



Javier Ferrer
Enrique Alba
Universidad de Málaga

BIN-CT: SISTEMA INTELIGENTE PARA LA GESTIÓN DE LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Resumen

El rápido crecimiento demográfico junto con la concentración de la población en los núcleos urbanos más la cantidad cada vez mayor de residuos que generamos todos los días, son los factores que llevan al límite la capacidad de asimilación de los residuos por parte de la naturaleza. Por tanto, necesitamos medios tecnológicos para hacer una gestión óptima del proceso de recogida de residuos, que supone además un 70% del coste operacional en el tratamiento de residuos. En este artículo presentamos una herramienta inteligente no comercial, desarrollada por nuestro grupo universitario NEO, basada en algoritmos de aprendizaje computacional, que apoyada por datos pasados (históricos), presentes (sensores) y futuros (predicciones), planea las mejores rutas de recogida posibles.

El objetivo que podemos alcanzar gracias a nuestro sistema software es reducir los costes del servicio de recogida de residuos, gracias a la reducción del gasto de combustible y optimización del personal, a la vez que se aumenta la calidad de servicio al ciudadano y se reducen las emisiones de gases contaminantes. En este artículo mostramos las características de nuestra herramienta, ilustrando su funcionamiento con un caso de estudio real de una ciudad española. Podemos concluir que el uso de esta herramienta evita los viajes innecesarios a contenedores, y por tanto obtenemos una reducción de los costes totales y de las emisiones nocivas para el medioambiente.

Abstract

The fast demographic growth, together with the concentration of the population in cities, and the increasing amount of waste we generate every day, are factors that push to the limit the ability of waste assimilation by nature. Therefore, we need technological means to make an optimal management of the waste collection process, which represents 70% of the operational cost in waste treatment. In this article, we present a non-commercial intelligent tool, based on computational learning algorithms, which supported by past (historical), present (sensor) and future (predictions) data, plans the best routes for waste collection.

The objective of the system is the cost reduction of the waste collection service by means of the reduction in fuel and optimization of the staff, while at the same time the quality of service to the citizen is increased and the gas emissions are reduced. In this article we show the features of our tool, illustrating its operation with a real case study of a Spanish city. We can conclude that the use of this tool avoids unnecessary visits to containers, and therefore we obtain a reduction of total costs and harmful emissions to the environment.

Palabras clave: *gestión de residuos; reciclaje; predicción; software; planificación rutas; sistemas inteligentes*

Área temática: Ciclo de vida de la ciudad y sus construcciones

1. Introducción

La generación de residuos muestra un crecimiento imparable a nivel global y, por contra, la capacidad de nuestro planeta para asimilarlos es cada vez menor, convirtiéndose el tratamiento de los residuos en uno de los retos más complejos a los que se enfrentan las sociedades modernas (Al-Salem, Lettieri, & Baeyens, 2009). Además, el *sistema lineal* de nuestra economía (extracción, fabricación, utilización y eliminación) ha alcanzado sus límites y se empieza a vislumbrar el agotamiento de una serie de recursos naturales. Por tanto, actualmente se está implantando un modelo de *economía circular* que consigue convertir nuestros residuos en materias primas, paradigma de un sistema de futuro sostenible.

A pesar del compromiso social y gubernamental, apenas existen medios tecnológicos para hacer una gestión óptima del proceso de recogida de residuos, que supone un 70% del coste operacional en el tratamiento de residuos (Teixeira, Antunes, & de Sousa, 2004). En este trabajo proponemos una herramienta inteligente para la gestión de la recogida de residuos sólidos urbanos. El sistema es doblemente inteligente, ya que integra algoritmos para pronosticar el porcentaje de llenado de los contenedores de residuos, más la posterior generación óptima de rutas de recogida para los camiones. Es decir, nuestro sistema software resuelve los dos grandes problemas a los que se enfrentan los servicios de recogida: 1) ¿qué contenedores se deben recoger? y 2) ¿en qué orden se visitan para minimizar el coste?

Para resolver la primera de estas preguntas hemos necesitado apoyarnos en el aprendizaje automático computacional (un nuevo tipo de *machine learning*) para estimar el porcentaje de llenado de cada contenedor, gracias al uso de datos históricos, y así saber cuándo debemos ir a recogerlo. Esta predicción se puede realizar a corto o largo plazo, considerando estacionalidad, y con la capacidad de realimentar el modelo matemático con los nuevos datos que se generan diariamente. Cabe destacar que la predicción de llenado para todos los contenedores individualmente (grano fino) es una característica que no se implementa en ninguna herramienta comercial existente. Adicionalmente, la herramienta interacciona con un sistema IoT (*Internet of Things*) para conocer los llenados en tiempo real de los contenedores equipados con sensores volumétricos, y es una herramienta fundamental para recabar datos y utilizarlos en la decisión de incluirlos en las rutas de recogida cuando éstas se generan.

La generación de rutas (de recogida de residuos en nuestro caso) es un problema combinatorio bien conocido llamado en inglés *Vehicle Routing Problem - VRP* (Dantzig & Ramser, 1959). Para resolver la segunda pregunta vamos a generar las rutas óptimas para visitar todos los emplazamientos de los contenedores, teniendo en cuenta multitud de restricciones como la capacidad de los camiones, la cantidad de residuos recogida y las características del emplazamiento del contenedor, entre otras.

La planificación de las rutas de recogidas de residuos tiene, por tanto, un amplio abanico de variantes y restricciones que por una parte lo hace inmanejable para una persona, y por otro nos da un gran margen de mejora al tratarlo con algoritmos de forma automática. Esta mejora se va a traducir en una disminución de los costes del servicio, una mejora medioambiental y una mejora en el servicio al ciudadano, en cuanto a calidad y en cuanto a costes. Además, debemos tener en cuenta que el sistema de recogida actual está en discusión, ya que tenemos un sistema que en ocasiones efectúa viajes innecesarios a contenedores semi-vacíos. Y es que no podemos obviar las emisiones contaminantes generadas por los viajes extra, que podrían perjudicar más el medio ambiente, que el beneficio de su recolección. Esto es

especialmente crítico en el caso de la recogida selectiva (plástico, papel, vidrio,...), donde el volumen de residuos suele ser menor que en el contenedor de residuos orgánicos. En ese caso una buena planificación de las recogidas es un aspecto aún más fundamental.

Las principales contribuciones de este artículo son las siguientes:

- Propuesta de sistema inteligente llamado BIN-CT para la generación de rutas de recogidas de residuos urbanos.
- Comparativa de tres algoritmos de aprendizaje computacional para la generación de predicciones de llenado de contenedores a partir de datos históricos.
- Caso de estudio de una ciudad real para ilustrar el comportamiento del sistema BIN-CT con 217 contenedores.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 describimos el estado del arte actual del problema de la recogida de residuos, haciendo hincapié en las diferentes variantes que se tratan en la literatura. En la Sección 3, describimos los problemas asociados con la recogida de residuos urbanos que tratamos en este artículo. La Sección 4 la dedicamos a comentar el sistema inteligente desarrollado, comentando en detalle sus componentes y funcionalidades más interesantes. La Sección 5 la dedicamos a la presentación y discusión de los resultados obtenidos en un caso de estudio real sobre recogida selectiva, particularmente la recogida de papel/cartón. Para finalizar, destacamos una serie de conclusiones y líneas de trabajo futuras.

2. Estado del Arte

El desarrollo poco sostenible de la mayoría de naciones ha creado un problema por la creciente generación de residuos que debe ser resuelto, donde se distinguen muchas fases desde la fabricación hasta el reciclado, pasando por la recogida, transporte, procesado, reciclado, almacenamiento y monitorización de residuos. En este trabajo nos centramos en la recogida de residuos urbanos, ya que es uno de los procesos más costosos cuando queremos volver a dar una nueva vida a los residuos (concepto en boga denominado economía circular).

Tradicionalmente la recolección de residuos sólidos se realizaba sin analizar previamente la demanda o las rutas de los vehículos, realizando esta labor los conductores de los vehículos aunque las soluciones estuvieran lejos de ser óptimas. Muy al contrario, actualmente conocemos que este proceso de recogida tiene innumerables variantes y restricciones que han dado lugar a multitud de estudios en los últimos años debido a su importancia. Los trabajos existentes se pueden clasificar, entre otras formas, atendiendo al tipo de residuo que se trata: residuos residenciales comúnmente conocidos como basura (Garvin, Cohen, & Dwyer, 2011), residuos industriales donde los clientes están más dispersos y la cantidad de residuo es mayor (Sahoo, Kim, Kim, Kraas, & Popov Jr., 2005), residuos reciclables (Dat, Truc Linh, Chou, & Yu, 2012) cada vez más importantes para nuestra sociedad y residuos peligrosos donde se minimiza la probabilidad de daños (Alagöz & Kocasoy, 2008).

El problema de la recogida de residuos municipales (Beliën, De Boeck, & Van Ackere, 2014), también se ha estudiado desde la perspectiva de las autoridades locales. A nivel municipal o incluso desde las diputaciones necesitan estudios globales para cuantificar los residuos generados en un periodo de tiempo y poder gestionarlos. Particularmente, en la literatura podemos encontrar predicciones para una ciudad completa como el presentado por Xu et al. (Xu, Gao, Cui, & Liu, 2013) de la ciudad china de Xiamen. La diferencia con nuestro enfoque es que ellos predicen sobre cantidades de residuos globalmente (grano grueso), mientras que nosotros generamos una predicción por cada contenedor involucrado (grano fino). Esto supone un aumento considerable de la complejidad del problema que se resuelve, debido a

que hay que considerar múltiples aspectos como la localización, las costumbres de los ciudadanos, la densidad poblacional del área, etc. En esta línea, también se ha estudiado el impacto de la intervención de las autoridades locales en la recogida de residuos (Cole, Quddus, Wheatley, Osmani, & Kay, 2014), siendo esta relevante a medio-largo plazo.

Dependiendo del lugar donde se produce la retirada de los residuos también existen diferentes variantes de este problema. Existen las recolecciones comunales donde la autoridad local identifica un punto compartido por la comunidad (Tung & Pinnoi, 2000), es el caso de los llamados “puntos limpios”. En el otro extremo se encuentra las recogidas “de bordillo” (Sniezek & Bodin, 2006), donde los propietarios sacan la basura a la puerta de su casa. El caso intermedio, que es el estudiado aquí, es la recogida de contenedores (Bodin, Mingozi, Baldacci, & Ball, 2000) que sirven a varias urbanizaciones o manzanas.

En las ciudades medianas ya podemos hablar de varios cientos o miles de estos contenedores, por lo que son necesarios métodos de computación avanzados para alcanzar la solución óptima. En el pasado, varios métodos de resolución exacta como el “*Branch and Bound*” o basados en programación matemática (Arribas, Blazquez, & Lamas, 2010) se han utilizado, aunque el tiempo de computación se vuelve exponencial por el número de elementos necesarios para la resolución, por lo que es recomendable el uso de heurísticas. A pesar de que ya se hayan explorado algunos algoritmos metaheurísticos como las colonias de hormigas o los algoritmos genéticos (Buenrostro-Delgado, Ortega-Rodriguez, Clemitshaw, González-Razo, & Hernández-Paniagua, 2015), aún existe margen de mejora cuando uno se enfrenta al problema de la recogida de residuos a grano tan fino como el que utilizamos en nuestro enfoque, analizando cada contenedor como una entidad individual.

El proceso de recogida de residuos implica a muchos actores como son las autoridades, los ciudadanos, la empresa que realiza el servicio y los trabajadores. Dependiendo del interesado, existen diferentes objetivos que se pueden optimizar. Entre ellos destacamos el número de vehículos necesarios para realizar el trabajo (Ombuki-Berman, Runka, & Hanshar, 2007), el coste total (Arribas et al., 2010), el impacto medioambiental (Tavares, Zsigraiova, Semiao, & Carvalho, 2009), el personal necesario (Baudach, Chmielewski, & Clausen, s. f.), la longitud de las rutas (Ustundag & Cevikcan, 2008) o el tiempo total de la recolección (Arribas et al., 2010). Nuestro enfoque considera varios de estos objetivos a la vez, tratando de encontrar una solución que minimice el número de vehículos necesarios, el coste total de la recogida, la longitud de las rutas, y por tanto el impacto medioambiental.

3. El Problema de Recogida de Residuos Urbanos

El problema de la recogida de residuos es un problema global que afecta a la mayoría de las ciudades del mundo. De hecho, este problema se encuadra dentro de la iniciativa Horizonte 2020 (*Horizon 2020*) y Ciudad Inteligente (*Smart City*) para la innovación y la investigación, promovido por la Unión Europea: el concepto de reducir el consumo energético y aprovechar mejor los recursos se ha convertido en un arma central para combatir los rigores de la crisis económica. Concretamente, uno de los objetivos que tiene la iniciativa *Smart City* es disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, emplear de manera sostenible los recursos disponibles y gestionar eficientemente las fuentes energéticas.

Nos enfrentamos, por tanto, a un problema que consiste en planificar cómo se va a realizar la recogida de residuos en un área determinada. Básicamente esta tarea consiste en determinar la asignación de los recursos disponibles (vehículos y conductores) a rutas de recogida, es decir, queremos que se visiten los contenedores de residuos que nos convenga recoger en el momento más adecuado (idealmente con porcentaje de llenado cercano al 100%). Entre las labores más importantes que hay que realizar podemos destacar la generación de las rutas de recogida por jornada y por tipo de residuo. No es necesario determinar la frecuencia de visitas que necesita un determinado contenedor, sino que las predicciones de llenado serán

las que nos ayuden a decidir si un contenedor en particular será recogido en una jornada o no. La generación de predicciones es realmente compleja, ya que necesitamos modelar el comportamiento de la población que deposita sus residuos en ese determinado contenedor.

La complejidad global de este problema viene derivada de la cantidad de restricciones que se le pueden aplicar al modelo, de forma que a más restricciones tenidas en cuenta, mayor realismo se consigue y mejor será la solución encontrada. Las restricciones que tenemos en cuenta son muy diversas. Con respecto al vehículo podemos restringir la capacidad del mismo, si disponemos de uno o más vehículos, si estos son diferentes o iguales, y si son de diferente tamaño, ya que en ciertas calles los vehículos grandes no pueden ser usados. También podemos considerar restricciones legales, como el número de horas que pueden trabajar los empleados, o restricciones políticas que pueden ser muy diversas. Por ejemplo obtener un porcentaje de residuos reciclables o la consideración de ventanas horarias para la recogida en determinados lugares, de manera que sólo a ciertas horas está permitida la recogida. Todas estas restricciones hacen que el problema sea difícilmente abarcable por técnicas tradicionales y menos aún por una persona.

4. El Sistema BIN-CT

El sistema BIN-CT propuesto para mejorar la planificación de la recogida de residuos se ha desarrollado dividiendo la funcionalidad en cuatro módulos claramente diferenciados y que podemos observar en la **Figura 1**.

En esta sección vamos a detallar las capacidades de nuestro software, así como su importancia a la hora de resolver una instancia del problema de recogida de residuos urbanos. Los cuatro módulos de los que se compone este paquete software son: módulo de manejo de datos, módulo de decisiones inteligentes, módulo de generación de rutas y módulo de visualización.

4.1. Módulo de Manejo de Datos

Toda la información necesaria para la ejecución del programa (proveniente de la empresa que use el sistema) se puede cargar de una base de datos. Esto nos permite obtener de forma rápida la información necesaria desde una base de datos remota. Además, una vez concluida la ejecución del programa de optimización de rutas, podemos almacenar la mejor solución en la base de datos para su posterior consulta y visualización.

La generación de las matrices de distancia y tiempos entre contenedores es una información esencial para generar las rutas realistas. El módulo de datos también es el encargado de solicitar esta información, que obtenemos gracias a la API de Google Maps, para que las rutas generadas sean lo más precisas posible.

Finalmente, también se almacenan los datos de capacidad obtenidos con los sensores para construir un historial de cada uno de los contenedores con sensor instalado. Nos permite utilizar esta información para clasificar los contenedores como de alto, medio y bajo uso y generar predicciones más acertadas.

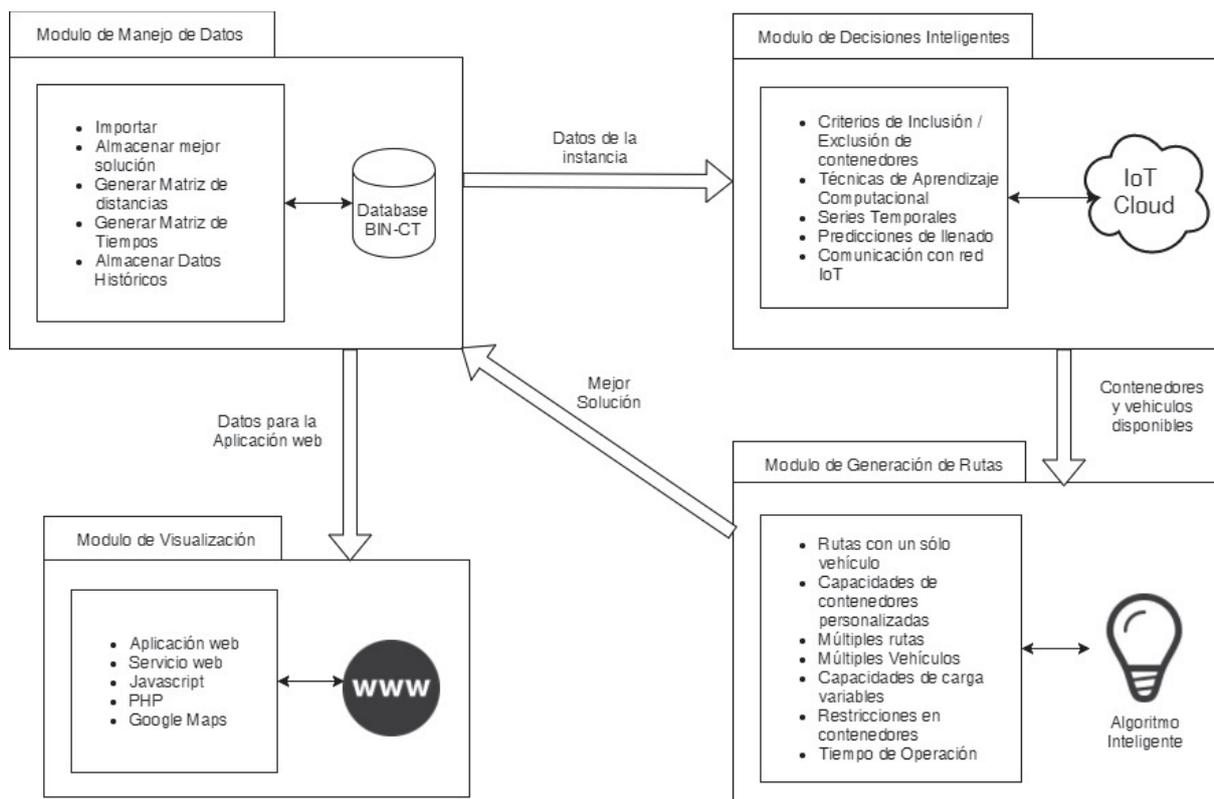


Figura 1: Diagrama del Sistema Software BIN-CT

4.2. Módulo de Decisiones Inteligentes

La característica fundamental de nuestro software es la capacidad para predecir el aporte diario para cada uno de los contenedores que forman parte del conjunto analizado. Hemos realizado un modelado matemático individualizado de cada contenedor usando la biblioteca de *machine learning* de Weka (Frank, Hall, & Witten, 2016) para la generación de pronósticos sobre el nivel de llenado de los mismos, partiendo de datos históricos registrados. Esto nos permite generar predicciones de llenado para los contenedores no monitorizados con sensores.

En este módulo también hemos definido los criterios de inclusión /exclusión utilizados para la toma de decisión acerca de los contenedores que van a ser recogidos en las rutas generadas. Los criterios de inclusión/exclusión se pueden definir atendiendo a: capacidad de contenedores, capacidad de vehículos, número de vehículos, compatibilidad de vehículos/contenedores, pronóstico realizado y lectura real de los sensores si fuera posible. Además, dado un conjunto de contenedores y un criterio, tenemos la posibilidad de forzar la inclusión de algunos contenedores con mayor prioridad en las rutas generadas, pudiendo quedar algunos excluidos debido a los criterios y restricciones definidos.

4.3. Módulo de Generación de Rutas

Este módulo tiene como funcionalidad principal la generación de rutas óptimas para la recogida de residuos. Dado un conjunto de contenedores, usamos un algoritmo de optimización basado en el principio de ruina y recreación (Schrimpf, Schneider, Stamm-Wilbrandt, & Dueck, 2000) que nos permite generar rutas de recogida eficientes, teniendo en cuenta la distancia y el tiempo de conducción entre ellos.

En general todos los contenedores suelen tener la misma capacidad, pero a medida que avanza el tiempo, en las ciudades tenemos contenedores diferentes, y por tanto con diferentes

capacidades. Nuestro software considera contenedores de distinto tamaño y por lo tanto, diferente capacidad. Se gestiona la capacidad de cada uno de forma individualizada, y esto nos permite estimar la carga total que va a recoger el vehículo, ya que no podemos exceder este límite. Además, las flotas de vehículos no sólo la forman vehículos idénticos sino que las flotas de vehículos son heterogéneas, por lo que se consideran los vehículos de forma individualizada. Por ejemplo, podemos asignar un número mayor de contenedores a los vehículos con mayor capacidad.

En ocasiones se producen casos especiales donde hay que tener en cuenta la compatibilidad entre contenedor/vehículo. Este caso ocurre, por ejemplo, cuando un contenedor tiene que ser recogido por un vehículo de tamaño pequeño. Nuestro software nos permite tener en cuenta esta restricción para generar rutas válidas. Además, esta característica también puede influir en el tiempo de operación por contenedor, que es el tiempo que se tarda desde que el camión para delante de un contenedor hasta que éste reemprende la marcha. Este tiempo se asigna dependiendo de la ubicación o características del contenedor a recoger. Esta característica repercute beneficiosamente en que el tiempo total de recogida estimado sea más realista.

4.4. Módulo de Visualización

La visualización de las soluciones se realiza en un mapa navegable HTML. El software genera soluciones para uno o más días, y éstas pueden visualizarse en un navegador web. En la **Figura 2** se puede ver el interfaz de la aplicación web, que además podemos consultar online en la dirección <http://mallba3.lcc.uma.es/binct/>. En la parte principal se muestra una parte de una solución obtenida para dos vehículos, una ruta de color rojo y otra ruta de color negro, para dos camiones diferentes. Además, podemos observar los contenedores marcados en rojo, que serán aquellos cuya predicción indica un porcentaje de llenado superior al 80%.

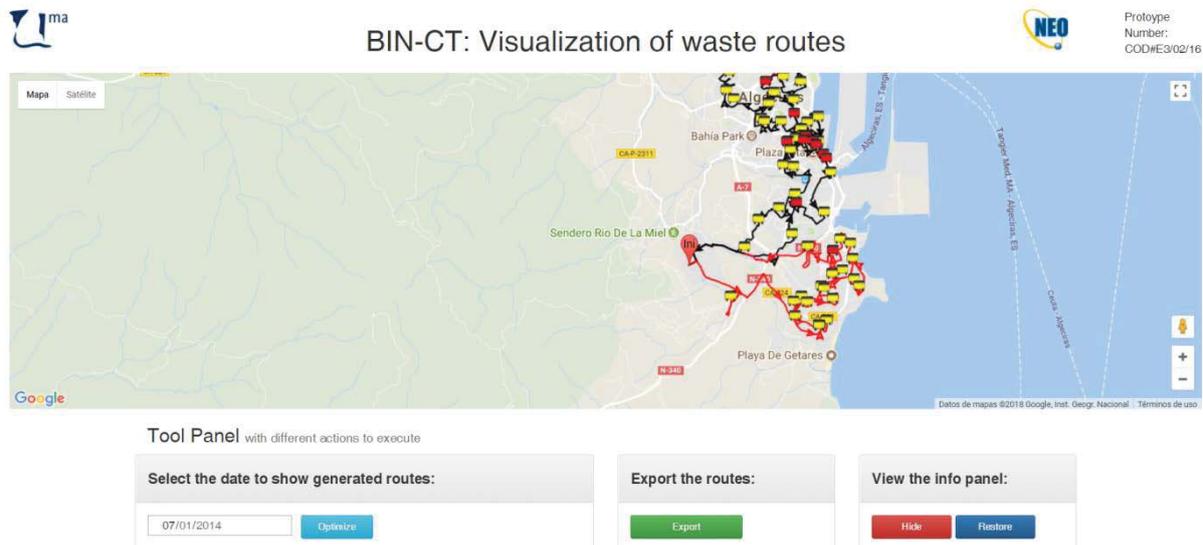


Figura 2: Interfaz de la aplicación BIN-CT

Las soluciones pueden ser obtenidas desde cualquier dispositivo móvil y su interfaz se adapta a los dispositivos móviles. Esta característica es especialmente deseable para la consulta por parte de los conductores de los camiones de recogida, en el caso de que les surja alguna duda con respecto a la ruta que deben seguir.

5. Caso de Estudio

En este artículo vamos a ilustrar el comportamiento de nuestra herramienta software con un caso de estudio real de una ciudad costera andaluza, donde ponemos de manifiesto las bondades de nuestro enfoque, siendo este efectivo y realista al mismo tiempo. En este caso vamos a llevar a cabo dos experimentos diferentes. En primer lugar vamos a centrarnos en el funcionamiento del módulo de predicciones, que es la parte más novedosa de nuestro sistema y que nos va a permitir conseguir el mayor ahorro en el funcionamiento de nuestro servicio de recogida. Este primer experimento va a consistir en la comparativa de tres algoritmos diferentes para generar predicciones. Por su parte, el segundo experimento será la generación de rutas para una jornada de trabajo, partiendo del estado que tuvieran los contenedores, es decir, van a tener estados de llenado diferentes que serán complementados con la predicción para el día siguiente. De esta manera pretendemos poner de manifiesto que nuestro enfoque es realista, y por tanto nuestras soluciones lo serán también.

Nuestro caso de estudio considera 217 contenedores azules dedicados a la recogida de papel/cartón del área metropolitana de una ciudad andaluza. La elección de una instancia de recogida selectiva es más atractiva para demostrar la potencia de nuestro enfoque, ya que la frecuencia de recogida de estos contenedores es muy variable, y no suele ser diaria como ocurre con la mayoría de contenedores de residuos orgánicos. La instancia estudiada de este problema tiene las siguientes características:

Característica	Valor
Número de contenedores	217 unidades
Número de vehículos	2 unidades
Tiempo de operación	210 segundos
Capacidad vehículo 1	2000 kg
Capacidad vehículo 2	5000 kg
Datos históricos	11 meses
Horizonte pronóstico	1 mes

Tabla 1: Características del caso de estudio

En el primer experimento hemos comparado los siguientes algoritmos de series temporales: regresión lineal, proceso gaussiano y SMOreg, todos disponibles en la biblioteca de series temporales de Weka. En este experimento utilizamos 11 meses de datos, que indican para cada día el porcentaje estimado de llenado del contenedor. Este dato es aportado por el conductor del vehículo si se ha pasado por este contenedor, y no tendremos dato alguno si ese día no se ha realizado su recogida. Por tanto, el sistema debe deducir qué ha ocurrido en los días que no tenemos datos. Para aliviar este problema, hemos realizado un pre-procesamiento de los datos que nos ha permitido obtener el incremento de carga estimado de cada uno de los contenedores de la instancia para cada día. A partir de estos datos, hemos generado las predicciones diarias para el siguiente mes. Los resultados indican que el algoritmo de aprendizaje basado en procesos gaussianos es el mejor algoritmo de los tres, obteniendo tan sólo un 3'83% de error absoluto medio en sus predicciones diarias de llenado. Por su parte, el algoritmo basado en regresión lineal tiene un error absoluto medio de un 7,41% y el algoritmo SMOreg de un 9,52%. Tras realizar el test estadístico de Kruskal-Wallis (con corrección de Bonferroni para comparar más de dos muestras) con una confianza del

95% podemos afirmar que existen diferencias significativas entre los resultados del algoritmo basado en procesos gaussianos con los otros dos algoritmos de la comparación.

Como principal conclusión del primer experimento podemos extraer que la estimación proporcionada por el mejor algoritmo es más que aceptable, con menos de un 4% de error absoluto medio, cifra que raramente podría influir en la decisión de recoger un contenedor de forma prioritaria. Por tanto, el algoritmo que decidimos utilizar para el segundo experimento es el basado en procesos gaussianos.

En el segundo experimento queremos ilustrar el comportamiento general del sistema para el caso de dos vehículos diferentes, considerando todas las demás características especificadas en la **Tabla 1**. Una vez que el sistema realiza las predicciones para el día siguiente, y se acumulan con el llenado actual, se elige el subconjunto de contenedores que queremos recoger con el siguiente criterio de inclusión/exclusión. Aquellos con un porcentaje de llenado superior al 60% se consideran opcionales y aquellos con llenado superior al 80% se marcan como obligatorios para su recogida. En nuestro caso de estudio, este criterio da lugar a un subconjunto de 91 contenedores a recoger por dos vehículos. Tras la ejecución del algoritmo de generación de rutas, obtenemos una ruta donde se deben recoger 55 contenedores, y la debe realizar el camión más grande (capacidad de 5000kg) y otra para el camión pequeño, con capacidad para 2000kg, que recoge exactamente 20 contenedores. Por lo tanto, nuestra solución es capaz de recoger la mayoría de los contenedores y aprovechar al máximo la capacidad de los vehículos, siendo tan sólo 14 los contenedores opcionales que no debemos recoger. Por otra parte, el sistema nos proporciona una información muy precisa de la duración de las rutas, teniendo la ruta más larga una duración estimada de 5 horas, 23 minutos y 21 segundos, mientras que la ruta más corta tendrá una duración de 2 horas, 9 minutos y 10 segundos.

Tras el estudio de estas soluciones por parte de la empresa que nos ha proporcionado los datos de este caso de estudio, podemos concluir que el sistema propuesto genera soluciones realistas y que reproduce con bastante fiabilidad lo que ocurre en la realidad. Además, gracias a las predicciones, no hemos considerado 126 contenedores. Con bastante probabilidad varios de estos contenedores forman parte de la ruta predefinida para esta jornada y por lo tanto, hemos ahorrado viajes innecesarios con el consiguiente ahorro en coste de la ruta y emisiones de gases contaminantes.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

Nuestro software es un sistema inteligente diseñado para utilizar el conocimiento y la tecnología que es parte del estado del arte en investigación actualmente en sostenibilidad urbana. Estamos convencidos de que nuestro sistema inteligente va a ayudar a mejorar la calidad de vida de la ciudad donde se implante, gracias a la reducción de y al tratamiento eficiente de los residuos generados, lo que va a constituir una vía para alcanzar la sostenibilidad en una ciudad.

Nuestro sistema software tiene como objetivo principal reducir los costes de un servicio de recogida de residuos, a la vez que se aumenta la calidad de servicio al ciudadano, ya que nuestro software ordena recoger los contenedores por encima del 80% y así evitamos los inconvenientes de los molestos desbordamientos de contenedores. En el caso de estudio que hemos analizado en este trabajo, probamos que las soluciones generadas son realistas, a la vez que son más eficientes porque no consideran los contenedores que están por debajo del 60% una vez que hemos sumado las predicciones para el día siguiente. Además, las predicciones diarias son acertadas en un 96,17%, lo que indica que se proporcionan predicciones bastante fiables para los cálculos que necesitamos hacer en nuestro sistema.

BIN-CT tiene una aplicación directa por las empresas concesionarias de los servicios de recogida de residuos, tanto en ciudades españolas como de cualquier parte del mundo. Este sistema software no comercial, basado en algoritmos de aprendizaje computacional, no requiere de una inversión grande en infraestructura, por lo que sería muy interesante para dichas empresas. Existe también una parte científica interesante (investigación en series temporales, predicciones, sensores IoT, algoritmos eficientes, ...) que a las empresas que se interesen por el sistema propuesto aquí, les podría dar el salto de calidad y distinción que se busca en un mercado tan competitivo como el actual.

Como trabajo futuro, y gracias a la forma de construcción del sistema, podemos destacar la posible integración de un número indeterminado de sensores (que puede crecer según necesidades), como en todo sistema ciberfísico, para medir la cantidad de residuo del contenedor. Gracias a esto, en un futuro se podrían tomar decisiones en tiempo real incluso durante las rutas que realicen los camiones de recogida.

7. Agradecimientos

Queremos agradecer su asesoramiento sobre recogida de residuos al departamento de medioambiente de la empresa Hermanos Padilla, S.L. Además, esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad, y los proyectos FEDER con códigos TIN2014-57341-R (<http://moveon.lcc.uma.es>), TIN2016-81766-REDT (<http://cirti.es>), y TIN2017-88213-R (<http://6city.lcc.uma.es>), a la Universidad de Málaga por el proyecto con código COD # E3/02/16 y Andalucía Tech.

8. Referencias

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625-2643. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Alagöz, A. Z., & Kocasoy, G. (2008). Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in İstanbul. *Waste Management*, 28(8), 1461-1471. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.024>
- Arribas, C. A., Blazquez, C. A., & Lamas, A. (2010). Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems. *Waste Management & Research*, 28(4), 355-363. <http://doi.org/10.1177/0734242X09353435>
- Baudach, J., Chmielewski, A., & Clausen, U. (s. f.). Integrated Vehicle Routing and Crew Scheduling (IVRCS) in Waste Management Part II. Recuperado a partir de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/citations;jsessionid=06DA06F60C8512230D8204E17C12DFCB?doi=10.1.1.687.8694>
- Beliën, J., De Boeck, L., & Van Ackere, J. (2014). Municipal Solid Waste Collection and Management Problems: A Literature Review. *Transportation Science*, 48(1), 78-102. <http://doi.org/10.1287/trsc.1120.0448>
- Bodin, L., Mingozzi, A., Baldacci, R., & Ball, M. (2000). The rollon-rolloff vehicle routing problem. *Transportation Science*, 34(3), 271-288. <http://doi.org/10.1287/trsc.34.3.271.12301>
- Buenrostro-Delgado, O., Ortega-Rodríguez, J. M., Clemitshaw, K. C., González-Razo, C., & Hernández-Paniagua, I. Y. (2015). Use of genetic algorithms to improve the solid waste collection service in an urban area. *Waste management (New York, N. Y.)*, 41, 20-7. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.026>

- Cole, C., Quddus, M., Wheatley, A., Osmani, M., & Kay, K. (2014). The impact of Local Authorities' interventions on household waste collection: a case study approach using time series modelling. *Waste management (New York, N.Y.)*, *34*(2), 266-72. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.018>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, *6*(1), 80-91. <http://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Dat, L. Q., Truc Linh, D. T., Chou, S. Y., & Yu, V. F. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Systems with Applications*, *39*(7), 6380-6387. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.031>
- Frank, E., Hall, M. A., & Witten, I. H. (2016). *The WEKA Workbench. Morgan Kaufmann, Fourth Edition*. Recuperado a partir de https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/Witten_et_al_2016_appendix.pdf
- Garvin, B. J., Cohen, M., & Dwyer, M. B. (2011). Evaluating improvements to a meta-heuristic search for constrained interaction testing. *Empirical Software Engineering*, *16*(1), 61-102.
- Ombuki-Berman, B. M., Runka, A., & Hanshar, F. T. (2007). Waste collection vehicle routing problem with time windows using multi-objective genetic algorithms. *Proceedings of the Third IASTED International Conference on Computational Intelligence*, 91-97. Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-54949135697&partnerID=40&md5=1094902e796768500f3f4cd9980931a4>
- Sahoo, S., Kim, S., Kim, B.-I., Kraas, B., & Popov Jr., A. (2005). Routing Optimization for Waste Management. *Interfaces*, *35*(1), 24-36. <http://doi.org/10.1287/inte.1040.0109>
- Schrimpf, G., Schneider, J., Stamm-Wilbrandt, H., & Dueck, G. (2000). Record Breaking Optimization Results Using the Ruin and Recreate Principle. *Journal of Computational Physics*, *159*(2), 139-171. <http://doi.org/10.1006/jcph.1999.6413>
- Sniezek, J., & Bodin, L. (2006). Using mixed integer programming for solving the capacitated arc routing problem with vehicle/site dependencies with an application to the routing of residential sanitation collection vehicles. *Annals of Operations Research*, *144*(1), 33-58. <http://doi.org/10.1007/s10479-006-0006-y>
- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management*, *29*(3), 1176-1185. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.013>
- Teixeira, J., Antunes, A. P., & de Sousa, J. P. (2004). Recyclable waste collection planning—a case study. *European Journal of Operational Research*, *158*(3), 543-554. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00379-5](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00379-5)
- Tung, D. V., & Pinnoi, A. (2000). Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi. *European Journal of Operational Research*, *125*(3), 449-468. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00408-7](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00408-7)
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2008). Vehicle Route Optimization for Rfid Integrated Waste Collection System. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, *7*(4), 611-625. <http://doi.org/10.1142/S0219622008003125>
- Xu, L., Gao, P., Cui, S., & Liu, C. (2013). A hybrid procedure for MSW generation forecasting at multiple time scales in Xiamen City, China. *Waste management (New York, N.Y.)*, *33*(6), 1324-31. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.012>

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: Javier Ferrer

Teléfono: +34 952133303

Fax: +34 952131397

E-mail: ferrer@lcc.uma.es

Cesión de Derechos

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Palacio de Ferias y Congresos de Málaga una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.