

Estudio de viabilidad de un problema de Logística Ecológica Dinámica

José M. Cadenas, M. Carmen Garrido, Raquel Martínez, Enrique Muñoz

Resumen— La competitividad existente hoy en día en las empresas, les obliga a ofrecer cada día a los clientes un servicio más detallado y particular. Además, la sociedad está cada día más concienciada en resolver los problemas de forma ecológica y que afecte lo menos posible a la contaminación de las ciudades, y que la solución a sus problemas no dependa excesivamente de las condiciones del tráfico y no repercuta en el empeoramiento de dichas condiciones. Por estos motivos, una empresa intenta estudiar si es posible dar una respuesta viable a la logística ecológica dinámica en entornos urbanos. Para ello, se dispone de una flota de vehículos terminales (de entrega/recogida) y de almacenes móviles que sirven de apoyo. El problema consiste en planificar las rutas tanto de los vehículos terminales como los almacenes móviles de manera coordinada, permitiendo la incorporación de nuevos elementos de entrega/recogida en la ejecución de un plan. La metaheurística Colonia de Hormigas ha sido la técnica utilizada para obtener la solución.

Palabras clave— Logística ecológica dinámica, entrega-recogida-servicio, optimización colonia de hormigas, sistemas de hormigas MAX-MIN.

I. INTRODUCCIÓN

En un entorno económico competitivo, donde la posibilidad de elección es mayor que nunca para empresas y clientes, resulta crucial que las empresas tengan bien organizadas sus actividades logísticas para enfrentarse a las cambiantes necesidades del siglo XXI. Ahora las empresas operan en un entorno donde las exigencias son tan elevadas, que ya no pueden permitirse fallar en la entrega de mercancías. Está aumentando la presión sobre las empresas para poder realizar sus entregas en el mismo día. Además, con la posibilidad de que las exigencias aún aumenten más, las empresas deberán asegurarse de proporcionar servicios incluso más eficientes.

La logística ecológica dinámica en entornos urbanos se refiere a la actividad en la cadena de entrega/recogida, que permita la trazabilidad de mercancías, efectiva y a tiempo, para garantizar el aprovechamiento máximo de los recursos, y tomar decisiones en tiempo real en el propio campo de acción, y que use un conjunto de dispositivos ecológicos de transporte y de almacenamiento móvil.

Esta actividad hace de la logística ecológica dinámica un nuevo campo de investigación debido a: la disponibilidad de vehículos ecológicos de veloci-

dad moderada y capacidad reducida con posibilidad de rutas independientes del tráfico, disponibilidad de información online sobre las condiciones del tráfico, control de las posiciones de los vehículos, actualización online de pedidos de clientes, etc. En otras palabras, la logística ecológica dinámica se centra en resolver la definición de las rutas que deben seguir unos vehículos ecológicos para entregar y recoger todos los ítems que se requieran, de tal manera que se reduzca el coste para las empresas y el servicio sea óptimo. Estas entregas/recogidas se realizan en los ya mencionados vehículos ecológicos que tendrían una capacidad de almacenamiento reducida, por lo que se deberían apoyar en otros vehículos de mayor capacidad llamados almacenes móviles, para ir reponiendo los ítems que deben entregar y depositando los que han recogido.

Los problemas de logística han sido y son muy estudiados en la actualidad. Más generalmente, los problemas sobre la búsqueda óptima de rutas han sido en la literatura un tópico que ha tenido una gran repercusión en el mundo de la investigación. Los problemas de enrutamiento de vehículos para realizar entregas y/o recogidas de ítems [13], el problema del viajante, [12], son problemas NP-completos que cuando el tamaño del problema es considerable, su resolución se vuelve intratable utilizando técnicas o métodos exactos, debido al tiempo necesario para su resolución. Por ese motivo en la literatura podemos encontrar metaheurísticas que, en la mayoría de los casos, en un tiempo razonable encuentran una solución que no tiene porqué ser la óptima del problema, pero sí una solución muy aproximada a la óptima. El problema del enrutamiento de vehículos se aplica en muchas áreas tales como la recogida de basuras en una ciudad, [11], en los casos de desastres naturales, como por ejemplo terremotos, [14], donde es necesario una rápida distribución de ayuda teniendo en cuenta que se debe de llegar primero a las zonas más afectadas, etc.

Por otro lado, la sociedad actual está muy concienciada con los problemas medioambientales, por lo que se prefieren soluciones respetuosas con el medio ambiente, es decir, ecológicas. Por esta razón, han surgido estudios (como [3], [9]) que tratan de solucionar problemas de logística en centros urbanos utilizando aproximaciones ecológicas.

En este documento se realiza un estudio de viabilidad para una empresa que quiere desarrollar un nuevo tipo de negocio en una ciudad donde su prioridad es el servicio al cliente final, respetando el me-

J.M. Cadenas, M.C. Garrido, R. Martínez - Depto. Ingeniería de la Información y las Comunicaciones. Universidad de Murcia. Murcia. España. E-mail: jcadenas, carmengarrido, raquel.m.e@um.es

E. Muñoz - European Center for Soft Computing. Mieres, España. E-mail: enrique.munoz@softcomputing.es

dio ambiente y dependiendo lo menos posible de las condiciones del tráfico. Para ello se propone utilizar vehículos ecológicos de gran movilidad (como bicicletas o motocicletas eléctricas) que permiten evitar los problemas de tráfico de una gran ciudad, pero que como contrapartida disponen de una capacidad de almacenaje limitada. Para paliar esta limitación se propone utilizar otro tipo de vehículos también ecológicos, como pueden ser coches o furgonetas eléctricas, que actuarán como almacenes móviles en los que los vehículos pequeños podrán recoger/depositar los paquetes según lo vayan necesitando sin tener que perturbar las rutas óptimas volviendo a la central. Con este modelo se espera reducir tanto los costes para la empresa, como el impacto ambiental de su actuación.

En resumen, en este trabajo se estudia la viabilidad para solucionar el problema que se plantea de la logística ecológica en entornos urbanos, teniendo en cuenta los parámetros de entrada y las diferentes restricciones del problema, utilizando para ello técnicas metaheurísticas y en particular una colonia de hormigas. Además se debe tener en cuenta que las necesidades de la empresa requieren la actualización dinámica de las rutas encontradas en casos en que se necesite entregar/recoger nuevos paquetes durante la ejecución de la planificación obtenida. Por ello la estrategia utilizada debe ser suficientemente flexible como para modificar las rutas obtenidas en un tiempo razonable.

Este trabajo se encuentra estructurado de la siguiente forma: en la Sección II se detalla el problema para el cual se pretende estudiar la viabilidad y se explican los diferentes parámetros del problema así como las restricciones del mismo; en la Sección III, se expone el proceso mediante el cual se ha realizado el estudio de viabilidad así como el algoritmo propuesto para aportar una solución factible a dicho problema; además se indica cómo se construye la solución del problema y las posibles acciones a tomar en el caso de no encontrar una solución factible. En la Sección IV se muestran algunos ejemplos simples de aplicación; por último, en la Sección V se exponen las conclusiones de este estudio.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema que se plantea es realizar un estudio sobre la viabilidad de la logística ecológica dinámica en entornos urbanos que sirva como referencia para que las empresas puedan establecer un nuevo estándar en este campo, con la adopción de dicho concepto. Además, las empresas necesitan soluciones flexibles que les permitan modificar las rutas obtenidas en caso de que aparezcan nuevas operaciones que pueden ser muy valiosas para la empresa. El uso de esta nueva tecnología puede ayudar a la empresa a ofrecer una gama dinámica de actividades, desde la entrega hasta la recogida, a través de todo el proceso logístico, en uno o en otro sentido. La logística

ecológica dinámica en entornos urbanos recoge diferentes áreas. Entre ellas, las que destacamos para plantear el problema, y por tanto, el tipo de método de resolución que utilizaremos, son las siguientes:

- Entrega/Recogida dinámica: La recogida y la entrega de mercancías sobre el mismo plan de actuación a los clientes o a las empresas debe permitirse, y de hecho, entregar las mercancías a través de la cadena de suministro puede ser todo un reto.
- Vehículos terminales ecológicos: El sistema de entrega y recogida se lleva a cabo por vehículos ecológicos que sirven para la mejora del medio ambiente.
- Almacenes móviles ecológicos: Para hacer más eficiente el sistema, se dispone de unos almacenes móviles que sirvan para abastecer a los vehículos terminales.
- Dispositivos portátiles: Tanto los vehículos terminales ecológicos de entrega/recogida como los almacenes móviles ecológicos disponen de dispositivos portátiles que les proporcionan independencia y dinamismo. Nos permitirá la introducción del dinamismo en el proceso de entrega/recogida.

La logística ecológica dinámica en entornos urbanos es una combinación de todos los elementos anteriores, proporcionando mayor eficacia a la empresa y a sus clientes. Este proceso puede garantizar que las entregas y recogidas funcionen sinérgicamente, para proporcionar la mejor experiencia de servicio.

A. Caracterización del Problema

La nueva forma de organizar la entrega y recogida en las ciudades y entornos urbanos se basa en la utilización de vehículos pequeños, rápidos y ecológicos (vehículos terminales) que dejan y recogen la mercancía al y del cliente final. Como apoyo logístico a la realización de las tareas se disponen de otros vehículos, también ecológicos con más capacidad, que hacen la función de almacén móvil y permiten optimizar los tiempos del resto de vehículos terminales.

Los elementos que debemos de tener en cuenta a la hora de resolver el problema son los siguientes:

- Localización de la central desde la cual parten todos los vehículos. Este punto será importante en el desarrollo de la solución puesto que puede resultar más interesante, según qué casos, volver a la central a recoger nuevos items que disponer de un almacén móvil.
- Conjunto de items a entregar/recoger, C .
- Conjunto de vehículos terminales disponibles, NU .
- Conjunto de almacenes móviles disponibles, TT .
- $G = (U, E)$ un grafo conexo y no dirigido, donde $U = C \cup PP$ es el conjunto de puntos (PP son las posibles paradas de los almacenes móviles) y E el conjunto de links que unen tales puntos.
 - Los puntos de entrega/recogida están dados con las órdenes de entrega/recogida de items.
 - Los links de conexión entre puntos están dados por las restricciones de la estructura viaria.

- Los posibles puntos de servicio (puntos de parada en los que se puede estacionar temporalmente) de los almacenes móviles están determinados en la red viaria.

B. Variables y restricciones del Problema

Vamos a analizar las restricciones y variables del problema. Además, vamos a indicar la nomenclatura utilizada para los diferentes elementos del problema.

Un aspecto a tener en cuenta es que en una ciudad pueden existir multitud de puntos de servicio, pero el algoritmo decidirá, conforme va construyendo la solución, cuáles de estos puntos son los más factibles en función de los puntos de entrega y/o recogida. Además es importante notar que en un principio para realizar el estudio de este problema, las distancias entre todos los puntos, bien entre los puntos de entrega/recogida, entre un punto de servicio y un punto de entrega/recogida o entre un punto cualquiera y la central de servicios, se supondrán conocidas, aunque, en su versión final, se dispondrá de sistemas de posicionamiento y gestión de mapas actualizados con alta frecuencia, capaces de indicar la distancia entre los puntos.

Las variables y restricciones del problema son las siguientes:

- 1.- N° máximo de vehículos terminales disponibles, $|NU|$, con capacidad Q . Esta variable indica el número máximo de vehículos disponibles para obtener una solución. Como mínimo este valor tiene que ser 1. Además estos cuentan con un horario laboral (HVT) que puede ser otra variable del problema porque puede que a la empresa le sea más beneficioso tener en cierto momento solamente un vehículo terminal aunque éste tenga más horas de trabajo. Denotamos por N al subconjunto de vehículos terminales utilizados para construir la solución, $N \subseteq NU$.
- 2.- N° máximo de almacenes móviles disponibles, $|TT|$, con capacidad W y $W > Q$. Esta variable indica el número máximo de almacenes móviles que el algoritmo podrá utilizar. El valor de esta variable puede ser mayor o igual a 0. Con los almacenes móviles (con un horario laboral HAM) se da la misma situación anterior ya que puede que el beneficio de la empresa sea mayor no poniendo un almacén móvil cuando por ejemplo los items a entregar y/o recoger estén relativamente cercanos a la central. Denotamos por T al subconjunto de almacenes móviles usados para construir la solución, $T \subseteq TT$.
- 3.- Puntos de entrega y recogida $|C|$. Para cada uno de los items se indicará si es para recoger o para entregar y además cada item podrá contener un valor que indicará la prioridad de entrega o recogida del mismo. Este valor oscilará entre 1 y 10 donde 1 indica mínima prioridad y 10 la máxima.
- 4.- Sea $x_{ijk} \in \{0, 1\}$ si el vehículo o almacén k pasa por el link de i a j .
- 5.- Sea $y_{sk} \in \{0, 1\}$ si el almacén móvil k está en el punto de servicio s .

6.- Tanto los almacenes móviles como los vehículos terminales tienen impuesta una cierta velocidad media, VAM y VVT , respectivamente, dependiendo de la ciudad y de las vías en las cuales se esté aplicando el problema.

7.- Horario máximo de Vehículos Terminales (HVT).

8.- Horario máximo de Almacenes Móviles (HAM).

9.- Tanto los vehículos terminales como los almacenes móviles deben siempre comenzar desde la central de la empresa y terminar en el mismo punto que comienzan.

Las restricciones relacionadas con la jornada laboral de los vehículos terminales y los almacenes móviles son las siguientes:

$$\sum_{i \in U} \sum_{j \in U} dist_{ij} \cdot x_{ijk} \leq VVT \cdot HVT, \quad \forall k \in N$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{j \in U} dist_{ij} \cdot x_{ijk} \leq VAM \cdot HAM, \quad \forall k \in T$$

Las restricciones de capacidad se verifican para cada trayecto de un vehículo terminal cuando realiza sus acciones de entrega y recogida. El plan para una jornada completa de uno de los vehículos estará formado por un conjunto de trayectos, intercalados por el apoyo de un almacén móvil, si fuera necesario. Cuando un vehículo terminal acaba con un trayecto (se ha quedado sin entregas/recogidas) debe dirigirse, si fuera necesario, hacia un punto de servicio s en el que estará un almacén móvil esperándolo (con una capacidad suficiente para dar servicio a los vehículos terminales que se le hayan asignado). El vehículo terminal dejará en el almacén móvil los items que sean necesarios, recogerá los items (hasta su capacidad Q según se haya planificado) para su entrega y continuará con la ejecución de su plan.

Por tanto, el objetivo, para llevar a cabo todas las peticiones de entrega/recogida, es minimizar tanto el número de vehículos terminales y almacenes móviles, como la distancia recorrida por ellos:

$$Min (|N| + |T|) \quad (1)$$

$$Min \left(\sum_{i \in U} \sum_{j \in U} \sum_{k \in N \cup T} dist_{ij} \cdot x_{ijk} \right) \quad (2)$$

con $x_{ijk} \in \{0, 1\}$ siendo $x_{ijk} = 1$ si el vehículo k , en su ruta, pasa por el arco (i, j) .

Es importante hacer notar que no tratamos de minimizar de forma explícita el tiempo de entrega/recogida de los items (aunque viene implícito en la minimización de la distancia), excepto para aquellos items cuya prioridad sea máxima, intentando que se entreguen antes que otros que tienen menor prioridad. Además, cabe destacar el hecho de que una vez obtenida una buena solución, es posible que

mientras se está ejecutando dicha solución, sea necesario recalcular de nuevo las rutas debido a la llegada de una nueva petición de entrega y/o recogida de un item en la misma jornada en el que se esté desarrollando la solución. Si se produce tal situación el algoritmo debe ejecutarse de nuevo, partiendo desde el punto actual y calcular de nuevo las rutas. Esta característica del problema es muy importante a la hora de seleccionar una técnica para desarrollarla, puesto que la técnica debe de encontrar una solución factible y el tiempo en calcular tal solución debe ser un tiempo viable teniendo en cuenta la situación de que en un mismo día puede ser necesario recalcular las rutas varias veces.

C. Análisis de la solución propuesta

La solución se proporciona como una secuencia de puntos a los que los vehículos terminales deben de ir. Cada vehículo terminal tiene asignado una ruta, y cada almacén móvil también tiene asignada una planificación de dónde debe de encontrarse en ciertos instantes.

El coste de las soluciones aportadas por la metaheurística viene dado por la distancia total empleada por todos los vehículos terminales y los almacenes móviles. Para conseguir minimizar el número de vehículos terminales y de almacenes móviles, al calcular el coste de cada solución se penaliza en función del número de vehículos terminales y del número de almacenes móviles utilizados en la solución a razón de $\frac{|N|}{|NU|}$ y $\frac{|T|}{|TT|}$. Así, cuanto menor número de vehículos terminales y de almacenes móviles utiliza la solución, menor será el coste de la misma.

Las dos funciones objetivo (1) y (2) las resolvemos de la siguiente forma: $\sum_{i \in U} \sum_{j \in U} \sum_{k \in NU \cup T} dist_{ij} \cdot x_{ijk}$ se penaliza por $\frac{|N|}{|NU|}$ y $\frac{|T|}{|TT|}$.

$$\left(\sum_{i \in U} \sum_{j \in U} \sum_{k \in NU \cup T} dist_{ij} \cdot x_{ijk} \right) \cdot \frac{|N|}{|NU|} \cdot \frac{|T|}{|TT|}$$

Es posible que para ciertos parámetros de entrada como el número de vehículos terminales, el número de almacenes móviles e items a entregar y/o recoger, no sea posible encontrar una solución factible. En ese caso se adoptan las siguientes soluciones:

- 1.- Desechar los items que queden por entregar/recoger cuando no haya más vehículos terminales disponibles, en este caso se deberá de tener en cuenta la prioridad de los items.
- 2.- Añadir al último vehículo terminal más horas de jornada laboral para completar el trabajo.

Las posibles decisiones a adoptar cuando no se encuentra una solución factible, quedarán por parte de la empresa quien deberá determinar cuál es la decisión más favorable en función de los diferentes parámetros de entrada. Debido a que el tiempo de ejecución de la metaheurística no es muy eleva-

do, la empresa podrá valorar las distintas soluciones ejecutándola tantas veces como sea necesario.

III. METODOLOGÍA

Para resolver el problema se podría plantear la utilización de un método exacto específico que encontrara la solución óptima de forma exacta. Sin embargo, las expectativas de negocio indican que el tamaño de las instancias del problema puede crecer hasta tamaños intratables (reparto en una ciudad mediana, como Murcia, o una grande como Madrid) que podrán llevar al método exacto a necesitar mucho tiempo (del orden de días) para obtener una solución. En los casos en los que no es posible la obtención de una solución óptima en un tiempo factible, resulta necesaria la utilización de técnicas que sean capaces de obtener soluciones de alta calidad en un tiempo razonable. Dentro de estas técnicas destacan las metaheurísticas. Las metaheurísticas son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento. Este tipo de estrategias han sido muy utilizadas en la resolución de problemas de optimización de todo tipo obteniendo resultados muy satisfactorios. Dentro de las metaheurísticas destacan diversas técnicas, como los algoritmos genéticos, la búsqueda tabú, la optimización de enjambre de partículas, la colonia de hormigas,... Para el problema que se pretende resolver, la que puede resultar más adecuada es la colonia de hormigas, puesto que fue específicamente diseñada para resolver problemas de minimización de caminos y ha sido aplicada con mucho éxito a diversos problemas de este tipo, como el problema del viajante de comercio, problemas de enrutamiento de paquetes en redes de telecomunicaciones, problemas de recogida y entrega. Por ello se plantea resolver el problema propuesto mediante un algoritmo de colonia de hormigas, [4], [5].

A. La colonia de hormigas

Las hormigas son insectos sociales que viven en colonias y que tienen un comportamiento dirigido al desarrollo de la colonia como un todo mas que a un desarrollo individual, [1]. Una característica interesante del comportamiento de las colonias de hormigas es cómo pueden encontrar los caminos más cortos entre el hormiguero y el alimento, puesto que son ciegas. Las hormigas son capaces de ello debido a que en su recorrido, depositan una sustancia llamada feromona que todas pueden oler. Este rastro permite a las hormigas volver a su hormiguero desde el alimento y localizar los mejores caminos para llegar al mismo. En particular, las hormigas se mueven de un modo aleatorio, tomando con mayor probabilidad aquellos caminos en los que la feromona es más fuerte. De esta manera, los caminos más prometedores van acumulando mayor cantidad de feromona al ser recorridos por más hormigas, mientras que los menos prometedores pierden feromona por evapora-

ción al ser utilizados por menos hormigas cada vez. Las hormigas naturales son capaces de resolver problemas de camino mínimo sin esfuerzo, los algoritmos de optimización de colonia de hormigas (OCH) tratan de reproducir el comportamiento de las hormigas reales para resolver este tipo de problemas. De este modo, cada hormiga artificial es un mecanismo probabilístico de construcción de soluciones. Para construir una solución cada hormiga utiliza:

- Rastros de feromona artificiales que cambian con el tiempo para reflejar la experiencia adquirida por el resto de hormigas en la resolución del problema.
- Cierta información heurística sobre la instancia concreta del problema.

El sistema de colonias de hormigas ha sido propuesto en la literatura para resolver problemas similares al que estamos proponiendo en este estudio. Por ejemplo, en [10] se utiliza una colonia de hormigas para encontrar una estrategia de resolución al problema de enrutamiento dinámico de vehículos. En [1] también se resuelve un problema de enrutamiento de vehículos haciendo uso de una optimización con los sistemas de colonias de hormigas. En [7] también nos podemos encontrar la optimización de colonia de hormigas, esta vez para solucionar el problema del enrutamiento de vehículos con carga.

En [8] se propone un multisistema de colonia de hormigas para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con red de retorno, donde disponen al igual que el problema que nosotros planteamos de unos usuarios finales a los cuales se les deben de recoger ciertos items y/o entregar otros. Para solucionar tal problema utilizan dos multirutas de búsqueda local usando MACS (multisistema de colonia de hormigas).

El modo de operación básico de un algoritmo de optimización de colonia de hormigas (OCH) es el siguiente: las hormigas de la colonia se mueven, concurrentemente y de manera asíncrona, a través de los estados adyacentes del problema. Este movimiento se realiza siguiendo una regla de transición que está basada en la información local disponible en las componentes (nodos). En esta información local incluyen la información heurística y los rastros de feromona para guiar la búsqueda. Al moverse por el grafo de construcción, las hormigas construyen incrementalmente soluciones. Una vez que cada hormiga ha generado una solución se evalúa ésta y puede depositar una cantidad de feromona que es función de la calidad de su solución. Esta información guiará la búsqueda de las otras hormigas de la colonia en el futuro. Además, el modo de operación genérico de un algoritmo de OCH incluye dos procedimientos adicionales, la evaporación de los rastros de feromona y las acciones del demonio. La evaporación de feromona la lleva a cabo el entorno y se usa como un mecanismo que evita el estancamiento en la búsqueda y permite que las hormigas busquen y exploren nuevas regiones del espacio. Las acciones del demonio

son acciones opcionales, que no tienen un contrapunto natural, para implementar tareas desde una perspectiva global que no pueden llevar a cabo las hormigas por la perspectiva local que ofrecen. Ejemplos son observar la calidad de todas las soluciones generadas y depositar una nueva cantidad de feromona adicional sólo en las transiciones/componentes asociadas a algunas soluciones, o aplicar un procedimiento de búsqueda local a las soluciones generadas por las hormigas antes de actualizar los rastros de feromona.

La estructura de un OCH genérico se presenta en los algoritmos 1, 2 y 3.

Algoritmo 1 - Colonia de Hormigas

```

begin
  Inicialización de parámetros
  while no se satisfaga criterio de parada do
    Generación de hormigas y actividad()
    Evaporación de feromona()
    Acciones del demonio
  end
  devolver mejor solución;
end

```

Algoritmo 2 -Generación de hormigas y actividad

```

begin
  Inicialización de parámetros
  for each Hormiga h do
    h=nueva_hormiga()
  end
end

```

Algoritmo 3 - nueva_hormiga()

```

begin
  inicializa_hormiga
  actualiza_memoria_hormiga()
  while estado_actual ≠ estado_objetivo do
    calcular_probabilidades_de_transición()
    siguiente_estado = aplicar_política_decision()
    mover_al_siguiente_estado(siguiente_estado)
    actualizar_estado_interno()
  end
  actualización_de_feromona()
end

```

Existen diversas implementaciones del concepto de OCH, siendo una de las más competitivas el sistema de hormigas MAX-MIN (SH-MM), que será el que se utilice para resolver el problema que nos interesa. SH-MM establece un buen balance entre exploración y explotación y reduce la posibilidad de estancamiento de la búsqueda, obteniendo resultados muy competitivos. El SH-MM presenta los siguientes aspectos particulares:

- Se aplica una actualización de los rastros de feromona fuera de línea. Es decir, después de que todas

las hormigas hayan construido su solución, cada rastro de feromona sufre una evaporación y la feromona se deposita solamente en la mejor solución, que puede ser o bien la mejor solución global o la mejor de la iteración.

- Los valores posibles para los rastros de feromona están limitados al rango $[\tau_{min}, \tau_{max}]$, por lo que se reduce la probabilidad de estancamiento del algoritmo. También, comentar que para incrementar la exploración de nuevas soluciones, en ocasiones, se utiliza una reinicialización de estos rastros.
- Los rastros de feromona se inicializan con un valor alto (el máximo permitido τ_{max}), en lugar de uno bajo como es habitual. Esto ayuda en la diversificación de la búsqueda puesto que las diferencias iniciales en los rastros serán pequeñas.

B. Aplicación del SH-MM al problema

Como hemos comentado anteriormente, la metaheurística que se utilizará para resolver el problema es la colonia de hormigas en su versión MAX-MIN. La obtención de una solución al problema planteado mediante el algoritmo SH-MM se realiza de manera constructiva.

A medida que el algoritmo avanza se va construyendo la solución, partiendo de una solución vacía, hasta llegar a una solución factible. Para ello, un vehículo terminal sale del punto origen (la central), y avanza al siguiente punto de entrega/recogida más próximo, pero hay que tener en cuenta siempre la capacidad del vehículo terminal, puesto que pueden producirse situaciones como que el punto más próximo sea una recogida pero el vehículo terminal no pueda recoger porque su capacidad esté completa y tenga que realizar primero una entrega para posteriormente recoger. Además, hay que tener en cuenta la restricción impuesta de que un vehículo terminal siempre debe de acabar su jornada laboral en la central, por lo tanto el vehículo terminal antes de visitar el siguiente punto comprueba que pueda llegar al punto y además que pueda regresar a la central dentro de su horario laboral. En el caso de que un vehículo terminal se quede sin items para entregar o recoger, el algoritmo determinará si es posible que un almacén móvil pueda abastecerlo y en caso afirmativo indicará al vehículo terminal el punto de la ciudad al que debe de acudir para recoger más items para entregar y descargar los items recogidos si estos no deben de ser entregados ese mismo día comprobando de nuevo la viabilidad de esta acción.

Un aspecto a destacar en lo referente a la gestión de vehículos terminales es que a pesar de que la solución se construye de manera secuencial, en el caso de que se requiera más de un vehículo terminal, todos comienzan su jornada laboral a la misma hora, pero puede ocurrir que uno de ellos termine de entregar/recoger items antes de que acabe su jornada laboral, debido a que no queden más items para ese día.

Por otro lado, la planificación de los almacenes móviles se realiza subordinada a las rutas de los vehículos terminales. Para ello, se dispone de una tabla de tiempos que controla a qué hora y dónde está cada almacén móvil en cada momento. En este punto, podríamos incluir, en lugar de una tabla de tiempos, una ventana con restricciones de tiempo como se especifica en trabajos como [6] y [2], pero el problema principal por el cual no se añade es, tal y como se ha indicado varias veces a lo largo de este estudio, porque es necesario que se encuentre una solución factible en el menor tiempo posible. Por ello, se opta por disponer de una parrilla de tiempos y así obtenemos la solución en menos tiempo.

Cuando un vehículo terminal necesite disponer de un almacén móvil, se comprueba si existe uno cercano en la zona y que se encuentre a menor distancia que la central. En ese caso el almacén móvil esperará a que el vehículo terminal llegue a ese punto y descargue y cargue nuevos items. En el caso de que no se encuentre un almacén móvil en la zona, se analiza si es posible que alguno de los que ya existen en circulación pueda acercarse a la zona en la hora en la cual el vehículo terminal se queda sin mercancía, en caso afirmativo se busca un posible punto de servicio cercano en esa zona y tanto el vehículo terminal como el almacén móvil se dirigen a ese punto. En el caso de que ningún almacén móvil este disponible en ese momento, entonces el vehículo terminal deberá regresar a la central. Comentar que a lo largo de la búsqueda de la solución, un almacén móvil se sitúa en diferentes puntos de servicio para cubrir las necesidades de diferentes vehículos terminales. Los puntos de servicio donde finalmente los almacenes móviles se deberán de situar a cierta hora, quedan determinados por la mejor solución aportada tras evaluar todas las posibles que ofrece el algoritmo.

C. Recursos necesarios y escalabilidad

Una vez que se ha seleccionado la metaheurística que utilizaremos podemos realizar una estimación de los recursos necesarios para su aplicación. Uno de los principales factores limitantes es el tamaño de la matriz de distancias que une los distintos puntos de entrega, recogida y servicio, en particular se puede estimar el tamaño de la matriz de distancias. Las memorias utilizadas por los ordenadores personales actuales oscilan entre los 4 y 8 GB, suponiendo que sólo se pudieran utilizar 2 GB se podría manejar una matriz de distancias de 20000 puntos sin problemas, lo cual se podría considerar un número de entregas y recogidas realmente considerable para una sola empresa de reparto. En cuanto al tiempo necesario para obtener las soluciones, al tratarse de una metaheurística que siempre es capaz de proporcionar una solución aproximada (aunque no sea la óptima) será dependiente de cuanto tiempo se desee dedicar para mejorar las soluciones iniciales, lo cual esperamos que se mantenga en el orden de minutos. Las pruebas reali-

zadas utilizando el prototipo diseñado indican unos tiempos razonables, desde unos pocos segundos para instancias pequeñas (100 puntos) hasta alrededor a 5 minutos para instancias de tamaño más grande (1000 puntos). En caso de que las restricciones de tiempo fueran muy ajustadas, la colonia de hormigas se presta fácilmente a su paralelización, puesto que cada hormiga puede crear su solución paralelamente durante la misma iteración, lo cual ayudará a reducir el tiempo de ejecución en un factor importante. Por lo tanto, consideramos que inicialmente con un ordenador personal de última generación se podrían satisfacer las necesidades para instancias de una magnitud importante (20000 puntos de entrega, recogida y servicio). En caso de que la magnitud de las instancias crezca o las restricciones de tiempo se vean desbordadas se podría optar por configurar un cluster compuesto por varios ordenadores personales.

IV. ALGUNOS EJEMPLOS

A. Caso 1

Supongamos que disponemos de un grafo con la estructura de las calles de una ciudad. Supongamos que cada punto posible de entrega y recogida y puntos de servicio están descritos en dicha estructura: cada punto está denotado por un número.

En la Tabla I mostramos los datos de entrada para configurar el problema.

TABLA I
FICHERO DE CONFIGURACIÓN DEL MODELO

#File of Distances
distance.file=Murcia.map
#File of Point(services,deliveries,pickups)
point.file=pointsMurcia.txt
#Messenger Features
messenger.speed=8
messenger.capacity=5
messenger.hours=8
messenger.quantity=10
#Truck features
truck.speed=40
truck.capacity=1000
truck.hours=8
truck.quantity=5

En dicha Tabla I se definen tanto el grafo y los puntos de entrega y recogida del problema que tenemos que resolver. Además, se describe la velocidad de los vehículos, su capacidad y el tiempo de trabajo, y la cantidad máxima disponible de cada uno de ellos.

En la Tabla II se muestran los puntos de entrega y recogida, junto con los puntos de servicio dentro de la estructura y la Central que se sitúa en el punto 1. Como podemos observar en la tabla, además de los puntos de entrega y recogida correspondientes, aparece debajo de cada uno de ellos un valor que indica la prioridad del elemento. Un valor más alto, nos indica que ese elemento debe de ejecutarse antes que otro de menor valor.

En la Tabla III mostramos la solución obtenida. En dicha tabla hemos utilizado la siguiente nomenclatura:

- VT_x : Vehículo Terminal x
- AM_x : Almacén Móvil x
- TEPS: tiempo de espera de AM_x en el punto de servicio
- TE_x : hora de encuentro con almacén móvil o en la central
- e_x : Item a entregar en el punto x
- r_x : Item a recoger en el punto x
- s_x : El vehículo terminal se encuentra en un punto de servicio x
- rr_x : Item a ser recogido en el punto x y entregado en la misma ruta.
- ee_x : Item recogido durante la ruta del vehículo terminal que va a ser entregado en el punto x
- c_x : Central de la empresa.

En la Tabla III podemos observar cómo VT_1 realiza su jornada dividida en dos partes: sale de la central con su plan de trabajo donde para realizar su primera parte del plan necesita del soporte de un almacén móvil para abastecerlo de los paquetes correspondientes y para terminar de ejecutar su plan, necesita volver a la central para recoger nuevos paquetes. Como podemos observar, el almacén móvil también le da soporte a VT_2 y VT_3 .

B. Caso 2

Supongamos que debemos de introducir en la cadena de entrega/recogida un paquete urgente. Debe recogerse en el punto 91 y debe entregarse en el 74. En este momento de tiempo, se ejecuta el algoritmo el cual descarta todos los elementos ya realizados y planifica el tiempo restante de la planificación. La solución propuesta se muestra en la Tabla IV.

TABLA IV
SOLUCIÓN FACTIBLE PARA LOS PUNTOS DADOS

VT ₁	R ₃₄	S ₄₄	r ₅₂	r ₄₈	r ₃₅	r ₄₇	r ₄₁	c ₁
TE _x	4:15	4:23						
VT ₂	e ₅₁	r ₆₁	e ₇₁	rr ₉₁	r ₉₈	e ₇₃	ee ₇₄	e ₅₄ c ₁
TE _x	4:15							
VT ₃	e ₇₈	r ₆₇	r ₆₆	e ₉₉	e ₁₀₀	rr ₉₆	ee ₂₈	c ₁
TE _x	4:15							
AM ₁	S ₄₄	c ₁						
TEPS	4:15-4:30	8:00-8:00						

En esta situación, VT_1 tiene que apoyarse de nuevo en AM_1 en el punto 44, en donde se puede recoger o dejar algunos paquetes. Como podemos observar en el reajuste de los planes, los puntos 14, 15, 25, 36 y 39 se quedan sin realizar su correspondiente entrega.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado el estudio de viabilidad sobre el posible desarrollo de una aplica-

TABLA II

TABLA DE CONFIGURACIÓN DE PUNTOS DE ENTREGA, RECOGIDA, RECOGIDA/ENTREGA, SERVICIO Y CENTRAL

Entregas	21	51	30	36	27	58	80	81	33	13	26	73	76	45	100	17	3	16	54	71	25	94	90	39	78	19	14	15	86	11
	1	1	2	1	1	1	1	2	8	5	4	2	2	2	1	1	1	2	7	1	1	1	3	3	1	1	9	4	1	1
Recogidas	41	4	50	75	32	98	52	22	35	60	87	67	89	66	68	34	47	12	99	69	61	93	48	43	7	2	20	49	92	24
	1	1	3	1	4	1	1	2	3	1	2	6	9	2	1	7	9	7	4	3	2	1	1	1	6	1	3	2	1	2
Entregas/ Recogidas	57/ 55 9	96/ 28 1																												
Puntos de Servicio	88	97	72	79	59	40	77	64	82	53	84	95	31	38	6	85	63	18	46	23	29	44	37	9	65	42	62	10	56	5
Central	1																													

TABLA III

SOLUCIÓN FACTIBLE PARA LOS PUNTOS DADOS

VT ₁	C ₁	r ₂	r ₁₂	e ₁₁	e ₁₃	e ₃	r ₄	r ₂₀	r ₇	s ₆	e ₁₆	e ₁₇	e ₂₇	e ₂₆	r ₂₄	r ₂₂	r ₃₂	e ₃₃	r ₄₃	r ₃₄	C ₁	e ₁₄	e ₁₅	e ₂₅	r ₃₅	e ₃₆	e ₃₉	r ₄₈	r ₄₇	r ₄₁	C ₁																	
TE _x	2:37														4:45														7:55																			
VT ₂	C ₁	e ₂₁	e ₁₉	e ₃₀	r ₅₀	r ₆₀	r ₄₉	e ₅₈	r ₆₈	r ₆₉	s ₅₉	e ₄₅	e ₅₁	r ₆₁	e ₇₁	e ₇₃	e ₅₄	r ₅₂	r ₅₇	r ₆₇	r ₆₆	e ₅₅	C ₁																									
TE _x	3:00														7:37																																	
VT ₃	C ₁	r ₇₅	e ₇₆	e ₈₆	e ₉₄	r ₉₃	r ₉₂	e ₈₁	r ₈₇	r ₈₉	s ₇₉	e ₈₀	e ₉₀	e ₇₈	r ₉₈	r ₉₉	e ₁₀₀	r ₉₆	e ₂₈	C ₁																												
TE _x	3:45														7:37																																	
AM ₁	C ₁	s ₆	s ₅₉	s ₇₉	C ₁																																											
TEPS	0:00-2:26-		2:55-		3:41-		8:00-																																									
	0:00-2:41		3:10		3:56		8:00																																									

ción para encontrar la mejor solución al problema de encontrar rutas para la entrega y/o recogida de items mediante vehículos ecológicos. En el problema se minimiza la distancia recorrida, junto con el número de recursos utilizados: el número de vehículos terminales y almacenes móviles.

El estudio de viabilidad es solicitado por una empresa que intenta abrir un nuevo tipo de mercado desde el punto de vista ecológico y pretende prestar una atención más personalizada al usuario final. La solución aportada se basa en la aplicación de la metaheurística colonia de hormigas para así disponer de un sistema flexible y escalable que pueda atender a las necesidades de la empresa en un futuro. Además del estudio de viabilidad, se ha desarrollado un prototipo mediante el cual podemos comprobar que el tiempo en alcanzar una solución no es excesivo puesto que siempre, dependiendo del ordenador, puede encontrarse una solución factible en unos pocos minutos para un problema de tamaño medio.

AGRADECIMIENTOS

Soportado por el proyecto TIN2011-27696-C02-02 del MICINN De España y el Fondo Europeo para el desarrollo Regional. Gracias también al programa de Financiación para Grupos de Investigación de excelencia con el código 04552/GERM/06 otorgado por la Fundación Séneca, Murcia, España. Además el agradecimiento a la Fundación Séneca de la región de Murcia por otorgar una beca FPI a R.Martínez.

REFERENCIAS

[1] J.E. Bella and P.R. McMullen, *Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem*, Advanced Engineering Informatics, 18:41–48, 2004.

[2] R. Bent and P. Van Hentenryck, *A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows*, Computers and Operations Research 33: 875–893, 2006.

[3] T.G. Crainic, N. Ricciardi and G. Storchi, *Models for evaluating and planning City Logistics systems*, Transportation Science 43(4): 432–454, 2009.

[4] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colnari, *Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B, 26(1):29–41, 1996.

[5] M. Dorigo and G. Di Caro, *The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic*, In D. Corne, M. Dorigo and F. Glover, editors, New Ideas in Optimization, McGraw-Hill, 11–32, 1999.

[6] M.A. Figliozzi, *Planning approximations to the average length of vehicle routing problems with time window constraints*, Transportation Research B 43: 438–447, 2009.

[7] G. Fuellerera, K.F. Doerner, R.F. Hartl and M. Iorib, *Ant colony optimization for the two-dimensional loading vehicle routing problem*, Computers and Operations Research, 36:655–673, 2009.

[8] Y. Gajpal and P.L. Abad, *Multi-ant colony system (MACS) for a vehicle routing problem with backhauls*, European J. of Operational Research, 196: 102–117, 2009.

[9] J.R. Kenworthy, *The eco-city: ten key transport and planning dimensions for sustainable city development*, Environment and Urbanization 18(1): 67–85, 2006.

[10] R. Montemanni, L.M. Gambardella, A.E. Rizzoli and A.V. Donati, *Ant Colony System for a Dynamic Vehicle Routing Problem*, Journal of Combinatorial Optimization, 10:327–343, 2005.

[11] T. Nuortio, J. Kytöjokib, H. Niskaa and O. Bräysyb, *Improved route planning and scheduling of waste collection and transport*, Expert Systems with Applications 30: 223–232, 2006.

[12] A. Puris, R. Bello, Y. Martinez and A. Nowe, *Twostage ant colony optimization for solving the traveling salesman problem*, in Nature Inspired Problem-Solving Methods in Knowledge Engineering, 4528:307–316, Berlin / Heidelberg: Springer, 2007.

[13] A.E. Rizzoli, R. Montemanni, E. Lucibello and L.M. Gambardella, *Ant Colony Optimisation for real world vehicle routing problems: from theory to applications*, Swarm Intelligence 1(2): 135–151, 2007.

[14] G.H. Tzeng, H.-J. Cheng and T.D. Huang, *Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems*, Transportation Research Part E 43: 673–686, 2007.