global deducida a partir de la información existente sobre el transporte de mercancías.

El transporte de mercancías en España se divide en un 85% para la carretera, un 12% por barco, 3% en tren y mínimas cantidades en avión. El transporte de mercancías por carretera constituye un sector que factura 6.000 millones de euros, repartido entre 500 empresas que absorben el 99% de la actividad. Existe una clasificación generalmente aceptada en función de los distintos tipos de mercancía. El tipo de mercancía relacionado más directamente con la distribución urbana es la denominada mercancía fraccionada, que corresponde aproximadamente al 10% del transporte por carretera, es decir 600 millones de euros. Por otro lado, el transporte de carga completa representa el 25% del transporte por carretera, 1.500 millones de euros. Los grandes centros comerciales situados en áreas urbanas hacen uso frecuentemente del transporte de carga completa, pero es difícil dar una estimación acerca de qué proporción de este tipo de transporte tiene el final de su cadena de suministro localizado en una zona urbana.

Existen otros dos tipos de transporte de mercancías que a menudo incluyen áreas urbanas en al menos uno de los dos extremos de su cadena de suministro: paquetería y servicios de Courier. Se trata de un mercado de 3.000 millones de euros cubierto por unas 4.000 empresas, la mayoría de las cuales son pequeñas y de ámbito local (las cinco mayores compañías aglutinan el 40% de la actividad). Además, la tercera y cuarta empresas en el ranking de servicios de paquetería y Courier son también las dos primeras en el ranking de carga fraccionada, con el 45% de este tipo de mercancía. Se trata de las principales compañías de logística y transporte que actúan también en la distribución urbana en las áreas metropolitanas españolas.

Los principales indicadores de actividades comerciales en España pueden ser resumidos en las siguientes cifras: existen 20 establecimientos comerciales por cada 1000 habitantes, incluyendo tiendas y también bares, cafeterías y restaurantes. Existe una relación de 9 a 1 entre clientes finales y centros de distribución. La localización de estos establecimientos es aproximadamente: 40% en el centro, 40% en la corona metropolitana y 20% en áreas no urbanas (pueblos, zonas rurales).

No existen indicadores de validez general a nivel español para operaciones de carga y descarga en relación con la población, el empleo o el tamaño de los comercios. Pero no hay razones para esperar valores muy diferentes de los ya obtenidos en Barcelona, Sevilla y otras ciudades: 100.000 operaciones diarias en Barcelona representan aproximadamente 1 operación semanal por empleo.

Cerca de 11 millones de personas viven en las 20 principales ciudades españolas, todas ellas con más de 200.000 habitantes. Dado que la tasa de población activa es del 55%, puede concluirse que un total de 6 millones de operaciones de carga y descarga se llevan a cabo diariamente en estas áreas urbanas (Ministerio de Economía y Competitividad de España, 2011).

Es tradicional en España considerar la Logística Urbana de Mercancías como un tipo de tráfico que debe ser regulado dentro de las normativas generales que se ocupan del tráfico y el transporte a nivel local. En las ordenanzas municipales, bajo el encabezamiento de carga y descarga, se encuentra normalmente un amplio artículo que contempla el tipo de vehículos permitidos en las distintas zonas de la ciudad, las ventanas temporales de acceso para los vehículos de reparto de mercancías y el uso de espacios de aparcamiento para carga y descarga. La mayoría de las normas de tráfico a nivel local fueron dictadas a finales de los años 60 y principios de los 70, y duraron tres décadas con sólo modificaciones y actualizaciones menores. Se ha producido una reciente reformulación de la mayoría de ordenanzas de transportes en la segunda mitad de los 90, por lo que muchas de ellas son recientes, de menos de 10 años de antigüedad.

Por otro lado, no existen instrumentos formales para incluir el concepto de la LUM en los niveles de decisión político y operacional a nivel local en otros departamentos que no sea el de tráfico. Muchas ciudades españolas están realizando una planificación estratégica que tendrá importantes efectos en cuanto al espacio asignado a los múltiples requerimientos posibles en el futuro. El transporte es uno de los principales conceptos a tener en cuenta en la planificación, pero el transporte urbano de mercancías está considerado sólo tangencialmente.

Las compañías logísticas planifican sus inversiones y sus operaciones de acuerdo con sus perspectivas de negocio, que suelen necesitar de gran rapidez en la toma de decisiones. Sin embargo, cualquier movimiento estratégico en el entorno del transporte urbano de mercancías necesita de la aprobación de las autoridades locales, que suelen seguir un ritmo muy diferente. Las compañías perciben la

---

burocracia y los cambios políticos como grandes lastres sobre la logística urbana de mercancías, ya que operaciones como las licencias para construcción (para la ampliación de instalaciones), modificaciones de la regulación o simplemente la resolución de problemas localizados de movilidad representan procesos muy lentos que pueden durar varios meses o incluso años.

Las condiciones de las operaciones diarias pueden ser calificadas de anarquía suave. Existe una cierta tolerancia a la hora de permitir el incumplimiento de la mayoría de normas locales siempre que las molestias causadas a otros tipos de tráfico no sean excesivas. Existe una posición de seguridad moral de los transportistas por estar trabajando, mientras que al resto de usuarios de la calle – excepto los taxis – no se les supone lo mismo.

La situación de los receptores les resulta bastante satisfactoria. Todas las políticas modernas de gestión de stocks – reducción de inventario, entregas frecuentes, just in time - pueden ser implantadas sin siquiera imponer restricciones derivadas desde el transportista. Existen múltiples proveedores con precios muy ajustados dispuestos a aceptar las condiciones que se impongan, por lo que la LUM no supone una restricción para las actividades empresariales o comerciales de las zonas urbanas. Las normativas de tráfico actuales pueden ser consideradas como una simple manera de regular estos aspectos, a pesar de ser bastante rígidas y rudimentarias. Además, no han sido coordinadas formalmente entre las distintas autoridades locales de España, lo cual es de especial importancia en términos del tipo de vehículo que puede acceder a cada ciudad. Las compañías de transporte que operan a nivel nacional deben enfrentarse a diferentes regulaciones dependiendo de la ciudad.

El tráfico, el transporte y la construcción están entre las máximas prioridades de cualquier Ayuntamiento, pero son necesarios menores tiempos de reacción en la modificación de las normas, para conseguir una implementación flexible de nuevas medidas e iniciativas. Estas iniciativas podrían así ser probadas y modificadas, y dar como resultado un crecimiento de las oportunidades para los distribuidores locales de mercancías.

Estas consideraciones no sólo retrasan los proyectos logísticos propuestos por las compañías, sino que pueden convertirlos en no viables. Los retrasos implican mayores incertidumbres en cuanto al resultado de la iniciativa, y las compañías no están preparadas para arriesgar sus finanzas y sus clientes por una simple y remota posibilidad. Por tanto, ya que las compañías no pueden permitirse funcionar más

espacio y las ciudades no pueden (de momento) acelerar sus procesos de decisión, el resultado es a menudo el rechazo del proyecto por parte de la compañía. O quizás, aún peor, el inicio del proyecto, asumiendo el riesgo de que finalmente pudiera no ser aprobado por las autoridades locales.

### **2.3.1.1. Centro histórico de Sevilla. Problemática.**

La posición del centro histórico de Sevilla como centro comercial, de negocios y turístico de la ciudad implica una ingente afluencia diaria de personas, vehículos y mercancías. Los principales problemas a los que se enfrenta el transporte de mercancías en el centro de la ciudad pueden ser resumidos de la siguiente manera:

- Colapso de las zonas de carga y descarga, tomadas por parte de vehículos privados, imposibilitando las tareas propias de los transportes de mercancías.
- Incompatibilidad de los horarios de apertura de los comercios con los horarios definidos para el acceso de vehículos de mercancías al centro histórico, imposibilitando una eficaz gestión de la distribución de las mercancías.
- Mala accesibilidad de la zona, congestionada y con muchas zonas peatonales.

Esta situación planteada en la ciudad de Sevilla es perfectamente paralela a la encontrada en otras ciudades españolas. En general, por parte de los proveedores, se realiza una distribución urbana de mercancías centrada en el día a día, pero no demasiada Logística Urbana. Y desde el punto de vista de la oferta, los problemas son tratados independientemente desde cada compañía.

### **2.3.1.2. Centro histórico de Sevilla. Soluciones posibles.**

Desde el punto de vista de todos los grupos implicados en esta problemática, entiéndase como tal a transportistas, receptores, residentes y administración local, y después de estudiar las posibles soluciones planteadas en otras ciudades se exponen algunas de ellas:

- Repartos nocturnos: La intención de esta medida es evitar la interferencia entre el tráfico privado de la mañana y el transporte de mercancías, realizando este último durante la noche. Ya que es imposible cambiar los

---

hábitos horarios de las personas que utilizan el coche para ir a trabajar al centro, quizás sería posible cambiar el horario del movimiento de mercancías.

- Road pricing: El establecimiento de peajes a la circulación de vehículos por determinadas zonas de la ciudad es un método “agresivo” para disminuir la congestión en las áreas urbanas más sobrecargadas. Consiste en cobrar una cantidad (a determinar) por utilizar determinadas rutas o acceder a determinadas zonas. Económicamente, responde a un intento de internalizar las externalidades provocadas por el hecho de circular con un vehículo por áreas densamente saturadas (congestión, contaminación, acaparamiento de aparcamientos...).
- Reparto conjunto: medidas que buscan el funcionamiento conjunto de varios transportistas, dentro de determinadas parcelas de la distribución urbana.
- Lanzaderas: Esta medida persigue la introducción en el centro de la ciudad de una serie de “zonas lanzadera”, que típicamente serían aparcamientos reservados para las furgonetas de mercancías, a los que podrían acceder a primera hora de la mañana. Desde ellos, la entrega final se realizaría a pie o utilizando vehículos alternativos. Con respecto a este tipo de solución existe un trabajo previo sobre la ciudad de Sevilla (Muñuzuri et al., 2012a).
- Terminal urbana: Las terminales urbanas son pequeños centros de transbordo, y quizás de almacenamiento, situados dentro de la ciudad, cerca de las zonas de elevada densidad comercial y que precisan por tanto de abundantes envíos de mercancías. En ciudades grandes pueden servir de complemento a los centros de transporte de mercancías situados en las afueras, y en ciudades pequeñas pueden sustituirlos.
- Sistemas de información en tiempo real: La base de cualquier sistema de gestión en tiempo real de una flota de transporte urbano de mercancías está en la disponibilidad de información actualizada sobre el estado del tráfico. Esta información debería hacerse disponible a través de internet a todas las empresas de transporte de mercancías, y en general a cualquier vehículo que circule por la ciudad.
- Gestión dinámica de zonas de carga y descarga: Se contempla aquí la introducción de un sistema para optimizar el uso de las zonas de carga y

descarga, de manera que se garantice su exclusividad para el uso de vehículos de transporte de mercancías. Igualmente, este sistema garantizaría la rotación de vehículos en las zonas de carga y descarga, evitando el estacionamiento indefinido de vehículos de reparto en ellas.

- Ventanas temporales de acceso: Esta medida consiste en establecer intervalos temporales durante los cuales el acceso a las zonas céntricas de la ciudad está permitido para los vehículos de transporte de mercancías. Estos intervalos suelen estar situados al principio de la mañana y de la tarde, y se pretende con ellos separar las horas de reparto de mercancías y las horas de máxima afluencia al centro de compradores, turistas, etc. Además, esta medida se ha implantado en la ciudad caso de estudio de este trabajo, por lo que se está hablando de una política real que tiene consecuencias.

---

# 3. RESPONDIENDO A LAS PREGUNTAS

---

*“Yo no procuro conocer las preguntas; procuro conocer las respuestas”*

- Confucio -

En el capítulo anterior se han venido desarrollando los conceptos de Logística Urbana y de Sostenibilidad, se ha comentado lo necesarios que son los dos y a la vez la complejidad que alberga cada uno de ellos, por lo que la pregunta a responder en esta tesis es: *¿cómo hacer sostenible la Logística Urbana?*. Esta pregunta es muy amplia y abarca muchas respuestas, es por ello que se han intentado establecer cuestiones más específicas que se pudieran responder en este trabajo, sin olvidar la cuestión principal y primera. De ese modo en esta tesis se intentarán responder a tres preguntas concretas derivadas de la cuestión principal. A continuación, se exponen esas preguntas y se comentan. Los tres capítulos siguientes al que nos ocupa intentan responder a cada una de ellas en el orden en que se presentan a continuación.

## 3.1. ¿Son las políticas sostenibles realmente sostenibles?

La primera pregunta derivada de la principal que se aborda es sobre el transporte de mercancías por carretera. Es bien sabido que el transporte de mercancías por carretera está causando una serie de impactos sociales, ambientales y económicos negativos en muchas ciudades de todo el mundo. Por lo tanto una Logística Urbana Sostenible debe ser la solución a los problemas de los centros urbanos, y los investigadores deben tener como principal objetivo reducir este impacto sin penalizar las necesidades de las ciudades (Chang and Yen, 2012; May, 2013). Por otra parte, los políticos y las autoridades competentes tienen como objetivo la disminución de los mencionados impactos negativos sociales, ambientales y

económicos del transporte urbano de mercancías. Debido a esto se han venido aplicando ciertas iniciativas y políticas para tratar de reducirlos (regulaciones temporales del acceso, promoción de la cooperación entre sector público y privado, centros logísticos, etc.). Algunos de los objetivos de estas políticas son mejorar el medio ambiente (calidad del aire y ruido), hacer más seguro el espacio de los peatones, la prevención de accidentes, etc. Y todos ellos tienen a la sostenibilidad como objetivo último (Dalkmann and Brannigan, 2007).

En esta situación, la logística urbana debe investigar y reflexionar sobre el impacto de estas políticas en las diferentes áreas y en los intereses de los diferentes actores involucrados en las zonas urbanas y los centros de las ciudades (ciudadanos, residentes, comerciantes, transportistas, autoridades locales, etc.). Este es un campo que ha sido investigado en los últimos años (Gonzalez-Feliu et al., 2012; Quak and de Koster, 2009; Stathopoulos et al., 2012, 2011). Dada la heterogeneidad de los intereses de estos grupos de interés, la coordinación se convierte en algo engorroso, por lo que generalmente actúan de manera independiente y sin ningún tipo de control centralizado. Sin embargo, esta parte de la tesis pretende responder a una pregunta que captura los intereses generales de todos los actores involucrados (los intereses generales deben estar por encima de los particulares): ¿son las políticas sostenibles realmente sostenibles? Por tanto, el primer objetivo de este trabajo, que se recoge en el capítulo 4, es evaluar una de estas políticas, supuestamente sostenibles, de manera cuantitativa para así poder responder a la pregunta de una manera más objetiva (Muñuzuri et al., 2013).

### **3.2. ¿Cómo hacer más sostenibles las flotas urbanas?**

La segunda de las preguntas que surge de la principal es acerca de las flotas urbanas, que, como se ha mencionado anteriormente, forman parte muy importante de la Logística Urbana. Más concretamente sobre la flota de recogida de residuos sólidos reciclables.

Tratar de resolver el problema de la recolección de residuos en las ciudades no es un problema nuevo y además no es fácil de resolver, ya que es un Vehicle Routing Problem que cae bajo la clasificación de NP-duro. Los diferentes tipos de contenedores de basura, diferentes tipos de residuos, la ubicación de los contenedores de basura, la contaminación, el consumo de energía, reducción de

---

costes y similares, son algunos de los posibles retos a enfrentar. Hoy en día la aparición de nuevas tecnologías y la caída de su precio permiten a los investigadores encontrar nuevas herramientas para resolver este problema. Mediante el uso de estas tecnologías se pueden abordar aspectos tales como la eliminación de paradas innecesarias, la reducción de las flotas y su equilibrio de acuerdo con la demanda, la reducción de la contaminación, la reducción de los costes de operación, etc. Estas cuestiones son la base de algunos de los proyectos de investigación realizados en los últimos años (Chang et al., 1997; Nuortio et al., 2006) y de los que cabe decir, que todas son nuevas vías de investigación que ofrecen un gran potencial para el trabajo futuro.

Esta parte de la tesis aborda el problema de la eliminación de residuos reciclables en áreas urbanas con datos del nivel de llenado de los contenedores en tiempo real. En particular, el trabajo se centra en la recogida de contenedores de vidrio. Para ello se comparará una política de recogida clásica, existente en la literatura, con una propuesta en esta tesis, que aboga por ser más sostenible (R. Grosso-delaVega et al., 2014). El desarrollo de la respuesta a esta segunda cuestión se recoge en el capítulo 5 de este documento.

### **3.3. ¿Puede ser sostenible la empresa privada de transporte?**

Centrándose en la perspectiva de la empresa privada se plantea esta cuestión, se sopesan dos conceptos supuestamente opuestos para este tipo de empresas, la sostenibilidad por un lado y la maximización de beneficios por otro. En esta parte de la tesis se desarrollan una serie de herramientas que tiene como fin último ahorrar costes, como requeriría una empresa privada, pero con el añadido de buscar también soluciones más sostenibles en el sentido del ahorro de combustible y de emisiones contaminantes. En el capítulo 6 se desarrolla y detalla el trabajo que realizado para poder responder a esta última pregunta del trabajo.



---

## 4. ESTIMACIÓN DE LOS COSTES ADICIONALES IMPUESTOS A LOS VEHÍCULOS DE REPARTO POR UNA VENTANA TEMPORAL DE ACCESO EN UNA CIUDAD

---

*“El que no aplica nuevos remedios debe esperar nuevos males: porque el tiempo es el máximo innovador”*

- Francis Bacon -

La senda del crecimiento para la mayoría de las ciudades del mundo desarrollado pasa por el ahorro de energía, la protección del medio ambiente y una mejor planificación para conseguir una reducción de las inversiones en infraestructura. Las nuevas políticas de transporte urbano promueven el uso de modos de transporte alternativos mediante la mejora del transporte público o con carriles bici, y las medidas reguladoras acumulan la presión sobre los vehículos privados, al restringir el acceso a las partes internas de la ciudad, con la eliminación de plazas de aparcamiento y el aumento de las peatonalizaciones (Anderson et al., 2005).

En lo que respecta al transporte urbano de mercancías, y dada la inviabilidad de los cambios de modos de transporte, las políticas y regulaciones locales se centran principalmente en la accesibilidad. Esto se traduce en restricciones de los movimientos de los vehículos ruidosos y/o contaminantes, o en la prohibición de su acceso a las zonas céntricas durante ciertos horarios (Muñuzuri et al., 2005; Zunder

and Ibanez, 2004). Otros trabajos previos analizan el efecto de las ventanas de tiempo impuestas por los clientes en las entregas urbanas de mercancías (Ando and Taniguchi, 2006; Qureshi et al., 2009), pero nuestra investigación se centra en las llamadas ventanas temporales de acceso. Esta medida consiste en una zona de la ciudad donde no se puede transitar ni permanecer, dentro de un determinado horario, por parte de los vehículos de tracción mecánica. Estas restricciones una geográfica y una temporal combinadas configuran lo que denominamos una ventana temporal de acceso (Access Time Window). Este tipo de política es de implantación generalizada en Europa, principalmente en ciudades medianas y grandes, que las aplican en diferentes configuraciones (Duin and Muñuzuri, 2006), normalmente en las zonas céntricas de las ciudades. A menudo estas zonas céntricas son foco de atracción turística, zonas de alta concentración comercial y de centros de negocio, por lo que provocan un flujo muy heterogéneo de personas y mercancías. Estas medidas tienden a eliminar los vehículos de reparto de estas congestionadas áreas internas de la ciudad, por lo general durante las horas centrales del día. Pero también tienen un efecto significativo en las operaciones de entrega de mercancías, dado que el número de entregas es mucho mayor en las zonas centrales. Por otro lado, normalmente estas ventanas de tiempo están cerradas durante la mayor parte del horario comercial, siendo este el periodo de tiempo receptor de mercancías por parte de los pequeños y medianos negocios (Muñuzuri et al., 2012b).

La introducción de estas ventanas temporales de acceso por parte de las autoridades locales responde a criterios de sostenibilidad, tratando así de eliminar la congestión y la contaminación de las zonas céntricas de las ciudades durante las horas más sensibles del día. Sin embargo, los análisis relacionados con la introducción de estas políticas han omitido algunos factores relevantes (Seasons, 2003). Por ejemplo, los costes adicionales impuestos a las empresas de transporte de mercancías, obligándolos a utilizar un número mayor de vehículos y a cubrir distancias más largas, dependiendo del tamaño de la zona restringida y de la duración de la ventana de tiempo, para realizar el mismo trabajo.

El concepto de sostenibilidad es generalmente una combinación de lo social, lo ambiental y lo económico (Richardson, 2005), pero mientras que el lado social de la sostenibilidad está garantizado por estas políticas, no es el caso para los otros dos pilares fundamentales de la sostenibilidad, al menos con respecto al reparto urbano de mercancías (Quak and de Koster, 2007). Es por esto que se ha tomado este punto de vista medio ambiental y económico en nuestro análisis. Este pretende calcular los

costes adicionales impuestos a los transportistas al introducir políticas tales como las ventanas temporales de acceso, para que puedan ser tenidos en cuenta en los análisis correspondientes coste-beneficio (Vickerman, 2000).

El objetivo es determinar en qué medida las rutas y operaciones de las compañías locales de reparto de mercancías se ven afectadas por las ventanas temporales de acceso, lo que exige la formulación de un nuevo problema de rutas de vehículos (Vehicle Routing Problem o VRP) específico para este escenario que se contempla. A pesar de que constituye uno de los temas más difundidos y amplios en la literatura científica, la lista de tipos de problemas de rutas de vehículos sigue aumentando, debido principalmente a la cada vez mayor complejidad de los escenarios.

Este tipo de ventana temporal se diferencia de las que se encuentran en el problema de rutas de vehículos con ventanas temporales (Vehicle Routing Problem with Time Windows o VRPTW) en que no se impone por el cliente sino por las autoridades locales. Además, la ventana de tiempo no sólo está relacionada con la prohibición de acceso a las instalaciones del cliente sino en general a la prohibición de acceso a toda la zona restringida (RZ). También se prohíbe con ella cruzar o permanecer en dicha RZ, incluso si no hay operaciones de entrega en curso. En resumen, hay un área relativamente grande de la ciudad sujeta a las restricciones de acceso en virtud de un horario preestablecido, y que tiene que ser tomada en cuenta por los operadores de transporte en la planificación de sus rutas diarias. Denominamos a este nuevo problema como un problema de rutas de vehículos con ventana temporal de acceso (Vehicle Routing Problem with Access Time Window o VRPATW), que combina los factores de zona prohibida y de tiempo afectando por igual a todos los clientes ubicados dentro del área restringida (RZ).

Centrándonos ahora en el problema nuevo planteado en este trabajo, cabe decir que está dentro de la gran familia VRP (Laporte, 2009). Las técnicas de investigación operativa que se vienen aplicando en este campo se centran cada vez más en manejar problemas de planificación de entregas de mercancías en zonas urbanas (Crainic et al., 2004; Ruan et al., 2012). La optimización de rutas de vehículos en las ciudades, debido a sus características específicas, por lo general se asocia con el TDVRP (Donati et al., 2008; Kok et al., 2012; Malandraki and Daskin, 1992), con enrutamiento dinámico de vehículos en tiempo real (Fleischmann et al., 2004; Gendreau et al., 1999) o con una combinación de ambos planteamientos (Chen et al., 2006). También mediante un análisis de varios casos de estudios, Figliozzi (2010) evaluó la influencia de la congestión urbana en el coste de los viajes de vehículos de transporte.

Pero las investigaciones más parecidas al trabajo que nos ocupa se pueden encontrar en dos artículos recientes:

- H. J. Quak and de Koster (2009), por un lado, que analizan la influencia de las ventanas temporales de acceso en un escenario multi-ciudad usando un VRPTW resuelto con paquete estándar de software comercial.
- Conrad and Figliozzi (2010), por otro lado, que estiman el efecto de la congestión en la planificación de rutas para entregas urbanas con un enfoque que utiliza un TDVRP.

Compararemos nuestro procedimiento VRPATW con estos dos enfoques (teniendo en cuenta que las restricciones de acceso son equivalentes a la congestión infinita), lo que demuestra que, cuando se considera un escenario de una sola ciudad con muchos clientes, se requiere un desarrollo específico como el que se describe aquí.

En términos del enfoque de solución, se ha utilizado un algoritmo genético estándar para determinar el efecto de las ventanas de temporales a la planificación y ejecución de unas rutas urbanas de reparto de mercancías. Aunque los algoritmos genéticos están entre las mejores herramientas analíticas de resolución de problemas de rutas de vehículos (Gendreau et al., 2008; Golden et al., 2008; Toth and Vigo, 2002), incluyendo el VRPTW (Caramia and Onori, 2008; Zhao et al., 2008) y el TDVRP (Duan et al., 2010; Jung and Haghani, 2001), nuestro objetivo aquí no era metodológico sino práctico, y se utiliza este algoritmo simplemente como una herramienta para estimar los efectos de las políticas restrictivas implantadas en las ciudades. Algorítmicamente hablando, se entiende que la principal contribución metodológica radica en el cálculo de la función de Fitness, diseñado específicamente para las características del VRPATW.

El resto del capítulo se estructura de la siguiente manera: el apartado 4.1 se describe el VRPATW y los diferentes casos que pueden surgir cuando se evalúa una determinada ruta; el apartado 4.1.4 nos muestra el modelo matemático del problema desarrollado. En la sección 4.2 se detallan los diferentes métodos de resolución que se utilizaron para encontrar soluciones al problema; en el apartado 4.3 se describe la red de prueba utilizada para calibrar los algoritmos utilizados. Seguidamente, en el apartado 4.4 se enumeran los problemas, ya existentes en la literatura, con que se compara el VRPATW, además del caso de estudio, y los resultados derivados de resolver el problema. Para finalizar, en el apartado 4.5 se ofrecen algunas conclusiones obtenidas del estudio.

## 4.1. Descripción del problema

Se define un problema de optimización de rutas sobre un grafo  $G: [V, A]$ , donde  $V$  denota al conjunto de nodos que lo componen y  $A$  el conjunto de arcos que unen dichos nodos. El problema consta de un único depósito desde donde empiezan y terminan todas las rutas, pero para la mejor resolución del modelo que se presenta (apartado 4.1.4) se utilizan dos subconjuntos de nodos virtuales  $D$  y  $D'$  con nivel de oferta mayor que cero que representan a dicho depósito único. De este modo  $D = \{O_1, \dots, O_l\}$  denota los nodos desde donde se iniciarán todas las rutas, y  $D' = \{O'_1, \dots, O'_l\}$  denota los nodos donde finalizarán todas las rutas, con  $l > 0$  como el número de vehículos utilizados en el problema (todos los vehículos llevan asociado un coste de utilización  $C$ ). Se considera que estos viajan por el grafo y que un único vehículo podrá parar en cada cliente, además no se consideran restricciones de capacidad en los vehículos, lo cual es una hipótesis realista dentro del campo de las entregas de mercancías urbanas, donde los vehículos rara vez van llenos (Muñuzuri et al., 2005).

De este modo, el conjunto de nodos  $V$  se define como  $V = D \cup D' \cup N \cup \bar{N}$ , siendo  $N$  el conjunto de nodos con nivel de demanda mayor que cero que representa a los clientes y  $\bar{N}$  el resto de nodos del grafo, nodos de tránsito, con nivel de demanda igual a cero. Cada uno de los nodos del grafo tiene asociado un coste temporal  $T_{D_i} \geq 0, \forall i \in V$  que modela el tiempo de entrega o de descarga, obviamente este será cero para los nodos virtuales que representan al depósito ( $T_{D_i} = 0 \forall i \in \{D, D'\}$ ) y para los nodos pertenecientes al subconjunto  $\bar{N}$  ( $T_{D_i} = 0 \forall i \in \bar{N}$ ); y por tanto distinto de cero para los nodos pertenecientes al subconjunto  $N$  ( $T_{D_i} \neq 0 \forall i \in N$ ).

Se considera también en el problema que existe cierta zona de la ciudad con una restricción de acceso temporal que denominaremos Zona Restringida ( $RZ$ ). Esta  $RZ$  está bajo la influencia de una ventana temporal ( $TW$ ) que regula la posibilidad de acceder a ella o no. Así se define un horizonte temporal (corresponde a las horas de trabajo de un día), al que se deben acoger todas las rutas, comprendido en el intervalo de tiempo  $[0, T]$ , y dos tiempos que definen el inicio ( $t_{CTW} | 0 < t_{CTW} < T$ ) y la finalización ( $t_{OTW} | t_{CTW} < t_{OTW} < T$ ) de la  $TW$ . De este modo se habla de que la ventana temporal está abierta ( $OTW$ ) cuando nos encontramos en un instante de tiempo  $t | t_{OTW} < t < t_{CTW}$ , y de que la ventana temporal está cerrada ( $CTW$ ) cuando nos encontramos en un instante de tiempo  $t | t_{CTW} \leq t \leq t_{OTW}$ . Una descripción esquemática de la configuración VRPATW se muestra en la Figura 4.1.

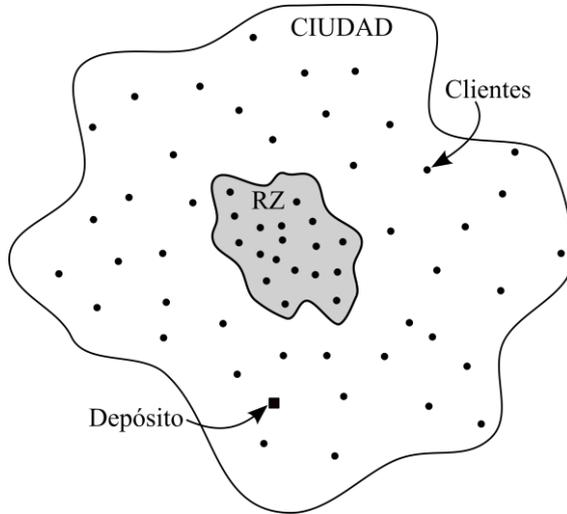


Figura 4.1. Representación esquemática de una ciudad en la que se aplica un VRPATW

Representando la recta del tiempo en la Figura 4.2 se pueden ver los tiempos definidos de la siguiente forma:



Figura 4.2. línea de tiempo que muestra el inicio y el final del horizonte temporal, y el inicio y el final de la ventana temporal de acceso ( $TW$ )

Parte de los clientes, o nodos pertenecientes a  $N$ , se encuentran dentro de la mencionada  $RZ$  por lo que los vehículos deberán interactuar con la  $TW$  para no incumplir la restricción temporal de acceso. Así se definen también otros dos subconjuntos de nodos, uno  $Rz$  que incluye a los nodos que se encuentran dentro de la  $RZ$  y  $\bar{Rz}$  que incluye a todos los nodos que se encuentran fuera de la  $RZ$ , así  $Rz \cup \bar{Rz} = V$ . A su vez dentro de  $\bar{Rz}$  se definen otros dos subconjuntos:  $\bar{Rz}_o = \bar{Rz} \setminus D'$  que incluye todos aquellos nodos desde los que puede salir un vehículo hacia otro nodo y  $\bar{Rz}_d = \bar{Rz} \setminus D$  que incluye todos aquellos nodos a los que puede llegar un vehículo desde otro nodo. Se supone también que  $N \cap RZ \neq \emptyset$  y que  $\bar{N} \cap RZ \neq \emptyset$ . Otra característica asociada al subconjunto  $Rz$  es que tiene una densidad mayor de

nodos pertenecientes al subconjunto  $N$  que cualquier otra parte del grafo. Con esto último se intenta modelar la realidad de que, por tener una alta concentración de comercios y centros de negocios, los centros de las ciudades tienen un número mayor de posibles clientes.

Para todo el problema y para el modelo, dado que se debe tener en cuenta el instante de tiempo en el que se está en cada momento, los costes que se utilizan se encuentran en términos temporales. Así se definen un conjunto de costes temporales asociados a cada uno de los arcos del grafo. Estos costes son función únicamente del tránsito por los arcos y no están relacionados con la cantidad de mercancía que se transporta por ellos. Cada arco  $(i, j) \in A$  tiene asociado cuatro tipos de coste de (véase la Figura 4.3):

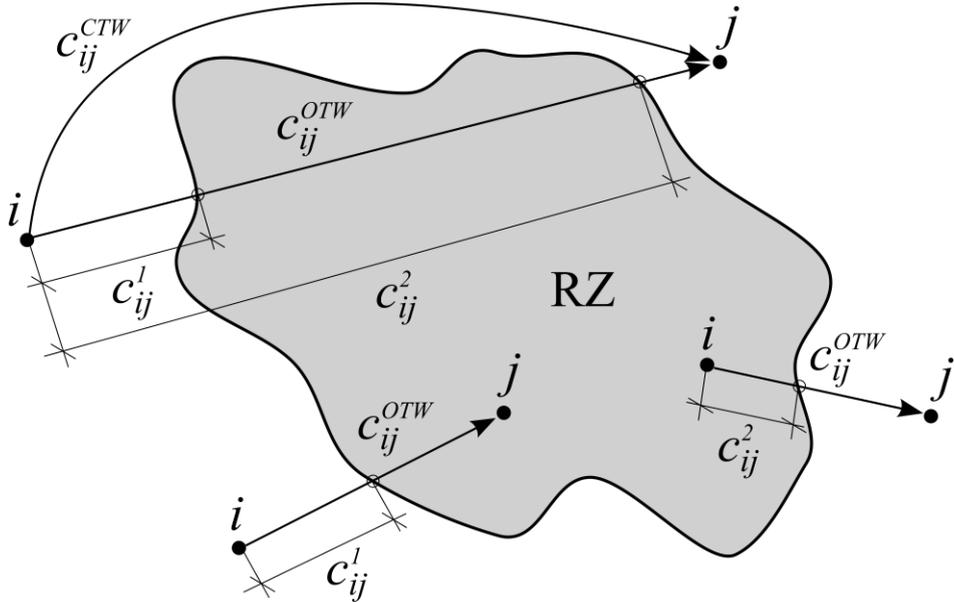


Figura 4.3. Estructura de costes de los arcos que entran, salen y cruzan la RZ

- $c_{ij}^{CTW}$  que es el coste de desplazamiento desde el nodo  $i$  hasta el nodo  $j$  con la ventana temporal cerrada.
- $c_{ij}^{OTW}$  que es el coste de desplazamiento desde el nodo  $i$  hasta el nodo  $j$  con la ventana temporal abierta.
- $c_{ij}^k$  con  $k = \{1, 2\}$  es un coste asociado a la intersección del camino de la ruta con el límite de la RZ, así si:

- $k = 1 \Rightarrow c_{ij}^1$  es coste de desplazamiento desde el nodo  $i$  hasta el límite de la  $RZ$  cuando la ruta entra en ella en su camino hacia el nodo  $j$ . El subíndice  $k = 1$  denota que el camino de la ruta está “entrando” en la  $RZ$ .
- $k = 2 \Rightarrow c_{ij}^2$  es el coste de desplazamiento desde el nodo  $i$  hasta el límite de la  $RZ$  cuando la ruta sale de ella en su camino hacia el nodo  $j$ . El subíndice  $k = 2$  denota que el camino de la ruta está “saliendo” de la  $RZ$ .

Otro dato binario auxiliar del problema y del modelo es  $p_{ij} = \{0, 1\}$  que toma el valor uno cuando el camino de la ruta cruza la  $RZ$ , es decir  $p_{ij} = 1 \Leftrightarrow c_{ij}^1 \geq 0$  y  $c_{ij}^2 \geq 0 \forall i \in \overline{Rz}_o$  y  $\forall j \in \overline{Rz}_d$ . Y toma el valor cero en cualquier otro caso.

Como resultado, el VRPATW difiere de la formulación clásica del VRPTW en dos aspectos principales:

- (1) la ventana de tiempo no se asigna a todos los nodos de clientes, sino a toda una zona del grafo ( $RZ$ ) y por tanto a todos los clientes que estén dentro de ella; y
- (2) en el VRPTW, las ventanas de tiempo corresponden al intervalo de tiempo durante el cual el cliente en cuestión se puede visitar, mientras que en el VRPATW la ventana de tiempo corresponde al intervalo de tiempo durante el cual los vehículos de reparto no pueden ni permanecer ni cruzar por el interior la zona restringida  $RZ$ .

Antes de describir las diferentes situaciones a considerar en el proceso de construcción de rutas, se definen a continuación algunos conceptos, terminologías y nomenclatura no mencionado hasta ahora y que se utilizaran en los siguientes apartados.

El coste  $T_{D_i}$  modeliza el hecho de que el vehículo al llegar a la ubicación del cliente  $i \in N$  se detiene para realizar la descarga de la mercancía, por lo que se debe distinguir un tiempo de llegada y otro de salida en el paso por cada uno de los nodos del subconjunto  $N$  de cara al análisis y resolución del problema. Estos tiempos se han denominado:

$t_i^e \equiv$  Tiempo de llegada del vehículo a la parada o cliente  $i$ .

$t_i^s \equiv$  Tiempo de salida de la parada  $i$  hacia la parada  $i + 1$ , con  $t_i^s = t_i^e + T_{D_i}$ .

Volviendo a la recta del tiempo se puede representar como se observa en la Figura 4.4, denotando con  $P_i$  el cliente o parada "i".

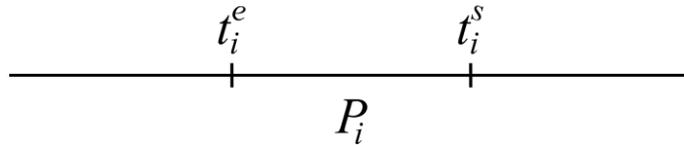


Figura 4.4. Representación de los tiempos de llegada y salida en el cliente  $i$  en la ruta de un vehículo

Después de la definición del problema, de la ventana de tiempo, de la zona restringida y de la terminología relacionada, ahora procedemos a analizar los diferentes casos que puedan surgir en el cálculo de rutas de vehículos. A partir de la situación general de un vehículo en movimiento que va de un cliente al siguiente hasta el final de su recorrido vamos a describir los posibles casos, su interacción con la ventana de tiempo y con la zona restringida, y cuál debería ser la reacción del algoritmo en cada uno de ellos.

#### 4.1.1. Caso general

Si un vehículo tiene que visitar una secuencia determinada de clientes, la situación por defecto establece que se inicia su recorrido en el depósito a partir del momento de inicio de día o tiempo cero. Luego, en cada cliente que se visita, se calcula el correspondiente tiempo de llegada y de salida, pero también tenemos que tener en cuenta si el cliente está en el interior de la zona restringida y, en caso afirmativo, si la ventana de tiempo está abierta o cerrada. Si no hay restricciones que afectan el viaje, el proceso continúa con el siguiente cliente de la secuencia, hasta que todos los clientes hayan sido visitados o el final del día  $T$  haya sido alcanzado por el tiempo de viaje del vehículo sin completar todos los clientes. En este último caso se recurrirá a un nuevo vehículo, este iniciará su ruta, con tiempo cero pues se considera que sale al mismo tiempo que el primero, desde el nodo inicial y su primera parada será la siguiente a la última que realizó el vehículo anterior. El proceso es el mismo para todos los posibles nuevos vehículos utilizados en la planificación de las rutas.

Sin embargo, si alguna restricción en relación con la ventana de tiempo afectara a la visita de un cliente dado en la ruta, se deben introducir consideraciones adicionales. Estas consideraciones, y el procedimiento seguido en cada caso, se describen en las siguientes secciones.

### 4.1.2. Entrada en la Zona Restringida

Este es el caso de viajar del cliente  $i$ , que se encuentra fuera de la zona restringida RZ, al cliente  $i + 1$  ubicado en el interior de esta. Varias situaciones diferentes pueden aparecer en este caso, dependiendo de si la ventana de tiempo está abierta o cerrada. Si la ventana de tiempo está abierta en el momento de llegada  $t_{i+1}^e$  al cliente  $i + 1$ , el procedimiento es idéntico al caso general, ya que la ventana de tiempo no afecta el viaje. Sin embargo, si la ventana de tiempo está cerrada en  $t_{i+1}^e$ , el viaje es inviable (véase la Figura 4.5), y la distancia (en unidades de tiempo) cubierta entre ambos clientes necesita ser dividida (véase la Figura 4.6) en  $c_{ij}^1$  (distancia cubierta fuera de la zona restringida) y  $(c_{ij}^{OTW} - c_{ij}^1)$  (distancia recorrida dentro de la zona restringida). La frontera entre la zona restringida y las zonas sin restricciones del resto de la ciudad está compuesta de nodos, uno de los cuales en este caso separa el último arco en  $c_{ij}^1$  del primer arco en  $(c_{ij}^{OTW} - c_{ij}^1)$ . En este caso, el vehículo tiene que esperar en el cliente anterior hasta que la ventana de tiempo se abra de nuevo y se pueda acceder a la zona restringida. Si ese cliente anterior no se encuentra dentro de la zona restringida, el instante de llegar al cliente  $i + 1$  se mueve hacia adelante, haciendo  $t_{i+1}^e = t_{OTW} + (c_{ij}^{OTW} - c_{ij}^1)$  (véase la Figura 4.7). Esto sincroniza el instante de entrar en la zona restringida con el instante en que la ventana de tiempo está abierta de nuevo, garantizando así que el vehículo no está dentro de la zona restringida mientras la ventana de tiempo esté cerrada.

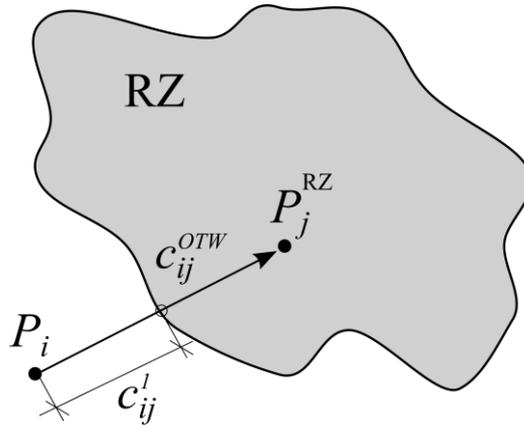


Figura 4.5. Representación de la entrada a la zona restringida

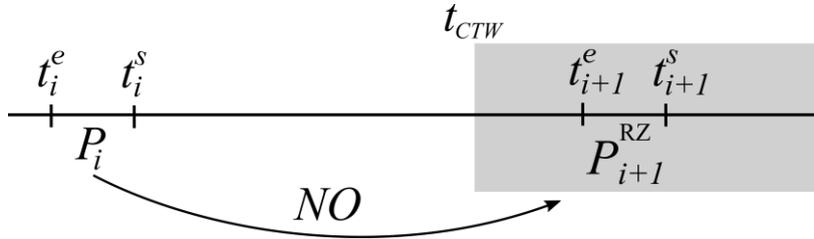


Figura 4.6. Distancias (en términos temporales) cubiertas dentro y fuera de la RZ al viajar entre los clientes  $i$  e  $i + 1$

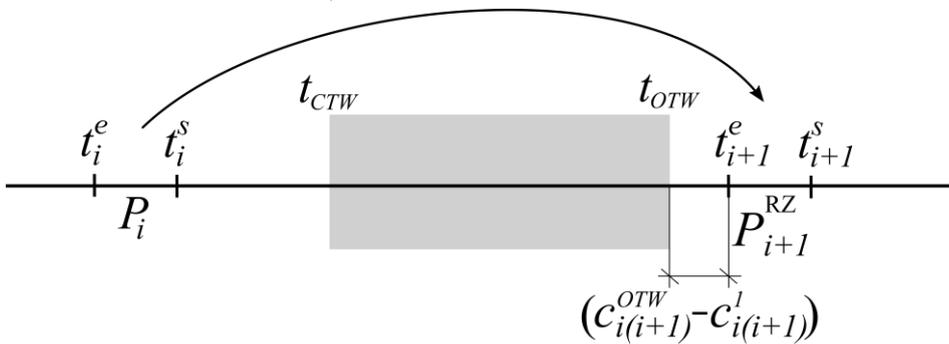


Figura 4.7. Reajuste del tiempo de llegada al cliente  $i + 1$  con el fin de asegurarse de que el vehículo no esté dentro de la RZ mientras la ventana de tiempo esté cerrada.

A continuación, y tratando de reducir la duración total de la ruta, también necesita ser revisado el tiempo de llegada al cliente anterior, desplazándolo hacia adelante en el tiempo lo más cerca posible al nuevo tiempo de llegada al cliente  $i + 1$ . Este mecanismo está representado en la Figura 4.8.

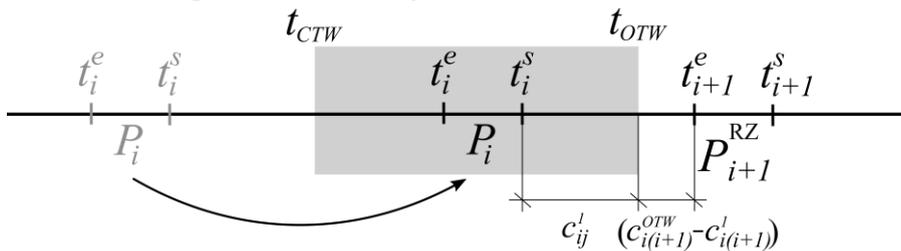


Figura 4.8. Reajuste del tiempo de llegada del cliente  $i$  lo más cerca posible al tiempo de llegada al cliente  $i + 1$

Este reajuste a su vez puede dar lugar a diferentes escenarios en caso de que los clientes visitaron antes del cliente  $i + 1$  también se encuentran dentro de la zona restringida. En ese caso, el procedimiento de planificación de la ruta debe hacer lo siguiente:

1. Revisar hacia atrás hasta encontrar el primer cliente situado fuera de la zona restringida. Este es el cliente de referencia ( $P_{ref}$ ), y es donde el vehículo puede esperar, sin violar ninguna restricción, hasta que la ventana de tiempo esté abierta de nuevo.
2. Desplazar hacia delante en el tiempo el grupo de clientes que se encuentren dentro de la zona restringida ( $P^{RZ}$ ), para visitarlos después de que se abra de nuevo la ventana de tiempo ( $t_{OTW} + (c_{ij}^{OTW} - c_{ij}^I) = t_{p,RZ}^e$ ) (ver Figura 4.9)

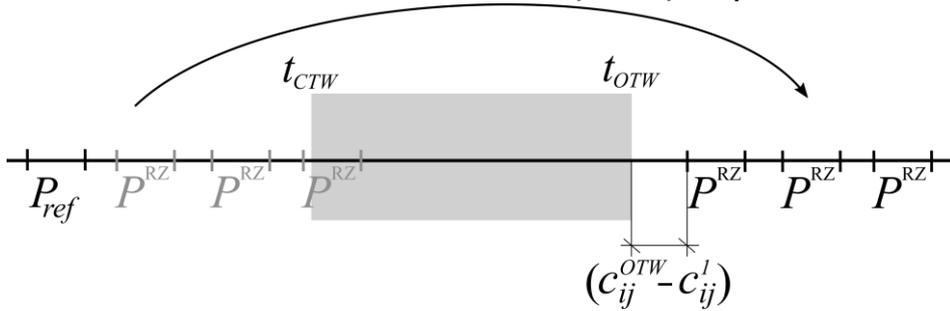


Figura 4.9. Reajuste de un grupo de clientes que se encuentran dentro de la RZ ( $P^{RZ}$ ) para ubicarlos después de que la ventana de tiempo este abierta de nuevo

3. Esta operación, dependiendo del número de clientes reordenados, podría hacer que las últimas paradas (hasta el cliente  $i + 1$ ) puedan ser asignadas con tiempos superiores al fin del día  $T$ . En ese caso, se almacenará la ruta anterior con las paradas que queden dentro del horizonte temporal y se iniciará otra ruta con un nuevo vehículo que deberá recorrer las paradas que no pudieron ser cubiertas por el vehículo anterior.
4. La visita al cliente de referencia (se recuerda que  $P_{ref} \notin RZ$ ) también deberá ser desplazada hacia delante en el tiempo, junto con los clientes visitados antes que él, con el fin de reducir el tiempo total de la ruta. En este proceso, si el cliente visitado justo antes que el de referencia se encuentra dentro de la zona restringida ( $P_{ref-1} \in RZ$ ) (ver Figura 4.10), el tiempo de visita a todos los clientes anteriores, incluyendo también el de salida del depósito,

se debe mover hacia atrás delante en el tiempo hasta  $t_{P_{ref}}^e - (c_{ij}^{OTW} - c_{ij}^2) = t_{CTW}$ .

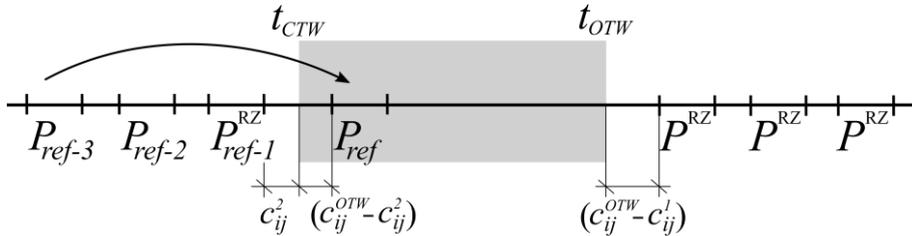


Figura 4.10. Reajuste del cliente de referencia cuando está precedido por otro cliente situado en el interior de la zona restringida

Por otro lado, si antes que el cliente de referencia el vehículo debe visitar a otros clientes que se encuentren fuera de la zona restringida, todos ellos pueden ser movidos hacia delante en el tiempo tanto como sea posible, manteniendo fuera del período de ventana cerrada únicamente los ubicados dentro de la zona restringida (ver la Figura 4.11).

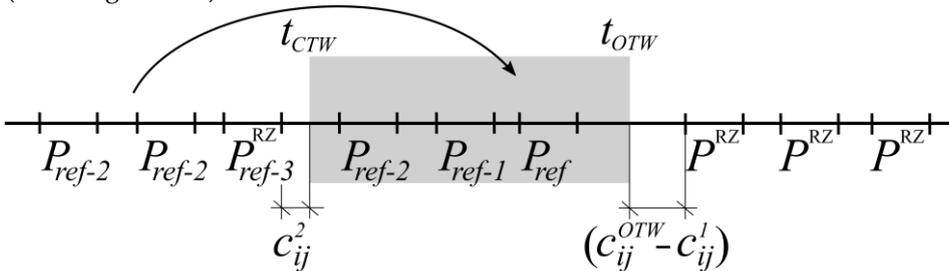


Figura 4.11. Reajuste del cliente de referencia y de sus antecesores desplazados en el tiempo lo máximo posible en busca de reducir la duración total de la ruta

### 4.1.3. Salida de la zona restringida

Si el vehículo está viajando desde el cliente  $i$ , que se encuentra dentro de la zona restringida, al cliente  $i + 1$ , que se encuentra fuera, debemos volver a distinguir entre las dos partes del trayecto, una dentro de la zona restringida ( $c_{ij}^2$ ) y la otra fuera ( $c_{ij}^{OTW} - c_{ij}^2$ ), como se muestra en la Figura 4.12.

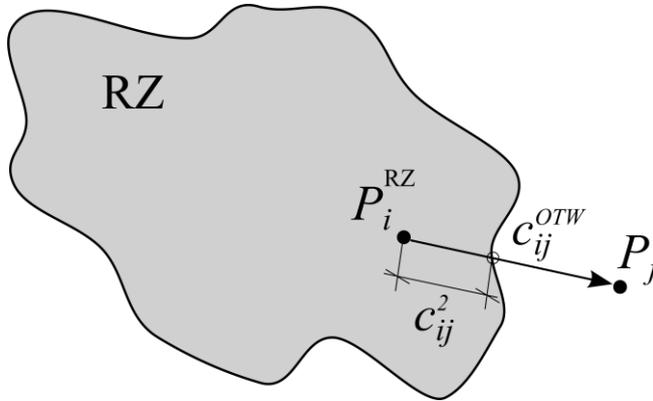


Figura 4.12. Trayecto entre un cliente ubicado dentro de la zona restringida a otro situado fuera

Los posibles casos que se pueden contemplar, en función de la ventana de tiempo, son muy similares a la situación anterior. Por ejemplo, si la ventana de tiempo está abierta al alcanzar el cliente  $i + 1$ , el viaje sigue el procedimiento general, como se muestra en la Figura 4.13.

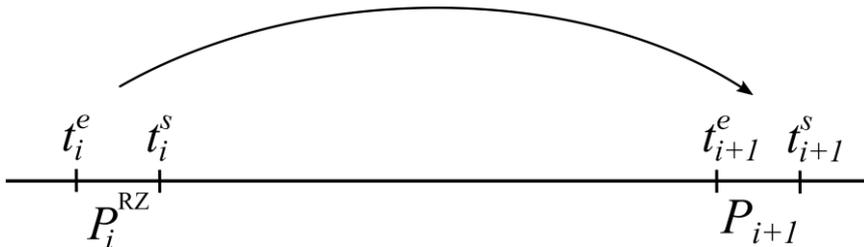


Figura 4.13. Salida de la zona restringida si la ventana de tiempo está abierta

En otro caso, la ventana de tiempo puede cerrarse durante el trayecto de un cliente a otro. Por ejemplo, el viaje representado en la Figura 4.14 es válido, y se trata como en el caso general, mientras que el de la Figura 4.15 no lo es. En este caso inviable, el procedimiento tiene que reajustar el tiempo de llegada al cliente  $i$ , moviéndolo hacia delante en el tiempo hasta que la ventana de tiempo está abierta de nuevo (véase la Figura 4.16). Entonces, como en los escenarios anteriores, todos los clientes visitados antes, y que no se encuentren dentro de la zona restringida, también serían movidos hacia delante con el fin de visitarlos mientras la ventana de tiempo esté cerrada y por tanto ahorrar tiempo en la duración global de la ruta.

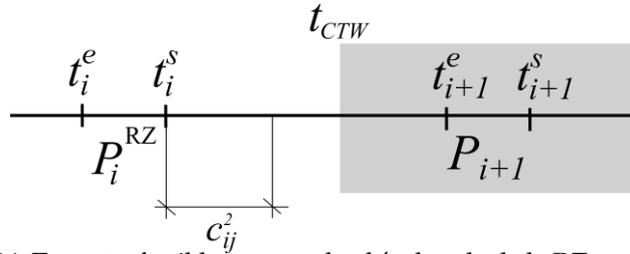


Figura 4.14. Trayecto factible, ya que el vehículo sale de la RZ antes de que se cierre la ventana de tiempo

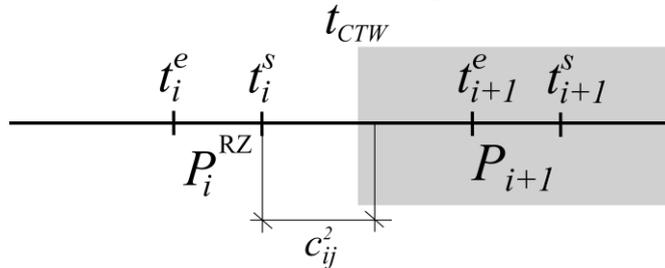


Figura 4.15. Trayecto inviable, ya que el vehículo circula dentro de la RZ cuando la ventana de tiempo aun esta cerrada

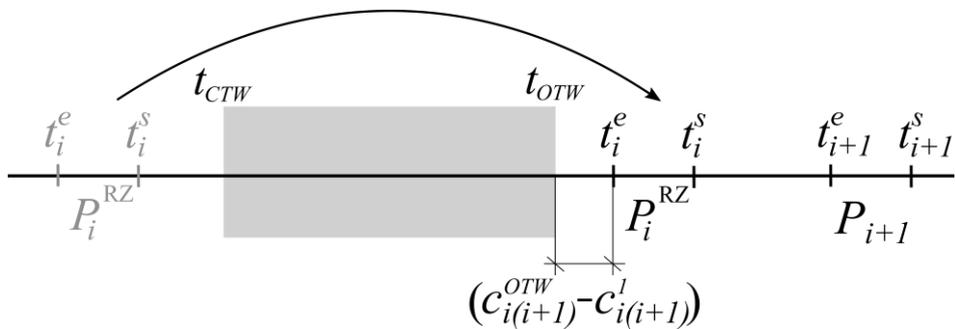


Figura 4.16. Reajuste del tiempo de llegada al cliente  $i$  lo más cerca posible a la apertura de la ventana de tiempo o  $t_{OTW}$

#### 4.1.4. El modelo del VRPATW

Después de mostrar toda la casuística del problema y de introducir la nomenclatura a utilizar se expone a continuación el modelo del problema que se presenta en esta

tesis. Así el modelo queda de la siguiente manera:

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^l (s_{O_i} - s_{O_i}) + C \sum_{i \in D} \sum_{j \in N} x_{ij} \quad [1]$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in D \cup N} x_{ij} = 1 \quad [2] \quad \forall j \in D' \cup N$$

$$\sum_{j \in D \cup N} x_{ij} = 1 \quad [3] \quad \forall i \in D \cup N$$

$$s_i + T_{D_i} + p_{ij} [c_{ij}^{CTW} \delta_{ij} + c_{ij}^{OTW} (1 - \delta_{ij})] + c_{ij}^{OTW} (1 - p_{ij}) - B(1 - x_{ij}) \leq s_j \quad [4] \quad \forall (i, j) \in (D \cup N, D' \cup N), i \neq j$$

$$s_i + T_{D_i} + c_{ij}^{OTW} \geq s_j - B(1 - x_{ij}) \quad [5] \quad \forall (i, j) \in (Rz, Rz), i \neq j$$

$$s_i \leq T \quad [6] \quad \forall i \in D'$$

$$s_i \leq t_{CTW} + B\alpha_{ij}^{k2} \quad [7] \quad \forall (i, j) \in (Rz, \overline{Rz}_d), k = 2, p_{ij} = 0, i \neq j$$

$$s_i \geq t_{OTW} - B\alpha_{ij}^{k1} \quad [8] \quad \forall (i, j) \in (Rz, \overline{Rz}_d), k = 2, p_{ij} = 0, i \neq j$$

$$s_j \leq t_{CTW} + B\alpha_{ij}^{k2} \quad [9] \quad \left. \begin{array}{l} \forall (i, j) \in (\overline{Rz}_o, \overline{Rz}_d), k = \{1, 2\}, p_{ij} = 1, i \neq j \\ \forall (i, j) \in (\overline{Rz}_o, Rz), k = 1, p_{ij} = 0, i \neq j \end{array} \right\}$$

$$s_j \geq t_{OTW} - B\alpha_{ij}^{k1} \quad [10]$$

$$s_i + T_{D_i} + c_{ij}^k = f_{ij}^k \quad [11]$$

$$f_{ij}^k \leq t_{CTW} + B(1 - x_{ij}) + B\alpha_{ij}^{k2} \quad [12] \quad \left. \begin{array}{l} \forall (i, j) \in (\overline{Rz}_o, \overline{Rz}_d), k = \{1, 2\}, p_{ij} = 1, i \neq j \\ \forall (i, j) \in (\overline{Rz}_o, Rz), k = 1, p_{ij} = 0, i \neq j \\ \forall (i, j) \in (Rz, \overline{Rz}_d), k = 2, p_{ij} = 0, i \neq j \end{array} \right\}$$

$$f_{ij}^k \geq t_{OTW} - B(1 - x_{ij}) - B\alpha_{ij}^{k1} \quad [13]$$

$$\alpha_{ij}^{k1} + \alpha_{ij}^{k2} \leq 1 + \delta_{ij} p_{ij} \quad [14]$$

$$\alpha_{ij}^{k1}, \alpha_{ij}^{k2}, \delta_{ij}, x_{ij} \in \{0, 1\}$$

$$s_i, f_{ij}^k \geq 0$$

La variable  $s_i$  indica el instante de tiempo en el que un vehículo llega al nodo  $i$ . La variable  $x_{ij}$  es una variable binaria de decisión que indica si un vehículo viaja del nodo  $i$  al nodo  $j$  tomando el valor uno, o no viaja entre esos dos nodos tomando el valor cero. La función objetivo [1] trata de minimizar la duración de las rutas y la utilización de vehículos por lo que suma, en el primer término, la duración total de todas las rutas calculadas (el término  $(s_{O_i} - s_{O_i})$  denota el coste, temporal, en que incurre el vehículo  $i$  haciendo la ruta del mismo nombre, pues resta el tiempo de

llegada al depósito  $O'_i$  menos el de salida del depósito  $O_i$ ) y en el segundo término penaliza la utilización de vehículos mediante la constante  $C \gg T$ . Las dos primeras ecuaciones [2] y [3] son restricciones clásicas de los VRP y aseguran que de cada nodo salga sólo un vehículo y a cada nodo llegue sólo un vehículo. La restricción [4] nos asegura que el instante de llegada al nodo  $i$  más el tiempo de descarga  $T_{D_i}$ , más el coste de desplazamiento correspondiente (el dato auxiliar binario  $p_{ij}$  y la variable binaria auxiliar  $\delta_{ij}$  controlan, según el caso, que se sume  $c_{ij}^{CTW}$  o  $c_{ij}^{OTW}$ ) sea menor o igual que el instante de llegada al nodo siguiente de la ruta  $j$ . La constante  $B \gg T$  certifica que los nodos  $i$  y  $j$  de la ecuación sean contiguos dentro de una ruta. La restricción [5] complementa a la restricción [4] y se asegura de que el camino entre dos nodos que se encuentran dentro de la  $Rz$  sea lo más corto posible y que se utilice para su cálculo el coste de desplazamiento  $c_{ij}^{OTW}$ . La restricción [6] controla que todas las rutas terminen dentro del horizonte temporal. En cuanto a las restricciones [7] y [8], ambas se aseguran de que el instante de llegada a un nodo  $i \in Rz$ , cuando la ruta se dirige hacia un nodo  $j \notin Rz$ , no se encuentre comprendido dentro de la  $TW$ . Las variables auxiliares binarias  $\alpha_{ij}^{k2}$  y  $\alpha_{ij}^{k1}$  controlan si el trayecto entre los nodos  $i$  y  $j$  interactúa con la  $RZ$  o no. Las restricciones [9] y [10] controlan que por un lado el instante de llegada a un nodo  $j \in Rz$  desde un nodo  $i \notin Rz$  no esté dentro de la  $TW$ , y por otro que cuando una ruta cruza la  $RZ$  viajando desde un nodo  $i \notin Rz$  hasta un nodo  $j \notin Rz$  se cumpla la restricción de acceso durante la  $TW$ . La restricción [11] aun siendo innecesaria se incluye en el modelo para una mejor comprensión de las restricciones siguientes y calcula las  $f_{ij}^k$  que representa el instante de tiempo en el que el trayecto de la ruta entra o sale de la  $RZ$ , en el caso en el que esto suceda. Con respecto a las restricciones [12] y [13], las dos se aseguran de que cuando la ruta llega o sale de la  $RZ$  no incumpla la restricción impuesta por la  $TW$  y además posibilitan que el vehículo pueda esperar en el límite de la  $RZ$  a que la  $TW$  deje de actuar y así poder continuar. La restricción [14] relaciona todas las variables binarias auxiliares y el dato binario auxiliar haciendo cumplir la situación de que si el trayecto de la ruta cruza la  $RZ$  y la  $TW$  comienza en algún momento de ese trayecto se cumpla la prohibición de no estar en la  $RZ$  durante la  $TW$  haciendo que el instante de tiempo  $f_{ij}^k$  correspondiente no se encuentre dentro de dicha  $TW$ .

#### 4.1.5. Problemas a comparar

En este apartado se exponen brevemente los otros dos problemas que entran en la

comparativa realizada en este trabajo. Los tres problemas se contrastaron sobre experimentos con las mismas configuraciones. Estos dos problemas son las dos alternativas principales encontradas en la literatura que pueden hacer frente al problema de VRPATW: el Time Dependent Vehicle Routing Problem o TDVRP (Conrad and Figliozzi, 2010) y el Vehicle Routing Problem with Time Windows o VRPTW (Quak and de Koster, 2009).

La aplicación del TDVRP a nuestro problema requiere la definición de dos matrices de distancia, *LongitudRutas* y *LongitudRutasVcerr*, que en este caso son matrices de tiempo pues es en términos temporales como se ha planteado el problema. Estas dos matrices representan los costes temporales de recorrer cada arco de la red, pero, y para simular la ventana temporal de acceso, una de ellas (*LongitudRutasVcerr*) se construye con costes muy elevados en los arcos de la zona restringida y en los arcos que entran y salen de ella. Con estas dos matrices se pretende representar la dependencia de las distancias con respecto al tiempo. En la Figura 4.17 se pueden ver los diferentes casos que se pueden encontrar al calcular el valor del Fitness en un TDVRP que sigue el proceso descrito en la Figura 4.18. Este proceso utiliza una matriz u otra dependiendo de si en el tiempo de salida de un determinado cliente la ventana temporal se encuentra cerrada o abierta.

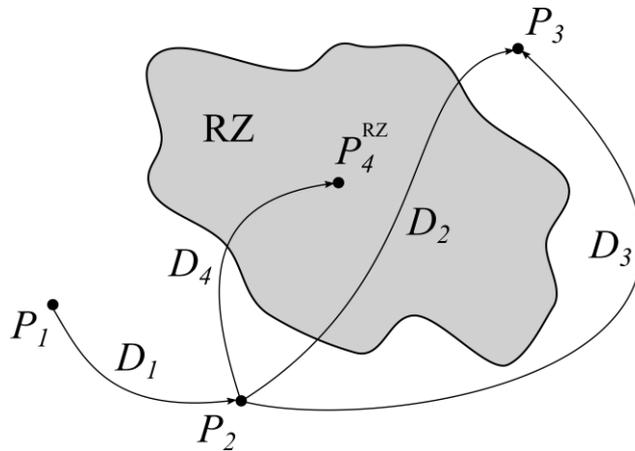


Figura 4.17. Posibles situaciones que surgen en el cálculo de las matrices de distancia del TDVRP. La distancia entre los nodos 1 y 2 (ambos fuera de la zona restringida) es igual a  $D_1$  tanto en *LongitudRutas* y *LongitudRutasVcerr*. La distancia entre 2 y 3 es igual a  $D_2$  en *LongitudRutas* y  $D_3$  en *LongitudRutasVcerr*. Por último, la distancia entre 2 y 4 es igual a  $D_4$  en

*LongitudRutas* y una cantidad muy grande en *LongitudRutasVcerr*

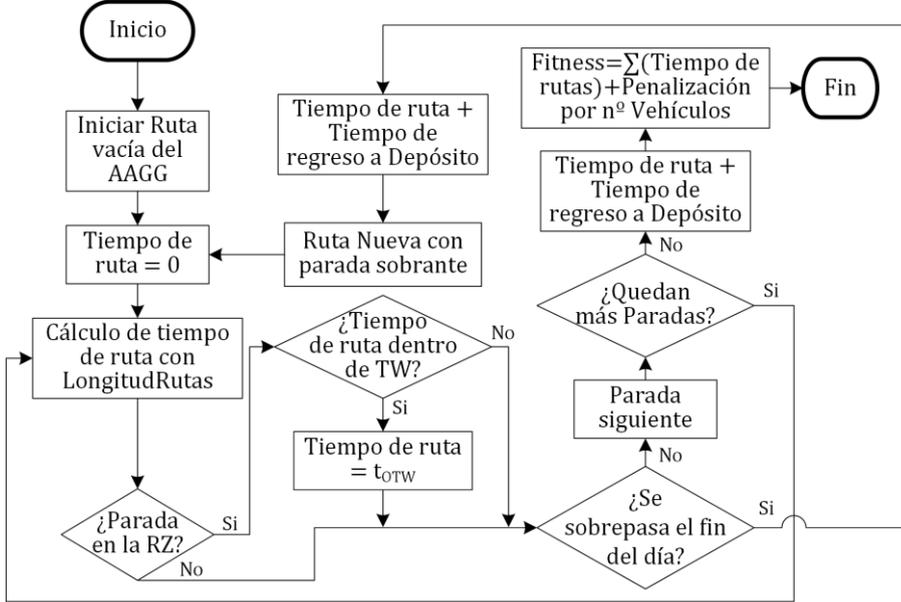


Figura 4.18. Proceso de cálculo del Fitness para el TDVRP

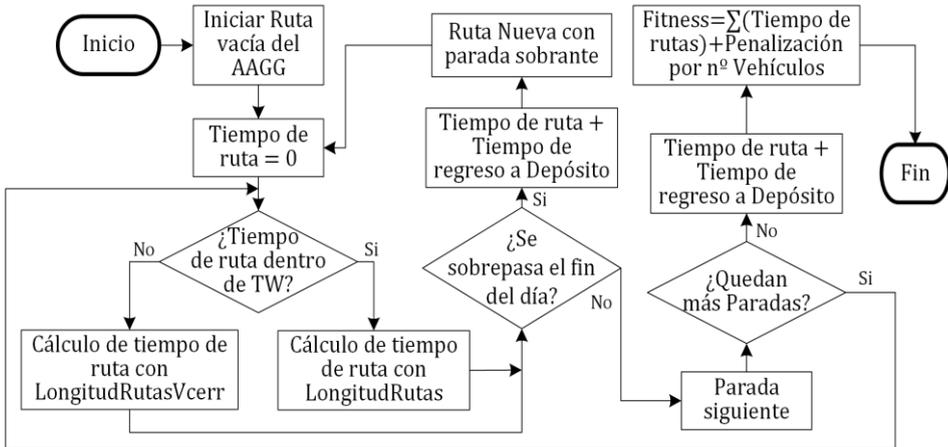


Figura 4.19. Proceso de cálculo del Fitness para el VRPTW

Por otro lado, el enfoque VRPTW sólo permite que lleguen los vehículos a un cliente dentro de una ventana de tiempo predeterminada. En nuestro caso, los clientes

situados fuera de la zona restringida están disponibles durante todo el día, mientras que los situados en el interior tienen dos ventanas de tiempo disponibles, antes y después del período en el que la ventana temporal de acceso está cerrada. El cálculo del Fitness para el VRPTW se describe en la Figura 4.19.

## 4.2. Métodos de resolución

En esta sección se describen los procedimientos heurísticos y metaheurísticos implementados para resolver el VRPATW, imprescindibles dada la naturaleza NP-hard del problema. Esto incluye, en primer lugar, una modificación del algoritmo de ahorro de Clarke y Wright, seguido de un algoritmo genético y de un método de búsqueda Tabú. Se detallan a continuación los correspondientes pseudo-códigos, así como una descripción de cada procedimiento. Vale la pena señalar que los tres procedimientos utilizan la misma función Fitness, representada en la Figura 4.20 y que se describe a fondo más adelante (Muñuzuri et al., 2013).

### 4.2.1. El algoritmo genético

El algoritmo utilizado para resolver el VRPATW se basa en la secuencia de paradas proporcionada por un algoritmo genético (Genetic Algorithm o GA) básico, construido de acuerdo con el diseño mostrado en la Figura 4.21.

Los operadores de este GA se describen brevemente a continuación:

- **Cruce:** El tipo de operador de cruce que se ha elegido para este algoritmo genético es el basado en dos puntos. Se agrupan los individuos de la población de dos en dos. Dentro de cada par de individuos se eligen aleatoriamente dos puntos de cruce y se intercambian las paradas comprendidas entre estos puntos de un individuo con otro. Esta operación se realiza con la totalidad de la población generándose así una población de descendientes del mismo tamaño que la anterior. Al realizarse esta operación, como es de esperar, se produce una duplicidad de paradas en los descendientes, cosa que no es admisible. Para solucionar esto se buscan las paradas repetidas y se sustituyen por las paradas que no estén en el individuo.

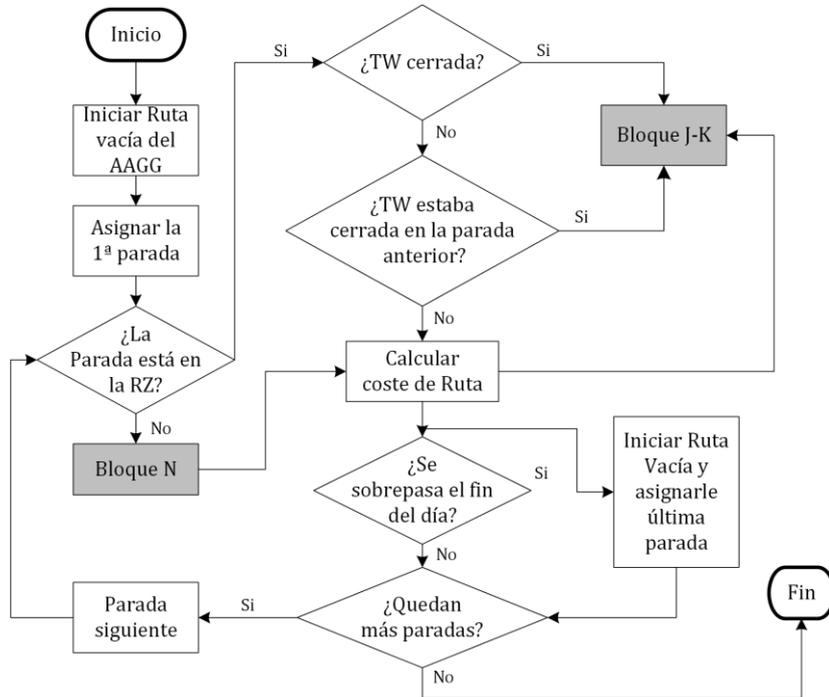


Figura 4.20. Representación esquemática de la función Fitness que se utiliza en las tres implementaciones

- Mutación: se seleccionan los individuos que van a ser mutados en función de la tasa de mutación, dicha mutación consiste en la elección de forma aleatoria de dos paradas dentro de cada individuo las cuales son intercambiadas de posición una con la otra. Así se generan individuos casi idénticos, pero con dos paradas cambiadas.
- Selección por Ranking: El operador de selección se basó en la función de selección proporcional, en la que cada individuo tiene una probabilidad proporcional al valor de su Fitness de ser seleccionado padre de la siguiente generación. De esta manera la población anterior de padres y la de sus descendientes es ordenada, de menor a mayor, según su valor de Fitness. Y posteriormente se le asigna a cada individuo un valor de probabilidad gradiente que va desde el valor unidad para el mejor individuo de las dos poblaciones, al valor cero que se asigna al peor individuo. Con esto se

asegura seleccionar al mejor individuo y desechar al peor para la siguiente generación de padres, además de retrasar de alguna manera la rápida convergencia de las poblaciones que suele ocurrir en este tipo de algoritmos.

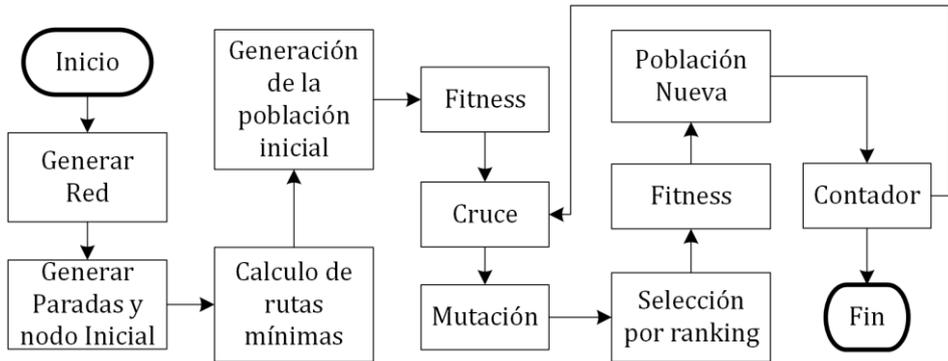


Figura 4.21. Estructura general del algoritmo genético utilizado

- Reinicio de Población o Población Nueva: Según un criterio que se basa en lo cerca que se encuentren el menor valor del Fitness y el valor del Fitness Medio de toda la población, se generará, en ese momento del proceso, una Población Nueva en la que sólo permanecerán los tres mejores individuos de la última población implementada. El resto de individuos se generará aleatoriamente. Con esto se pretende no caer en máximos locales e intentar ampliar la zona de búsqueda de soluciones.
- El criterio de parada se asocia únicamente con el número de iteraciones que se registran mediante un contador.

El resto de esta sección se describe el procedimiento para calcular el Fitness de un individuo dado (cada individuo se compone de una secuencia ordenada de clientes a visitar), que se basa en el análisis de la casuística visto anteriormente. El diagrama de flujo del cálculo del Fitness se muestra en la Figura 4.20.

El cálculo del Fitness comienza con un individuo o secuencia de clientes proporcionadas por el GA y una ruta vacía asociada al primer vehículo. Para cada cliente  $i$ , el procedimiento es el siguiente:

- Si el cliente  $i$  no se encuentra dentro de la zona restringida, el procedimiento entra en el Bloque N. Este bloque explora el cliente anterior  $i - 1$  en la ruta  $y$ , en caso de que se encuentre dentro de la zona restringida, determina si la

ventana de tiempo se cierra en el proceso de viajar desde la  $i - 1$  a  $i$ . En tal caso, el procedimiento modifica el tiempo de llegada a los clientes anteriores al cliente  $i$ , tal y como se muestra en la sección 4.1. El coste global de la ruta se incrementa en consecuencia después de la introducción del cliente  $i$ .

- Sin embargo, si el cliente  $i$  está ubicado dentro de la zona restringida, la siguiente pregunta es si la ventana de tiempo se cierra cuando el vehículo entra en la zona restringida. Si es así, el procedimiento entra Bloque J-K. Este bloque explora los clientes anteriores en busca de los que también se encuentren dentro de la zona restringida. A continuación, se reajustan los tiempos de llegada a estos clientes para que el vehículo los visite después de que la ventana de tiempo se abra de nuevo. Para el caso de los clientes que no se encuentran ubicados dentro de la zona restringida se reajusta para que sean visitados por el vehículo, en la medida de lo posible, durante el periodo de ventana cerrada, tal y como se describe en la sección 4.1. Si, por el contrario, la ventana de tiempo está abierta durante el viaje, el procedimiento simplemente actualiza el tiempo global de viaje después de la introducción del cliente  $i$ .
- El último cálculo determina si el fin del día o tiempo  $T$  se ha sobrepasado ya sea con la introducción del último cliente, teniendo en cuenta que el vehículo debe volver al depósito, o en otro caso con el reajuste de los tiempos de llegada debido a su interacción con la ventana de tiempo. Si es así, el procedimiento inicia una nueva ruta con un vehículo nuevo, y le asigna como primera parada el primer cliente que no pudo ser servido por la ruta anterior. De lo contrario, el procedimiento pasa al siguiente cliente, siempre que en la secuencia queden clientes por servir a la espera de ser asignados a la ruta.

Una vez que todas las rutas se han calculado, el valor del Fitness del individuo evaluado es la suma de la duración de todas las rutas, más la suma de los costes fijos asociados al número de vehículos utilizados para servir a todos los clientes de la secuencia. Al GA diseñado se le añadió posteriormente un bloque adicional de operadores inter e intra-rutas en busca de mejorar la solución obtenida por este. En la Figura 4.22 y en la Figura 4.23 se pueden observar el pseudocódigo del GA y la estructura del bloque adicional de mejora y los operadores utilizados en él.

### **Algoritmo Genético**

```
1:  $p \leftarrow$  Initial random population
2:  $(npl_t, bis) \leftarrow$  null
3: for iteration1 := 1 to  $Nit_{max}$ 
4:   for iteration := 1 to TP
5:      $p_v \leftarrow$  fitness( $p$ )
6:   end
7:    $ngp_o \leftarrow$  crossover( $p$ )
8:    $ngp_f \leftarrow$  mutation( $ngp_o$ )
9:   for iteration := 1 to TP
10:     $ngpv_f \leftarrow$  fitness( $ngp_f$ )
11:   end
12:    $p \leftarrow$  probabilisticSelection( $p, p_v, ngp_f, ngpv_f$ )
13:    $npl_t \leftarrow npl_t + 1$ 
14:   if  $npl_t \geq npl_{max}$ 
15:      $bis \leftarrow$  selectBestIndividualSolution( $p$ )
16:      $p \leftarrow$  randomPopulation
17:   end
18: end
19:  $solution \leftarrow$  selectBestIndividualSolution( $p$ )
```

Figura 4.22. Pseudocódigo del enfoque algoritmo genético (Muñuzuri et al, 2013)

### **Algoritmo Genético + Búsqueda Local**

```
1: Algorithm Genetic Algorithm
2: while improving solution
3:   solution  $\leftarrow$  operator 2 – opt
4:   solution  $\leftarrow$  operator Or – opt
5:   solution  $\leftarrow$  operator 3 – opt
6:   solution  $\leftarrow$  operator Relocate Operator
7: end
```

Figura 4.23. Pseudocódigo del algoritmo genético enfoque que incorpora la rutina de búsqueda local finales

## **4.2.2. El Algoritmo Clarke y Wright modificado**

En la búsqueda de un método heurístico rápido, y ante la particularidad del

VRPATW con respecto a otros VRP, se ha adaptado el conocido método de ahorro de Clarke y Wright (Clarke et al., 1964) para su resolución. La Figura 4.24 muestra el pseudocódigo de este algoritmo Clarke y Wright modificado.

**Algoritmo C & W modificado**

```

1:  $c \leftarrow$  all customers
2: partial solution  $\leftarrow$  null
3: complete solution  $\leftarrow$  null
4: for iteration1 := 1 to all customers of  $c$ 
5:   for iteration2 := 1 to all customers of  $c$ 
6:      $C \ \& \ WList_{OTW} \leftarrow$  fitness( $c$  from iteration1,  $c$  from iteration2)
7:      $C \ \& \ WList_{CTW} \leftarrow$  fitness( $c$  from iteration1,  $c$  from iteration2)
8:   end
9: end
10: solution  $\leftarrow$  insert first two customers from  $C \ \& \ WList_{OTW}$ 
11: solution value  $\leftarrow$  fitness(solution)
12: while no all customers
13:   if  $t_{OTW} \geq$  solution value  $\geq t_{CTW}$ 
14:     solution  $\leftarrow$  insert next customer from  $C \ \& \ WList_{CTW}$ 
15:     solution value  $\leftarrow$  fitness(solution)
16:   else
17:     solution  $\leftarrow$  insert next customer from  $C \ \& \ WList_{OTW}$ 
18:     solution value  $\leftarrow$  fitness(solution)
19:   end
20: end
21: complete solution  $\leftarrow$  partial solution
22: while improving complete solution
23:   complete solution  $\leftarrow$  operator 2 – opt
24:   complete solution  $\leftarrow$  operator Or – opt
25:   complete solution  $\leftarrow$  operator 3 – opt
26:   complete solution  $\leftarrow$  operator Relocate Operator
27: end

```

Figura 4.24. Pseudocódigo del algoritmo de ahorro Clarke y Wright modificado adaptado a la VRPATW

Para ello se crean dos listas ordenadas diferentes de parejas de clientes ( $C \ \& \ WList_{OTW}$  y  $C \ \& \ WList_{CTW}$ ) utilizando el mencionado método. Una lista

( $C \& WList_{OTW}$ ) para el ahorro potencial que se produciría en la distancia a recorrer al secuenciar cada pareja posible de clientes cuando la ventana de tiempo está abierta. Y otra lista ( $C \& WList_{CTW}$ ) para el caso en que la ventana temporal esté cerrada. Estas listas contienen por tanto parejas de clientes ordenados de mayor a menor ahorro. Al iniciar el algoritmo se calculan las listas, se inicia una solución vacía y se inserta la primera pareja de clientes procedentes de  $C \& WList_{OTW}$  en la solución. A continuación, se calcula el valor de esa solución parcial mediante el fitness y se construye la solución insertando clientes de las listas en la solución parcial hasta completarla. Para la inserción de los clientes se tiene en cuenta el valor de la solución parcial para así poder determinar si la parada del cliente a insertar estaría en un tiempo de la ruta con la ventana temporal abierta o cerrada. Obviamente si la parada siguiente se produciría con la ventana temporal abierta el cliente a insertar saldría de la lista  $C \& WList_{OTW}$  y en el caso contrario de la lista  $C \& WList_{CTW}$ . Y de este modo se continúan insertando clientes hasta completar la solución. Posteriormente se busca una mejora de la solución encontrada hasta el momento aplicando una secuencia de operadores de búsqueda local. Esta secuencia de operadores se repite indefinidamente mientras se encuentre alguna mejora del valor de la solución. Los operadores utilizados son el  $2 - opt$ ,  $3 - opt$ ,  $Or - opt$  y  $Relocate operator$  (Lin, 1965; Or, 1976; Savelsbergh, 1992).

### 4.2.3. La Búsqueda Tabú

Dado su buen rendimiento, en comparación con otras metaheurísticas aplicadas a los VRP, se optó por utilizar un procedimiento de búsqueda Tabú (TS) para resolver el VRPATW. Esto se puede observar en investigaciones recientes (Vidal et al., 2013, 2012) que demuestran la idoneidad de esta metaheurística para resolver todo tipo de VRP, obteniéndose con ella los mejores resultados en términos de calidad de la solución y en tiempo de computación. Teniendo en cuenta las diferencias del VRPATW con el resto de problemas que pertenecen a la familia de los VRP's tales como que cualquier inserción de clientes en posiciones diferentes de la solución puede alterar significativamente el valor de la función objetivo, se puede dudar a priori que las mejores metaheurística para solucionar cualquier VRP sean las mismas que las mejores para solucionar el VRPATW. Para solventar esa duda se ha implementado este algoritmo, cuyo pseudocódigo se muestra en la Figura 4.25, para su resolución.

**Algoritmo** *Busqueda Tabu Completo*

```
1: (Tlist, nsList, nsvList, fTl, nobetter)  $\leftarrow$  null
2: bnsv  $\leftarrow$   $\infty$ 
3: for iteration := 1 to  $I_{t_m}$ 
4:   for ns in Neighborhood of cs
5:     nsv  $\leftarrow$  fitness(ns)
6:     nsList  $\leftarrow$  nsList + ns
7:     nsvList  $\leftarrow$  nsvList + nsv
8:     if nsv < bnsv
9:       bnsv  $\leftarrow$  nsv
10:      bns  $\leftarrow$  ns
11:     end
12:   end
13:   if Not TabuElements(bns, Tlist)
14:     (Tlist, fTl)  $\leftarrow$  diferences(bns, cs)
15:     elseif bnsv < bsv
16:       bs  $\leftarrow$  bns
17:       bsv  $\leftarrow$  bnsv
18:       cs  $\leftarrow$  bns
19:       csv  $\leftarrow$  bnsv
20:       break to 5
21:     else
22:       while TabuElements(bns, Tlist)
23:         (bns, bnsv)  $\leftarrow$  findnextbest(nsList, nsvList)
24:       end
25:       (Tlist, fTl)  $\leftarrow$  diferences(bns, cs)
26:     end
27:     cs  $\leftarrow$  bns
28:     csv  $\leftarrow$  bnsv
29:     if csv < bsv
30:       bs  $\leftarrow$  csv
31:       bsv  $\leftarrow$  csv
32:     else
33:       nobetter  $\leftarrow$  nobetter + 1
34:       if nobetter  $\geq$   $M_m$ 
35:         cs  $\leftarrow$  diversify(fTl, cs)
```

```

36:  csv ← fitness(cs)
37:  end
38:  end
39: Tlist ← update(Tlist, Itm, Tmx)
40: end
41: solution ← bs

```

**Algoritmo Búsqueda Tabu Completo + Búsqueda Local**

```

1: Algoritmo Búsqueda Tabu Completo
2: while improving solution
3:  solution ← operator 2 – opt
4:  solution ← operator Or – opt
5:  solution ← operator 3 – opt
6:  solution ← operator Relocate Operator
7: end

```

Figura 4.25. Pseudocódigo del procedimiento de búsqueda Tabú implementado

El algoritmo TS implementado sigue una estructura básica. La solución inicial se consigue mediante un algoritmo Greedy. Este algoritmo busca el cliente sin asignar más cercano al último que se asignó hasta completar la asignación de todos los clientes. Para el concepto de vecindario del algoritmo TS diseñado se optó por el intercambio de posición de dos clientes dentro de la solución. De esta manera se asegura de una manera sencilla y eficaz la viabilidad de todas las soluciones alternativas encontradas por este método. Así se intercambian dos a dos todos los clientes dentro de la solución actual (*cs*) y se almacena la mejor solución encontrada (*bns*). De este modo también se obtiene una intensificación (búsqueda de mejores soluciones en el entorno cercano de la solución actual) profunda dentro del vecindario. Posteriormente se compara con la mejor solución encontrada (*bs*) hasta el momento, y si es mejor se actualiza esta última y se continúa con el algoritmo. La lista Tabú (*Tlist*), siguiendo con el concepto de vecindario adoptado, almacena los clientes que se intercambiaron en la última iteración. La permanencia dentro de la lista Tabú de los movimientos no permitidos o memoria a corto plazo depende del número de iteraciones transcurridas desde que se incluyó en tal lista y se controla con el parámetro  $T_{mx}$  (de tal modo que el número de iteraciones del algoritmo desde que se incluye un movimiento en la lista Tabú debe ser menor o igual que el valor de  $T_{mx}$ ).

Como se ha mencionado anteriormente, el problema planteado tiene ciertas características que hacen que el cambio de posición de dos clientes dentro de la solución puede alterar significativamente el valor de la función objetivo o Fitness. Este cambio significativo en el valor de la solución, en general, ira en contra de la minimización de la longitud de las rutas que se pretende buscar. Pero también puede ir a favor de lo buscado, por lo que como criterio de aspiración se adopta uno tal que permita movimientos prohibidos o Tabús siempre y cuando la solución encontrada mejore a la mejor encontrada hasta el momento.

A modo de memoria a medio plazo se implementó una memoria de la frecuencia ( $fTl$ ) en que los intercambios de clientes se realizan. Así se almacena el número de veces en que se han intercambiado cada par de clientes dentro de la solución actual. Cuando el algoritmo no encuentra mejora en el valor de la solución en un cierto número de iteraciones ( $M_m$ ) se buscan soluciones alternativas, más alejadas de las actuales, intercambiando los pares de clientes con menor frecuencia de intercambio. De este modo se aumenta la diversificación (búsqueda de mejores soluciones en entornos alejados de la solución actual) de las soluciones. También se incluyó en algoritmo TS un criterio de memoria a largo plazo. Para este criterio se optó por el más sencillo, y no por ello menos eficaz, de reiniciar el algoritmo desde una solución aleatoria. Obviamente la mejor solución encontrada hasta ese momento permanece almacenada. Este reinicio se realiza un número fijado de veces dependiendo del tamaño del problema ( $N_{lm}$ ). Y para finalizar, como criterio de parada del algoritmo se decidió optar por un numero de iteraciones máximo ( $It_m$ ).

### 4.3. Calibración

En esta sección se muestran los experimentos hechos con los tres algoritmos expuestos en los apartados 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3 sobre una red de prueba, que se expone en el apartado siguiente, en busca de encontrar los parámetros que gobiernan a dichos algoritmos que mejor encajan con el tipo de problema que se pretende resolver. Esta calibración busca que los métodos de resolución del problema lleguen a las mejores soluciones en el menor tiempo de computación posible. Dado que el tiempo de resolución o tiempo de computación, obviamente dependiendo de la CPU utilizada, puede llegar a ser muy alto al solucionar el VRPATW, sobre todo por parte del GA, una calibración de los parámetros de los algoritmos se hace muy necesaria y relevante. En los apartados siguientes se exponen los pasos seguidos para realizarla

y los resultados obtenidos. Cabe mencionar que, como se puede constatar en la extensión de los apartados, el mayor esfuerzo y la mayor cantidad de tiempo invertido fue en la calibración del GA, pues este se utiliza para resolver los tres problemas a comparar (TDVRP, VRPTW y el VRPATW) y además puede llegar a consumir un tiempo de computación del orden de cinco veces mayor que el que le toma a la búsqueda Tabú, obviamente resolviendo la misma configuración de problema. Por otro lado, el algoritmo de búsqueda Tabú, al igual que el algoritmo de Clarke y Wright modificado, sólo se utilizaron para resolver el VRPATW en la comparativa de problemas o modelos que mejor se adaptan la política de la ventana temporal de acceso.

#### **4.3.1. Descripción de la red de prueba**

Para la puesta en práctica y la calibración de los algoritmos de resolución, se utilizó una red de prueba (véase la Figura 4.26) con un diseño simple que permitió interpretar, de la forma más sencilla posible, los resultados para posteriormente analizarlos. La red de prueba consta de 900 nodos distribuidos en un cuadrado de 30x30 y comunicados por arcos de igual longitud. La Figura 4.26 muestra el sentido de los arcos y por tanto en el que se puede desplazar el vehículo. Tal y como se ha definido esta red de prueba el sentido se alterna en las filas y en las columnas. De tal modo que en las filas impares el sentido es hacia la izquierda y en las pares es hacia la derecha, de igual forma, en las columnas impares el sentido es hacia arriba y en las pares es hacia abajo. La zona restringida se ubicó en el centro de la red considerándose como límite de esta los nodos y no los arcos. En los experimentos de prueba, se seleccionó la ubicación del depósito y de los diferentes clientes al azar, teniendo en cuenta que el depósito debe ser colocado fuera de la zona restringida, y que los nodos dentro de la zona restringida tienen una mayor probabilidad de ser un cliente que los que se encuentran fuera. Con esto, como ya se explicó anteriormente, se pretende simular la mayor densidad de comercios, y por tanto de clientes, que se encuentran en los centros de las ciudades.

#### **4.3.2. Experimentos y resultados**

A continuación, se detallan los experimentos realizados con cada uno de los algoritmos y los resultados obtenidos, seguidos de las conclusiones que derivaron

de ellos. Dada la naturaleza del algoritmo Clarke y Wright modificado que se utiliza en esta tesis no es necesaria su calibración por lo que no se le dedicará un apartado en esta sección.

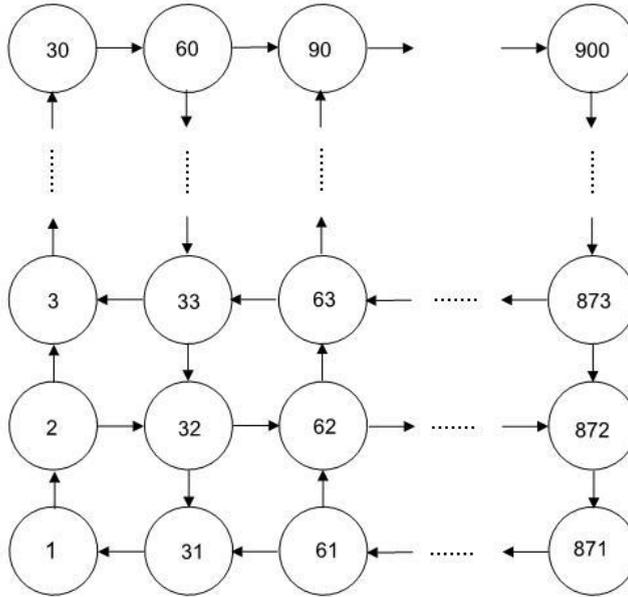


Figura 4.26. Representación esquemática de la red de prueba utiliza para calibrar el algoritmo

A la hora de buscar soluciones a los experimentos planteados sobre la red de prueba, se aplicaron las siguientes hipótesis y restricciones al cálculo del Fitness de cada población:

- El número máximo de  $l$  vehículos de la flota es infinito; se supuso que la flota era suficiente para cubrir todas las entregas.
- Se estableció un coste fijo  $C = 8000$  unidades de tiempo para cada vehículo adicional, excepto para el primero, que es necesario para completar todas las entregas dentro del horizonte temporal. Esto penaliza la introducción de nuevos vehículos en la solución. El valor de este coste se seleccionó arbitrariamente, simplemente haciéndolo muy superior al coste temporal de cualquier ruta calculada.
- La longitud de los arcos de la red de prueba se supone igual a 200 m.

- Se asignó una velocidad constante igual a  $20 \text{ Km/h}$  para todos los vehículos de reparto. Con este dato, el de la longitud de los arcos de la red y un sencillo cálculo cinemático se obtiene los cotes temporales  $c_{ij}^{CTW}$ ,  $c_{ij}^{OTW}$ ,  $c_{ij}^1$  y  $c_{ij}^2$  correspondientes a cada arco  $(i, j)$ .
- El horizonte de tiempo es igual a  $[0, T] = 10 \text{ horas}$ .
- La ventana temporal se supone situada en la mitad del horizonte temporal.
- El tiempo de descarga, o el tiempo que los vehículos pasan en cada cliente, es  $T_{D_i} = 20 \text{ minutos}$ .

#### 4.3.2.1. Calibración del GA

Los experimentos de la red de prueba, que se utilizaron para la calibración del GA, se construyeron de acuerdo con los valores de tres parámetros relacionados con el problema y tres más relacionados con el GA. Según los primeros análisis realizados sobre esta red de prueba se llegó a la conclusión de que los parámetros más relevantes y para los que más sensibles se mostraban los resultados de los experimentos eran los que se han utilizado. Estos parámetros son:

- Parámetros de las configuraciones de los problemas:
  - **Número de paradas o clientes (N° Stop).**
  - **Tamaño de la Zona Restringida (RZ):** En unidades de longitud de la red de prueba. Cada 2 unidades equivalen a  $100 \text{ metros}$ .
  - **Longitud de la Ventana Temporal (TW):** En horas.
- Parámetros de los Algoritmos Genéticos:
  - **Tamaño de la población (A):** Se decidió que fuera función del número de clientes, por lo que se toman valores del factor  $A$  que multiplica al numero de paradas de los problemas. Así el *Tamaño poblacion* =  $A \times N^\circ \text{ Stops}$ .
  - **Número de iteraciones (B):** También se decidió que fuera función del número de paradas. De esta forma  $N^\circ \text{ Iteraciones} = B \times N^\circ \text{ Stops}$ .
  - **Tasa de mutación (TM).**

En las Tabla 4.1, Tabla 4.2 y en la Tabla 4.3 se muestran los valores de los parámetros

tomados además de los resultados de las pruebas realizadas.

Tabla 4.1. Resultados de los experimentos realizados con el GA sobre la Red de Prueba para el VRPATW

	A	B	TM	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
Nº Stop				50	50	50	50	50	120	120	120	120	
RZ				0	20	20	50	50	20	20	50	50	
TW				0	4	8	4	8	4	8	4	8	
Exp.1-1	1	20	0,1	14288	2 23038	3 54160	6 23580	3 77244	8 47474	5 142946	14 67168	7 207640	19
Exp.1-2	1	20	0,5	14304	2 22922	3 45400	5 23614	3 80526	8 55896	6 143302	14 67776	7 198746	19
Exp.1-3	1	30	0,1	14232	2 15680	2 45608	5 23448	3 80424	8 55696	6 134258	13 56642	6 195420	19
Exp.1-4	1	30	0,5	14256	2 22456	3 50568	6 23690	3 80452	8 46854	5 139314	14 57152	6 186762	18
Exp.1-5	3	20	0,1	14264	2 14296	2 44850	5 23508	3 71702	7 46832	5 126514	12 57636	6 179020	16
Exp.1-6	3	20	0,5	14280	2 22688	3 45434	5 23470	3 71740	7 47110	5 126514	12 49878	5 193020	18
Exp.1-7	3	30	0,1	14208	2 14312	2 44858	5 23326	3 69062	7 46634	5 125238	12 57336	6 170308	16
Exp.1-8	3	30	0,5	14224	2 14112	2 45170	5 15218	2 76982	8 46656	5 124962	12 57184	6 175548	17

Los resultados en cada caso se componen del valor del Fitness de la mejor solución encontrada acompañado por el correspondiente número de vehículos utilizados para la realización de la ruta. Se completó una primera serie de 72 experimentos para cada problema. Se diseñaron 9 configuraciones de problema diferentes, incluyendo el caso de que no exista ventana temporal de acceso, y se resolvieron con 8 algoritmos genéticos diferentes.

De estos resultados se sacaron conclusiones, más se decidió realizar una segunda tanda de experimentos, en este caso sólo en los planteamientos de TDVRP y de VRPTW. La razón de esta segunda serie fue que a la vista de los primeros resultados se concluyó que se podían encontrar mejores parámetros para la resolución de las diferentes configuraciones de estos dos planteamientos. De este modo las tablas de resultados de los planteamientos de TDVRP y de VRPTW se completan con una segunda batería de experimentos en los que se resuelven las mismas tipologías o configuraciones de problema, pero con valores diferentes de los parámetros del algoritmo genético.

Tabla 4.2. Resultados de los experimentos realizados con el GA sobre la Red de Prueba para el TDVRP

	A	B	TM	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
Nº Stop				50	50	50	50	50	120	120	120	120	
RZ				0	20	20	50	50	20	20	50	50	
TW				0	4	8	4	8	4	8	4	8	
Exp.1-1	1	20	0,1	14080	2 22096	3 46160	6 38344	5 78584	10 62710	7 143050	17 95566	11 207466	25
Exp.1-2	1	20	0,5	13952	2 22088	3 46096	6 38032	5 78424	10 46098	5 142946	17 94854	11 199560	24
Exp.1-3	1	30	0,1	13976	2 14192	2 54264	7 22048	3 78368	10 54116	6 142586	17 86452	10 191126	23
Exp.1-4	1	30	0,5	13912	2 21824	3 46136	6 30360	4 78352	10 62238	7 134872	16 94606	11 207202	25
Exp.1-5	3	20	0,1	14040	2 13992	2 46184	6 38264	5 78464	10 54036	6 134632	16 78306	9 199040	24
Exp.1-6	3	20	0,5	14056	2 13904	2 46128	6 29992	4 70376	9 46194	5 119156	14 79106	9 191166	23
Exp.1-7	3	30	0,1	14024	2 22088	3 46080	6 29960	4 70320	9 46666	5 134792	16 86588	10 198912	24
Exp.1-8	3	30	0,5	13880	2 14032	2 46088	6 30032	4 78264	10 45970	5 126686	15 78290	9 191166	23
Exp.2-1	2	40	0,2	14016	2 13824	2 46008	6 38208	5 70160	9 54036	6 134336	16 78434	9 198816	24
Exp.2-2	2	40	0,3	14000	2 21952	3 46104	6 29880	4 70240	9 45930	5 126526	15 78522	9 198920	24
Exp.2-3	2	40	0,4	13960	2 21856	3 46056	6 30200	4 70216	9 53892	6 134288	16 70080	8 190774	23
Exp.2-4	2	60	0,2	13880	2 21896	3 46024	6 22056	3 70232	9 45682	5 118556	14 86012	10 190750	23
Exp.2-5	2	60	0,3	13848	2 13880	2 46024	6 29832	4 78248	10 37568	4 126254	15 86276	10 182692	22
Exp.2-6	2	60	0,4	13888	2 13880	2 46056	6 21968	3 70160	9 45986	5 134400	16 86772	10 190750	23
Exp.2-7	4	40	0,2	13960	2 13880	2 38248	5 22256	3 70240	9 45778	5 134336	16 78146	9 182748	22
Exp.2-8	4	40	0,3	13968	2 13904	2 46080	6 22008	3 78232	10 45922	5 134408	16 78090	9 190654	23
Exp.2-9	4	40	0,4	13920	2 13792	2 38160	5 22456	3 70200	9 45658	5 126606	15 69984	8 182716	22
Exp.2-10	4	60	0,2	13936	2 13760	2 46048	6 38176	5 78232	10 45874	5 118532	14 77858	9 182492	22
Exp.2-11	4	60	0,3	13904	2 13936	2 46032	6 29824	4 78200	10 37536	4 118164	14 78010	9 190638	23
Exp.2-12	4	60	0,4	13912	2 21824	3 46136	6 30360	4 78352	10 62238	7 134872	16 94606	11 207202	25

A la vista de los resultados obtenidos y después de un pequeño estudio de sensibilidad se estimaron los valores de los parámetros con los que se esperaba conseguir las mejores soluciones para cada GA (véase la Tabla 4.4).

Cabe destacar que el parámetro relacionado con el número de iteraciones es mucho menor en el caso del planteamiento de VRPATW. Esto es debido al hecho de que cada iteración en este procedimiento es mucho más larga que en los otros casos. Por el contrario, este planteamiento proporciona unos resultados más cercanos a la realidad, debido al procedimiento de reajuste de paradas alrededor de la ventana temporal de acceso que se ha explicado en apartados anteriores. El motor de optimización para los planteamientos de TDVRP y de VRPTW es el propio GA, pero en el caso del VRPATW también se optimiza durante el cálculo del Fitness, lo que se traduce en la necesidad de un menor número de iteraciones para llegar a soluciones igualmente aceptables. Sin embargo, el coste computacional requerido es

significativamente mayor, como se mostrará en los siguientes apartados.

Tabla 4.3. Resultados de los experimentos realizados con el GA sobre la Red de Prueba para el VRPTW

	A	B	TM	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
Nº Stop				50	50	50	50	50	120	120	120	120	
RZ				0	20	20	50	50	20	20	50	50	
TW				0	4	8	4	8	4	8	4	8	
Exp.1-1	1	20	0,1	14080	2 14956	2 47942	5 15334	2 63548	6 50340	5 123116	11 48230	5 170534	15
Exp.1-2	1	20	0,5	13904	2 13880	2 47944	5 15330	2 63546	6 38912	4 122998	11 48032	5 167036	15
Exp.1-3	1	30	0,1	13872	2 13952	2 47920	5 15600	2 63582	6 39080	4 123086	11 50450	5 170382	15
Exp.1-4	1	30	0,5	13848	2 13848	2 47908	5 15184	2 63534	6 38560	4 119624	11 47768	5 167108	15
Exp.1-5	3	20	0,1	13904	2 13864	2 47908	5 15524	2 63540	6 38824	4 123042	11 48128	5 158908	14
Exp.1-6	3	20	0,5	13968	2 13800	2 47916	5 15214	2 63526	6 38416	4 119704	11 48164	5 155692	14
Exp.1-7	3	30	0,1	14000	2 13840	2 47900	5 15308	2 63536	6 38848	4 122928	11 39616	4 158880	14
Exp.1-8	3	30	0,5	13976	2 13800	2 39798	4 15290	2 63534	6 38768	4 122966	11 47882	5 158808	14
Exp.2-1	2	40	0,2	13736	2 13800	2 39788	4 15192	2 63578	6 38584	4 123044	11 47952	5 158838	14
Exp.2-2	2	40	0,3	13744	2 13744	2 39782	4 15294	2 63528	6 38664	4 119722	11 39672	4 155616	14
Exp.2-3	2	40	0,4	13688	2 13824	2 47920	5 15166	2 63562	6 38440	4 119708	11 39612	4 158974	14
Exp.2-4	2	60	0,2	13760	2 13904	2 47914	5 15286	2 63536	6 38584	4 119702	11 39626	4 158862	14
Exp.2-5	2	60	0,3	13704	2 13736	2 47900	5 15294	2 63546	6 37792	4 119684	11 39434	4 158874	14
Exp.2-6	2	60	0,4	13720	2 13920	2 47924	5 15322	2 63512	6 37752	4 122972	11 39424	4 158858	14
Exp.2-7	4	40	0,2	13696	2 13776	2 47906	5 15176	2 63546	6 38672	4 119680	11 48196	5 155602	14
Exp.2-8	4	40	0,3	13688	2 13768	2 47916	5 15310	2 63532	6 38568	4 119646	11 47986	5 158972	14
Exp.2-9	4	40	0,4	13744	2 13800	2 47916	5 15286	2 63536	6 38568	4 119710	11 39444	4 158888	14
Exp.2-10	4	60	0,2	13784	2 13752	2 47914	5 15188	2 63524	6 37672	4 119692	11 39628	4 158868	14
Exp.2-11	4	60	0,3	13776	2 13816	2 47904	5 15218	2 63538	6 38376	4 119670	11 39428	4 155590	14
Exp.2-12	4	60	0,4	13696	2 13792	2 39762	4 15306	2 63526	6 38728	4 119672	11 39376	4 158884	14

Tabla 4.4. Valores de los parámetros del GA usados en la resolución de los experimentos

	VRPATW	TDVRP	VRPTW
Tamaño de Población ( <i>A</i> )	2	3	4
Numero de Iteraciones ( <i>B</i> )	6	40	50
Tasa de Mutación ( <i>TM</i> )	0.5	0.4	0.4

#### 4.3.2.2. Calibración de la búsqueda Tabú

Los experimentos de la red de prueba, que se utilizaron para la calibración de la búsqueda Tabú, se construyeron de acuerdo con los valores de los mismos tres parámetros relacionados con el problema que en el caso del GA, y con cuatro más relacionados con la búsqueda Tabú. Cabe remarcar aquí que este algoritmo, al igual

que el algoritmo Clarke y Wright modificado, se utilizó únicamente en este capítulo sobre el problema VRPATW, a diferencia del GA que se utilizó además sobre los otros dos problemas a comparar. Los parámetros de la búsqueda Tabú son:

- Parámetros de las configuraciones de los problemas:
  - **Número de paradas o clientes (Nº Stop).**
  - **Tamaño de la Zona Restringida (RZ):** En unidades de longitud de la red de prueba. Cada 2 unidades equivalen a 100 *metros*.
  - **Longitud de la Ventana Temporal (TW):** En horas.
- Parámetros de las configuraciones de la búsqueda Tabú:
  - $It_m \equiv$  nº de iteraciones del Tabú
  - $T_{mx} \equiv$  nº de iteraciones permaneciendo en la lista Tabú
  - $N_{tm} \equiv$  nº de reinicios con solución aleatoria
  - $M_m \equiv$  nº de iteraciones máximo sin mejorar la solución

Después de hacer varios experimentos se llegó a la conclusión de que el parámetro  $It_m$  o número de iteraciones del algoritmo Búsqueda Tabú podía ser fijado en un valor de 150. Este valor se fijó así pues se observó que el algoritmo convergía a su mejor solución en un número significativamente menor de iteraciones de 150 en todos los experimentos realizados. De este modo, y como se puede observar en la Tabla 4.5, los experimentos de calibración se centraron en los otros parámetros mencionados. Los resultados de los experimentos sobre la red de prueba del VRPATW utilizando la búsqueda Tabú diseñada se pueden ver en la ya mencionada Tabla 4.5.

Al igual que en la calibración del GA, los resultados en cada caso se componen del valor del Fitness de la mejor solución encontrada acompañado por el correspondiente número de vehículos utilizados para la realización de la ruta. Después de analizar los resultados se tomaron los valores de los parámetros que se detallan a continuación:

- $It_m \equiv$  nº de iteraciones del Tabú =150
- $T_{mx} \equiv$  nº de iteraciones permaneciendo en la lista Tabú = 5 para problemas pequeños (10, 15, 25) y =7 para el resto.

- $N_{lm} \equiv n^{\circ}$  de reinicios con solución aleatoria = 2 para problemas pequeños (10, 15, 25) y =4 para el resto.
- $M_m \equiv n^{\circ}$  de iteraciones máximo sin mejorar la solución, para activar el reinicio con solución aleatorio =10

Tabla 4.5 Resultados de los experimentos realizados con la búsqueda Tabú sobre la Red de Prueba para el VRPTW

	$I$	$t_m$	$T_{mx}$	$N_{lm}$	$M_m$	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
Nº Stop						50	50	50	50	50	120	120	120	
RZ						0	20	20	50	50	20	20	50	
TW						0	4	8	4	8	4	8	4	
Exp.1-1	150	5	2	10		11430	2 22577	3 64450	6 25938	3 58705	8 58868	5 110068	14 59780	7
Exp.1-2	150	7	2	10		17594	2 26819	3 53572	5 27628	3 98242	8 65957	6 111776	14 65743	7
Exp.1-3	150	5	2	30		13947	2 18816	2 51081	5 19462	3 63535	8 49012	6 146341	13 51544	6
Exp.1-4	150	7	2	30		16680	2 20435	3 38432	6 28665	3 91715	8 44043	5 119810	14 48579	6
Exp.1-5	150	5	4	10		12838	2 17441	2 35880	5 21627	3 59513	7 54793	5 155612	12 64552	6
Exp.1-6	150	7	4	10		15422	2 25864	3 46343	5 26286	3 83936	7 38630	5 145491	12 57858	5
Exp.1-7	150	5	4	30		13498	2 12165	2 44858	5 24959	3 53178	7 44769	5 100190	12 55616	6
Exp.1-8	150	7	4	30		14935	2 12277	2 42912	5 14001	2 78522	8 48522	5 106218	12 58900	6

## 4.4. Caso de estudio

A continuación, se describen los resultados obtenidos al resolver un caso de estudio en una ciudad real en la que se implantó una ventana temporal de acceso. En el apartado 4.4.1 se utiliza solamente el GA para resolver los tres problemas a comparar (TDVRP, VRPTW y el VRPATW), en busca de determinar cuál de ellos se acerca más a la realidad de una ventana temporal de acceso funcionando en el centro de una ciudad. En el siguiente apartado (apartado 4.4.2) se utilizan los métodos de resolución elegidos (GA, Búsqueda Tabú, Algoritmo Clarke y Wright modificado y método exacto) para aplicarlos sobre el mismo caso de estudio, en este caso solamente sobre el modelo de VRPATW, con el fin de hacer una comparativa de cuál de ellos se adapta mejor a su resolución. Posteriormente también se exponen unas breves conclusiones al respecto en el apartado 4.5.

### 4.4.1. Descripción del caso de estudio

El GA diseñado se aplicó al caso real de una empresa que opera en la ciudad de

Sevilla. Es una pequeña/mediana empresa de reparto de paquetería con alrededor de 100 clientes diarios. El reparto se realiza partiendo desde sus instalaciones ubicadas en una zona industrial a las afueras de la ciudad. Muchos de sus clientes están ubicados dentro o cerca del centro de la ciudad, y las operaciones de la empresa se ven afectadas en gran medida por la restricción temporal de acceso impuesta por las autoridades locales en dicho centro. Acceder o permanecer en el centro está prohibido para los vehículos de reparto entre las 12.00 y las 16.00 horas de todos los días. Con esto se intenta evitar los altos niveles de contaminación que conllevan el gran número de vehículos de reparto y su interacción con el flujo de vehículos privados y de turistas que visitan los monumentos ubicados en el centro histórico. Además, dentro de una intensa campaña de peatonalización y de promoción de sistemas de transporte no contaminantes como las bicicletas, las autoridades locales están considerando la posibilidad de extender el horario de prohibición, e incluso de extender la zona restringida en la que se aplica la ventana temporal de acceso. La cuestión es que no se han tomado medidas para evaluar el efecto de este tipo de políticas en los costes de los operadores de transporte en la ciudad, con este trabajo se intenta llenar ese vacío.

La Figura 4.27 muestra la distribución de los nodos que componen el área metropolitana de Sevilla, este conjunto de nodos conforma un grafo con las características necesarias para la aplicación de un VRP sobre él. Al resolver el problema, se asumieron las siguientes características:

- La compañía cuenta con un número de vehículos suficientes para hacer todas las entregas
- Todos los vehículos comienzan sus rutas en el depósito o almacén y que deben volver allí antes del final del día ( $T$ )
- La capacidad de los vehículos no se tiene en cuenta o se considera infinita, con esto se intenta simular que la empresa real se esfuerza permanentemente para aumentar sus factores de carga. Además de que el tipo de mercancía que maneja esta empresa rara vez supera el tamaño de un bulto de  $1m^3$ , por lo que con los vehículos de que dispone cubre de sobra las necesidades de transporte.
- El coste fijo aplicado desde el segundo vehículo en adelante se supone que es igual a  $C = 8000$  minutos.

- También se han hecho varias suposiciones sacadas de la experiencia de la compañía:
  - La velocidad promedio de los vehículos se tomó de 20 *kilómetros/h*
  - El tiempo de descarga en cada cliente fue de  $T_{D_i} = 20$  *minutos*,
  - La duración del día se fijó en  $[0, T] = 10$  *horas*, lo que representa las horas de funcionamiento diario de la flota de la empresa.

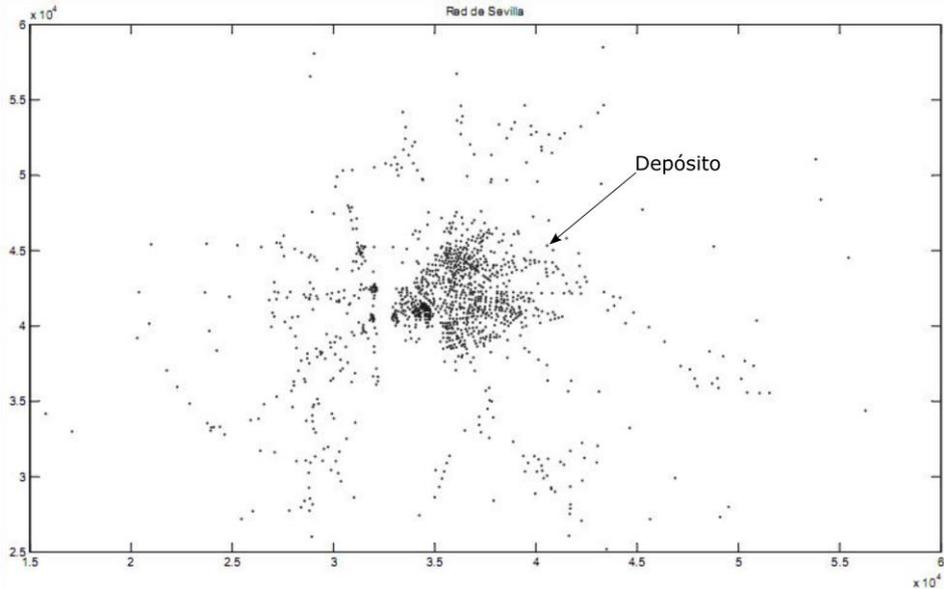


Figura 4.27. Los nodos de la red del área metropolitana de Sevilla. El nodo marcado muestra la ubicación del almacén de la empresa caso de estudio

Se diseñaron 30 configuraciones diferentes de problemas para dar cuenta del amplio conjunto de escenarios al que se enfrenta a diario esta compañía de reparto. El diseño de experimentos dependió del número de clientes ( $N^q P = 50, 100$  y  $150$ ), del tamaño de la zona restringida (considerando el caso de que no exista  $RZ$  o con tamaño igual a  $RZ = 2$ , que es el escenario actual, 5 y 9 unidades de longitud) y de la longitud de la ventana temporal ( $TW = 2, 4$  y  $6$  *horas*). Para cada configuración, se generaron 10 variaciones diferentes, cambiando aleatoriamente la localización de los clientes, lo que resultó en un conjunto total de 300 experimentos. La Tabla 4.6 muestra las características de cada uno de los 300 problemas, incluyendo en cada caso el número de clientes situados dentro de la zona restringida. La Tabla 4.7

contiene el promedio de los tiempos de cálculo necesarios para ejecutar cada configuración de problema, lo que demuestra que, especialmente para grandes problemas, el esfuerzo computacional requerido para el planteamiento de VRPATW es mucho más grande que el requerido para el TDVRP o el VRPTW. La tabla también muestra los valores de los parámetros utilizados para el GA en cada caso.

Los resultados obtenidos para cada batería de experimentos se presentan en las Tabla 4.8, Tabla 4.9 y Tabla 4.10, cada una corresponde a un número diferente de clientes. Las tablas muestran, para cada variante de cada configuración, el mejor valor de fitness obtenido (en unidades de tiempo), el número de vehículos necesarios y el número de nodos prohibidos cruzaron en cada solución (NBN), que son los nodos, no necesariamente correspondientes a clientes, que se encuentra dentro de la zona restringida y que son visitados por un vehículo mientras la ventana temporal de acceso está cerrada. Estos resultados se resumen en la Tabla 4.11, que muestra la comparativa de los resultados para los diferentes tamaños de problemas y para los diferentes planteamientos. El patrón más común que se observa es que los valores de Fitness más bajos correspondan al planteamiento de VRPTW, seguido por el de VRPATW y por último el TDVRP.



Tabla 4.7. Valores de los parámetros utilizados para cada configuración de problemas y el tiempo de computación promedio necesarios para ellos

Tiempo Medio de computación (horas)													
TDVRP				VRPTW				VRPATW					
	A	B	TM	Time	A	B	TM	T. Med. Ejec.	A	B	TM	Time	
T1				0.055093				0.176512				0.182081	
T2				0.064514				0.179472				0.169663	
T3				0.031944				0.180278				0.170140	
T4				0.032056				0.180861				0.183364	
T5	3	40	0.4	0.032000	4	50	0.4	0.179667	2	6	0.4	0.118601	
T6				0.032056				0.181556				0.138611	
T7				0.032167				0.196833				0.222902	
T8				0.032111				0.181861				0.109532	
T9				0.032111				0.185667				0.140498	
T10				0.032333				0.204361				0.275189	
T11				0.413642				1.661204				2.213062	
T12				0.526235				1.422083				2.153675	
T13				0.260333				1.420583				2.436335	
T14				0.260333				1.439333				3.063763	
T15	3	40	0	0.260889	4	50	0	1.427250	2	6	0	2.332827	
T16				0.261333				1.509917				3.798658	
T17				0.262889				1.756444				10.93603	
T18				0.261111				1.463056				2.901332	
T19				0.261667				1.555861				6.154558	
T20				0.264222				1.847306				17.20567	
T21				1.316028				5.207674				16.206997	
T22				1.763944				5.331296				16.332169	
T23				0.971278				5.205944				18.888069	
T24				0.970833				5.384028				22.304733	
T25	3	40	0	0.973444	4	50	0	5.366861	2	6	0	20.467061	
T26				0.974278				5.625500				33.486537	
T27				0.980389				6.676736				92.718041	
T28				0.972000				5.218722				26.226999	
T29				0.976389				5.660889				55.715953	
T30				0.983444				7.237028				163.321552	

Tabla 4.8. Resultados de los experimentos del caso de estudio para 50 clientes

		Experimentos sobre la Red de Sevilla - 50 Clientes																													
		V-1			V-2			V-3			V-4			V-5			V-6			V-7			V-8			V-9			V-10		
		Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN	Fitness	iv	NBN
C1		24544	4	0	16467	3	0	16440	3	0	24488	4	0	16449	3	0	16431	3	0	24541	4	0	16437	3	0	16460	3	0	16463	3	0
	TDVRP	24559	4	8	24506	4	2	16440	3	0	24505	4	19	24484	4	10	16445	3	3	24562	4	0	16448	3	4	24488	4	12	24477	4	2
C2	VRPTW	24549	4	5	24521	4	2	24487	4	16	24513	4	23	24507	4	0	24477	4	10	32620	5	0	24511	4	23	24494	4	14	24521	4	10
	VRPATW	24587	4	0	24497	4	0	24477	4	0	24494	4	0	24476	4	0	24466	4	0	32580	5	0	24476	4	0	24484	4	0	24501	4	0
C3	TDVRP	24553	4	5	16467	3	5	16458	3	16	24488	4	23	16449	3	7	24474	4	28	24556	4	25	16442	3	1	16460	3	15	24516	4	20
	VRPTW	24547	4	12	24531	4	32	24473	4	24	24514	4	15	24499	4	26	16431	3	3	24541	4	10	16437	3	6	24461	4	34	24504	4	0
C4	VRPATW	32629	5	0	24502	4	0	24464	4	0	24505	4	0	24485	4	0	24455	4	0	32580	5	0	24469	4	0	24485	4	0	24509	4	0
	TDVRP	24549	4	16	24515	4	29	24483	4	20	32580	5	52	24482	4	3	16450	3	12	24563	4	5	32507	5	19	40582	6	25	16463	3	46
C5	VRPTW	32610	5	72	24500	4	38	24476	4	32	24567	4	90	24499	4	46	24488	4	25	24568	4	20	24519	4	79	24557	4	62	24491	4	30
	VRPATW	32608	5	0	24500	4	0	24474	4	0	32539	5	0	24475	4	0	32492	5	0	24560	4	0	24485	4	0	32519	5	0	24509	4	0
C6	TDVRP	32585	5	27	32570	5	69	24492	4	78	32546	5	127	32572	5	60	24518	4	44	32623	5	84	24539	4	81	32590	5	54	32558	5	64
	VRPTW	24570	4	43	24559	4	70	24528	4	53	24579	4	112	24537	4	158	24476	4	22	24548	4	2	24555	4	49	24487	4	71	24529	4	28
C7	VRPATW	32596	5	0	32531	5	0	24475	4	0	32531	5	0	32494	5	0	24493	4	0	32569	5	0	24464	4	0	32523	5	0	32527	5	0
	TDVRP	40685	6	82	64718	9	204	48584	7	103	56713	8	307	48672	7	260	48711	7	239	48674	7	40	56643	8	135	64659	9	119	48645	7	110
C8	VRPTW	32629	5	165	40775	6	323	24530	4	132	32638	5	270	32628	5	220	24609	4	165	24599	4	138	32635	5	305	32641	5	262	24583	4	161
	VRPATW	40644	6	0	48603	7	0	32494	5	0	40570	6	0	40524	6	0	40528	6	0	40619	6	0	40519	6	0	40545	6	0	40554	6	0
C9	TDVRP	104944	14	315	128938	17	315	96669	13	199	120831	16	279	112762	15	347	112758	15	211	96903	13	241	120843	16	147	128972	17	394	96731	13	105
	VRPTW	49058	7	571	73396	10	409	48932	7	443	65247	9	464	49071	7	563	57106	8	412	49056	7	334	57218	8	526	73398	10	462	40915	6	447
C10	VRPATW	72787	10	0	97281	13	0	48550	7	0	80724	11	0	72658	10	0	72672	10	0	64717	9	0	72776	10	0	80842	11	0	64647	9	0
	TDVRP	48642	7	117	56604	8	79	48540	7	76	48604	7	102	48559	7	85	64586	9	26	48686	7	64	56564	8	37	48604	7	139	48551	7	27
C11	VRPTW	32614	5	44	32641	5	166	24557	4	100	32607	5	137	32632	5	168	24566	4	224	32631	5	101	32637	5	172	32633	5	144	24560	4	149
	VRPATW	32636	5	0	40768	6	0	32575	5	0	40648	6	0	40765	6	0	40733	6	0	32612	5	0	57055	8	0	40774	6	0	32561	5	0
C12	TDVRP	80767	11	192	80687	11	199	80602	11	141	80804	11	193	72643	10	160	80635	11	114	88772	12	68	80639	11	96	88678	12	223	72668	10	142
	VRPTW	40863	6	391	48933	7	342	32733	5	251	40791	6	305	40867	6	281	40804	6	296	40858	6	283	48936	7	229	40889	6	396	40766	6	229
C13	VRPATW	56751	8	0	57129	8	0	56906	8	0	56883	8	0	65133	9	0	65106	9	0	56795	8	0	73418	10	0	57144	8	0	48784	7	0
	TDVRP	163037	20	535	171012	21	469	128706	17	320	169004	22	515	152842	20	419	136850	18	350	177137	23	244	160962	21	265	177046	23	497	136822	18	353
C14	VRPTW	73430	10	692	89697	12	501	65252	9	461	89691	12	673	73516	10	613	73397	10	459	73527	10	319	89706	12	404	89712	12	571	65351	9	494
	VRPATW	97603	13	0	105998	14	0	89466	12	0	105808	14	0	105854	14	0	97723	13	0	105684	14	0	114180	15	0	122256	16	0	89356	12	0

Tabla 4.9. Resultados de los experimentos del caso de estudio para 100 clientes

		Experimentos sobre la Red de Sevilla - 100 Clientes																																
		V-1			V-2			V-3			V-4			V-5			V-6			V-7			V-8			V-9			V-10					
		Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN			
C1		40852	6	0	40841	6	0	40858	6	0	40903	6	0	40869	6	0	48932	7	0	40832	6	0	40846	6	0	48951	7	0	48937	7	0			
	TDVRP	40867	6	41	40857	6	62	48942	7	18	48937	7	8	40869	6	3	48932	7	7	40832	6	25	40846	6	18	48956	7	17	48949	7	25			
C2	VRP TW	48980	7	3	48927	7	40	48982	7	41	57071	8	23	57088	8	45	57068	8	5	48964	7	51	57082	8	21	57073	8	35	49010	7	19			
	VRPATW	48977	7	0	48911	7	0	48967	7	0	48984	7	0	57013	8	0	48999	7	0	48885	7	0	57003	8	0	57034	8	0	49054	7	0			
	TDVRP	40852	6	56	40860	6	31	40864	6	40	48928	7	93	48898	7	13	57082	8	14	40842	6	48	48954	7	59	49006	7	19	48937	7	57			
C3	VRP TW	49044	7	32	40895	6	59	48988	7	68	57064	8	63	48988	7	59	57059	8	45	40877	6	89	57058	8	45	57097	8	65	49019	7	27			
	VRPATW	56987	8	0	48904	7	0	57025	8	0	56996	8	0	57008	8	0	48990	7	0	56921	8	0	65048	9	0	57041	8	0	65084	9	0			
	TDVRP	48980	7	107	40841	6	34	48927	7	60	40903	6	91	48971	7	110	48965	7	67	40850	6	72	65022	9	131	57055	8	83	64997	9	92			
C4	VRP TW	57082	8	114	48970	7	68	65213	9	190	57144	8	113	49067	7	124	57113	8	130	48988	7	82	73313	10	191	57177	8	170	65250	9	136			
	VRPATW	57003	8	0	56912	8	0	73125	10	0	65066	9	0	73098	10	0	65060	9	0	56932	8	0	73105	10	0	73078	10	0	73140	10	0			
	TDVRP	65003	9	155	57057	8	107	65131	9	121	49018	7	82	57066	8	84	57091	8	106	56911	8	154	57071	8	180	65034	9	85	73173	10	168			
C5	VRP TW	57139	8	197	57062	8	118	57124	8	163	57135	8	122	65183	9	202	49013	7	59	57112	8	222	57116	8	148	65215	9	95	65218	9	116			
	VRPATW	65061	9	0	64976	9	0	73093	10	0	65043	9	0	73062	10	0	65064	9	0	64954	9	0	73103	10	0	65079	9	0	73148	10	0			
	TDVRP	105172	14	336	97117	13	277	113294	15	316	105143	14	149	97260	13	385	73263	10	290	105099	14	273	89233	12	235	121221	16	287	105302	14	394			
C6	VRP TW	81575	11	634	65276	9	489	89680	12	538	73385	10	613	73359	10	549	65316	9	560	65322	9	467	65337	9	485	73406	10	485	89750	12	801			
	VRPATW	81106	11	0	81021	11	0	105287	14	0	81093	11	0	89154	12	0	81131	11	0	89050	12	0	89171	12	0	81140	11	0	105336	14	0			
	TDVRP	249624	32	723	169683	22	604	282141	36	763	177584	23	559	209572	27	563	185469	24	464	185409	24	590	257737	33	566	201556	26	558	290056	37	764			
C7	VRP TW	146885	19	802	114247	15	874	195749	25	928	130466	17	927	130491	17	933	122259	16	850	130552	17	853	146780	19	945	138669	18	934	203948	26	1174			
	VRPATW	169917	22	0	137242	18	0	227016	29	0	145416	19	0	161728	21	0	129316	17	0	153444	20	0	169851	22	0	153444	20	0	227310	29	0			
	TDVRP	113076	15	174	105023	14	156	121114	16	162	121042	16	118	105124	14	186	97109	13	121	112977	15	169	121115	16	131	89081	12	186	121169	16	157			
C8	VRP TW	65253	9	228	57121	8	256	73405	10	328	65235	9	274	65189	9	282	65210	9	255	57046	8	149	65299	9	328	57179	8	165	65355	9	318			
	VRPATW	89492	12	0	65156	9	0	97823	13	0	89560	12	0	65166	9	0	73156	10	0	65212	9	0	73251	10	0	73186	10	0	89568	12	0			
	TDVRP	169275	22	340	137062	18	264	193416	25	286	185225	24	224	177295	23	355	161247	21	243	153081	20	460	185256	24	251	161136	21	285	209413	27	330			
C9	VRP TW	97832	13	628	81605	11	550	114173	15	644	89722	12	700	89696	12	627	89728	12	587	81548	11	565	97923	13	714	81607	11	613	114199	15	763			
	VRPATW	138260	18	0	113856	15	0	162898	21	0	122209	16	0	121899	16	0	113700	15	0	121929	16	0	138179	18	0	113719	15	0	154599	20	0			
	TDVRP	369655	47	813	241588	31	559	556297	64	860	337716	43	715	353776	45	743	337629	43	493	281439	36	728	419857	52	712	305510	39	819	546263	64	1031			
C10	VRP TW	187637	24	921	146855	19	885	244716	31	1175	171280	22	1014	187538	24	980	155041	20	959	154987	20	949	195790	25	1086	163149	21	1071	244767	31	1205			
	VRPATW	236139	30	0	203266	26	0	293433	37	0	244204	31	0	235941	30	0	203276	26	0	203365	26	0	252250	32	0	203335	26	0	285310	36	0			

Tabla 4.10. Resultados de los experimentos del caso de estudio para 150 clientes

		Experimentos sobre la Red de Sevilla - 150 Clientes																													
		V-1			V-2			V-3			V-4			V-5			V-6			V-7			V-8			V-9			V-10		
		Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN	Fitness	rv	NBN
C1		73408	10	0	65295	9	0	65334	9	0	65256	9	0	73335	10	0	65314	9	0	65318	9	0	65289	9	0	73445	10	0	65225	9	0
	TDVRP	81525	11	44	65295	9	39	73369	10	56	65256	9	87	73348	10	53	73382	10	5	65340	9	24	73366	10	45	81462	11	33	65232	9	75
C2	VRPTW	89683	12	68	73482	10	36	81493	11	39	81503	11	43	81538	11	41	81551	11	7	81583	11	57	89636	12	79	81539	11	26	73386	10	67
	VRPATW	89626	12	0	81501	11	0	81472	11	0	82047	11	0	81460	11	0	73885	10	0	73731	9	0	90398	11	0	81525	11	0	67195	9	0
	TDVRP	73425	10	52	73367	10	74	65334	9	82	73358	10	105	73362	10	91	65314	9	90	65399	9	78	65289	9	59	81384	11	68	65244	9	52
C3	VRPTW	97756	13	110	81548	11	110	89627	12	107	89604	12	77	81522	11	130	81542	11	71	89687	12	146	81554	11	157	81561	11	104	65322	9	109
	VRPATW	97703	13	0	81509	11	0	86184	12	0	81518	11	0	72945	9	0	80391	11	0	79627	11	0	83579	10	0	81559	11	0	58412	8	0
	TDVRP	73498	10	185	73430	10	161	81499	11	123	73398	10	173	81393	11	82	73371	10	117	73419	10	91	81398	11	145	73445	10	86	65225	9	72
C4	VRPTW	97925	13	221	89691	12	183	97708	13	200	105926	14	273	97754	13	187	89767	12	189	97855	13	202	89708	12	199	105938	14	222	73438	10	231
	VRPATW	113825	15	0	89548	12	0	80585	11	0	87347	13	0	88427	12	0	71900	11	0	84020	11	0	80875	12	0	105777	14	0	73405	10	0
	TDVRP	97693	13	233	97720	13	351	97597	13	258	97525	13	278	97722	13	386	81672	11	229	105521	14	104	89586	12	149	105625	14	294	81527	11	128
C5	VRPTW	97794	13	297	97793	13	293	105932	14	385	97791	13	466	89664	12	233	97835	13	413	105992	14	363	105916	14	343	97797	13	213	81576	11	372
	VRPATW	105767	14	0	89559	12	0	93076	14	0	88796	9	0	80403	10	0	93081	13	0	79502	13	0	98513	14	0	90138	13	0	82255	10	0
	TDVRP	145932	19	427	129828	17	543	153971	20	492	153984	20	632	161873	21	669	161837	21	324	169796	22	481	169831	22	597	137777	18	535	137625	18	297
C6	VRPTW	122297	16	812	122165	16	985	114147	15	866	130382	17	939	114165	15	885	138545	18	928	122297	16	992	130437	17	964	122228	16	757	106020	14	752
	VRPATW	137954	18	0	121670	16	0	107008	13	0	130217	17	0	114117	15	0	137329	17	0	122203	16	0	112350	14	0	126455	16	0	106014	14	0
	TDVRP	378845	48	1253	306390	39	1398	314433	40	786	346647	44	1084	290136	37	1052	378785	48	940	370387	47	856	402570	51	995	314407	40	912	281879	36	549
C7	VRPTW	220133	28	1482	203759	26	1812	203905	26	1561	252736	32	1945	203816	26	1502	236482	30	1525	236508	30	1571	236450	30	1334	220182	28	1587	171297	22	1235
	VRPATW	259081	33	0	218128	28	0	211330	25	0	255411	35	0	204246	31	0	240011	30	0	277361	31	0	235736	35	0	220678	29	0	205389	22	0
	TDVRP	145844	19	287	137714	18	375	161740	21	288	185677	24	337	161579	21	350	153757	20	250	161734	21	377	161741	21	267	153584	20	261	169419	22	85
C8	VRPTW	122210	16	454	114035	15	325	114098	15	443	114085	15	484	105934	14	405	130403	17	697	106008	14	461	97826	13	461	89698	12	337	89684	12	443
	VRPATW	129974	17	0	97677	13	0	197169	27	0	194076	15	0	119790	21	0	224673	23	0	220504	13	0	196892	25	0	150263	21	0	91158	16	0
	TDVRP	250157	32	665	249931	32	657	282059	36	452	322006	41	812	265764	34	850	266021	34	450	282047	36	638	257959	33	749	217994	28	564	241578	31	335
C9	VRPTW	154833	20	960	146671	19	1057	154955	20	1070	154879	20	1077	146680	19	1163	163171	21	1189	171128	22	1080	154873	20	1005	146667	19	952	138543	18	1108
	VRPATW	194708	25	0	162442	21	0	189121	25	0	166128	21	0	201045	21	0	173974	20	0	189664	28	0	184091	19	0	157410	24	0	214781	24	0
	TDVRP	613189	76	1742	506599	64	1939	578686	73	1037	642965	81	1111	482201	61	1520	684995	85	1204	618961	78	1438	594884	75	1568	458504	58	1241	427790	53	716
C10	VRPTW	301693	38	1756	277150	35	2146	285382	36	1565	334288	42	1111	244635	31	1649	326208	41	1583	318097	40	1731	317983	40	1791	277157	35	1647	228260	29	1192
	VRPATW	358170	45	0	325021	41	0	288897	52	0	419245	42	0	263212	38	0	356274	54	0	384088	44	0	299084	41	0	328207	38	0	285308	40	0

Tabla 4.11. Comparativa entre los tres planteamientos considerados

	50 Clientes	100 Clientes	150 Clientes	Total
TDVRP<VRPTW<VRPATW	5%	25%	12%	11%
TDVRP<VRPATW<VRPTW	12%	19%	19%	25%
VRPTW<TDVRP<VRPATW	8%	6%	6%	5%
<b>VRPTW&lt;VRPATW&lt;TDVRP</b>	<b>59%</b>	<b>47%</b>	<b>47%</b>	<b>53%</b>
VRPATW<TDVRP<VRPTW	10%	0%	9%	3%
VRPATW<VRPTW<TDVRP	6%	3%	7%	9%

Con respecto a las violaciones de las restricciones de acceso, mostradas bajo el epígrafe NBN, muestran que, a pesar de que los planteamientos del VRPTW y del TDVRP son aproximaciones relativamente buenas al problema en cuestión y obtienen estimaciones de costes de ruta aceptables, se requiere un algoritmo específico, como el VRPATW aportado en este trabajo, para garantizar el pleno cumplimiento de la normativa en la mayoría de los casos. Los ejemplos sacados de la literatura, donde se utiliza la visión clásica del VRPTW o enfoques con el TDVRP para estimar el efecto de ventanas temporales de acceso en las empresas de transporte, no se corresponden con el tipo de problema que se define con un VRPATW y por lo tanto no dan lugar a estimaciones de costes precisas. Esto se muestra en la Tabla 4.12, que muestra el exceso medio de costes impuesto a las compañías de transporte, como la del caso de estudio, con respecto al escenario base sin ventana temporal de acceso. Estos excesos de costes se expresan en kilómetros y luego se transforman en valores monetarios, asumiendo los costes fijos de un vehículo tipo furgoneta (105.06 € / día) y su coste promedio por km (0.163 € / km) (Ministerio de Fomento de España, 2016). Los aumentos en el total de la distancia recorrida y su posterior traducción a coste económico son obviamente mayores para las zonas restringidas de mayor tamaño y con los tiempos de ventana cerrada mayores, más en todo caso, son significativos para cada uno de los diferentes escenarios considerados. A la vista de los resultados de sobreestimación para el planteamiento de TDVRP y de subestimación para el VRPTW, los sobrecostes impuestos por este tipo de medidas son, una vez más, evidentes, y a la vez hace que sea necesario un planteamiento más cercano a la realidad como el planteado aquí de VRPATW.

Tabla 4.12. Incrementos medios de Distancia recorrida y de Coste con respecto al escenario sin RZ

		Incrementos medios de Distancia recorrida y de Coste									
		RZ = 2			RZ = 5			RZ = 9			
		TW=2	TW=4	TW=6	TW=2	TW=4	TW=6	TW=2	TW=4	TW=6	
TDVRP	50 C	$\Delta K_m(\%)$	4.0%	2.4%	8.9%	19.0%	42.3%	76.0%	25.9%	44.9%	105.7%
		$\Delta \epsilon(\%)$	10.5%	3.8%	20.6%	38.2%	114.2%	300.2%	104.4%	196.0%	427.3%
	100 C	$\Delta K_m(\%)$	1.1%	3.6%	7.2%	19.7%	37.0%	88.1%	23.0%	40.5%	109.1%
		$\Delta \epsilon(\%)$	1.9%	5.5%	10.7%	30.6%	102.0%	291.8%	114.1%	211.5%	513.4%
	150 C	$\Delta K_m(\%)$	2.3%	2.1%	6.6%	22.6%	39.7%	85.9%	28.4%	48.5%	107.8%
		$\Delta \epsilon(\%)$	4.7%	2.4%	8.9%	33.3%	98.2%	302.3%	101.1%	216.0%	539.7%
VRPATW	50 C	$\Delta K_m(\%)$	7.2%	7.1%	9.5%	10.5%	18.2%	53.6%	46.8%	112.8%	280.1%
		$\Delta \epsilon(\%)$	23.4%	26.0%	29.6%	36.3%	68.8%	169.9%	69.5%	145.0%	311.7%
	100 C	$\Delta K_m(\%)$	11.2%	13.1%	19.2%	19.6%	29.2%	103.0%	50.7%	137.3%	352.3%
		$\Delta \epsilon(\%)$	15.2%	25.0%	40.1%	43.9%	75.6%	211.6%	62.9%	162.0%	370.2%
	150 C	$\Delta K_m(\%)$	16.5%	19.2%	33.5%	36.8%	71.3%	209.8%	51.7%	115.7%	313.3%
		$\Delta \epsilon(\%)$	19.3%	14.0%	26.2%	31.7%	60.5%	198.9%	40.0%	99.2%	277.5%
VRPTW	50 C	$\Delta K_m(\%)$	10.7%	4.2%	11.6%	14.2%	32.3%	141.6%	29.5%	78.2%	225.3%
		$\Delta \epsilon(\%)$	24.2%	13.8%	24.3%	22.4%	41.2%	141.5%	40.5%	85.3%	226.4%
	100 C	$\Delta K_m(\%)$	15.8%	14.2%	26.6%	30.0%	62.2%	212.9%	38.5%	103.2%	298.0%
		$\Delta \epsilon(\%)$	19.3%	14.0%	26.2%	31.7%	60.5%	199.0%	40.0%	99.2%	277.5%
	150 C	$\Delta K_m(\%)$	16.5%	19.2%	33.6%	36.9%	71.4%	210.0%	51.7%	115.9%	313.7%
		$\Delta \epsilon(\%)$	17.4%	22.1%	35.5%	39.9%	71.6%	201.9%	53.6%	113.4%	301.6%

El análisis del caso de estudio y la aplicación del planteamiento de VRPATW ofrece varias conclusiones interesantes. Es importante señalar que estos resultados corresponden a una ciudad concreta y una definición específica de problema, pero caben esperar resultados similares en cualquier ciudad sujeta a una política de ventana temporal de acceso:

- Los escenarios con el tamaño actual de zona restringida ( $RZ = 2$ ) muestran unos pequeños, aunque nada despreciables incrementos de coste con respecto en al escenario base (sin ventana temporal de acceso), y estos incrementos se hacen más grandes a medida que la longitud de la ventana temporal ( $TW$ ) aumenta.
- Los escenarios con  $RZ = 5$ , que corresponde al tamaño de la zona restringida que en la actualidad se está considerando en Sevilla, muestran diferencias significativas con respecto al escenario base. Como se esperaba, estas diferencias aumentan con el incremento de la longitud de la ventana temporal. A modo de ejemplo, la Figura 4.28 muestra el aumento de los

costes operativos resultantes de un aumento en la duración del período de CWT o ventana cerrada, para un tamaño dado  $RZ = 5$  de la zona restringida. El aumento de los costes es importante, y no depende en gran medida del número de clientes involucrados, lo que se traduce en que se ven igualmente afectados los grandes y pequeños operadores de transporte por las políticas de ventanas temporales de acceso. Como consecuencia de esto las prácticas de violación de las normas regulatorias, como las descritas en Muñozuri et al. (2012b) son una práctica común en ciudades con este tipo de restricciones.

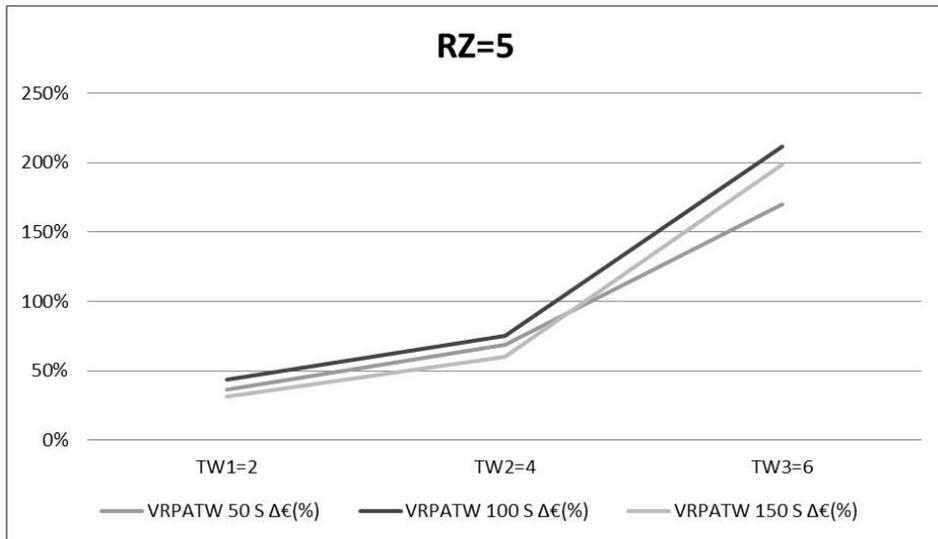


Figura 4.28. Incremento de costes debido a las variaciones en la duración de la ventana temporal de acceso en el caso de estudio

- La influencia de los parámetros  $RZ$  y  $TW$  son más grandes cuando el número de clientes es mayor, a pesar de aumentar la posibilidad de tener más opciones para configurar rutas casi óptimas.
- Los escenarios con  $RZ = 9$  muestran un gran aumento en el número de vehículos necesarios para cubrir todos los clientes, lo que representa incrementos globales de costes de hasta el 400%.

El escenario con  $RZ = 9$  y  $TW = 2$  muestra un resultado mejor que el escenario con  $RZ = 5$  y  $TW = 6$ . Esto indica que la influencia de la longitud

de la ventana temporal aumenta a medida que el tamaño de la zona restringida crece.

#### **4.4.2. Comparativa de métodos de resolución**

Se aplicaron los métodos de resolución elegidos al caso de estudio de la ciudad de Sevilla ya detallado en el apartado 4.4.1. Para cada diferente número de clientes se solucionó también un escenario sin restricción temporal de acceso, ya que la comparación de las otras soluciones con este escenario base proporciona los incrementos en la longitud de las rutas provocadas por la regulación. También se resolvió una batería de escenarios con 10 clientes utilizando el modelo matemático del apartado 4.1.4 y el software Gurobi. Así se obtuvieron las soluciones óptimas exactas de estos escenarios con un coste computacional medio de unas 2 horas por escenario, utilizando una CPU a 2,40 GHz con 8 GB de RAM. Para los escenarios más grandes solamente se utilizaron los métodos heurísticos y metaheurísticos ya que estos tenían un coste computacional de más de una semana utilizando el método exacto. La Figura 4.29 muestra los tiempos de cálculo, se puede observar que con el GA que requiere más de 5 días para las instancias de problemas más grandes, y en la Tabla 4.13 se muestran los detalles de cada uno de los 60 escenarios resueltos y los resultados obtenidos.

Estos resultados no son concluyentes en cuanto a identificar el mejor método de resolución, lo que va en concordancia con los resultados obtenidos por Figliozzi (2012) para el TDVRP, en donde ninguna técnica de resolución se podía identificar como predominante. El algoritmo genético obtiene resultados ligeramente mejores en la mayoría de los escenarios del problema, aunque también requiere tiempos de computación mayores. En cualquier caso, el aumento de la longitud total de las rutas con respecto al escenario base es clara, y este aumento se vinculó directamente con el tamaño de la zona restringida y con la duración de la TW en todos los escenarios del problema.

Tabla 4.13. Resultados obtenidos de la aplicación de las diferentes metodologías de solución de 60 casos de problemas del caso de estudio. Para cada caso, se muestran la longitud total de la ruta (fitness), medida en kilómetros, y el número de vehículos necesarios (NºV)

Nº C	RZ	CTW	AG + LocalS		TABÚ + LocalS		C & W		EXACT		
			Fitness	NºV	Fitness	NºV	Fitness	NºV	Fitness	NºV	
1	0	0	112.02	1	112.02	1	112.02	1	112.02	1	
2		2	112.02	1	112.31	1	112.31	1	112.02	1	
3	1.1	4	112.31	1	112.59	1	113.35	1	112.31	1	
4		6	113.92	1	114.68	1	114.95	1	113.92	1	
5	10	2	112.02	1	112.02	1	112.02	1	112.02	1	
6		1.6	4	112.71	1	112.59	1	113.84	1	112.59	1
7		6	142.74	1	142.82	1	142.74	2	142.74	1	
8		2	112.02	1	112.02	1	112.02	1	112.02	1	
9	2	4	123.84	1	123.07	1	123.07	1	122.90	1	
10		6	171.16	2	171.18	1	190.72	2	171.16	2	
11	0	0	140.91	1	141.51	1	141.51	1	-	-	
12		2	141.51	1	141.60	1	141.90	1	-	-	
13	1.1	4	141.09	1	142.16	1	143.21	1	-	-	
14		6	145.30	1	145.62	1	145.38	1	-	-	
15	15	2	141.51	1	142.81	1	145.38	1	-	-	
16		1.6	4	143.23	1	144.26	1	160.59	2	-	-
17		6	178.28	2	191.10	2	194.50	2	-	-	
18		2	140.91	1	141.09	1	142.84	1	-	-	
19	2	4	146.60	1	146.60	1	161.69	2	-	-	
20		6	285.30	2	286.31	2	288.83	2	-	-	
21	0	0	258.41	2	259.22	2	262.43	2	-	-	
22		2	261.13	2	260.24	2	266.93	2	-	-	
23	1.1	4	262.43	2	261.09	2	267.20	2	-	-	
24		6	262.11	2	271.47	2	270.22	2	-	-	
25	25	2	262.27	2	261.40	2	261.76	2	-	-	
26		1.6	4	264.09	2	262.30	2	269.33	2	-	-
27		6	296.74	2	279.92	3	291.02	3	-	-	
28		2	2	262.34	2	267.23	2	266.13	2	-	-
29		4	265.75	2	264.37	2	263.53	2	-	-	

Nº C	RZ	CTW	AG + LocalS		TABÚ + LocalS		C & W		EXACT		
			Fitness	NºV	Fitness	NºV	Fitness	NºV	Fitness	NºV	
30		6	349.20	3	348.61	3	355.37	3	-	-	
31	0	0	431.88	3	437.66	3	440.17	3	-	-	
32		2	436.19	3	439.33	3	441.17	3	-	-	
33	1.1	4	440.11	3	443.67	3	440.00	3	-	-	
34		6	456.31	3	460.35	4	466.03	4	-	-	
35	50	2	434.24	3	450.76	3	458.13	4	-	-	
36		1.6	4	455.52	4	442.82	3	441.76	3	-	-
37		6	493.28	4	487.21	4	505.97	4	-	-	
38		2	434.92	3	460.91	4	441.56	3	-	-	
39	2	4	462.90	4	447.95	3	456.84	4	-	-	
40		6	582.30	4	582.54	4	529.31	5	-	-	
41	0	0	815.26	6	815.86	6	824.80	6	-	-	
42		2	816.61	7	819.85	6	831.22	6	-	-	
43	1.1	4	829.60	5	822.49	6	826.20	6	-	-	
44		6	880.40	6	819.31	6	825.63	6	-	-	
45	100	2	818.87	7	819.31	6	830.43	6	-	-	
46		1.6	4	825.67	5	820.91	6	846.21	6	-	-
47		6	867.60	7	883.49	7	871.02	6	-	-	
48		2	848.01	6	836.33	6	835.89	6	-	-	
49	2	4	837.73	6	826.64	6	829.88	6	-	-	
50		6	849.74	7	898.83	7	904.07	7	-	-	
51	0	0	1182.84	9	1178.55	8	1182.32	8	-	-	
52		2	1205.06	8	1187.28	8	1201.28	8	-	-	
53	1.1	4	1215.46	9	1195.82	8	1192.61	8	-	-	
54		6	1194.15	8	1196.74	8	1205.90	9	-	-	
55	150	2	1175.64	8	1187.14	8	1188.03	8	-	-	
56		1.6	4	1200.33	9	1210.41	9	1212.68	9	-	-
57		6	1235.71	9	1242.38	9	1247.60	9	-	-	
58		2	1218.46	9	1241.43	9	1233.53	9	-	-	
59	2	4	1238.07	9	1270.76	9	1219.46	9	-	-	
60		6	1247.47	9	1280.62	10	1302.50	10	-	-	

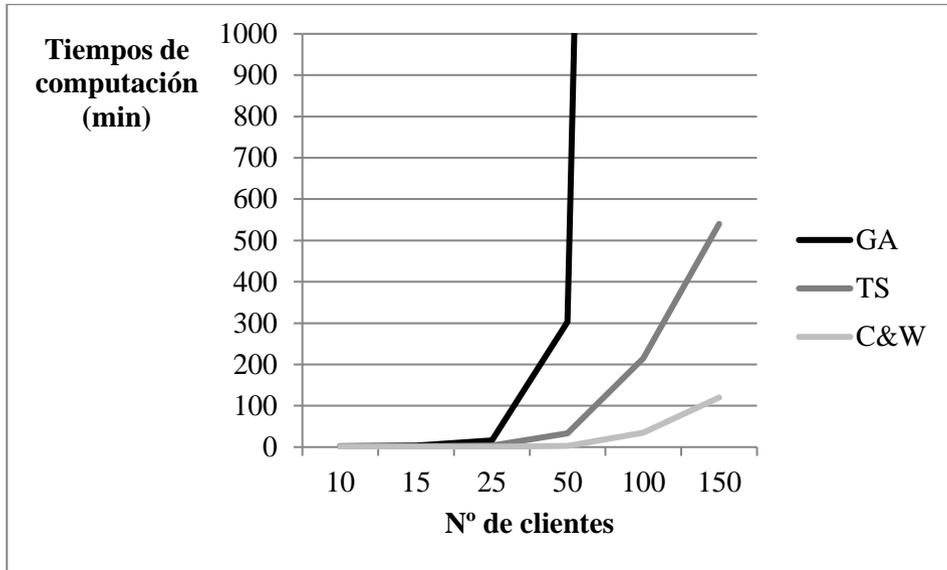


Figura 4.29. tiempos de cálculo en función del número de clientes para los tres métodos implementados

## 4.5. Conclusiones

Se han utilizado diferentes métodos, después de la calibración de sus parámetros, para estimar los costes adicionales impuestos debidos a la aplicación de una ventana temporal de acceso en el centro de la ciudad a una pequeña o mediana empresa de transporte de paquetería en la ciudad española de Sevilla. Se han utilizado también los planteamientos de TDVRP y de VRPTW, bien conocidos en la literatura, basados en el mismo motor de GA, para estimar estos sobrecostes. Y posteriormente se han comparado con los resultados proporcionados por el enfoque aportado en este trabajo de VRPATW, diseñado específicamente para este tipo de problema. Los tres procedimientos confirman que el aumento de la distancia total recorrida y del coste debido a la ventana temporal de acceso es considerable, y que este aumento es exponencial con respecto al incremento del tamaño de la zona restringida y de la longitud del período de ventana cerrada.

Estos resultados se pueden extrapolar fácilmente a otras áreas urbanas, lo que

confirma la suposición previa de que las políticas de sostenibilidad urbana implementadas por las autoridades locales no logran todos sus objetivos de sostenibilidad. Por un lado, la restricción de acceso a los vehículos de reparto de mercancías contribuye a la mejora de la accesibilidad al centro de la ciudad, a su conservación y habitabilidad, y a la reducción de ruidos y otras molestias, aspectos todos estos relacionados con la sostenibilidad social. Sin embargo, los otros dos pilares fundamentales del concepto de sostenibilidad, la sostenibilidad económica y la ambiental, y siempre desde el punto de vista de las empresas de reparto de mercancía, no se satisfacen por este tipo de política. El aumento en el número de vehículos requeridos y de la distancia total recorrida representan aumentos, por un lado, en el coste del transporte, y por otro, en las emisiones de gases de efecto invernadero tales como el  $CO_2$ . Consecuencias estas dos en la que, se entiende, las autoridades locales no pretendían caer al implantar estas políticas, aun contando con la aparente obviedad inicial de los resultados. Estas conclusiones tan poco alentadoras para la consecución de la sostenibilidad de las ciudades pudieran ser previsibles a priori basándose en trabajos de investigación anteriores que abordaban problemáticas parecidas, pero desde un marco territorial más amplio.

Con respecto a la evaluación exacta de estos costes y de estas distancias adicionales, se ha desarrollado en este trabajo el enfoque del VRPATW para representar, con un alto nivel de detalle, la situación de las empresas de reparto dentro de las ciudades que sufren una ventana temporal de acceso. La comparación de este enfoque con los encontrados en la literatura de TDVRP y de VRPTW aplicándose todos al mismo conjunto de problemas revela un patrón con respecto a estos incrementos. De acuerdo con el cual el planteamiento de VRPTW tiende a subestimar los costes y distancias adicionales y el TDVRP a sobreestimarlos. En el caso del VRPTW, los vehículos de reparto simplemente se ven obligados a visitar a los clientes mientras la ventana temporal está abierta, pero estos vehículos pueden realizar viajes que cruzan la zona restringida mientras la ventana temporal está cerrada, cosa que no se podría dar en un caso real. Debido a esto este planteamiento proporciona las soluciones de menor valor. Por otro lado, el planteamiento de TDVRP descarta el viaje cuando el origen o el destino se encuentra dentro de la zona restringida y la ventana temporal está cerrada. Pero esto no permite el supuesto de que el vehículo pueda salir de un cliente hacia el siguiente que se encuentre dentro de la zona restringida mientras la ventana está cerrada, pero sabiendo que se abrirá antes de llegar al borde de la zona restringida. Por este y por otros casos que reflejan las carencias de adaptación del TDVRP al problema planteado se explica que este aporte

los valores más altos de Fitness de los tres planteamientos comparados.

El uso de estas técnicas (TDVRP y VRPTW) proporciona soluciones más fáciles y menos costosas computacionalmente, pero que no coinciden exactamente con el funcionamiento real de los repartos urbanos de mercancías que sufren las restricciones de acceso al centro de la ciudad, dando lugar así a soluciones con violaciones de las restricciones de la ventana temporal de acceso. Nuestra impresión es que la exactitud de los trabajos de Quak y De Koster (2009) se debe a su aplicación a un escenario multi-ciudad, donde los efectos, antes explicados, de las ventanas temporales de acceso en el diseño de las rutas de reparto se diluyen un poco. Sin embargo, cuando el análisis se centra en una sola ciudad y la evaluación de los costes necesita un mayor nivel de detalle, se hace necesario un procedimiento específico como el aquí aportado de VRPATW.

Sobre la base de los resultados proporcionados por los 30 escenarios analizados en el caso de estudio, se puede concluir que el algoritmo VRPATW constituye una sólida técnica para evaluar la introducción de políticas de ventanas temporales de acceso, desde el punto de vista de los costes adicionales impuestos a los transportistas. Se ha demostrado la influencia de los tres parámetros considerados (número de clientes a visitar, el tamaño de la zona restringida y la longitud de la ventana temporal) y el hecho de que un pequeño aumento en uno de ellos no afecta significativamente a los resultados, pero un aumento mayor en, al menos, dos de ellos causa costes adicionales significativos.

Los aumentos de los costes de transporte y de las emisiones de  $CO_2$  requieren la aplicación de técnicas de evaluación cuantitativa con las que tratar de disminuirlos, o al menos para incorporarlos en el análisis global de las políticas. Estas conclusiones no pueden considerarse evidentes cuando estos costes adicionales son ignorados por las autoridades locales en la implantación de estas políticas, mientras si tienen en cuenta factores externos como la contaminación, la congestión del tráfico o el impacto visual de los vehículos de reparto. La contribución de las técnicas de investigación operativa proporciona una poderosa herramienta para evaluar estos costes adicionales y cuantificarlos. El objetivo aquí es la búsqueda de la sostenibilidad urbana sin imponer cargas excesivas a las empresas de transporte que operen en las zonas urbanas, y creemos, el procedimiento desarrollado aquí contribuye a ir en esa dirección. Por otro lado, si se pretende utilizar este planteamiento como herramienta de toma de decisiones para las empresas de transporte, se requerirían tiempos de computación de la evaluación del Fitness más

pequeños, cosa que constituye el principal objetivo de nuestras investigaciones futuras.

Para la implantación de políticas sobre transporte urbano destinadas a aumentar la sostenibilidad del transporte de mercancías en las ciudades se ha de tener en cuenta, por parte de las autoridades locales y ayuntamientos, todos los factores externos y costes involucrados. En el caso, estudiado en esta tesis, de las políticas de restricción de acceso por lo general se traducen, para los vehículos de transporte, en rutas más largas y más ineficientes, que a su vez implican un mayor consumo de energía, un aumento de emisiones y mayores costes operativos para las compañías. No hace falta decir que esto es así porque las mercancías tienen que continuar llegando a los centros de las ciudades a pesar de las barreras regulatorias. Dentro de este escenario, la investigación operativa puede ayudar a los planificadores y a las autoridades de las ciudades a estimar los costes adicionales impuestos a los transportistas, y también pueden ayudar a los transportistas a optimizar sus rutas cuando se ven afectadas por las ventanas temporales de acceso en una ciudad. Se ha presentado en este trabajo el modelo matemático para el problema de rutas de vehículos con ventana temporal de acceso (VRPATW), que conceptualiza el problema y establece la base para la construcción de soluciones técnicas. La aplicación directa de este modelo matemático es, sin embargo, limitada a escenarios de problemas pequeños, por lo que se han probado y comparado tres metodologías alternativas de soft-computing, lo que muestra que el decisor debe elegir entre el tiempo computacional y la calidad de la solución. Con la aplicación de estos métodos de soft-computing a los escenarios más pequeños del caso de estudio y con el hecho de que o bien encuentran la solución óptima o alcanzan una muy cercana a ella, se confirma la solidez de estos métodos. Así su posterior aplicación a los problemas de mayor tamaño proporciona una cuantificación de buena calidad de los costes adicionales impuestos a los transportistas por las regulaciones de ventana temporal de acceso. En este apartado de la tesis se proporciona una herramienta válida para la evaluación de la implementación de ventanas temporales de acceso, y de este modo se abre la puerta a posibles nuevas implantaciones de esta medida. Por ejemplo, al obtener un mejor conocimiento y comprensión de los costes adicionales, los transportistas podrían estar dispuestos a pagar para que se les permitiera operar dentro de la zona restringida fuera del período pre-establecido, proporcionando un mejor servicio a sus clientes y reduciendo sus costes al mismo tiempo. Lo que conseguiría una mayor eficiencia económica y un aumento de la sostenibilidad al mismo tiempo, aspectos aparentemente contradictorios, pero que se demuestra aquí que no lo son.



---

# 5. OPTIMIZACIÓN DE LA RECOGIDA DE RESIDUOS RECICLABLES UTILIZANDO INFORMACIÓN EN TIEMPO REAL

---

“Para mejorar hay que cambiar.  
Para ser perfecto hay que cambiar  
a menudo”

- Winston Churchill -

Intentar resolver el problema de la recogida de basura de las ciudades no es un problema nuevo. Ya en los años 70 se pueden encontrar autores que intentan abordar el problema, ya sea desde un punto de vista matemático (Marks et al., 1970), ya sea modelando y resolviendo un problema de rutas de vehículos o VRP (Beltrami and Bodin, 1974; Turner and Hougland, 1975). Este problema no es de fácil resolución ya que se engloba dentro de la familia de problemas denominados Vehicle Routing Problem (VRP), que como es conocido, todos ellos entran dentro de la clasificación NP-duros. Desde el punto de vista del modelado del problema existen dos formas diferentes pero equivalentes de abordar el problema:

- Arc Routing Problem (ARP) o problema basado en arcos.
- Vehicle Routing Problem (VRP) o problema basado en los nodos.

Los ARP se consideran la forma más natural de modelizar el problema. Se entiende que la acumulación de basura se produce a lo largo de las calles de la ciudad, por lo que el problema se reduce a recorrer esas calles. Así se simulan las calles con los arcos y los nodos del grafo con las esquinas de estas. De esta forma se busca minimizar el paso por arcos no necesarios para buscar la optimización del problema, es decir,

minimizar el paso por calles donde no exista basura. En la literatura se pueden encontrar multitud de ejemplos en los que se aborda el problema desde este punto de vista, y se resuelve con diferentes metodologías (Amponsah and Salhi, 2004; Bautista et al., 2008; Mei et al., 2011).

Los VRP modelan el problema asimilando los nodos a los puntos de recogida de basura por los que hay que pasar y los arcos con las distancias que los separan unos de otros. Esta forma de abordar el problema es de uso más común que la anterior, ya que la basura se suele concentrar en contenedores fácilmente localizables, y se pueden encontrar aún más referencias en la literatura donde los autores adaptan el problema a diferentes modelos VRP y los resuelven con heurísticas y metaheurísticas diferentes (Angelelli and Speranza, 2002; Hemmelmayr et al., 2011; Kim et al., 2004; Nuortio et al., 2006).

El aumento de los niveles de consumo y de la generación de residuos asociada, las consideraciones medioambientales y la sostenibilidad de las ciudades han llevado a la aparición de nuevas directivas europeas y nacionales con respecto a la gestión de los residuos urbanos. Un ejemplo de esto es el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) implantado en España en el año 2009 (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Y Marino. Gobierno de España., 2009), que viene a continuar el anterior Plan Nacional de Residuos Urbanos (PNRU) (Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de España., 2000), y que, entre otras cosas, obliga a los municipios de más de 5000 habitantes asegurar la recogida selectiva de residuos en origen. Este tipo de medidas hacen que se planteen nuevos retos a los encargados de gestionar estos residuos, más en el marco de recesión económica en el que nos encontramos, diferentes tipos de contenedores, diferentes tipos de basura, ubicación de contenedores, contaminación, consumos energéticos, reducción de costes, etc. Así se puede encontrar en la literatura autores que enfrentan el problema desde el consumo de combustible (Sonesson, 2000), hasta los que engloban objetivos medioambientales y económicos (Rhoma et al., 2010).

Pero la aparición de las nuevas tecnologías y el abaratamiento de estas aportan a los investigadores nuevas herramientas con las que resolver este problema. Ejemplo de estas nuevas tecnologías son: los denominados sistemas GIS (Geographic information system), sensores volumétricos, identificadores por radio frecuencia (RFID). Utilizando este tipo de tecnología se pueden abordar problemas como la eliminación de paradas innecesarias, reducción y equilibrado de flota según demanda, reducción de la contaminación, reducción de costes de operación, etc. En

este sentido se trabaja en los últimos años (Chang et al., 1997; Faccio et al., 2011; Johansson, 2006; Nuortio et al., 2006) y en el que hay gran potencial de trabajos futuros.

Y es en este sentido en el que se mueve este trabajo. En este trabajo abordamos el problema de recogida de basura reciclable en entornos urbanos, pero con información real del nivel de llenado de los contenedores. En concreto nos centramos en la recogida de contenedores de vidrio. Este tipo de basura reciclable necesita de un tratamiento diferente con respecto a la orgánica pues, aunque ambas necesitan ser recogidas, la frecuencia en que se hace es diferente. De ese modo la basura orgánica se recoge con una frecuencia diaria casi sin excepción mientras que la basura reciclable no. Dado el carácter no perecedero de la basura reciclable y de que el volumen en que se genera es menor que la orgánica, este tipo de basura puede ser recogida con una frecuencia menor que la diaria. De ese modo este capítulo se estructura de la siguiente manera: el problema a resolver se plantea en el apartado 5.1, seguidamente en el apartado 5.2 se aportará un método de resolución novedoso que consta de un horizonte temporal de mejora, además y en busca de su validación, se comparará con otro algoritmo de optimización clásico y que se puede encontrar en la literatura científica especializada. En el apartado 5.3 se detalla cómo se aplica el método propuesto y que se va a comparar a un caso de estudio en la ciudad de Sevilla. Finalmente, en los apartados **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y 5.4 se mostrarán los resultados y expondrán las conclusiones sacadas. Cabe mencionar que en este capítulo se prescinde del aparato de calibración porque no se hace necesario para el método de resolución utilizado.

## 5.1. Descripción del problema

Se plantea el problema de recoger los contenedores de basura reciclable una ciudad, en concreto de los contenedores de vidrio. Estos contenedores suelen estar ubicados por toda la ciudad de manera dispersa. Como ya se ha mencionado, por la naturaleza no degradable del vidrio, por la tasa no muy elevada de generación de este tipo de residuo y por la capacidad de los contenedores destinados a ello no se hace necesario recogerlos diariamente. De este modo se plantea un grafo  $G = (V, A)$ , donde  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  son los nodos y  $A = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V, i \neq j\}$  son los arcos. Adoptando la perspectiva de los problemas basados en los nodos, el conjunto de nodos  $V$  representa, por tanto, a los contenedores que se han de recoger y el conjunto

de arcos  $A$  a las calles por las que debe circular el camión de recogida de residuos y su longitud, la distancia a recorrer entre ellos. El vértice  $v_o$  es el depósito desde donde parte una flota de  $m$  vehículos con una capacidad máxima de carga  $Q_m$ . Cada vértice  $V \setminus \{v_o\}$  corresponde a un contenedor o cliente, cada uno de ellos tiene asociado una capacidad  $Q_v$  de valor fijo e igual para todos. Asociado también a cada nodo o contenedor existe un tiempo  $tr$ , que representa el tiempo invertido por el camión de recogida en vaciar el contenido del contenedor en el depósito de dicho vehículo. Este tiempo se considera fijo en este problema, por lo que no depende en principio, de la cantidad de residuos que pueda tener el contenedor regido. Se dispone también del nivel de llenado o demanda  $Nll_i$  ( $Q_v \geq Nll_i \geq 0$ ) asociado a cada uno de ellos, con este valor se denota el volumen de residuos que alberga el contenedor y que es medido por un dispositivo volumétrico del que, se supone, disponen todos ellos. Asociado a los arcos  $A$  existe una matriz simétrica de costes o tiempos de viaje  $C = (c_{ij})$  y en cuanto al marco temporal el problema se enmarca en tres horizontes de tiempo, uno de planificación  $t$ , que consta de un único día (se entiende que es el día actual), otro de cálculo, que consta de  $T_{cal}$  días y otro de optimización, que consta de  $T_{opt}$  días. Estos horizontes de tiempo cumplen que  $T_{opt} > T_{cal} > t$ . Dependiendo de la política de recogida aplicada se pueden distinguir dos subconjuntos de nodos o contenedores, por un lado, el subconjunto  $V_r$  que denota al grupo de contenedores que debe ser recogido dentro del horizonte temporal del problema, y por otro lado el subconjunto  $\bar{V}_r$  que denota al subconjunto de contenedores que no deben ser recogidos ese día. Qué contenedor pertenece a cada uno de los subconjuntos depende por un lado de su nivel de llenado y por otro de la política de recogida elegida y de su ubicación dentro del grafo.

Entonces el problema consiste en diseñar  $r$  rutas de vehículos dentro de  $G$ , que empiecen y terminen en  $v_o$  tal que (i) la demanda total de todos los clientes debe ser satisfecha; (ii) cada ruta empiece y termine en el depósito  $v_o$ ; (iii) cada cliente  $v_i$  debe ser servido por un solo vehículo; (iv) la demanda total de la ruta realizada por el vehículo  $m$  no debe superar  $Q_v$  y el tiempo de viaje no debe superar el horizonte temporal de un día (esta restricción se supone se cumple en todos los casos, dado que por la capacidad del camión y la de los contenedores las rutas no son nunca de una duración elevada pues); (v) se intenta minimizar el coste total de la recogida de residuos dentro del horizonte de optimización  $T_{opt}$ , para ello se hace uso del horizonte de cálculo  $T_{cal}$  en busca de minimizar el tiempo de viaje de cada ruta  $L(r)$  dentro del horizonte de planificación.

## 5.2. Método de resolución

En este apartado se expone la solución que se propone al problema antes presentado, así como las diferencias, antes de la realización de una comparativa cuantitativa, con una de las soluciones utilizadas por otros autores que se pueden encontrar en la literatura. Con esto se pretende hacer una validación de la política propuesta sobre las ya existentes. Se propone una política de recogida en la que se fija, a priori, el porcentaje de llenado ( $RL$ ) de los contenedores a partir del cual se deben recoger, es decir, el volumen de basura con respecto al total de capacidad del contenedor mínimo a partir del cual se considera que se debe recoger el contenedor. Con la instalación de unos dispositivos de medición volumétrica en cada contenedor y mediante una comunicación mediante radiofrecuencia con la central de recogida de residuos, se conoce el nivel de llenado de cada contenedor al inicio de cada día. Y por tanto cada día se sabe el número de contenedores que deben ser recogidos de manera obligatoria por la compañía encargada. Por otro lado, con el dato del nivel de llenado y con el histórico de recogidas de los años anteriores (se pueden consultar los datos de las empresas de recogida de residuos sólidos urbanos de cada posible ciudad o región) se estiman unas tasas de llenado medias para cada contenedor y para cada día. Con estos datos se prevén los contenedores que deberán ser recogidos los próximos  $T_{cal}$  días, si se cumplieran esos niveles estimados de llenado. De este modo se realizan los cálculos para determinar las rutas necesarias para recoger todos los contenedores del día  $t$  u horizonte de planificación, y también se calculan las posibles rutas para el horizonte de cálculo, es decir, para los  $T_{cal}$  días siguientes al día  $t$ . En busca de disminuir el número de kilómetros a recorrer dentro del horizonte de optimización  $T_{opt}$  y según un criterio propuesto, se buscan los posibles contenedores, que estén en alguna ruta de los  $T_{cal}$  días siguientes, que puedan ser recogidos en el día actual o día  $t$ . Obviamente el nivel de llenado que tendrán estos contenedores en el día actual será menor al valor fijado por la política, por lo que el criterio propuesto tiene en cuenta esa capacidad del contenedor no aprovechada como indicador de decisión. Estos contenedores a los que se les adelanta su recogida se seleccionan por parte del algoritmo por criterios de ahorro en cuanto a la longitud de las rutas realizadas por los vehículos de recogida. Esta política se compara con otra en la que simplemente se recogen los contenedores que hayan llegado al nivel de llenado fijado.

Se aclara a continuación la nomenclatura utilizada en la descripción del algoritmo, así como los operadores y bloques que lo componen.

- $L(r)$  denota la longitud, en términos temporales, de ruta  $r$ .
- *Operador Inserción*: Operador que inserta el nuevo contenedor en la posición de cada ruta que suponga un menor coste, ya sea una ruta nueva u otra ya iniciada, cumpliendo con las restricciones de capacidad de los vehículos.
- *Operador Búsqueda Local*: Operador que dentro de cada ruta ubica cada contenedor en la posición donde tenga un menor coste para la longitud total de la ruta.
- *Bloque de Mejora Intra-Rutas*: Bloque que se compone de los ya conocidos operadores de mejora 2-Opt, OR-Opt (Or, 1976) y 3-Opt (Lin, 1965) ejecutados una sola vez cada uno y en el orden expuesto dentro de cada una de las rutas iniciadas.
- *Bloque de Mejora Inter-Rutas*: Bloque compuesto por los ya conocidos operadores de mejora: Exchange, Relocate (Savelsbergh, 1992), 2-Opt\* (Potvin and Rousseau, 1995), CROSS - Exchange (Taillard et al., 1997) y GENI - Exchange (Gendreau et al., 1992) ejecutados una sola vez cada uno y en el orden expuesto. Estos operadores se aplican entre cada ruta con respecto a las demás.
- El parámetro que servirá como criterio de decisión de si se recogerán contenedores con nivel de llenado menor al fijado por la política en un día  $t$  se definirá de la forma siguiente:

$$Perdida_i = (1 - Nll_i) \cdot tr \cdot k \quad (5.1)$$

Siendo  $Nll(i)$  el nivel de llenado de cada contenedor en el instante actual,  $tr$  el tiempo de recogida de cada contenedor y  $k$  un parámetro, a modo de peso en el criterio de decisión, de la capacidad no aprovechada. Este parámetro  $k$  se utiliza aquí porque se desconocen los costes pormenorizados del transporte, es decir, no se puede calcular, por falta de datos, el diferencial de coste exacto de recoger un contenedor que aún no ha llegado al nivel de llenado límite en un día, con respecto a recogerlo el día que hubiese llegado al su nivel de llenado límite. Es obvio que al recogerse antes se desperdicia cierta capacidad volumétrica del contenedor, pero también se ahorra en longitud recorrida total de los vehículos, de ese modo en la simulación se utilizan diferentes valores de  $k$  en busca de determinar la robustez de las soluciones frente su valor.

A continuación, en la Figura 5.1, se detalla el algoritmo utilizado por la política propuesta. Dicho algoritmo calcula las rutas necesarias para un día en concreto, pero como ya se ha comentado antes, se simulará la recogida continuada dentro del horizonte de optimización  $T_{opt}$  para poder comparar así los resultados globales de las dos políticas. Así se construye un algoritmo de cálculo de rutas cuyo pseudocódigo mostramos a continuación:

```

1: for  $t = 1:T_{opt}$ 
2:   Calcular contenedores a recoger día  $t$  (Datos reales)
3:   for  $d1 = 1:T_{cal}$ 
4:     estimar contenedores a recoger en día  $t + d1$  (Datos estimados)
5:   end
6:   for  $d2 = 1:(T_{cal} + 1)$  Construir las rutas de recogida de cada día
7:     Operador Inserción
8:     Operador Búsqueda Local
9:     Bloque Mejora Intra – Rutas
10:    Bloque Mejora Inter – Rutas
11:   end
12:   for  $d3 = 1:T_{cal}$  cada día desde  $t + 1$  hasta  $t + (T_{cal} + 1)$ 
      y cumpliendo las restricciones de capacidad del camión
13:     for Para cada contenedor  $j$  de cada ruta  $r$  del día  $t$ 
14:       for Para cada contenedor  $i$  de cada ruta  $s$  del día  $t + d3$ 
15:         if  $L(r \text{ con } i \text{ entre } j \text{ y } j + 1) + Perdida(i) + L(s \text{ sin } i) < L(r) + L(s)$ 
16:           Guardar contenedor  $i$  en contenedores a recoger en día  $t$ 
17:         end
18:       end
19:     end
20:   end
21:   for construir rutas para el día  $t$  con los contenedores nuevos
22:     Operador Inserción
23:     Operador Búsqueda Local
24:     while Mientras mejore la longitud de las rutas
25:       Bloque Mejora Intra – Rutas
26:       Bloque Mejora Inter – Rutas
27:     end
28:   end
29: end

```

Figura 5.1. Pseudocódigo del algoritmo diseñado para la propuesta

Para hacer la simulación de la política a comparar se utilizó un algoritmo con una estructura como la mostrada en la Figura 5.2:

```
1: for  $t = 1: T_{opt}$ 
2:   Calcular contenedores a recoger día  $t$  (Datos reales)
3:   for  $d5 = t$  Construir las rutas de recogida del día  $t$ 
4:     Operador Inserción
5:     Operador Búsqueda Local
6:     while Mientras mejore la longitud de las rutas
7:       Bloque Mejora Intra – Rutas
8:       Bloque Mejora Inter – Rutas
9:     end
10:  end
11: end
```

Figura 5.2. Pseudocódigo de la política a comparar

### 5.3. Caso de estudio

En este apartado se expone cómo se aplica el método de resolución propuesto en una ciudad real como Sevilla. A modo de antecedentes se puede decir que actualmente en la ciudad de Sevilla se utiliza una política que mezcla por un lado la recogida de contenedores según estimaciones de tasas de llenado históricas y por otro lado las recogidas de contenedores después de haber recibido la llamada de algún vecino alertando del llenado completo de alguno de ellos. La implantación de sensores automatizados que emiten una señal al centro de gestión de residuos con el dato del nivel de llenado en los contenedores de este tipo de basura es una tendencia que se puede observar que está creciendo en los últimos tiempos. En Italia (Faccio et al., 2011) ya llevan algún tiempo en funcionamiento con buenos resultados.

Asumiendo que este tipo de sensores se han implantado en la ciudad de estudio, se plantea el problema de optimizar la recogida de los contenedores de vidrio reciclable partiendo de los datos que exponen a continuación. Se plantea por tanto una nueva política de recogida en la que se tratará de reducir la longitud recorrida por los vehículos sin perder por ello nivel de servicio. Entendido este nivel de servicio como

la demanda satisfecha o el porcentaje de vidrio recogido con respecto al total generado. Los datos desde los que se parte para solucionar el problema se exponen a continuación:

- Se dispone de un modelo de Sevilla consistente en un grafo  $G = (V, A)$ , con  $V$  consistente en 1217 nodos y  $A$  que cuenta con 4510 arcos. El coste asociado a cada arco en términos de distancia esta en kilómetros.
- Cada nodo de  $A$  lleva asociado una demanda o nivel de llenado  $Nll_i \geq 0$ . Dado que no todos los nodos del grafo se consideran contenedores algunos de ellos se fijan con una demanda nula  $Nll_i = 0$ .
- Se asume la existencia de una flota de  $Nll_i$  vehículos suficientes para realizar el servicio. La capacidad de los camiones  $Q_m$  se fija en términos de números de contenedores llenos ( $Nll_i = Q_v$ ) que pueden contener. Cada vehículo puede recoger 7 contenedores llenos, de ese modo se tiene que  $Q_m = 7 \cdot Q_v$ . Cabe decir aquí que en la ciudad de Sevilla las capacidades de los contenedores destinados a recoger el vidrio tienen un volumen de  $3 m^3$ . Asociados a los vehículos también se fija el tiempo necesario para recoger cada contenedor en  $tr = 2.5 \text{ minutos}$  (la mecánica de recogida de los contenedores de vidrio en Sevilla requiere de una grúa). La velocidad media estimada de los vehículos se fijó en  $20 \text{ km/h}$ , así con este dato y con un simple cálculo cinemático se puede obtener la matriz  $C = (c_{ij})$  que es la matriz de costes de cada arco, pero en términos temporales.
- Existe un único depósito  $v_o$  desde el que los vehículos empiezan y terminan las rutas de recogida.
- Distribuidos por el grafo se ubican los contenedores que se han de recoger. Se ha fijado el número de contenedores en 300. Se considera que cada contenedor dispone de un sensor volumétrico que aporta diariamente el nivel de llenado de cada uno de ellos. Por tanto, los contenedores tienen asociados dos datos, a parte de su ubicación exacta, uno es su nivel de llenado actual  $Nll_i$  (%) y el otro una tasa de llenado diaria (%) diferente para cada uno de ellos. Esta tasa, siguiendo así lo observado en la literatura (Johansson, 2006), se asume que sigue una distribución normal de media 0.1428, y para la desviación  $\sigma$ , que se tomará como un parámetro a variar en los experimentos, se usaran los valores de  $\sigma = 0.5$  y de  $\sigma = 1$  en busca de averiguar cual de los métodos a comparar se se adapta mejor a los

cambios de valor de la tasa de llenado diaria.

- El problema se pretende resolver para un horizonte de planificación  $t$  de un día, aunque la política propuesta pretende minimizar el número de kilómetros a recorrer dentro del horizonte de optimización  $T_{opt}$ , que para este caso de estudio se ha fijado en  $T_{opt} = 90 \text{ dias}$ , por lo que para ello se fija también el horizonte de cálculo en  $T_{cal} = 6 \text{ dias}$ .

Los valores estimados relativos a los contenedores y a los vehículos se calculan según datos estadísticos procedentes de la compañía que gestiona los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Sevilla (LIPASAM, 2011).

Así una vez detallados el problema, los métodos de resolución y el caso de estudio, a continuación, se exponen y analizan los resultados obtenidos. Se realizaron numerosos experimentos sobre el modelo de la ciudad de Sevilla con las dos políticas a comparar. Como parámetros a estudiar su sensibilidad sobre los resultados se tomaron, en los dos casos, la desviación estándar ( $\sigma$ ) de la distribución normal de la tasa de llenado diaria de los contenedores y el nivel de llenado límite de estos ( $RL$ ). Y en el caso de la política propuesta en este capítulo el valor del parámetro  $k$ . Este valor se utiliza como peso del criterio de la toma de decisión de recoger contenedores en un día  $t$  con nivel de llenado inferior al límite. En busca de poder realizar una mejor comparación entre las dos políticas estudiadas aquí, se añadió el valor del parámetro  $k$  en el cálculo de los costes de la política a comparar. A diferencia de la política propuesta, este parámetro no entra en la toma de decisiones de cual contenedor recoger o no por lo que no influye en ningún resultado de la política existente en la literatura excepto en la propia función de costes totales, que es donde ha sido incluido. Como índice de satisfacción del servicio se calculó la demanda satisfecha  $DS$  cada día. Se considera demanda no satisfecha, y por lo tanto no se contabiliza en el índice, la cantidad de vidrio que se estima que llega al contenedor después de que este esté lleno. Esta cantidad de residuos se considera que no se recoge pues el operario del vehículo se limita a vaciar el contenedor dentro del vehículo.

Los valores utilizados de los parámetros antes mencionados en los experimentos se detallan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Valores de los parámetros de los experimentos realizados

	Valores
Desviación estándar ( $\sigma$ )	$\sigma = 0.5$ y $\sigma = 1$
Nivel de llenado límite ( $RL$ )	$RL = 0.9$ , $RL = 0.9$ y $RL = 0.9$
Parámetro $k$	$k = 0.5$ , $k = 1$ y $k = 3$

Los resultados de los experimentos realizados de ambas políticas se exponen en la Tabla 5.2 y en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Resultados obtenidos de los experimentos realizados sobre el modelo con la política propuesta.  $\sigma$   $\equiv$  Desviación,  $RL$   $\equiv$  Nivel de llenado límite,  $Km$   $\equiv$  Distancia total recorrida,  $N^{\circ}C$   $\equiv$  Número de contenedores totales,  $N^{\circ}RT$   $\equiv$  Número de rutas totales,  $NIIMV$   $\equiv$  Nivel de llenado medio de los vehículos,  $DS$   $\equiv$  Demanda satisfecha,  $k$   $\equiv$  valor del parámetro en cuestión,  $CT$   $\equiv$  Coste total

$\sigma$	$RL$	$Km$	$N^{\circ}C$	$N^{\circ}RT$	$NIIMV$ (%)	$DS$ (%)	$K$	$CT$
0,5	0,9	4538	842	122	94,36%	97,68%	0,5	14665
0,5	0,9	4644	855	126	92,87%	97,72%	1	16069
0,5	0,9	4494	819	120	93,70%	97,63%	3	19624
1	0,9	5389	1074	156	94,48%	95,15%	0,5	17509
1	0,9	5528	1071	157	93,99%	95,20%	1	19261
1	0,9	5440	1045	152	95,04%	94,95%	3	24159
0,5	0,95	4411	844	122	96,33%	95,42%	0,5	14287
0,5	0,95	4297	811	117	95,99%	95,36%	1	14917
0,5	0,95	4243	780	114	95,62%	95,14%	3	18578
1	0,95	5003	955	139	96,24%	92,04%	0,5	16203
1	0,95	5026	950	140	95,67%	91,97%	1	17454
1	0,95	5132	966	144	94,69%	92,18%	3	22642
0,5	1	3969	734	108	94,73%	91,62%	0,5	12825
0,5	1	4006	744	107	95,29%	91,71%	1	13877
0,5	1	3803	718	106	92,62%	91,39%	3	16793
1	1	4967	968	141	94,03%	89,10%	0,5	16110
1	1	4923	936	136	94,68%	88,83%	1	17109
1	1	4675	889	132	92,58%	88,42%	3	20692

Se debe aclarar aquí que los resultados mostrados son los obtenidos para todo el horizonte de optimización de tres meses ó 90 días, por tanto, el coste total  $CT$

mostrado es el resultado de sumar el coste, siempre en términos temporales, de todas las rutas diarias durante esos 90 días. Se puede observar comparando los resultados de las dos tablas que la política existente en la literatura, en términos de coste total ( $CT$ ), destaca muy levemente sobre la propuesta, tan levemente que se podría decir que son iguales. De la misma manera, en cuanto al porcentaje de demanda satisfecha ( $DS$  (%)), también se podría decir que ninguna de las dos políticas destaca sobre la otra, que prácticamente son iguales. En la misma dirección iría el análisis del total de kilómetros ( $Km$ ) recorridos por los vehículos de recogida de residuos, son prácticamente los mismos. Las diferencias entre las dos políticas las podemos encontrar en el número total de contenedores recogidos ( $N^{\circ} C$ ) en el que se observa que la política propuesta realiza más recogidas que la política a comparar en casi todos los casos. También se pueden encontrar diferencias entre las políticas a comparar en términos de número de rutas ( $N^{\circ} RT$ ) realizadas, pues en este caso vuelve a destacarse la política propuesta en este capítulo realizando más rutas que la otra en casi todas las ocasiones. Del mismo modo la política propuesta destaca sobre la otra en términos de nivel de llenado de los camiones de recogida ( $NIIMV$  (%)), pues este es superior en la mayoría de los experimentos realizados. En cuanto a la robustez frente al parámetro  $k$  se observa que los resultados de los experimentos de la política propuesta tienen una variación muy leve con respecto a la variación del valor del parámetro en cuestión. Teniéndose en cuenta que el valor de  $k$  primero se duplica y después se triplica con respecto al valor anterior, los resultados se mantienen muy estables, incluso casi iguales, con excepción obvia del valor del coste total ( $CT$ ) pues este tiene incluido este parámetro en su cálculo.

Tabla 5.3. Resultados obtenidos de los experimentos realizados sobre el modelo con la política a comparar.  $CT \equiv$  Coste total en función del valor de  $k$

$\sigma$	$RL$	$Km$	$N^{\circ} C$	$N^{\circ} RT$	$NIIMV$ (%)	$DS$ (%)	$CT$ ( $k=0,5$ )	$CT$ ( $k=1$ )	$CT$ ( $k=3$ )
0,5	0,9	4541	833	129	89,71%	97,7%	14666	15707	19872
0,5	0,95	4366	789	122	91,75%	95,2%	14083	15069	19014
0,5	1	4356	787	121	92,91%	92,0%	14053	15037	18972
1	0,9	5197	1000	151	92,43%	94,8%	16840	18090	23090
1	0,95	4937	952	143	94,50%	92,0%	16000	17190	21950
1	1	4960	950	145	93,66%	88,9%	16067	17254	22004

## 5.4. Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un procedimiento de optimización de rutas de recogida de contenedores de basura reciclable usando información en tiempo real del nivel de llenado de estos. Para ello se propone una política de recogida basada en tres etapas: planificación, cálculo, y optimización. En la primera se calculan los contenedores a recoger en un día  $t$  según los datos del nivel de llenado ( $Nll_i$ ) y el nivel límite ( $RL$ ) propuesto por la política, y se calculan las rutas mínimas necesarias para ello. En la segunda etapa, denominada de cálculo, se estiman los contenedores a recoger los siguientes  $T_{cal} = 6$  días al día  $t$ , según el nivel de llenado actual ( $Nll_i$ ) y el histórico de datos de tasas de llenado, y con ellos se determinan las posibles rutas mínimas necesarias para que sean recogidos en cada uno de esos  $T_{cal} = 6$  días. Y en la tercera y última, denominada de optimización, en busca de minimizar los kilómetros recorridos en el horizonte de optimización  $T_{opt} = 90$  días, se buscan los contenedores de los  $T_{cal} = 6$  días estimados que se pueden recoger el día  $t$  aun con un nivel de llenado inferior al límite. Así el procedimiento que se propone optimiza las rutas diarias, usando datos reales, a dos niveles, uno diario y otro dentro de un horizonte de cálculo mayor.

La política propuesta se ha comparado con políticas usadas actualmente en la literatura y que sólo tienen en cuenta la optimización diaria. Y se han sacado las siguientes conclusiones:

- Haciendo el análisis desde el punto de vista económico, la política propuesta es en general levemente más cara que la política con la que se compara, es por eso que no se puede determinar una verdadera ventaja de una sobre otra con respecto a este aspecto.
- Si hacemos el análisis desde el punto de vista del consumidor o de la eficacia, es decir, desde el nivel de satisfacción de este al ver que se recogen los contenedores antes de que lleguen a su límite de almacenamiento, ninguna de las dos políticas destaca significativamente sobre la otra en ese aspecto. Como se puede observar en las tablas la demanda satisfecha ( $DS$  (%)) de las dos políticas es casi idéntica en cada uno de los diferentes experimentos y situaciones propuestas.
- En cuanto a realizar el análisis de los resultados desde el punto de vista de la eficiencia de las políticas, entendiendo esta como la realización del mismo

trabajo, pero con menos recursos, se puede observar que la política propuesta en esta tesis es ciertamente más eficiente que la otra. Como se puede ver en los resultados, el nivel de llenado de los camiones (*NUMV* (%)) de recogida de residuos de la política propuesta es superior en todos los casos que en la otra política. Y en la dirección de este análisis también se observa que el número de contenedores recogidos es mayor en todos los casos en la política propuesta que en la otra a comparar, además el número de rutas realizadas por la política propuesta es inferior que en la otra. Con estos dos datos se refuerza el análisis de que la política propuesta es más eficiente pues recoge más contenedores con menor número de rutas o lo que es lo mismo, recoge más contenedores con menos camiones de recogida. Por tanto, la política propuesta hace un aprovechamiento mejor y más optimizado de los recursos, esto se puede traducir en una reducción de la flota de vehículos necesaria, y por tanto en un ahorro muy importante para la empresa encargada de la recogida de residuos.

- Desde el punto de vista medioambiental, el análisis en principio parece quedar igualado en las dos políticas, pues el número de kilómetros (*Km*) recorridos por ellas es prácticamente el mismo. Pero realizando un análisis más profundo se puede observar que si la política propuesta recorre los mismos kilómetros con menos vehículos y recoge más contenedores con los mismos kilómetros estará reduciendo, con respecto a la otra, el volumen de emisiones de gases de efecto invernadero y por tanto se podría considerar más sostenible que la política a comparar.

Así se concluye que la política propuesta en este capítulo puede llegar a ser atractiva tanto desde el punto de vista de la empresa concesionaria, ya que mantiene unos altos niveles de satisfacción al cliente disminuyendo los gastos en el número de vehículos necesarios, como desde el punto de vista de las autoridades municipales, pues mantiene la satisfacción de sus ciudadanos a la vez que hace más sostenible la recogida de residuos sólidos urbanos ya que disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero.

---

## 6. CÁLCULO DE RUTAS DE VEHÍCULOS CON LOS COSTES DE TRANSPORTE DEPENDIENTES DE LAS ZONAS DE REPARTO

---

*“Aquella teoría que no encuentre aplicación práctica en la vida, es una acrobacia del pensamiento”*

- Swami Vivekananda -

Este capítulo presenta el diseño e implementación de una serie de heurísticas para resolver el caso real de una empresa de distribución en Sevilla. La empresa da servicio a sus clientes desde un almacén central con una flota heterogénea de vehículos, sus clientes tienen restricciones de acceso en función del tamaño de los vehículos, y pueden ser servidos por más de un vehículo si la carga supera la capacidad de los vehículos y además tienen ventanas de tiempo durante las cuales pueden ser servidos. El procedimiento algorítmico utilizado pretende minimizar el coste de transporte de la empresa, que está vinculado a la subcontratación de los vehículos necesarios sobre un horizonte temporal de un día. Como objetivo secundario se busca también hacer más sostenible a la propia empresa, en el sentido de disminuir la distancia recorrida por los vehículos de reparto y por tanto con ello reducir el consumo de combustibles fósiles, y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. En cuanto al coste de transporte del caso que nos ocupa, no depende de la distancia recorrida por los vehículos o del peso transportado por ellos, sino que depende de la zona del mapa a la que viaja el vehículo. En el resto del capítulo se hará referencia a este tipo de configuración como “coste de transporte dependiente de la zona” (ZDTc o Zone-Dependent Transportation Cost). Así cuando

se hace referencia en este capítulo al “coste de transporte” se refiere a la cantidad total de dinero pagado por la empresa a la empresa de transporte subcontratada, y con “tiempo de viaje” se hará referencia al lapso de tiempo entre dos paradas o el tiempo dedicado por los vehículos en desplazamientos de un destino a otro.

La estructura de este capítulo es la siguiente: en la sección 6.1 se hace una breve caracterización del problema de estudio. En la sección 6.1.2 se presenta el problema, sus restricciones y su modelo matemático, para continuar exponiendo el método de resolución en la sección 6.2 y sus subsecciones. En la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se detalla la calibración realizada sobre los algoritmos. En el apartado 6.4 se exponen y analizan los resultados obtenidos en el caso de estudio. Y finalmente algunas conclusiones sacadas del trabajo realizado se exponen en la sección 6.5.

## 6.1. Descripción del problema

En este apartado, y los subapartados que lo componen, se realiza una caracterización del problema que se plantea, a la vez que se repasan los diferentes planteamientos que se pueden encontrar en la bibliografía especializada en busca del que mejor encaje con el problema. Además de esto se realiza también una exposición matemática del problema en la que se incluye el modelo matemático.

Observando las características del problema que se plantea se puede deducir fácilmente que se trata de un tipo de Vehicle Routing Problem (VRP), pero a priori y según nuestro conocimiento, no encaja en ninguna de sus múltiples variantes o extensiones. La investigación llevada a cabo reveló que un problema con las características al que se enfrenta aquí no se ha analizado anteriormente, desde un punto de vista académico ni desde el punto de vista práctico. Las soluciones a problemas de este tipo son normalmente resueltas por parte de las empresas que se enfrentan a ellos de manera manual. Así era el caso de la empresa del caso de estudio. Suele ser una persona con mucha experiencia en el transporte que dedica todos los días varias horas de su tiempo en planificar e intentar optimizar los envíos diarios a los que se tiene que enfrentar la empresa. Este coordinador establece el número de paradas para el día en cuestión y luego las asigna a los vehículos disponibles, tratando de minimizar el coste de transporte, e intentando también mantener el tiempo de viaje en mente como un objetivo secundario. Se puede suponer a priori

que, con todas las características y restricciones del problema planteado, las soluciones encontradas de forma manual no estén muy cerca del óptimo deseado. Al menos en lo que se refiere a problemas de gran tamaño, cuando muchos envíos tienen que ser servidos en el mismo día.

La distancia entre la realidad y los modelos utilizados por los investigadores ha sido siempre uno de los inconvenientes principales para que estos últimos puedan ser aplicados a casos reales. Esto está cambiando con el incremento exponencial de la capacidad computacional y con el desarrollo de, cada vez más eficientes, heurísticas y metaheurísticas. La realidad es siempre mucho más compleja de lo que se plasma en un modelo. Es por esto que la literatura científica ha tratado siempre de trocear esa realidad en partes más pequeñas y simples. Pero al centrarse en subproblemas se desprecia el alto grado de interrelación que tienen esas pequeñas partes de la realidad (Schmid et al., 2013). Además de la propia complejidad de los sistemas reales con sus diversas características y restricciones que puedan ser obviados en un modelo, en la actualidad no sólo se debe buscar el mínimo coste o el máximo beneficio, sino que deben entrar en la ecuación aspectos tan relevantes como el medioambiente y el aspecto social. Más aún en un problema de transporte de mercancías, como el que se presenta en este capítulo, con sus impactos negativos sobre el medioambiente (contaminación, emisiones, etc) y sobre el medio social (ruido, atascos, congestión de carreteras, etc) (Rafael Grosso-delaVega et al., 2014; Muñuzuri et al., 2013). De ese modo en la heurística que se presenta se busca el mínimo coste de transporte además de, como objetivos secundarios, la mínima longitud de las rutas, el mínimo consumo de combustible y el máximo aprovechamiento de la capacidad de los vehículos. Buscándose de ese modo el máximo ahorro con el mínimo impacto.

### **6.1.1. Caracterización del problema**

Como ya se ha comentado la clasificación del problema a solucionar no es fácil debido al número y diversidad de restricciones a tener en cuenta. Siguiendo las últimas tendencias en la literatura científica al respecto (Drexler, 2012; Lahyani et al., 2015; Masmoudi et al., 2013; Schmid et al., 2013; Vidal et al., 2013) denominaremos al problema como un Rich VRP (RVRP) o también llamado Multi-Attribute VRP (MAVRP).

El problema clásico del Vehicle Routing Problem (VRP) consiste en encontrar las

rutas para que una flota de vehículos satisfaga la demanda de ciertos clientes. Los clientes tienen demandas diferentes y los vehículos una capacidad fija. Los vehículos deben partir de un depósito central, visitar a los clientes una sola vez y volver al depósito. El objetivo es que los vehículos satisfagan toda la demanda de los clientes recorriendo la menor distancia en sus rutas.

Atendiendo a la necesidad de que cada cliente tenga un tamaño de camión máximo con el que puede ser servido se podría clasificar el problema como un Site-dependent VRP (SDVRP). En el SDVRP (Nag et al., 1988) una flota heterogénea de vehículos satisface la demanda de una serie de clientes. Normalmente existen diferentes tipos de vehículos con diferentes tamaños y capacidades, y cada tipo tiene un número limitado de vehículos. En el VRP cualquier vehículo puede visitar a cualquier cliente, en el caso de SDVRP no es así. Existen relaciones de compatibilidad entre los clientes y los vehículos. Algunos clientes situados en zonas con calles estrechas necesitan vehículos pequeños, otros pueden ser servidos por vehículos medianos y otros pueden ser servidos por cualquier tipo de vehículo. En el SDVRP y sus variantes (Chao and Liou, 2005) cada tipo de vehículo tiene asignada una capacidad fija pero en el problema que se plantea aquí, dentro de cada tipo de vehículo existen diferentes capacidades. Esto se debe a que la empresa del caso de estudio clasifica los vehículos por accesibilidad y existen diferentes capacidades para vehículos con igual accesibilidad. Rehaciendo la clasificación de los vehículos y recodificando su asignación a los clientes el problema podría encajar en este tipo de VRP, pero no satisfaría todas las restricciones del problema.

Ante la posibilidad de que la demanda de los clientes supere a la capacidad del tipo de camión con el que pueden ser servido se podría modelar el problema como un VRP with Split Deliveries (VRPSD) (Dror et al., 1994; Dror and Trudeau, 1989). En el VRPSD se dispone de una flota de vehículos de capacidad homogénea para servir a ciertos clientes. Al contrario de lo que sucede en el clásico VRP en este caso cada cliente puede ser visitado más de una vez. Y la demanda de los clientes puede ser mayor a la capacidad de los vehículos. Se busca servir toda la demanda de los clientes sin exceder la capacidad de los vehículos, con el mínimo número de ellos y recorriendo la mínima distancia (Archetti and Speranza, 2012). De nuevo la característica principal del tipo de VRP encaja con las características del problema a resolver, pero no cumple con todas sus restricciones.

En el problema a resolver los clientes disponen de ventanas de tiempo dentro de las cuales deben ser servidos. Existen en la literatura extensiones con ventanas de

tiempo de casi todos los tipos VRP's. Buscando alguno de ellos que pudiera encajar en nuestro problema se puede encontrar en la bibliografía existente problemas como el SDVRP with time Windows (SDVRPTW) (Cordeau and Laporte, 2001), variante del ya mencionado SDVRP, o como el VRPSD with time Windows (VRPSDTW) (Archetti and Speranza, 2012; Belfiore and Yoshida Yoshizaki, 2009), variante del también mencionado VRPSD.

Con respecto a la flota de vehículos heterogénea y fija en número de la que se dispone, se puede encontrar en la literatura diferentes variantes de VRP's que se centran en ese tipo de restricción. El que mejor se adapta al problema a resolver según nuestro criterio es el denominado Heterogeneous Fixed Fleet VRP (HFFVRP) (Tarantilis et al., 2004). El HFFVRP se considera una extensión del VRP con diferentes tipos de vehículos, cada uno de ellos con su capacidad definida, el número de cada tipo de vehículo es fijo y con el coste dependiente, a parte de la distancia recorrida y del número de vehículos utilizados, del tipo utilizado. Pero, aunque encaja en varias de las restricciones que se nos planean en este problema no abarca todos los atributos que se pretenden modelar.

En cuanto a las restricciones de horario de los conductores de los vehículos, se debe cumplir con las normas impuestas por las autoridades nacionales y regionales que las regulan. Este tipo de restricciones dentro de los VRP's se suelen encontrar en la literatura en los últimos años en busca de la seguridad de los conductores y de reducir el número de accidentes (Goel, 2009; Goel and Vidal, 2014).

Lo que hace verdaderamente novedoso al problema que se plantea es que la función de costes dependa de la región o zona a la que va el vehículo y no de la distancia recorrida por este. Según el conocimiento del autor no existe referencia alguna en la literatura sobre una restricción de este tipo. Como se mencionó anteriormente la empresa factura sus transportes dependiendo de la zona más alejada al que viaja el vehículo de reparto. A este último tipo de restricción al que nos referimos se ha venido a llamar Zone-dependent transportation cost (ZDTc).

Por lo tanto y haciendo un resumen de lo mencionado hasta ahora en el apartado, el problema podría ser clasificado en la literatura (ver Tabla 6.1) como Rich VRP con las siguientes características:

- dependencia del lugar de entrega y del tamaño del vehículo utilizado (Site dependency)
- posibilidad de más de una visita por cliente (Split Deliveries)

- restricciones de ventanas temporales (Time Windows)
- utilización de una flota de vehículos heterogénea y fija en su número (Heterogeneous Fixed Fleet)
- restricciones en las horas máximas de conducción y de trabajo (Hours of services regulation)
- y con el coste dependiente de la zona a la que viaja el vehículo de reparto (with Zone-dependent transportation cost o ZDTc)

De acuerdo con todas las características, nuestro problema puede ser descrito como un Rich Vehicle Routing Problem with zone-dependent transportation cost (RVRPZD).

Tabla 6.1. Características de los diferentes VRP

<i>Problem</i>	<i>Capacity heterogeneity</i>	<i>Site dependency</i>	<i>Split deliveries</i>	<i>Time Windows</i>	<i>Heterogeneous Fleet</i>	<i>Vehicle type dependent cost</i>	<i>Zone dependent transportation cost</i>
<i>VRP</i>							
<i>SDVRP</i>		X			X		
<i>VRPSD</i>			X				
<i>SDVRPTW</i>		X		X	X		
<i>VRPSDTW</i>			X	X			
<i>HFFVRP</i>	X				X		
<i>RVRPZD</i>	X	X	X	X	X	X	X

### 6.1.2. El modelo del RVRPZD. Descripción matemática del problema

El RVRPZD que presentamos en este capítulo se define en un grafo  $G = (V, A)$ , donde  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  son los nodos y  $A = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V, i \neq j\}$  son los arcos. El grafo está dividido en  $p$  zonas y por tanto existen unos subconjuntos de nodos  $P_n \subseteq V$ ,  $\cup_1^n P_n = V$  que denota a que zona pertenece el subconjunto de vértices. El vértice  $v_0$  es el depósito desde donde parte una flota de  $m$  vehículos y  $t$  diferentes tipos dependiendo de su capacidad. Por cada tipo de vehículos  $l$  ( $l = 1, \dots, t$ ), siendo el tipo 1 el de menor capacidad y el tipo  $t$  el de mayor, existen  $m_l$  vehículos

disponibles. Dentro de cada tipo de vehículo  $l$  existen diferentes capacidades  $Q_{lk}$ , ( $k = 1, \dots, m_l$ ), siendo la  $Q_{l1}$  la mínima capacidad del tipo  $l$  y  $Q_{lm_l}$  la máxima. Cada vértice  $V \setminus \{v_0\}$  corresponde a un cliente con una demanda  $q_i > 0$ , con un tiempo de descarga dependiente de la demanda  $d_i(q_i) > 0$  y con una ventana de tiempo en el que debe ser servido  $[e_i, l_i]$ . Además, cada cliente  $v_i$  puede ser servido solamente por un subconjunto de tipos de vehículos  $R_i \subseteq \{1, \dots, t\}$ . Asociado con  $A$  existe una matriz asimétrica de costes o tiempos de viaje  $C = (c_{ij})$ . Y asociado a cada zona del grafo  $P_n$  y al tipo  $l$  y capacidad  $k$  del vehículo un coste de transporte  $T_{nlk} > 0$ . Con respecto al número de clientes servidos en una cada ruta existe un coste adicional  $f_{lk} > 0$ . Este coste se suma al coste de la ruta por cada cliente que se sirva además del primero. Es decir, si la ruta sólo tiene un cliente no se imputará, pero si tiene 3 se imputará dos veces.

Entonces el RVRPZD que se presenta consiste en designar  $r$  rutas de vehículos en  $G$  tal que (i) la demanda total de todos los clientes debe ser satisfecha; (ii) cada ruta empiece y termine en el deposito  $v_0$ ; (iii) cada cliente  $v_i$  debe ser servido por un tipo de vehículo perteneciente a  $R_i$  y dentro de su ventana de tiempo  $[e_i, l_i]$ ; (iv) la demanda total de la ruta realizada por el vehículo  $l$  con capacidad  $k$  no debe superar  $Q_{lk}$  y no debe superar el tiempo de viaje  $D_{lk}$ ; (v) cada cliente puede pertenecer a más de una ruta; (vi) se intenta minimizar el coste del transporte, y la función de costes del problema depende del tipo y capacidad del camión, de la cantidad de clientes servidos en la ruta y de la zona del grafo que se visite. Así, por ejemplo, si una ruta pasa por las zonas 1 y 3 utilizando el tipo de vehículo  $l$  con capacidad  $k$  su coste de transporte será  $\max_{n \in \{1,3\}} T_{nlk}$ , además del coste adicional  $f_{lk}$  si existiese. De este modo el coste del transporte de una ruta será el de la zona con mayor  $T_{nlk}$  de las visitadas en la ruta más el coste adicional si existiese; (vii) se intenta también minimizar el tiempo de viaje de cada ruta.

Los conjuntos del modelo:

$K \equiv$  conjunto de todos los vehículos disponibles en la flota

$P \equiv$  conjunto de todas las zonas geográficas

$V \equiv$  conjunto de todos los clientes

$N \equiv$  conjunto de todos los nodos del grafo

$A \equiv$  conjunto de todos los arcos del grafo

Los parámetros del modelo:

$S_k \equiv$  tamaño del vehículo  $k$

$C_k \equiv$  capacidad del vehículo  $k$

$\alpha_{ip} = 1$  si el cliente  $i$  pertenece a la zona  $p$ , 0 en otro caso

$R \equiv$  parámetro que establece la importancia relativa de los costes y tiempos de viaje en la función objetivo. Típicamente,  $R \ll 1$ .

$M \equiv$  parámetro constante,  $M \gg 1$

$s_i \equiv$  tiempo de servicio al cliente  $i$

$[e_i, g_i] \equiv$  ventana temporal del cliente  $i$

$q_i \equiv$  demanda del cliente  $i$

$D_k \equiv$  tiempo máximo de conducción por parte de los conductores

$c_{ij} \equiv$  tiempo de viaje entre los clientes  $i$  y  $j$

$f_k \equiv$  coste dependiente del tipo y  $k$  tamaño  $l$  del camión

Las variables del modelo:

$x_{ijk} = 1$  si el vehículo  $k$  viaja entre los clientes  $i$  y  $j$ , 0 en otro caso

$y_{ik} = 1$  si el vehículo  $k$  visita al cliente  $i$ , 0 en otro caso

$ZDTC_k =$  coste relacionado con zona del vehículo  $k$

$DC_k =$  coste relacionado con el número de vehículos  $k$  utilizados

$t_{ik} =$  tiempo de llegada del vehículo  $k$  al cliente  $i$

Así el modelo matemático del problema RVPZD queda como sigue:

$$\text{Minimizar: } \sum_k (ZDTC_k + DC_k) + R \cdot \sum_k \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_k \sum_j x_{ijk} = 1; \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_i x_{isk} = \sum_j x_{sjk}; \forall s \in I, k \in K \quad (3)$$

$$y_{ik} = \sum_j x_{ijk}; \forall i \in I, k \in K \quad (4)$$

$$t_{ik} + s_i + c_{ij} \leq t_{jk} + M \cdot (1 - x_{ijk}); \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (5)$$

$$e_i \leq t_{ik} \leq g_i; \forall i \in I, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq C_k; \forall k \in K \quad (7)$$

$$ZDTC_k \geq \sum_p T_{pk} \alpha_{ip} y_{ik}; \forall i \in I, k \in K \quad (8)$$

$$DC_k \geq \left[ \left( \sum_i y_{ik} \right) - 1 \right] \cdot f_k; \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_k S_k y_{ik} \leq MS_i; \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \leq D_k; \forall k \in K \quad (11)$$

$$x_{ijk}, y_{ik} \in \{0,1\}; ZDTC_k, DC_k, t_{ik} \geq 0 \quad (12)$$

La función objetivo minimiza la suma de los costes de transporte, compuestos por los costes dependientes de zona y por los costes de número de vehículos por ruta, más la suma de los tiempos de viajes de todas las rutas. La restricción (1) se asegura de que cada cliente sea visitado exactamente por un vehículo. La restricción (2) es una típica ecuación de equilibrio de flujo. La restricción (3) comprueba que, si un vehículo está asignado a un cliente, lo visitará en algún momento a lo largo de su recorrido. La (4), (5) y (6) son sobre las restricciones de eliminación de sub-rutas, las restricciones temporales y sobre las restricciones de las ventanas temporales, respectivamente. La restricción (7) regula la capacidad de los vehículos. La restricción (8) asegura que el coste dependiente de la zona imputado al vehículo es igual al coste máximo dependiente de zona de todos los clientes visitados por el mismo. La restricción (9) verifica que el coste relacionado con el número de clientes en la ruta por cada vehículo es igual al coste de visitar todos sus clientes asignados a excepción del primero. La restricción (10) verifica que sólo los vehículos con tamaño

permitido pueden visitar cada cliente. La restricción (11) hace cumplir el tiempo de conducción máximo diario en todos los vehículos. Y la restricción (12) establece los dominios de todas las variables del modelo.

## 6.2. Métodos de resolución

En este capítulo se comparan dos métodos de resolución diferentes para resolver el problema planteado. El primero una heurística y el segundo una metaheurística. En cuanto a la elección de los métodos para resolver el problema, debe tenerse en cuenta que la complejidad que aporta el coste dependiente de la zona y el dependiente del tipo de vehículo hace que sea imposible aplicar cualquier método existente en la literatura, es por tanto necesaria una alternativa práctica a los métodos de resolución que ya existen (Fry and Ohlmann, 2009). El objetivo, en lugar del estrictamente metodológico, es más práctico, y así se buscó cómo proporcionar soluciones rápidas y fiables para el problema planteado.

Debido al gran número de restricciones considerados en el problema, la primera dificultad a la que se debe hacer frente al diseñar un método heurístico es la generación de una solución inicial factible, sin que esto lleve a escenarios incompatibles o muy difíciles de evaluar. Este es un problema común para RVRPs en general (Vidal et al., 2013), y es por eso que la heurística propuesta incluye un número suficientemente grande de vehículos virtuales, con sus restricciones muy relajadas y su coste muy elevado. Con la inclusión de este tipo de vehículos se permite a la heurística crear rutas con ellos y así asignar clientes que de otro modo no podrían incluirse en ninguna otra ruta sin romper las restricciones del problema. Un ejemplo extremo de este tipo de situación se puede plantear en el caso hipotético en el que todos los clientes de un día determinado sólo pudiesen ser servidos por el tipo más pequeño de vehículo, y el número de vehículos del tipo más pequeño no es suficiente para transportar toda la demanda. Esto es obviamente un escenario incompatible, pero la inclusión de los vehículos virtuales permite que el procedimiento pueda asignar algunos de los clientes a ellos, proporcionando así una solución factible para el usuario final. Los clientes asignados a los vehículos virtuales indican que no pueden ser incluidos en ninguna de las rutas de ese día, por lo que se quedarían fuera, y se considerarían de nuevo al día siguiente o en un nuevo planteamiento con otros inputs. En lugar de devolver un error para una solución que no sea compatible, los vehículos virtuales permiten que se obtenga la mejor solución

posible para cualquier entrada dada, incluso si esa solución implica dejar algunos de los clientes fuera de ella. Con este procedimiento se asegura que cualquier solución generada por el algoritmo es factible en el sentido de que no viola ninguna restricción del problema, incluso si esta solución incluye vehículos virtuales y por lo tanto no es realizable. Estos vehículos virtuales son tratados como vehículos reales por el procedimiento, pero son fácilmente detectables debido a su coste y capacidad de carga inusualmente alta con respecto a los otros.

La siguiente lista resume todas las entradas o inputs necesarios para el funcionamiento del procedimiento, así como las salidas u outputs generados por el mismo.

Inputs:

- Para todos los clientes  $V$ :
  1. Velocidad media de los vehículos  $s > 0$
  2. Matriz de tiempos de viaje  $C = (c_{ij})$ , calculada a partir de  $s$ .
- Para cada cliente  $v_i$ :
  3. Identificación numérica  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ )
  4. Demanda  $q_i$
  5. Ventana de tiempo  $[e_i, l_i]$
  6. Tipo de camión máximo permitido  $h$  (el cliente  $v_i$  sólo puede ser servido por un conjunto de vehículos  $R_i \subseteq \{1, \dots, h\}$ , ( $h \leq t$ ))
  7. Zona a la que pertenece el cliente  $P_p$
- Para los vehículos:
  8. Número de vehículos disponible  $m$
  9. Tipos de vehículos disponibles  $l$  ( $l = 1, \dots, t$ )
  10. Vector de capacidades  $Q_{lk}$ , ( $k = 1, \dots, m_l$ ) por cada tipo  $l$  y cada capacidad  $k$
  11. Matriz de costes de transporte  $T_{plk}$  según zona  $p$ , tipo  $l$  y capacidad  $k$
  12. Tiempo máximo de viaje permitido  $D_{lk}$  según tipo  $l$  y capacidad  $k$

13. Coste adicional por cliente extra  $f_{lk}$
- Outputs (Por cada ruta  $r$ ):
    1. Carga transportada  $C_r = \sum_{i \in r} q_i$
    2. Tipo  $l$  y capacidad  $k$  del camión utilizado en la ruta  $r$  tal que  $Q_{lk} \geq C_r$
    3. Tiempo de viaje  $R_r < D_{lk}$
    4. Coste de transporte dependiente de la zona  $ZDTc_r = \max_{p \in r} T_{plk} + \text{num. of customer} \cdot t_{lk}$
    5. Porcentaje de llenado del vehículo  $FL_r = (C_r/Q_{lk}) \cdot 100$
    6. Los clientes ordenados que componen la ruta  $\{v_i \mid i \in r\}$

En los apartados siguientes se expone una descripción detallada del proceso heurístico diseñado. A pesar de que cada apartado contiene una explicación de las restricciones y aspectos del problema que tienen mayor influencia en la construcción de la correspondiente solución factible y en el valor de la función objetivo, se entiende que el proceso funciona de tal manera que todas las demás restricciones que intervienen en el problema también se cumplen.

La función Fitness diseñada para la herramienta se implementa para garantizar la no violación de cada una de las restricciones del problema y para calcular el coste de transporte de cada ruta. Esta función de Fitness se utiliza en todos los métodos presentes en este capítulo para evaluar todas las soluciones, asegurando con esto que todos los métodos proporcionan una solución factible. Vale la pena comentar que en el inicio del procedimiento no existe ninguna ruta y todos los clientes y los vehículos disponibles se disponen en listas ordenadas.

El principal objetivo de este procedimiento es reducir al mínimo el  $ZDTc$ . Para lograr esto, el procedimiento busca las rutas más baratas dentro del espacio de soluciones, también tratando de minimizar la duración de estas. Por medio de esto, el procedimiento minimiza los costes de transporte y además busca reducir al mínimo el consumo de combustible y el tiempo de viaje, con lo que se consiguen estos dos objetivos secundarios ya mencionados. Por lo tanto, se minimizan el impacto social negativo del transporte urbano de mercancías, además de proporcionar beneficios económicos para la empresa.

## 6.2.1. Heurística Greedy

Se implementó una heurística greedy dividida en dos fases principales (ver Figura 6.1). A su vez, estas dos fases contienen varias subfases distintas. La primera fase se encarga de encontrar una solución inicial factible y la segunda realiza búsquedas para encontrar posibles mejoras de esta solución.

### 6.2.1.1. Fase inicial. Solución Inicial.

Esta fase inicial se subdivide en dos etapas (véase Figura 6.1). La primera resuelve el posible problema de las Split deliveries, es decir de que la demanda de algún cliente supere a la capacidad máxima del mayor vehículo utilizable para servirle. La segunda encuentra la solución inicial y la une a las posibles rutas generadas por la primera etapa.

#### 6.2.1.1.1. Etapa 1: Carga fraccionada (Split deliveries) y Proceso de Revisión

Esta primera etapa contiene las siguientes dos rutinas:

- *Primero*: asignar rutas a todos los clientes, si existiesen, con  $q_i > Q_{hm_h}$  siendo  $h = \max(l \in R_i)$ . Para ello se crea una ruta nueva con el cliente  $v_i$ , se actualiza la lista de clientes con una nueva demanda para esos clientes de  $q'_i = q_i - Q_{hm_h}$  y se actualiza la lista de vehículos disponibles quitando el de capacidad  $Q_{hm_h}$ . Este proceso se hace hasta que la capacidad del cliente cumpla  $q_i < Q_{hm_h}$  con todos los clientes que necesiten split deliveries, es decir, cargas fraccionadas.
- *Segundo*: asignar vehículos a clientes con restricciones más ajustadas. A este proceso lo denominamos "Proceso de revisión". Con esto se busca impedir llegar a incompatibilidades en el proceso de construcción de las rutas. Tales como asignar clientes a vehículos, por ser el coste de ruta más barato, pero dejar fuera de esa ruta clientes que se quedarían sin vehículo real. Para ello se han implementado dos procedimientos secuenciales:
  - En primer lugar, si un cliente, debido a las restricciones de accesibilidad, sólo puede ser servido por un vehículo específico, que además está disponible, y la demanda del cliente cubriría más del 85% de la capacidad de carga del vehículo ( $q_i > 0,85 \cdot Q_{hm_h}$ ), el cliente se asigna

directamente a ese vehículo, creando con esto una nueva ruta. La lista de los restantes clientes y vehículos se actualiza posteriormente.

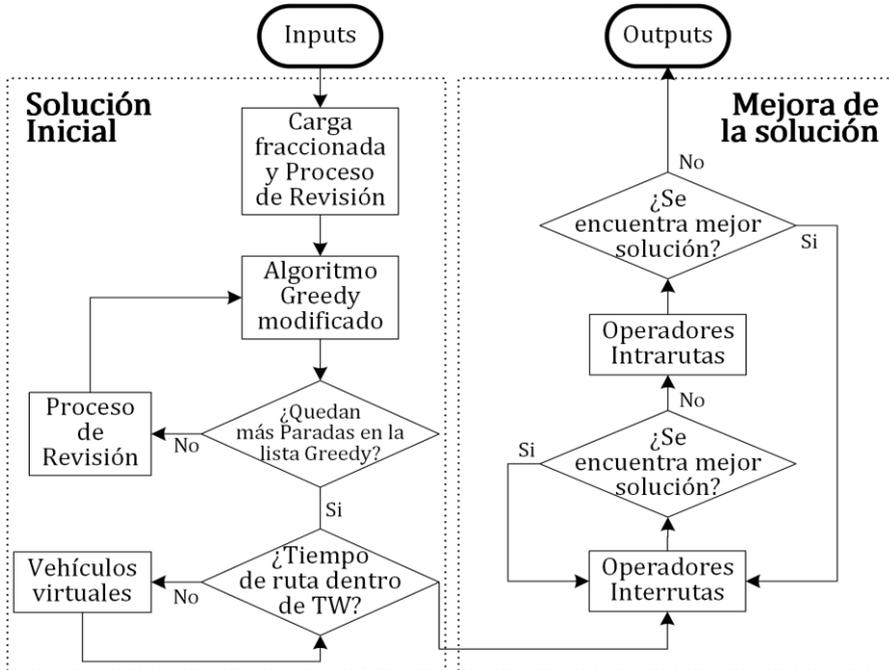


Figura 6.1. Diagrama de flujos de la heurística diseñada

- En el segundo lugar, si un cliente sólo puede ser servido por un tipo específico de vehículo y hay un número  $\leq 2$  de vehículos disponibles de ese tipo, el cliente es asignado al más barato de ellos. La lista de los restantes clientes y vehículos se actualiza posteriormente.

Después de esta etapa, si se ha llevado a cabo porque no es necesaria en todos los casos, se obtiene una solución incompleta del problema y se pasa a la segunda etapa.

#### 6.2.1.1.2. Etapa 2: Algoritmo greedy modificado

Para encontrar el resto de la solución inicial se utilizó una variante del método de resolución más comúnmente utilizado para resolver los VRP's, el algoritmo greedy de Clarke y Wright (CW) (Clarke et al., 1964). Este procedimiento CW parte de considerar  $n$  rutas, con un cliente asignado a cada una de ellas. Las siguientes iteraciones buscan las dos rutas que generen el máximo ahorro en el coste global y

las unen. El ahorro entre las rutas  $(i, v_0)$  y  $(v_0, j)$  es:

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (6 - 1)$$

donde se suma el coste de ir desde el nodo  $i$  al depósito, más el coste de ir desde el depósito al nodo  $j$  menos el coste de ir desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ . Esto viene de restar el coste total de la ruta que pasa por  $i$  y por  $j$  antes de su unión menos el coste después de su unión, esto es:

$$s_{ij} = (c_{0i} + c_{i0} + c_{0j} + c_{j0}) - (c_{0i} + c_{ij} + c_{j0}) = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (6 - 2)$$

Otras variantes del CW pueden encontrarse en la literatura , (Altinel and Öncan, 2005; Gaskell, 1967; Paessens, 1988; Yellow, 1970) en ellas los autores suelen añadir al cálculo del ahorro uno o más sumandos dependientes de otros parámetros. Estos sumandos tienen sus correspondientes pesos que determinan la importancia relativa de cada uno dentro de la función objetivo o de ahorro. Siguiendo esta tendencia e intentando adaptar el método a las características del problema, se diseñó una función de ahorro dependiente del coste de transporte, de la distancia y de la demanda. Así la función de ahorro diseñada fue:

$$s_{ij} = T_{ihm_h} + T_{jhm_h} - \max(T_{ihm_h}, T_{jhm_h}) + c_{i0} + c_{0j} - L \cdot c_{ij} + F \cdot |c_{i0} - c_{0j}| + V \cdot \left\{ \frac{(q_i - q_j) / [(\sum_{i=1}^n q_i)]}{n} \right\} \quad (6 - 3)$$

con  $h = \max(l \in R_i)$ ,  $h' = \max(l \in R_j)$  y  $L$ ,  $F$  y  $V$  pesos relativos. En función de la distribución de pesos, la función encuentra soluciones más centradas en la demanda, en el tiempo de viaje o el coste de transporte. Esto a su vez implica la necesidad de la calibración del algoritmo (ver apartado 6.3).

Entonces el proceso de construir las rutas queda del siguiente modo:

- *Paso 1:* Se calcula la lista de ahorro  $s_{ij}$  según la función anterior y se ordena en orden descendiente (de mayor a menor ahorro).
- *Paso 2:* Se toma el primer elemento de la lista (el de mayor  $s_{ij}$ ) y se incorporan los clientes  $i$  y  $j$  a una ruta, obviamente si ninguna restricción es incumplida, y a continuación se elimina de la lista de ahorro. Dentro de este proceso se pueden dar los siguientes casos:
  - Paso 2.1: Si ni el cliente  $i$  ni el  $j$  pertenecen a ruta alguna. Entonces se crea una ruta nueva donde se incluyan  $i$  y  $j$ .

- Paso 2.2: Si uno de los dos clientes ( $i$  o  $j$ ) ya pertenece a alguna ruta. Entonces se incluye en la ruta existente si no se incumplen ninguna de las restricciones del problema.
- Paso 2.3: Si ambos  $i$  y  $j$  pertenecen ya a rutas diferentes y son no interiores (se considera interior a un cliente en una ruta cuando ni es el primero de la ruta ni es el último). Se unen las rutas si no se incumple ninguna restricción del problema.
- *Paso 3:* Si la lista de ahorro aún tiene algún elemento se aplica el “Proceso de Revisión” si fuese necesario y se retrocede al paso 2. En otro caso se continúa con el paso 4.
- *Paso 4:* El proceso finaliza cuando todos los clientes se han incluido en alguna ruta. En otro caso se asignan cada uno de estos clientes que restan por incluir al mismo número de vehículos virtuales, creando así tantas rutas de vehículos virtuales como clientes por incluir.

Con esto se obtiene una solución completa del problema  $cs_p$ . Es decir, todos los clientes asignados a alguna ruta, sin incumplir ninguna restricción del problema.

### 6.2.1.2. Mejora de la solución

En esta segunda fase de toma la solución aportada por la fase primera  $cs_p$  y se intenta mejorar. Se entiende en este caso como mejora la búsqueda de una solución más barata y de menor tiempo de viaje, consiguiéndose con eso el mayor aprovechamiento de la capacidad de los vehículos. Para ello se utilizan dos tipos de operadores diferentes, unos inter-rutas y otros intra-rutas. Los primeros (operador Búsqueda Local, operador 2-Opt, operador OR-Opt y el operador 3-Opt) actúan dentro de cada una de las rutas construidas buscando posibles mejoras en coste de transporte y/o en el tiempo de viaje. El operador Búsqueda Local intenta insertar cada uno de los clientes de una ruta en cada una de las posiciones de ella buscando así algún ahorro. Los operadores OR-Opt (Or, 1976), 2-Opt y el 3-Opt (Lin, 1965) están diseñados según sus concepciones originales. Y los segundos operador the exchange, operador Relocate (Savelsbergh, 1992), operador 2-Opt\* (Potvin and Rousseau, 1995) y el operador Cross Exchange (Taillard et al., 1997) buscan mejoras en las rutas intentando combinar, intercambiar o juntar elementos de dos rutas diferentes. Cada uno de los operadores utilizados en la heurística se ha adaptado a las necesidades del problema en cuestión.

## 6.2.2. La Búsqueda Tabú

El rendimiento de la heurística greedy se ensayó frente a una metaheurística de tipo búsqueda Tabú, cuyo diseño se basó en la literatura existente (Chao and Liou, 2005) sobre la resolución de SDVRPs. El diseño de esta búsqueda Tabú se realizó siguiendo el diseño clásico y simple de la literatura (Glover, 1989). Como ya se ha mencionado, el problema contempla múltiples subproblemas dentro de él, pero el hecho de que cada cliente tiene diferentes restricciones de acceso es el que más dificultades, a la hora de diseñar e implementar este tipo de algoritmo, plantea. Además de estas dificultades, la cuestión de la codificación de las soluciones conllevaba ciertas dificultades adicionales. Dado que las soluciones al problema planteado se codificaron como una lista ordenada de paradas que después evalúa la función Fitness (se recuerda aquí que se implementó una sola función Fitness y se implementó en los dos métodos), los movimientos de la búsqueda Tabú se realizan intercambiando de posición dos de esas paradas dentro de la lista ordenada. Pues la dificultad se encuentra en que el valor de la función fitness de una solución y el valor de otra solución adyacente o vecina a ella, es decir que se diferencian en un único movimiento del algoritmo, pueden ser muy dispares debido a la propia naturaleza del problema y sus múltiples restricciones (piénsese en que se cambia una parada con una restricción de tamaño de vehículo muy estricta y se sitúa en una ruta con un vehículo no permitido, el algoritmo dividiría esa ruta para asignarle un vehículo permitido añadiendo así un vehículo más a la solución). Con esto se dificulta el proceso de intensificación de la búsqueda Tabú, la cual intenta explorar de forma exhaustiva el entorno de la mejor solución encontrada hasta el momento, dado que en el entorno más cercano (entendiendo entorno cercano de la solución a soluciones derivadas de la anterior y que se diferencian en un único movimiento del algoritmo Tabú) puede tener unos valores muy dispares en cuanto a su magnitud, dificultando con esto la elección de la dirección de mejora del algoritmo. Aún con las dificultades expuestas y con otras no expuestas, se diseñó un algoritmo de búsqueda Tabú que abordaba el problema y que consta de dos fases:

- *Fase 1: Solución inicial.* La primera fase construye una solución inicial factible. El proceso funciona mediante la generación de una solución al azar, para luego ir añadiendo tantos vehículos virtuales como sea necesario para aquellos clientes que violan alguna restricción temporal o de accesibilidad.
- *Fase 2: Búsqueda Tabú.* Esta segunda fase emula el método diseñado y

descrito por Chao y Liou (2005), con las excepciones obvias de adaptación a las restricciones específicas de la RVRPZD. Aquí los autores mencionados utilizan unos algoritmos para realizar los movimientos de la búsqueda Tabú o de búsqueda de vecindario adaptados al Site-Dependent Vehicle Routing Problem (SDVRP) y a las dificultades que entraña la dependencia de las paradas con el tamaño o tipo de vehículos. Así se realizan movimientos de vecindario dentro de las mismas rutas, con sus respectivos tamaños de vehículos, o dentro de las posibles diferentes rutas existentes con el mismo tipo de vehículo. Con esto se busca encontrar un vecindario de cada solución que no difiera en mucho con respecto al valor de la función Fitness, solucionándose en parte el problema, ya mencionado anteriormente, de la búsqueda de la dirección de mejora.

Se utilizó esta búsqueda Tabú para resolver el problema, pero se le añadió una tercera fase adicional con el fin de permitir mejoras en las soluciones encontradas.

- **Fase 3: Mejora de la solución.** En esta etapa se utilizan los mismos operadores usados en la sección 6.2.1.2. Esta fase está destinada a mejorar la solución encontrada por la búsqueda Tabú.

Se resolvió el problema de nuevo con las tres fases, buscando mejorar la metodología de Chao y Liou (2005).

### 6.3. Calibración

En este apartado se detalla someramente los resultados obtenidos en las calibraciones de los algoritmos utilizados en este capítulo. Para cada uno de los algoritmos se diseñaron una serie de baterías de experimentos, las cuales cubrían la práctica totalidad de los posibles escenarios que se podían dar dentro del problema que se plantea. Después de obtener los resultados de resolver dichos experimentos y de procesar los resultados en busca de patrones reconocibles, se sacaron las conclusiones, en forma de valores de parámetros, que se exponen a continuación.

En primer lugar, se exponen los valores referentes a los pesos de la ecuación (6 - 3) que relacionan los diferentes sumandos adicionales de la ecuación de ahorro diseñada para el algoritmo Greedy utilizado:

- $L = 1$ ,

- $F = 1,5$
- $V = 0,5$

En cuanto a la búsqueda Tabú diseñada, se llevó a cabo un proceso de calibración con el fin de elegir los mejores valores para parámetros tales como el número de iteraciones, el tamaño de la lista Tabú y el criterio de parada. Los valores con los que se concluyó que el algoritmo se adaptaba mejor a la fisiología del problema son:

- $It_m \equiv n^\circ$  de iteraciones del Tabú=150
- $T_{mx} \equiv n^\circ$  de iteraciones permaneciendo en la lista Tabú = 7
- $N_{lm} \equiv n^\circ$  de reinicios con solución aleatoria= 3
- $M_m \equiv n^\circ$  de iteraciones máximo sin mejorar la solución, para activar el reinicio con solución aleatorio =10

## 6.4. Caso de estudio

En este apartado se muestra un caso real de una empresa de transporte de mercancías en Sevilla y los resultados obtenidos al resolver el problema con las heurísticas diseñadas anteriormente. El problema que se planteaba con la empresa consiste en distribuir mercancías de muy diverso tamaño y peso, desde un único almacén central, por toda la ciudad de Sevilla. Esta ciudad tiene una superficie total de  $142,44 \text{ Km}^2$  y consta de 8 distritos diferentes: Casco Antiguo, Macarena-San Pablo-Sta. Justa, Nervión-Cerro-Amate, Triana, Norte, Este-Alcosa-Torreblanca, Sur-Bellavista-La Palmera y Los Remedios, lo que muestra la dimensión de la zona de reparto y del problema (Ver Figura 6.2). Para abordar el reparto la empresa dispone de una flota heterogénea y con número fijo de vehículos subcontratados. Es de mencionar que el número de vehículos disponibles puede variar, pero en el horizonte de tiempo en que se plantea el problema se considera fijo. De ese modo, cada día se conoce el número fijo de vehículos disponibles, aunque ese número puede variar en días diferentes.

La empresa, en cuanto al reparto de mercancías, tiene que cumplir con una serie de restricciones impuestas por sus clientes. Según qué cliente, estos deben ser servidos dentro ciertas ventanas de tiempo. En este caso real del caso de estudio solo existen dos tipos de ventanas. El primer tipo es una ventana de tiempo por la mañana, y el

segundo es por la mañana y por la tarde. Dependiendo del tipo de cliente estos pueden tener dos tipos de horarios, uno que seguro incluye la mañana (7 h to 15h), y otro en el que abren también en horario de tarde (7h to 19h). De este modo un tipo de ventana temporal será con horario de mañana y la otra con horario de mañana y de tarde.



Figura 6.2. Mapa de situación y de la zona de influencia de la empresa

Por otro lado, cada cliente, dependiendo de su ubicación, tiene un tipo de acceso máximo o un tamaño de vehículo máximo con el que se puede acceder a él. Para esto la empresa ordena su flota disponible en diferentes categorías dependiendo del tamaño, capacidad de carga y volumen de carga. De este modo cada cliente se codifica con una de estas categorías, entendiéndose con esto que puede ser servido por esa categoría como máximo o por las categorías menores a ese si existiesen.

El tipo y tamaño de mercancía que necesitan los posibles clientes es muy variado, pudiendo ir desde unos cables de alimentación para ordenadores hasta mobiliario de gran tamaño. Por lo que los clientes pueden tener una demanda mayor a la

capacidad de carga que tenga su categoría de vehículo máxima, necesitándose en tal caso más de un vehículo para servir al cliente. Cabe decir aquí que normalmente los clientes son servidos por un único vehículo.

El número de clientes a los que puede servir la empresa es conocido, y el coste del transporte de las mercancías al cliente no depende, como ya se ha mencionado, de la distancia recorrida por los vehículos. En este caso la empresa en cuestión tiene un tipo de contrato con los vehículos subcontratados por los que establecen entre los dos unas tarifas según el distrito al que se acuda a dar servicio. Es de entender que estas tarifas dependen en gran medida de la distancia de ese distrito al almacén de la empresa, pero a la hora de liquidar el servicio la empresa paga la tarifa más alta de los distritos visitados por el vehículo (en el caso de que se acuda a más de un distrito diferente a servir a los clientes). Obviamente el caso de servir a clientes de un solo distrito es trivial. De este modo se tiene establecido previamente, dependiendo del vehículo y su tamaño, el coste de viajar a cada zona. La regla general, puede variar ligeramente dependiendo del transportista, es que el distrito más barato sea el Norte dado que el depósito central se encuentra en ese distrito. Los siguientes distritos son Este y Macarena-Alcosa-Torreblanca, seguidos de Triana y Casco Antiguo. El siguiente es Nervión-Cerro-Amate, y por último los distritos de Los Remedios y Sur-La Palmera-Bellavista son los más caros. Se muestra en la Figura 6.3 un ejemplo del coste proporcional de un camión si viajara a los diferentes distritos.

Además de esta tarifa fija, la empresa paga una cuota fija por cada cliente adicional (a partir del segundo en adelante) incluido en una ruta. Por último, y no menos importante, se deben cumplir las normas que regulan en España y en Andalucía las horas de conducción de vehículos de transporte y las horas de duración de la jornada laboral de los conductores. Estas dictan que el horario laboral, entendiéndose por tal el tiempo que dedica el conductor desde que sale del depósito central hasta que vuelve, no debe superar las 10 horas. Pero también impone que el tiempo que transcurra desde que el conductor llega a su primer destino hasta que sale de su último destino no supere las 8 horas. Los datos correspondientes a los costes de transporte por tipo de camión y distrito se pueden ver en la Tabla 6.2.

Al intentar resolver el problema se entiende que lo que busca una empresa, obviamente, es gastar menos en transporte por lo que la heurística diseñada tiene como función objetivo el minimizar costes. Cabe señalar que el 30% de los costes globales de la empresa están relacionados con la subcontratación de los servicios de transporte, lo que representa un porcentaje total de aproximadamente 2 millones de

euros por año. Estas cifras dan una idea de la importancia y la dimensión del problema.

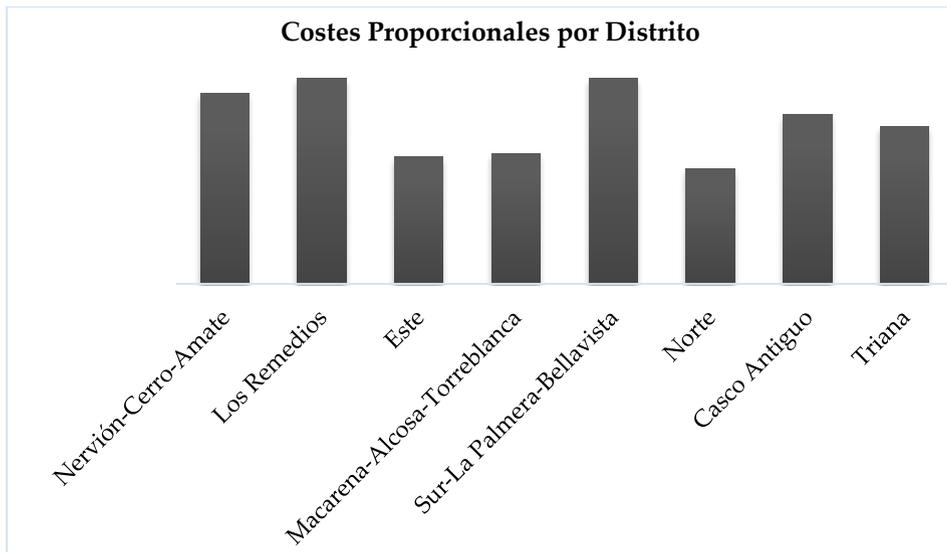


Figura 6.3. Costes proporcionales por distrito

Los tres métodos descritos (heurística greedy, búsqueda Tabú y Tabú + Fase 3) se implementaron, calibraron y validaron utilizando, además de otros, los datos de una semana real de operaciones de la empresa de distribución. Las tablas de esta sección muestran los datos correspondientes a las entradas o inputs de los algoritmos, así la Tabla 6.3 muestra las características de los datos representativos de una semana utilizados para la calibración y la validación; la Tabla 6.4 muestra las características de los clientes (demanda, ventanas de tiempo, accesibilidad y distrito) de uno de los días de la semana.

Una tabla de inputs adicional, que no se muestra aquí, contiene los valores  $c_{ij}$ , es decir, los tiempos de viaje entre cada par de clientes, y entre éstos y el depósito. Para poder disponer de estos datos se requirió un procedimiento de cálculo previo utilizando los códigos postales y las direcciones de cada cliente contenidos en la base de datos de la compañía. En cuanto al cálculo del tiempo de viaje, se supone que la velocidad de los vehículos es constante e igual para todos los vehículos (30 km / h, valor fijado por la empresa) y se conocen las distancias entre paradas. Así, el tiempo de viaje entre las paradas se conoce a priori (matriz asimétrica de los tiempos de

viaje).

Tabla 6.2. Datos reales correspondientes al acuerdo entre la empresa distribuidora y los conductores subcontratados, incluyendo la capacidad de transporte, tiempos de conducción y los costes de transporte en función del distrito de destino. En este caso  $p = 8, m = 25, t = 6, m_1 = 4, m_2 = 7, m_3 = 3, m_4 = 5, m_5 = 3, m_6 = 3$

$l$	$k$	$Q_{lk}$ (Kg)	$D_{lk}$ (min)	$f_{lk}$ (€)	$T_{nlk}$ (€)							
					$P_1$ Norte	$P_2$ Este	$P_3$ Macarena- Alcosa- Torreblanca	$P_4$ Triana	$P_5$ Casco Antiguo	$P_6$ Nervión- Cerro- Amate	$P_7$ Los Remedios	$P_8$ Sur-La Palmera- Bellavista
1	1	2200	780	8	170	180	190	195	195	210	210	210
	2	2750	780	10	170	180	190	195	195	220	215	215
	3	3000	780	10	170	180	190	195	195	225	225	225
	4	4000	780	10	170	180	190	195	195	225	225	225
2	1	5300	780	10	180	200	200	220	220	260	265	265
	2	5600	540	10	180	200	200	220	220	260	265	265
	3	6000	900	1	99	100	101	102	103	104	105	106
	4	6010	900	1	99	100	101	102	103	104	105	106
	5	6020	900	1	99	100	101	102	103	104	105	106
	6	6030	900	1	99	100	101	102	103	104	105	106
	7	6040	900	1	99	100	101	102	103	104	105	106
3	1	6500	780	10	185	200	205	245	245	300	305	305
	2	6800	780	10	185	200	205	245	245	300	305	305
	3	7100	780	10	185	200	205	245	245	300	305	305
4	1	7500	540	15	190	210	215	260	280	315	340	340
	2	8000	540	15	190	210	215	260	280	315	340	340
	3	8500	540	15	190	210	215	260	280	315	340	340
	4	8510	540	15	200	230	290	330	340	400	400	400
	5	8520	540	15	190	210	215	260	280	315	340	340
5	1	10000	540	15	195	220	255	290	295	350	335	335
	2	10500	540	15	195	220	255	290	295	350	335	335
	3	11500	540	18	200	230	290	340	360	400	440	440
6	1	13200	540	20	200	230	290	340	380	400	460	460
	2	13500	540	20	200	230	290	340	380	400	460	460
	3	13510	540	20	200	230	290	340	380	400	460	460

Tabla 6.3. Características de la semana representativa estudiada

	Demanda total (Kg)	Nº clientes	Demanda media por cliente (Kg)
Lunes	124059	20	6202,95
Martes	97558	23	4241,65
Miércoles	81770	19	4303,68
Jueves	56874	23	2472,78
Viernes	67283	35	1922,37
Sábado	101667	26	3910,27
Domingo	50388	15	3359,20

Tabla 6.4. Inputs de los clientes a servir el miércoles de la semana

$i$	$q_i$	$[e_i, l_i]$	$l$	$P_n$
1	335	[7: 00,15: 00]	6	7
2	370	[7: 00,19: 00]	6	4
3	530	[7: 00,15: 00]	2	5
4	956	[7: 00,15: 00]	6	5
5	984	[7: 00,19: 00]	6	4
6	1701	[7: 00,19: 00]	6	3
7	1780	[7: 00,19: 00]	5	4
8	2070	[7: 00,15: 00]	5	4
9	2156	[7: 00,15: 00]	6	3
10	2591	[7: 00,15: 00]	6	7
11	2660	[7: 00,15: 00]	2	5
12	2702	[7: 00,15: 00]	6	4
13	3190	[7: 00,19: 00]	6	5
14	4412	[7: 00,15: 00]	6	4
15	5175	[7: 00,19: 00]	5	7
16	5292	[7: 00,15: 00]	2	5
17	8102	[7: 00,15: 00]	4	7
18	10346	[7: 00,15: 00]	5	7
19	26418	[7: 00,15: 00]	6	5

La Tabla 6.5 muestra los resultados obtenidos con los datos de la semana de

validación, se compara la solución hecha a mano de la compañía con las soluciones encontradas por la heurística greedy, el procedimiento de búsqueda Tabú y el Tabú + fase3. La tabla muestra el coste total de transporte en euros por día, el número de vehículos usados y el factor de carga promedio de las rutas.

Tabla 6.5. Comparativa entre las soluciones de la empresa y métodos de resolución utilizados

		Solución de la compañía	Heurística greedy	Tabú	Tabú + Fase 3
Lunes	Coste Total (€)	4118	4189	4529	4226
	Nº de vehículos	17	17	17	17
	Factor de carga	89,7%	90,8%	93,8%	93,9%
Martes	Coste Total (€)	3634	3394	3449	3398
	Nº de vehículos	16	15	16	15
	Factor de carga	83,2%	90,4%	87,4%	90,8%
Miércoles	Coste Total (€)	3312	3142	3252	2937
	Nº de vehículos	13	12	12	12
	Factor de carga	80,0%	87,2%	81,6%	90,5%
Jueves	Coste Total (€)	2126	1804	2285	1925
	Nº de vehículos	10	9	10	9
	Factor de carga	85,1%	93,3%	90,3%	94,3%
Viernes	Coste Total (€)	3413	2487	2587	2392
	Nº de vehículos	15	11	12	11
	Factor de carga	69,4%	86,1%	84,8%	90,1%
Sábado	Coste Total (€)	3581	2964	3507	3334
	Nº de vehículos	18	13	15	14
	Factor de carga	68,2%	96,9%	89,9%	92,7%
Domingo	Coste Total (€)	2020	2097	2232	1854
	Nº de vehículos	10	8	8	8
	Factor de carga	77,4%	88,7%	83,5%	88,4%

En la mayoría de los casos las soluciones propuestas por los algoritmos mejoran las soluciones adoptadas por la empresa. Sólo en el lunes la empresa encontró una solución mejor, pero las soluciones devueltas por los algoritmos utilizan el mismo número de vehículos y obtuvieron mejores promedios de factor de carga, lo que indica que el rendimiento de los algoritmos podría haber mejorado en ese día

específico con un conjunto diferente de parámetros de calibración.

Con respecto a los algoritmos, el que mejor rendimiento demostró fue el procedimiento de búsqueda Tabú + fase 3, seguido de la heurística greedy. Las soluciones encontradas aportan mejoras significativas en términos de coste (véase la Figura 6.4), y en el número de vehículos utilizados (Figura 6.5) y los factores de carga (Figura 6.6). Vale la pena señalar que la heurística greedy es mejor que la búsqueda Tabú + fase 3 en los días con mayor demanda (lunes, martes y sábado), a pesar del hecho de que el tiempo de cálculo promedio requerido por la búsqueda Tabú + fase 3 es aproximadamente 10 veces mayor que el requerido para la heurística greedy.

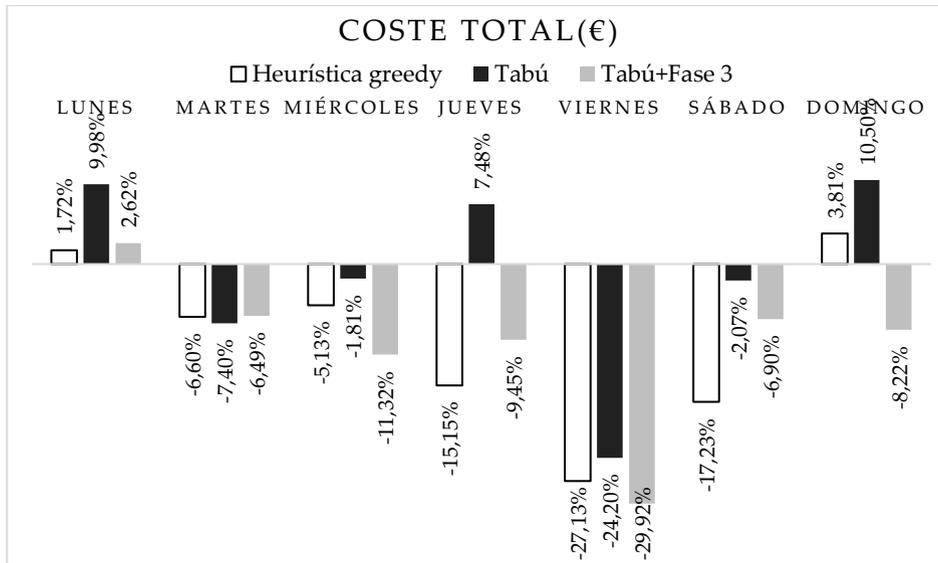


Figura 6.4. Diferencia porcentual entre el coste total de transporte de los tres algoritmos con respecto a la solución de la compañía

Durante la semana de validación, la compañía gastó una cantidad total de 22.204 € en la entrega de pedidos a las escuelas, y los algoritmos muestran que se podría haber logrado el mismo resultado gastando solamente 20.077 €, lo que representa una reducción del 9,6% en los gastos de la semana y una un ahorro anual estimado de alrededor de 100.000 €. Con respecto al número de vehículos, la empresa utiliza un total de 99 vehículos en la semana de validación, cuando el mismo trabajo se podría haber hecho con sólo 85 (reducción de 14,1%).

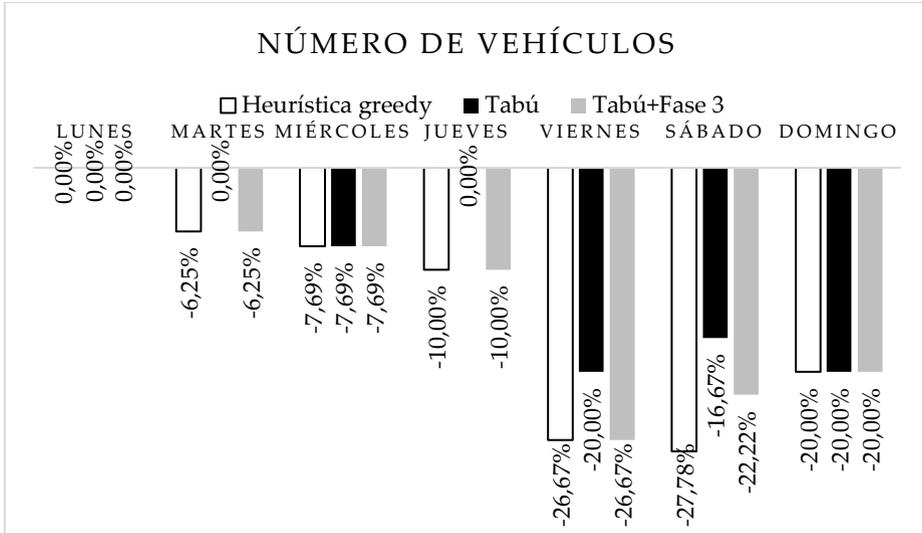


Figura 6.5. Diferencia porcentual entre el número de vehículos requeridos por los tres algoritmos con respecto a los de la solución de la compañía

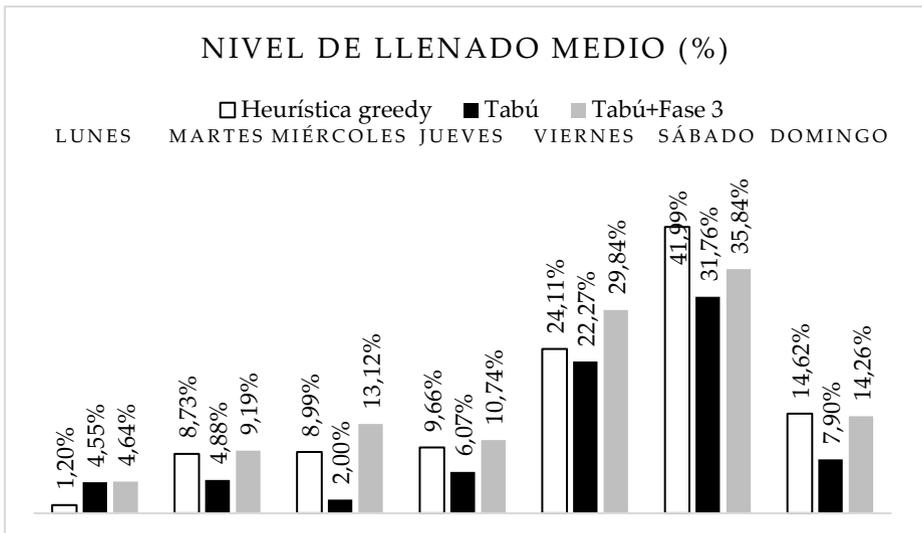


Figura 6.6. Diferencia porcentual entre los factores de carga medios para los tres algoritmos con respecto a la solución de la compañía

Esta reducción se podría extrapolar fácilmente hacia consideraciones

medioambientales (reducción de emisiones) o de sostenibilidad en general (menor impacto, menor ruido, etc). Por último, el nivel de llenado medio aumenta en un 14,5% con respecto a las rutas reales de la empresa, lo que indica una mejora en la eficiencia, manteniendo el mismo nivel de eficacia.

## 6.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el diseño, implementación y validación de una heurística basada en la lógica Greedy para resolver un problema particularmente complejo de transporte urbano de mercancías. Una empresa de distribución asentada en Sevilla (España) debe transportar mercancía por todos los distritos de la ciudad. Esta empresa subcontrata una flota heterogénea de vehículos para ello, y el coste que se imputa por cada vehículo utilizado depende del distrito o distritos a las que viaje el vehículo y no de la distancia recorrida. Además, los clientes tienen ventanas de tiempo, pueden ser servidos por más de un vehículo y tienen restricciones de acceso según el tamaño del vehículo. La empresa busca minimizar sus costes cumpliendo con las horas de trabajo de los conductores estipuladas y con las demás restricciones. Se ha caracterizado este problema como un Rich Vehicle Routing Problem with Zone-Dependent Transportation Cost (RVRPZD).

Se han probado y comparado tres métodos de resolución, obteniéndose los mejores resultados por un procedimiento de búsqueda Tabú mejorado seguido de cerca por la heurística greedy. En cuanto a los tiempos de ejecución de los métodos no son dignos de mención ya que son razonablemente pequeños, en todos los casos calculados el tiempo de ejecución fue de menor a 7 segundos (CPU Core 2 Duo). Las mejores soluciones generadas por los diferentes algoritmos, de acuerdo con las pruebas de validación, muestran un posible ahorro de costes de casi un 10% y de reducciones del 14% en el número de vehículos necesarios para el servicio. Una reducción en los niveles de emisiones y en el consumo de energía, además de un aumento en la eficiencia global del sistema de distribución, son también efectos secundarios positivos que aportaría el uso de la aplicación.

Este caso de estudio ilustra la gran complejidad de los VRP's aplicados a la industria, donde las restricciones impuestas por los clientes y las políticas regulatorias o el servicio en sí mismo, pueden dar lugar a tipos inexplorados de problemas, a pesar de la gran variedad de ellos ya analizados en la literatura. A menudo la en principio

simple obtención, por parte de los algoritmos, de una solución inicial factible puede convertirse en una tarea realmente complicada. Es por eso que este caso de estudio demuestra también la flexibilidad de las técnicas de soft-computing para encontrar mejoras en los procesos industriales y en las operaciones que se basan en la ejecución manual y en los conocimientos y la experiencia.

No obstante, aún más mejoras pueden incorporarse al proceso de planificación de las rutas, y las oportunidades futuras en investigación incluyen la adaptación de los algoritmos a un horizonte de planificación móvil o rolling horizon (básicamente este tipo de horizonte hace que se tomen decisiones inmediatas basadas en predicciones sobre cierto/s periodo/s futuro/s) para ayudar a las compañías a decidir qué clientes deben ser asignados a cada jornada de trabajo.

Como conclusión global del capítulo que nos ocupa cabría mencionar que, como se ha podido comprobar, la sostenibilidad y el ahorro de costes o la eficiencia, en una empresa privada, no tiene por qué estar están reñidas. De hecho, con los resultados obtenidos se puede decir que se puede conseguir una empresa más eficiente, con lo que disminuiría costes realizando el mismo servicio, a la vez que se pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, con lo que se puede hacer a la empresa más sostenible. Mayor eficiencia a la vez que se es más sostenible.



---

## 7. CONCLUSIONES

---

*“La vida es el arte de sacar conclusiones suficientes a partir de datos insuficientes.”*

- Samuel Butler -

En la introducción se comentaba que la estructura de esta tesis se debía a que en ella se pretendía responder preguntas, en concreto tres, y es lo que se va a hacer en estas conclusiones generales. En cada uno de los capítulos 4, 5 y 6 se exponen las conclusiones particulares de cada uno de los problemas que se solucionan en ellos, aquí lo único que se pretende es hacer un resumen de las conclusiones alcanzadas en los mencionados capítulos.

Todas las cuestiones planteadas relacionan la logística urbana con la sostenibilidad, que es el marco paradigmático en el que transita este trabajo. Otro tema transversal de esta tesis y que no se menciona en el título, es la ciudad de Sevilla, escenario de todos los problemas y soluciones que aquí se plantean. Para responder a estas preguntas se ha desarrollado un modelo de más de 1200 nodos de dicha ciudad sobre el que se han aplicado todos los algoritmos implementados para cada una de las preguntas.

*¿Son las políticas sostenibles realmente sostenibles?*

Para responder a la primera de las cuestiones se implementó un algoritmo genético, un algoritmo de búsqueda Tabú y un algoritmo greedy con el que se evaluó cuantitativamente una de las supuestas políticas sostenibles. Estas dos metaheurísticas y esta heurística se plantearon sobre tres problemas diferentes que intentan modelar una ventana temporal de acceso, que es la política supuestamente sostenible elegida para el estudio. Se eligió esta política en concreto porque está implantada en la ciudad de Sevilla, además de porque es habitual encontrarla en las ciudades europeas. Los problemas que intentan modelar la ventana temporal de acceso son el TDVRP, el VRPTW y el desarrollado ad hoc en este trabajo: Vehicle Routing Problem with Access Time Window. Este último problema, cuyo modelo

matemático también se presenta aquí, es una de las aportaciones más relevantes de esta tesis. Este problema ha sido desarrollado para modelar específicamente la problemática que plantea una ventana temporal de acceso, es decir, una zona de la ciudad con acceso prohibido para los vehículos durante una ventana temporal. Los otros dos problemas que se analizan existían previamente en la literatura y son, sin estar diseñados específicamente para ella, los que mejor se adaptan a modelar una ventana temporal de acceso. Así se utilizaron estas herramientas para determinar cuantitativamente que una empresa de reparto de mercancías operando en una ciudad con una ventana temporal de acceso incurre en unos considerables gastos de transporte adicionales en comparación con el caso en el que no existiera tal política. Con esta conclusión, y entendiendo que la sostenibilidad se construye sobre tres pilares fundamentales: el económico, el social y el medioambiental, se puede concluir que una ventana temporal de acceso, aun pretendiendo serlo en su implantación, no es sostenible. Si bien esta política se apoya en los pilares social y medioambiental, se le olvida el económico, tal y como se demuestra en el capítulo 4 de esta tesis. Por lo que la respuesta a la primera de las cuestiones es que no todas las políticas sostenibles son sostenibles.

#### *¿Cómo hacer más sostenibles las flotas urbanas?*

En respuesta a la segunda de las cuestiones se desarrolló una novedosa política de recogida de residuos sólidos reciclables en busca de hacer más sostenible la flota urbana encargada de recoger el vidrio en la ciudad de Sevilla. Esta política se basa en la información real y diaria del nivel de llenado de los contenedores proporcionada por unos dispositivos instalados en cada uno de ellos. En base a esta información se pudo implementar una política que mejora a una ya existente con la que se compara. Esta nueva política no sólo mejora en el aspecto económico a la otra, sino que reduce considerablemente los niveles de consumo de combustible y de emisiones al medioambiente haciéndola de ese modo más sostenible. Por tanto, en el capítulo 5 y en respuesta a la segunda cuestión, se encuentra una forma de hacer más sostenible una de las flotas urbanas.

#### *¿Puede ser sostenible la empresa privada de transporte?*

Esta es una cuestión a la que la primera respuesta que se viene a la mente es negativa, pero que cada vez más con las nuevas tendencias va cambiando de signo. Obviamente el principal objetivo que tiene una empresa privada es el económico y no el del medioambiente o el social, pero en el capítulo 6 se demuestra que aun con

---

el principal objetivo de reducir costes se puede llegar a ser, si no sostenibles, sí más sostenibles.

Para responder a esta cuestión se utilizó un caso real de una empresa, así se diseñó e implementó una herramienta de ayuda a la toma de decisiones que pudiera optimizar las rutas de reparto a las que se tenía que enfrentar diariamente. Se diseñó un algoritmo que tenía en cuenta todas y cada una de las numerosas, y no poco complejas, restricciones que planteaba el problema del reparto diario de la empresa. Fruto del estudio previo realizado, en busca de un problema parecido en la literatura, se concluyó que no existía ningún problema que albergara todas esas restricciones. De ese modo otra de las aportaciones interesantes de esta tesis es la presentación, se incluye también su modelo matemático, de otra nueva variante de VRP: el Rich Vehicle Routing Problem with zone-dependent transportation cost. Este problema presenta la novedad de que el coste del transporte no depende directamente de la distancia recorrida y sí de la zona geográfica a la que viaja el vehículo de reparto.

Para ello se implementó un algoritmo basado en la lógica greedy, rápido y eficiente en recursos computacionales, que aportaba buenas soluciones. A modo de comparativa se resolvió también su modelo matemático de manera exacta y se implementaron además dos tipos de algoritmos búsqueda Tabú. La comparativa de soluciones no sólo se hizo en términos económicos, sino que también se realizó en términos de sostenibilidad. De tal manera que aparte de ahorrar en gastos de transporte se ahorró en combustible y en emisiones, al aumentar el aprovechamiento de la capacidad de carga de los vehículos y al reducir el número de estos que eran necesarios para realizar los transportes requeridos. Por tanto y en respuesta a la tercera cuestión, según los resultados obtenidos se puede decir que la empresa privada puede ser sostenible, o al menos más sostenible que en el escenario anterior. Pero lo significativo de esta conclusión es que esa eficiencia económica se obtuvo a la vez que se consiguió ser más sostenible. Un reto, la sostenibilidad, que se hace más asequible si se consigue caminando por esa senda, la eficiencia económica. La sostenibilidad a través de la eficiencia económica.



---

## 8. CONCLUSION

---

*“Life is the art of drawing  
sufficient conclusions from  
insufficient premises.”*

- Samuel Butler -

As discussed in the introduction, the structure of this thesis is based upon a number of questions—three to be precise—which are attempted to be answered. This is in fact the aim of the conclusion section. Since in chapters 4, 5 and 6, the particular conclusions to each of the problems that are solved in them are presented, the goal here is to provide a summary of the conclusions reached in the aforementioned chapters.

All the questions proposed relate urban logistics to sustainability, which is the paradigmatic framework this work centers upon. Another transversal topic in this thesis that is not actually mentioned in the title is Seville City, which is the site for all the problems and solutions under discussion here. In order to answer these questions, a model including more than 1200 nodes of the said city has been developed upon which all the algorithms implemented for each of the questions have been applied.

*Are sustainable policies really sustainable?*

In order to answer the first question, three algorithms were implemented, namely, a genetic algorithm, a Tabu search algorithm and a greedy algorithm that was used to assess quantitatively one of the alleged sustainable policies. The two metaheuristics and the heuristic were applied to three different problems that tried to model an access time window, which is the sustainable policy allegedly used to carry out the analysis. This policy was actually chosen because it is already instituted in Seville and, furthermore, it is the one usually found in other European cities. The problems that the access time window attempts to model are the TDVRP, the VRPTW and the one implemented ad hoc for the current work, i.e., Vehicle Routing Problem with Access Time Window. The latter problem, whose mathematical model is presented

here as well, is one of the major contributions of this thesis. This problem has been devised in order to model the specific quandary that derives from an access time window, that is, a city area with banned access for vehicles during a time window. The other two problems that are analyzed here already existed in the literature and actually are—even though they are not designed specifically for the purpose—the best ones in order to adapt an access time window. Thus, these tools are used to determine quantitatively that a given goods delivery company with an access time window may increase significantly the cost of transportation when compared to an scenario in which such policy is non-existent. Provided that sustainability is built upon three basic pillars, namely, upon economic, social and environmental foundations, it may be concluded that an access time window is not sustainable. Even if this policy centers upon the social and environmental pillars, the economic one was forgotten, as chapter 4 of the present work has demonstrated. Therefore, the answer to the first of the questions is that not all sustainable policies are in fact sustainable.

*How can urban fleets become more sustainable?*

As an answer to the second question, an original policy was developed in order to collect solid recyclable waste. The aim was to make the urban fleet in charge of the collection of glass in Seville more sustainable. This policy is based upon real daily information coming from the filling levels of the dumpsters provided by some devices installed in each of them. Based upon this information, a policy that improves the extant one was implemented. This new policy not only improves the economic aspect of the former one, but it also lowers the consumption of fuel and the emissions to the environment considerably, thus making it more sustainable. Consequently, in chapter 5 and as an answer to the second question, a way to make more sustainable urban fleets has been found.

*Can the private transportation company be sustainable?*

The first answer that springs to the mind tends to negative, although thanks to the new tendencies, this idea seems to be gradually reversed. The main goal that a private company has is obviously an economic one, in detriment of an environmental or social focus, but as demonstrated in chapter 6, when the main goal is the reduction of expenses, a given company is likely to become, if not a hundred per cent sustainable, at least more sustainable.

In order to answer this question, the real case of a company was used; this is how a

---

tool to aid decision-making was developed so that delivery routes that needed to be confronted every day could be optimized. An algorithm that took into consideration the numerous and complex restrictions derived from daily delivery issues in the company was designed. As a result of a previous study carried out to find a similar problem in the literature, it was concluded that no such problem including all these restrictions existed. Thus, another interesting contribution of this thesis is the presentation and inclusion of its mathematical model, another new variant of the VPR, the Rich Vehicle Routing Problem with zone-dependent transportation cost. The novelty of this problem lies in that the cost of transportation does not depend directly upon the distance covered, but rather upon the geographical area to which the delivery vehicle actually travels.

For this purpose, an algorithm based on a greedy logic was implemented; it was an algorithm that was quick and efficient in computational resources leading to good solutions. As a comparison, its mathematical model was also precisely solved and, furthermore, two types of Tabu search algorithms were implemented. The comparison of solutions not only took into account economic terms but also sustainability. Therefore, and as an answer to the third question, according to the results obtained, it may be stated that the private company can actually be sustainable, or at least more sustainable than in the former scenario. However, the most significant element of this conclusion is that the aforementioned economic efficiency was obtained while being more sustainable. Sustainability is a challenge that becomes more tangible when following the pathway of economic efficiency. Sustainability through economic efficiency.



---

## 9. APORTACIONES REALIZADAS Y TRABAJOS FUTUROS

---

*“Caballeros, debo recordarles que, mis probabilidades de éxito, aumentan en cada nuevo intento...”*

- John Nash -

Esta tesis, inicialmente proyecto de, se inició allá por septiembre del año 2012. Desde entonces se han realizado muchos experimentos de variado éxito y se han obtenido algunos resultados intermedios. Aun sabiendo que el trabajo de responder a las cuestiones planteadas en esta tesis es y será inconcluso, algunas de las respuestas han sido publicadas o lo serán en un futuro cercano. De esta manera en relación a la primera pregunta y por tanto al capítulo 4 se han publicado los trabajos:

*Muñuzuri, J., Grosso-delaVega, R., Cortés, P., Guadix, J., 2013. Estimating the extra costs imposed on delivery vehicles using access time windows in a city. Computers, Environment and Urban Systems 41, 262–275.*

*Grosso-delaVega, R., Muñuzuri, J., Cortés, P., Carrillo, J., Cortes, P., Carrillo, J., 2014a. City logistics: Are sustainability policies really sustainable? Dirección y Organización 53, 45–50.*

En el artículo Muñuzuri et al. (2013), publicado en una revista con un factor de impacto (JCR) de 2,092 en el 2015 y que ha sido citado en 4 ocasiones (Scopus), se desarrolla la mayor parte de lo expuesto en el capítulo 4. En el artículo Grosso-delaVega, Muñuzuri, Cortés, et al. (2014) los autores esbozan brevemente las conclusiones sacadas de los experimentos realizados en ese mismo capítulo.

Con respecto al capítulo 5 se publicó el siguiente trabajo (R. Grosso-delaVega et al., 2014), donde se recoge la totalidad del capítulo 5 de este trabajo:

*Grosso-delaVega, R., Muñuzuri Sanz, J., Rodriguez Palero, M., Teba Fernandez, J., 2014.*

*Optimization of Recyclable Waste Collection Using Real-Time Information, in: Prado-Prado, J.C., Garcí-a-Arca, J. (Eds.), Annals of Industrial Engineering 2012. Springer, pp. 171–177.*

Con respecto al capítulo 6 del trabajo que nos ocupa cabe decir que existe un artículo en puertas de ser publicado. Concretamente este artículo recoge todo lo mencionado en dicho apartado y actualmente (diciembre del 2016) se encuentra en periodo de revisión. El título que llevará este futuro artículo será: *Solving a real case of rich vehicle routing problem with zone-dependent transportation costs.*

Cabe mencionar la publicación del artículo (Grosso-delaVega and Muñuzuri, 2014), en donde los autores hacen un somero esbozo y una pequeña declaración de intenciones de lo que iba a ser, y ha terminado siendo, esta tesis:

*Grosso-delaVega, R., Muñuzuri, J., 2014. Quantitative assessment of sustainable city logistics. International Journal of Production Management and Engineering 3(2), 97.*

Otro trabajo publicado muy relacionados con esta tesis es Muñuzuri et al., 2012a:

*Muñuzuri, J., Cortés, P., Grosso-delaVega, R., Guadix, J., Grosso, R., Guadix, J., 2012a. Selecting the location of minihubs for freight delivery in congested downtown areas. Journal of Computational Science 3(4), 228–237.*

En este trabajo, publicado en una revista con un factor de impacto (JCR) de 1, 078 en el 2015 y que ha sido citado en 9 ocasiones (Scopus), los autores no abordan directamente las cuestiones particulares de esta tesis pues es un problema de localización y no de diseño de rutas, pero sí utilizan un algoritmo genético, técnica aprendida durante esta tesis, para abordar un problema de logística urbana. Sostenibilidad, muy relacionado con esta tesis

Por otro lado y solamente relacionado en la metaheurística utilizada se puede mencionar el siguiente trabajo ( Muñuzuri et al., 2012c):

*Muñuzuri, J., Cortés Achedad, P., Rodríguez, M., Grosso-delaVega, R., 2012c. Use of a genetic algorithm for building efficient choice designs. International Journal of Bio-Inspired Computation 4(1), 27.*

En este trabajo, publicado en una revista con un factor de impacto (JCR) de 1, 390 en el 2015 y que ha sido citado en 9 ocasiones (Scopus), los autores utilizan un algoritmo genético como herramienta de resolución al igual que se hace en esta tesis para alguno de sus problemas.

---

# 10. REFERENCIAS

---

*“El secreto de la creatividad es saber cómo ocultar tus fuentes”*

- Albert Einstein -

- Allen, B., Browne, M., Piotrowska, M., Woodburn, A.G., 2010. Freight Quality Partnerships in the UK - an analysis of their work and achievements, Green Logistics.
- Allen, J., Anderson, S., Browne, M., Jones, P., 2000. A framework for considering policies to encourage sustainable urban freight traffic and goods/service flows: summary report (JOUR).
- Allen, J., Browne, M., Cherrett, T., 2012. Investigating relationships between road freight transport, facility location, logistics management and urban form. *Journal of Transport Geography* 24(September), 45–57.
- Allen, J., Thorne, G., Browne, M., 2007. Good practice guide on urban freight transport (JOUR), Bestuufs administration centre.
- Altinel, I.K., Öncan, T., 2005. A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society* 56(8), 954–961.
- Ambrosini, C., Routhier, J., 2004. Objectives, Methods and Results of Surveys Carried out in the Field of Urban Freight Transport: An International Comparison. *Transport Reviews* 24(1), 57–77.
- Amponsah, S.K., Salhi, S., 2004. The investigation of a class of capacitated arc routing problems: The collection of garbage in developing countries. *Waste Management* 24(7), 711–721.
- Anand, N., van Duin, R., Quak, H., Tavasszy, L., 2015. Relevance of City Logistics Modelling Efforts: A Review. *Transport Reviews* 35(6), 701–719.

- Anand, N., van Duin, R., Tavasszy, L., 2014. Ontology-based multi-agent system for urban freight transportation. *International Journal of Urban Sciences* 18(2), 133–153.
- Anand, N., Yang, M., van Duin, J.H.R.H.R., Tavasszy, L., 2012. GenCLOn: An ontology for city logistics. *Expert Systems with Applications* 39(15), 11944–11960.
- Anderson, S., Allen, J., Browne, M., 2005. Urban logistics - How can it meet policy makers' sustainability objectives? *Journal of Transport Geography* 13(1 SPEC. ISS.), 71–81.
- Ando, N., Taniguchi, E., 2006. Travel Time Reliability in Vehicle Routing and Scheduling with Time Windows. *Networks and Spatial Economics* 6(3–4), 293–311.
- Angelelli, E., Speranza, M.G., 2002. The application of a vehicle routing model to a waste-collection problem: Two case studies. *Journal of the Operational Research Society* 53(9), 944–952.
- Archetti, C., Speranza, M.G., 2012. Vehicle routing problems with split deliveries. *International Transactions in Operational Research* 19(1–2), 3–22.
- Arebey, M., Hannan, M. a, Basri, H., Begum, R. a, Abdullah, H., 2011. Integrated technologies for solid waste bin monitoring system. *Environmental monitoring and assessment* 177(1–4), 399–408.
- Bautista, J., Fernández, E., Pereira, J., 2008. Solving an urban waste collection problem using ants heuristics. *Computers and Operations Research* 35(9), 3020–3033.
- Belfiore, P., Yoshida Yoshizaki, H.T., 2009. Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil. *European Journal of Operational Research* 199(3), 750–758.
- Beltrami, E.J., Bodin, L.D., 1974. Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks* 4(1), 65–94.
- Brundtland, G.H., 1987. World Commission on Environment and Development, Our Common Future. *World Commission on Environment and Development, Our Common Future*.
- Bugliarello, G., 2006. Urban sustainability: Dilemmas, challenges and paradigms. *Technology in Society* 28(1–2), 19–26.

- 
- Caramia, M., Onori, R., 2008. Experimenting crossover operators to solve the vehicle routing problem with time windows by genetic algorithms. *International Journal of Operational* 3(5), 497–514.
- Chang, N.-B., Lu, H.Y., Wei, Y.L., 1997. GIS technology for vehicle routing and scheduling in solid waste collection systems. *Journal of Environmental Engineering* 123(9), 901–910.
- Chang, T.-S.T.-S., Yen, H.-M.H.-M., 2012. City-courier routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research* 223(2), 489–498.
- Chao, I.M., Liou, T.S., 2005. A new Tabú search heuristic for the site-dependent vehicle routing problem. *Operations Research/ Computer Science Interfaces Series* 29, 107–119.
- Chen, H.K., Hsueh, C.F., Chang, M.S., 2006. The real-time time-dependent vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics* 42(5), 383–408.
- Cherrett, T., Allen, J., McLeod, F., Maynard, S., Hickford, A., Browne, M., 2012. Understanding urban freight activity - key issues for freight planning. *Journal of Transport Geography* 24, 22–32.
- Clarke, G. u, Wright, J.W., Clarke, G. u, Wright, J.W., 1964. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research* 12(4), 568–581.
- Comi, A., Delle Site, P., Filippi, F., Nuzzolo, A., 2011. Ex-post assessment of city logistics measures: the case of Rome, in: *Transport Management and Land-Use Effects in Presence of Unusual Demand*. pp. 235–252.
- Conrad, R.G., Figliozzi, M.A., 2010. Algorithms to Quantify the Impacts of Congestion on Time- Dependent Real-World Urban Freight Distribution Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1–35.
- Cordeau, J.F., Laporte, G., 2001. A Tabú search algorithm for the site dependent vehicle routing problem with time windows. *INFOR Journal* 39(3), 292–298.
- Crainic, T.G., Ricciardi, N., Storchi, G., 2004. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 12(2), 119–137.

- Dablanc, L., 2010. Freight transport, a key element of the urban economy. Guidelines for practitioners, in: *Freight Transport, a Key Element of the Urban Economy. Guidelines for Practitioners*. pp. 10–0977.
- Dablanc, L., 2008. Urban goods movement and air quality policy and regulation issues in European Cities. *Journal of Environmental Law* 20(2), 245–266.
- Dablanc, L., 2007. Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41(3), 280–285.
- Dalkmann, H., Brannigan, C., 2007. Transport and Climate Change. Module 5e. Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities, Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- Dasburg, N., Schoemaker, J., 2008. Quantification of Urban Freight Transport Effects II (Report of BESTUFS Project).
- Donati, A. V., Montemanni, R., Casagrande, N., Rizzoli, A.E., Gambardella, L.M., 2008. Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system. *European Journal of Operational Research* 185(3), 1174–1191.
- Drexl, M., 2012. Rich vehicle routing in theory and practice. *Logistics Research* 5(1–2), 47–63.
- Dror, M., Laporte, G., Trudeau, P., 1994. Vehicle routing with split deliveries. *Discrete Applied Mathematics* 50(3), 239–254.
- Dror, M., Trudeau, P., 1989. Savings by split delivery routing. *Transportation Science* 23(2), 141–145.
- Duan, Z.-Y., Yang, D.-Y., Wang, S., 2010. An improved genetic algorithm for time dependent vehicle routing problem, in: *Control Theory and Applications*. pp. 1557–1563.
- Duin, J. Van, Muñozuri, J., 2006. Fighting the windmills: Survey results on urban freight policies between Spain and the Netherlands, in: *Recent Advances in City Logistics. The 4th International Conference on City Logistics*. pp. 331–345.
- Elkington, J., 1997. Cannibals with forks. *Cannibals with Forks: The triple bottom line of 21st century* *The triple bottom line of 21st century* (April), 1–16.
- Escuín, D., Millán, C., Larrodé, E., 2012. Modelization of Time-Dependent Urban

- 
- Freight Problems by Using a Multiple Number of Distribution Centers. *Networks and Spatial Economics* 12(3), 321–336.
- European Commission, 2007. Preparation of the Green Paper on Urban Transport, in: Stakeholder Conference “Towards a European Policy for Urban Transport.” Brussels, pp. 1–5.
- Faccio, M., Persona, A., Zanin, G., 2011. Waste collection multi objective model with real time traceability data. *Waste Management* 31(12), 2391–2405.
- Figliozzi, M.A., 2012. The time dependent vehicle routing problem with time windows: Benchmark problems, an efficient solution algorithm, and solution characteristics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48(3), 616–636.
- Figliozzi, M.A., 2010. The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics and costs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46(4), 496–506.
- Fleischmann, B., Gnutzmann, S., Elke, S., Sandvoß, E., 2004. Dynamic Vehicle Routing Based on Online Traffic Information. *Transportation Science* 38(4), 420–433.
- Fry, M.J., Ohlmann, J.W., 2009. Route Design for Delivery of Voting Machines in Hamilton County, Ohio 39(5), 443–459.
- Gaskell, T.J., 1967. Bases for vehicle fleet scheduling. *Operational Research Quarterly* 18(3), 281–295.
- Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J., Taillard, E., 1999. Parallel Tabú Search for Real-Time Vehicle Routing and Dispatching. *Transportation Science* 33(4), 381–390.
- Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., 1992. New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem. *Operations Research*.
- Gendreau, M., Potvin, J.Y., Bräysy, O., Hasle, G., Løkketangen, A., 2008. Metaheuristics for the vehicle routing problem and its extensions: A categorized bibliography, in: *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Springer, pp. 143–169.
- Giannopoulos, G.A., 2002. Integrating freight transportation with intelligent transportation systems: Some European issues and priorities. *Transportation*

- Research Record* (1790), 29–35.
- Glover, F., 1989. Tabú Search—Part I. *ORSA Journal on Computing* 1(3), 190–206.
- Goel, A., 2009. Vehicle scheduling and routing with drivers' working hours. *Transportation Science* 43(1), 17–26.
- Goel, A., Vidal, T., 2014. Hours of Service Regulations in Road Freight Transport: An Optimization-Based International Assessment. *Transportation Science* 48(3), 391–412.
- Golden, B.L., Raghavan, S., Wasil, E.A., 2008. The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, *Information Systems Journal*. Springer Science & Business Media.
- Goldman, T., Gorham, R., 2006. Sustainable urban transport: Four innovative directions. *Technology in Society* 28(1–2), 261–273.
- Gonzalez-Feliu, J., Ambrosini, C., Pluvinet, P., Toilier, F., Routhier, J.-L., 2012. A simulation framework for evaluating the impacts of urban goods transport in terms of road occupancy. *Journal of Computational Science* 3(4), 206–215.
- Grosso-delaVega, R., Muñuzuri, J., 2014. Quantitative assessment of sustainable city logistics. *International Journal of Production Management and Engineering* 3(2), 97.
- Grosso-delaVega, R., Muñuzuri, J., Cortés, P., Carrillo, J., Cortes, P., Carrillo, J., 2014. City logistics: Are sustainability policies really sustainable? *Dirección y Organización* 53, 45–50.
- Grosso-delaVega, R., Muñuzuri Sanz, J., Rodriguez Palero, M., Teba Fernandez, J., 2014. Optimization of Recyclable Waste Collection Using Real-Time Information, in: Prado-Prado, J.C., García-Arca, J. (Eds.), *Annals of Industrial Engineering 2012*. Springer, pp. 171–177.
- Hannan, M. a, Arebey, M., Begum, R. a, Basri, H., 2011. Radio Frequency Identification (RFID) and communication technologies for solid waste bin and truck monitoring system. *Waste management (New York, N.Y.)* 31(12), 2406–2413.
- Hemmelmayr, V., Doerner, K.F., Hartl, R.F., Rath, S., 2011. A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems. *Journal of Heuristics* 19(2), 129–156.
- Hesse, M., 2004. Logistics and freight transport policy in urban areas: a case study of

- 
- Berlin-Brandenburg/Germany. *European Planning Studies* 12(7), 1035–1053.
- Holguín-Veras, J., Wang, Q., Xu, N., Ozbay, K., Cetin, M., Polimeni, J., 2006. The impacts of time of day pricing on the behavior of freight carriers in a congested urban area: Implications to road pricing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40(9), 744–766.
- Islam, M.S., Hannan, M.A., Arebey, M., Basri, H., 2012. An Overview for Solid Waste Bin Monitoring System. *Journal of Applied Sciences Research* 8(2), 879–886.
- Johansson, O.M., 2006. The effect of dynamic scheduling and routing in a solid waste management system. *Waste Management* 26(8), 875–885.
- Jung, S., Haghani, A., 2001. Genetic Algorithm for the Time-Dependent Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Record* 1771(1), 164–171.
- Kim, S., Sahoo, S., Kim, B.-I., Marshall, J., 2004. Routing optimization for waste management, in: IIE Annual Conference and Exhibition 2004. pp. 2553–2593.
- Kok, a. L.L., Hans, E.W.W., Schutten, J.M.J.M.J., 2012. Vehicle routing under time-dependent travel times: The impact of congestion avoidance. *Computers and Operations Research* 39(5), 910–918.
- Kytöjoki, J., Nuortio, T., Bräysy, O., Gendreau, M., 2007. An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems. *Computers & Operations Research* 34(9), 2743–2757.
- Lahyani, R., Khemakhem, M., Semet, F., 2015. Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research* 241(1), 1–14.
- Laporte, G., 2009. Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science* 43(4), 408–416.
- Ligocki, C., Zonn, L.E., 1984. Parking problems in central business districts. *Cities* 1(4), 350–355.
- Lin, S., 1965. Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technical Journal* 44(10), 2245–2269.
- LIPASAM, 2011. Memoria de sostenibilidad. Sevilla.
- Lozano, R., 2008. Envisioning sustainability three-dimensionally. *Journal of Cleaner Production* 16(17), 1838–1846.
- Macário, R., Galelo, A., Martins, P.M., 2008. Business models in urban logistics.

*Revista Científica Ingeniería y Desarrollo* 24, 77–96.

- Maggi, E., 2007. La logistica urbana delle merci. *Aspetti economici e normativi*.
- Malandraki, C., Daskin, M.S., 1992. Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Properties and Heuristic Algorithms. *Transportation Science* 26(3), 185–200.
- Marcucci, E., Danielis, R., 2008. The potential demand for a urban freight consolidation centre. *Transportation* 35(2), 269–284.
- Marks, D.H., Liebman, J.E., DH, M., JC, L., 1970. Mathematical analysis of solid waste collection, Public Health Service Publication. Departement of Health, Education and Welfare, Correspondence Address: MARKS DH.
- Masmoudi, M., Benaissa, M., Chabchoub, H., L'Electrode, Tunisair, 2013. Mathematical modeling for a rich vehicle routing problem in E-commerce logistics distribution, in: 2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT 2013. Sousse, pp. 290–295.
- May, A.D., 2013. Urban transport and sustainability: The key challenges. *International journal of sustainable transportation* 7(3), 170–185.
- McKinnon, A.C., 1994. Urban goods movement: A guide to policy and planning. *Journal of Transport Geography*.
- Mei, Y., Tang, K., Yao, X., 2011. A memetic algorithm for periodic capacitated arc routing problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* 41(6), 1654–1667.
- Ministerio de Economía y Competitividad de España, 2011. Informe sobre la distribución comercial en España en 2010.
- Ministerio de Fomento de España, 2016. Observatorio del Transporte de Mercancías por Carretera. Oferta y Demanda, Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015.
- Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de España., 2000. Plan Nacional de Residuos Urbanos. *Boletín Oficial del Estado* 28(13 de enero), 4810–4830.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Y Marino. Gobierno de España., 2009. Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008- 2015. *Boletín Oficial del Estado* 49, 19893–20016.

- 
- Montgomery, M., Stren, R., 2007. Cities Transformed: Demographic Change and its Implications in the Developing World.
- Muñuzuri, J., Cortés, P., Grosso-delaVega, R., Guadix, J., 2012a. Selecting the location of minihubs for freight delivery in congested downtown areas. *Journal of Computational Science* 3(4), 228–237.
- Muñuzuri, J., Cortés, P., Guadix, J., Onieva, L., 2012b. City logistics in Spain: Why it might never work. *Cities* 29(2), 133–141.
- Muñuzuri, J., Cortés Achedad, P., Rodríguez, M., Grosso-delaVega, R., 2012c. Use of a genetic algorithm for building efficient choice designs. *International Journal of Bio-Inspired Computation* 4(1), 27.
- Muñuzuri, J., Grosso-delaVega, R., Cortés, P., Guadix, J., 2013. Estimating the extra costs imposed on delivery vehicles using access time windows in a city. *Computers, Environment and Urban Systems* 41, 262–275.
- Muñuzuri, J., Larrañeta, J., Onieva, L., Cortes, P., 2005. Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities* 22(1), 15–28.
- Nag, B., Golden, B.L., Assad, A., 1988. Vehicle routing with site dependencies. *Vehicle routing: Methods and studies* 149–159.
- Norouzi, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghazanfari, M., Alinaghian, M., Salamatbakhsh, A., 2012. A New Multi-objective Competitive Open Vehicle Routing Problem Solved by Particle Swarm Optimization. *Networks and Spatial Economics* 12(4), 609–633.
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., Bräysy, O., Kytöjoki, J., Niska, H., Bräysy, O., 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.
- OECD, 2003. Delivering the Goods 21st Century Challenges to Urban Goods Transport: 21st Century Challenges to Urban Goods Transport, Transport (Paris, France). OECD Publishing.
- OECD & UNDP, 2002. Sustainable Development Strategies: A Resource Book.
- Or, I., 1976. Travelling salesman-type combinatorial problems and their relation to the logistics of regional blood banking (JOUR). *Northwestern University*,

- Paessens, H., 1988. The savings algorithm for the vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research* 34(3), 336–344.
- Potvin, J.-Y., Rousseau, J.-M., 1995. Exchange heuristic for routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society* 46(12), 1433–1446.
- Quak, H.J., de Koster, M.B.M., 2009. Delivering Goods in Urban Areas: How to Deal with Urban Policy Restrictions and the Environment. *Transportation Science* 43(2), 211–227.
- Quak, H.J., de Koster, M.B.M., 2007. Exploring retailers' sensitivity to local sustainability policies. *Journal of Operations Management* 25(6), 1103–1122.
- Qureshi, A., Taniguchi, E., Yamada, T., 2009. An exact solution approach for vehicle routing and scheduling problems with soft time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45(6), 960–977.
- Rhoma, F., Zhang, Z., Luo, Y., Noche, B., Students, M., 2010. Environmental & economical optimization for municipal solid waste collection problems, a modeling and algorithmic approach case study. *12th WSEAS International Conference on Mathematical Methods, Computational Techniques and Intelligent Systems, MAMECTIS '10 Sousse*, 205–211.
- Richardson, B.C., 2005. Sustainable transport: Analysis frameworks. *Journal of Transport Geography* 13(1 SPEC. ISS.), 29–39.
- Robusté, F., Campos, J.M.J., Galván, D., 2000. Nace la logística urbana, in: Actas Del IV Congreso de Ingeniería Del Transporte. Editado Por JV Colomer Y A. García. Schleske, E., Lozano, A., Antún, JP (2001). Location of a Logistic Platform for Improving the Shoe Distribution in Mexico City. Proceedings of the XXXII Annual Confere.
- Rossi, R., Gastaldi, M., Gecchele, G., 2012. Comparison of fuzzy-based and AHP methods in sustainability evaluation: A case of traffic pollution-reducing policies. *European Transport Research Review* 5(1), 1–16.
- Ruan, M., Lin, J. (Jane), Kawamura, K., 2012. Modeling urban commercial vehicle daily tour chaining. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48(6), 1169–1184.

- 
- Russo, F., Comi, A., 2010. A modelling system to simulate goods movements at an urban scale. *Transportation* 37(6), 987–1009.
- Savelsbergh, M., 1992. The vehicle routing problem with time windows: minimizing route duration. *ORSA journal on computing* 4(2), 146–154.
- Schmid, V., Doerner, K.F., Laporte, G., 2013. Rich routing problems arising in supply chain management. *European Journal of Operational Research* 224(3), 435–448.
- Schrank, D., Eisele, B., Lomax, T., Bak, J., 2015. 2015 Urban Mobility Scorecard. *Texas A&M Transportation Institute* 39(August), 5.
- Seasons, M., 2003. Monitoring and Evaluation in Municipal planning. *Journal of the American Planning Association* 69(4), 430–440.
- Sonesson, U., 2000. Modelling of waste collection - A general approach to calculate fuel consumption and time. *Waste Management and Research* 18(2), 115–123.
- Stantchev, D., Whiteing, T., 2006. Urban Freight Transport and Logistics: An Overview of the European Research and Policy. Brussels.
- Stathopoulos, A., Valeri, E., Marcucci, E., 2012. Stakeholder reactions to urban freight policy innovation. *Journal of Transport Geography* 22, 34–45.
- Stathopoulos, A.B., Valeri, E., Marcucci, E., 2011. Urban freight policy innovation for Rome ' s LTZ : a stakeholder perspective, City Distribution and Urban Freight Transport : Multiple Perspectives. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- Taillard, É., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.Y., 1997. A Tabú search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows. *Transportation Science* 31(2), 170–186.
- Taniguchi, E., Thompson, R., 2002. Modeling City Logistics. *Transportation Research Record* 1790(1), 45–51.
- Tarantilis, C.D., Kiranoudis, C.T., Vassiliadis, V.S., 2004. A threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research* 152(1), 148–158.
- Taylor, I., Sloman, L., 2008. Masterplanning Checklist. London.
- Toth, P., Vigo, D., 2002. The vehicle routing problem, Optimization.
- TRB, 1997. Toward A Sustainable Future: Addressing the Long-Term Effects of

- Motor Vehicle Transportation on Climate and Ecology -- Special Report 251.
- Turner, W.C., Houglan, E.S., 1975. Optimal Routing of Solid Waste Collection Vehicles. *A I I E Transactions* 7(4), 427–431.
- UNEP, 2006. World Urbanization Prospects: The 2005 Revision. *Population (English Edition)* (268), 1–4.
- Vickerman, R., 2000. Evaluation methodologies for transport projects in the United Kingdom, in: *Transport Policy*. pp. 7–16.
- Vidal, T., Crainic, T.G., Gendreau, M., Lahrichi, N., Rei, W., 2012. A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. *Operations research* 60(3), 611–624.
- Vidal, T., Crainic, T.G., Gendreau, M., Prins, C., 2013. Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis. *European Journal of Operational Research* 231(1), 1–21.
- Ville, S., Gonzalez-Feliu, J., Dablanc, L., 2013. The Limits of Public Policy Intervention in Urban Logistics: Lessons from Vicenza (Italy) and lessons for other European cities. *European Planning Studies* 21(10), 1528–1541.
- Visser, J., van Binsbergen, A., 1999. Urban freight transport policy and planning Review Arjan van Binsbergen Toshinori Nemoto. *First International Symposium on City Logistics* (July), 35.
- Yellow, P., 1970. A computational modification to the savings method of vehicle scheduling. *Operational Research Quarterly* 21(2), 281–283.
- Zhao, J., Wu, L., Liu, D., 2008. Heuristic genetic algorithm of vehicle routing problem with time windows. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* 8(1), 113–117.
- Zhou, J., Dai, S., 2012. Urban and Metropolitan Freight Transportation: A Quick Review of Existing Models. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* 12(4), 106–114.
- Zunder, T., Ibanez, J., 2004. Urban freight logistics in the European Union. *European Transport / Trasporti Europei* 28(May), 77–84.