



Facultad de Ciencias Económicas

**Estudio, enfoque y mejora de la gestión de residuos  
bajo el paradigma de gestión de una ciudad inteligente  
aplicado a una localidad de pequeño tamaño**

Autor: Juan Torralbo Rojas

Tutor: Enrique Díaz-Plaza Sanz

Madrid | Abril 2023

---

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1.	INTRODUCCIÓN.....	8
1.	CONTEXTO.....	8
2.	JUSTIFICACIÓN DEL TEMA .....	9
3.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
4.	METODOLOGÍA .....	10
5.	ESTRUCTURA .....	10
CAPÍTULO 2.	LAS SMART CITIES Y LA GESTIÓN DE RESIDUOS INTELIGENTE.....	11
1.	EL CONCEPTO DE SMART CITY.....	11
1.1.	El modelo asociativo en las Smart Cities .....	13
2.	LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN UNA SMART CITY .....	13
2.1.	Breve referencia al sistema tradicional de recogida de residuos .....	14
2.2.	Sistemas de recogida de residuos en una Smart City .....	15
2.3.	Relación con Internet of Things .....	16
2.4.	Esquema de proyecto de gestión de residuos inteligente.....	17
2.5.	Otra visión esquemática del proyecto.....	22
2.6.	El SaaS en la recogida de residuos .....	23
3.	LA RECOGIDA DE RESIDUOS INTELIGENTE: EL CASO DE GRANADA	23
3.1.	El esquema procedimental de la recogida de residuos en Granada .....	24
1.1.	Objetivos y resultados.....	25
4.	LOS BENEFICIOS DE LA RECOGIDA DE RESIDUOS INTELIGENTE .....	26
CAPÍTULO 3.	APLICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS INTELIGENTE A LOCALIDAD DE PEQUEÑO TAMAÑO.....	27
1.	EL CASO CONCRETO DE VILLANUEVA DE CÓRDOBA: SITUACIÓN ACTUAL	
	27	

2. VIABILIDAD DE LA APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO EN LA LOCALIDAD DE PEQUEÑO TAMAÑO .....	29
2.1. Contexto actual .....	29
2.2. Esquema procedimental.....	31
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	53
CAPÍTULO 5. PRÓXIMOS PASOS .....	58
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....	59

## **LISTADO DE ABREVIATURAS**

**API:** Application Programming Interface

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**CVRPTW:** Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows

**DDS:** Decision Support System

**EPREMASA:** Empresa Provincial de Residuos y Medio Ambiente S.A.

**GA:** Genetic Algorithm

**GAP:** Generalised Assignment Problem

**GIR:** Gestión Integral de Residuos

**GIS:** Geographic Information Systems

**GPS:** Global Positioning System

**HaaS:** Hardware as a Service

**IoT:** Internet of Things

**KNN:** K-Nearest Neighbors

**LoRa:** Low Rate

**RFID:** Radio Frequency Identification

**RS:** Remote Sensing

**SaaS:** Software as a service

**SVM:** Support Vector Machine

**TSP:** Traveling Salesman Problem

**VRP:** Vehicle Routing Problem

**WPR:** Waste Production Rate

**WSN:** Wireless Sensor Network

## **RESUMEN**

Este Trabajo desarrolla la viabilidad de la aplicación de un modelo de gestión de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño, concretamente, en el proceso de la recolección de residuos.

Para ello, se sigue un procedimiento lógico que comienza por el estudio de los aspectos clave del paradigma de Smart Cities, la recogida de residuos inteligente y el Internet of Things. Posteriormente, se desarrolla el esquema procedimental del proyecto que consiste en el manejo de datos, la predicción de los mismos y las decisiones inteligentes aparejadas, la optimización de rutas y las tareas de visualización, en ese orden.

Tras estudiar el caso general, se analiza un caso exitoso de aplicación de un modelo de recogida de residuos inteligente en la ciudad de Granada, que nos servirá para estudiar la casuística real del problema.

Finalmente, se expone la hipotética implantación de un modelo de recogida de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño. Para ello, se pone como ejemplo a la localidad de Villanueva de Córdoba. En primer lugar, se analizan sus circunstancias actuales y, posteriormente, se desarrolla la viabilidad de la aplicación del esquema procedimental de la recogida de residuos inteligente para así analizar los problemas que se pueden encontrar en una futura materialización del proyecto. El desarrollo de este punto se centra en el modelo predictivo del tiempo medio de recogida de los contenedores.

## **PALABRAS CLAVE**

Smart Cities, gestión de residuos, recogida de residuos inteligente, Internet of Things, modelo predictivo, optimización de rutas.

## **ABSTRACT**

This paper develops the feasibility of the application of a smart waste management model in a small town, specifically, in the waste collection process.

For this purpose, a logical procedure is followed, starting with the study of the key aspects of Smart Cities, smart waste collection and Internet of Things. Subsequently, the procedural outline of the project is developed, consisting of data management, data prediction and the associated smart decisions, route optimization and visualization tasks, in that order.

After studying the general case, a successful case of application of an intelligent waste collection model in the city of Granada is analyzed, which will help us to study the real casuistry of the problem.

Finally, the hypothetical implementation of an intelligent waste collection model in a small town is presented. For this purpose, the town of Villanueva de Córdoba is used as an example. First, its current circumstances are analyzed and, subsequently, the feasibility of the application of the procedural scheme of intelligent waste collection is developed in order to analyze the problems that may be encountered in a future materialization of the project. The development of this point focuses on the predictive model of the average collection time of the containers.

## **KEY WORDS**

Smart Cities, waste management, smart waste collection, Internet of Things, predictive model, route optimization.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1. CONTEXTO

A partir de la segunda década del siglo XXI, comenzaron a generalizarse proyectos relativos al paradigma de Smart City, el cual defiende una mejor calidad de vida y el respeto por el medio ambiente a través del uso de las nuevas tecnologías. Muestra de ello son los cambios radicales que han vivido las ciudades en aspectos como eficiencia energética, movilidad y gestión de residuos.

Estos proyectos han sido aplicados, primeramente, en grandes ciudades ya que su grado de afectación a la población y su aplicación es más sencilla debido al grado de inversión. Sin embargo, esto podría caer en una discriminación rural tal y como está pasando en otros sectores de desarrollo tecnológico como en la movilidad sostenible (Ical, 2022).

Por lo tanto, es coherente preguntarse si estos modelos que surgen en los ámbitos metropolitanos tienen cabida en ambientes rurales beneficiándose, así, de las ventajas ofrecidas en las ciudades y evitar la discriminación anteriormente mencionada. La pregunta es clara: ¿Se puede aplicar el modelo de Smart City en una localidad de pequeño tamaño?

En segundo lugar, la gestión de residuos se constituye como uno de los servicios principales de las ciudades del siglo XXI. Hace más de 5000 años, ya existían vertederos donde la gente de las ciudades tiraba los desechos sin que molestaran. El problema se agravó en la Revolución Industrial con el surgimiento de residuos inorgánicos y no degradables. Poco a poco y gracias al movimiento ecologista, en los años 70 comenzó a surgir una conciencia medioambiental en aumento (Phillips, 2021). Actualmente, los gobiernos municipales intentan aplicar nuevas políticas adaptadas al desarrollo tecnológico y al paradigma de Smart City; sin embargo, esto se complica en localidades de pequeño tamaño. Por lo tanto, cabe una segunda pregunta más concreta en este Trabajo: ¿Es posible la aplicación de un modelo de gestión de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño?

## 2. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

El éxodo rural que está ocurriendo actualmente hace que cada vez sea más difícil la sustentación de las cuentas de gran parte de los ayuntamientos españoles. Este problema se acentúa aún más en localidades que no se encuentran en el radio de aproximación de una gran ciudad.

Es por ello que deben surgir nuevas políticas e investigaciones en pro de generar soluciones para estas instituciones deficitarias. Muchas de ellas, como la delegación de las funciones en la diputación provincial para generar una economía de escala, ya han sido implantadas con gran éxito. Además, tal y como se ha mencionado en la contextualización del problema, se trata de evitar una discriminación por motivos geográficos hacia los habitantes de poblaciones rurales respecto de aquellos que viven en grandes urbes metropolitanas.

Por último, hay que destacar el impacto ambiental que tiene la tendencia descontrolada al alza de la generación de residuos. Entre otros datos, si seguimos sin realizar mejoras claras en el sector, las toneladas de CO<sub>2</sub> aumentarán en 2,6 mil millones de toneladas, lo cual representaría en torno al 8% de las emisiones totales (Kaza et. al., 2018).

## 3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Para resolver los problemas ya expuestos, pueden proponerse numerosas soluciones que abarcan todo el proceso de la gestión de residuos. Un punto muy interesante y novedoso es el relacionado con la economía circular. La economía circular se define como el modelo de gestión de residuos que recicla los materiales y productos ya existentes todas las veces posibles para generar en ellos un valor añadido (Parlamento Europeo, 2023). No obstante, y con tal de ser lo más concreto posible, este Trabajo se centrará en otra parte de la gestión de residuos con tal de fomentar este modelo de economía circular: la recogida de residuos inteligente.

El objetivo principal de este trabajo es: analizar la situación de la recogida de residuos urbanos en una localidad de pequeño tamaño para ver la viabilidad de la aplicación de un modelo de recogida propio de una Smart City.

Para ello, estudiaremos el caso de Villanueva de Córdoba, una pequeña localidad en el norte de la provincia de Córdoba que actualmente se acoge a un régimen común de recogida

de residuos proporcionado por la empresa pública EPREMASA, cuya propietaria es la Diputación Provincial.

Como ya se ha mencionado anteriormente, este Trabajo pretende responder a dos cuestiones:

- ¿Se puede aplicar el modelo de Smart Cities en una localidad de pequeño tamaño?
- ¿Es posible la aplicación de un modelo de gestión de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño?

Una vez respondidas estas cuestiones, se podrán llegar a unas conclusiones que tienen como fin ayudar en la mejora de la calidad de vida de los habitantes de municipios del ámbito rural (Riva Sanseverino, 2014).

#### 4. METODOLOGÍA

La metodología del Trabajo se basará en asentar, en primer lugar, los conceptos básicos de Smart Cities. Se tratará de pasar de lo general a lo concreto, finalizando con el análisis de la localidad de pequeño tamaño y la aplicación de un proyecto de recogida de residuos inteligente en el municipio.

#### 5. ESTRUCTURA

La estructura de este Trabajo Final de Grado se dividirá en dos partes:

En un primer momento, se establecerá el marco teórico sobre qué es una Smart City y el aspecto de la gestión de residuos bajo el paradigma de Smart Cities. Una vez asentada esta contextualización, se analizará el esquema procedimental de un proyecto de gestión de residuos inteligente y se expondrá un ejemplo de aplicación, en este caso, nos servirá como ejemplo la recogida de residuos en la ciudad de Granada.

En segundo lugar, se tratará el caso concreto de la localidad de Villanueva de Córdoba, haciendo referencia a su realidad actual e intentando asemejar el modelo de Smart City a una población de pequeño tamaño para ver la viabilidad del proyecto en este tipo de poblaciones y los beneficios que supondría.

## **CAPÍTULO 2. LAS SMART CITIES Y LA GESTIÓN DE RESIDUOS INTELIGENTE**

### **1. EL CONCEPTO DE SMART CITY**

El concepto de Smart City o ciudad inteligente es una construcción relativamente reciente y, dependiendo del punto de vista, puede tener unos matices distintos. A modo de ejemplo y como primera aproximación, desde un contexto jurídico: el empleo de las nuevas tecnologías al servicio de una pléyade de aspectos que resultan consustanciales a la calidad de vida de los ciudadanos, relacionados, entre otros, con los edificios preexistentes y la mejora edificatoria, las redes de energía, transporte y movilidad, la preservación y protección del medio ambiente, la implantación y facilitación de la administración electrónica y el comercio electrónico o la prestación eficaz y eficiente en condiciones de equidad de diversos servicios públicos, así, señaladamente, sanidad y educación. (Marcos, 2021).

Sin embargo, parece más oportuno utilizar la definición dada por Townsend: una ciudad que hace uso de la últimas tecnologías y comunicaciones para tomar mejores decisiones y alcanzar las aspiraciones urbanas de los ciudadanos. Estos datos son recolectados a través de la instrumentalización, contextualizar los datos mediante su integración y, posteriormente, analizar los datos contextualizados para hacerlos “inteligentes” para mejorar los servicios de la ciudad y la calidad de vida. (World Bank, 2016). Se considera que el concepto de Smart Cities contiene seis ámbitos de aplicación: economía, personas, gobernanza, movilidad, medio ambiente y calidad de vida (Lundin et. al., 2017). En este sentido, hay que destacar la nota de ciudad que, aunque no esté incluida dentro de los ámbitos de aplicación mencionados, aparece en gran parte de las definiciones del concepto de Smart Cities. Este aspecto es de gran interés en este estudio ya que trataremos de ver la viabilidad de la aplicación del concepto de Smart City en un entorno rural.

Todas las Smart Cities tienen como base de su organización, cuatro elementos básicos: una infraestructura de conectividad, que pone en común a todos los dispositivos que conforman la Smart City; sensores y dispositivos conectados, relacionado con el IoT; centros integrados de operación y control, donde se analizan y procesan los datos para distribuir información útil; e interfaces de comunicación, que permiten tanto como una visualización sencilla como una gestión participativa en la ciudad (Bouskela et. al., 2016).

Si hacemos aterrizar esta idea de ciudad inteligente, podemos encontrar numerosos servicios que se pueden ver afectados por la aplicación del paradigma de Smart City ya que se trata de un término con carácter interdisciplinar (Lundin et. al., 2017; Fundación Telefónica, 2011):

- Movilidad urbana. Entre las posibles aplicaciones que tienen las nuevas tecnologías están: la información del tráfico en tiempo real; la gestión de los medios de transporte de viajeros, de los aparcamientos, de flotas y del uso de bicicletas; las aplicaciones de trazabilidad y logística; el pago de peajes; el soporte al uso de vehículos eléctricos; y los servicios de compartición de vehículos.
- Eficiencia energética y medioambiente. En este aspecto destacan: Smart Energy Grid (consiste en la optimización de la generación, distribución y consumo de energía para así evitar su gasto inútil), Smart Metering (se trata de la recolección de datos sobre el consumo eléctrico en los contadores de cada usuario de la red), gestión de parques y jardines públicos, medición de parámetros medioambientales y, finalmente, la recogida y tratamiento de residuos urbanos (objeto de estudio de este trabajo y que será desarrollado en el siguiente punto).
- Gestión de infraestructuras y edificios públicos. Dentro de este ámbito entrarían la gestión de edificios públicos, inmótica, infraestructuras urbanas y equipamiento urbano; y el reporte de incidencias urbanas por la ciudadanía.
- Gobierno y ciudadanía. Aquí se incluirían los conceptos de: e-Administración, e-Participación, gobierno abierto y aplicaciones analíticas.
- Seguridad pública. Componen este punto: la gestión de servicios públicos de emergencia y protección civil; videovigilancia y seguridad ciudadana; y prevención y detección de incendios.
- Salud. Se podrían destacar: la telemotorización, la telemedicina, la teleasistencia y la sanidad pública.
- Educación, capital humano y cultura. Este ámbito abarca numerosas prácticas como el e-learning, el teletrabajo, el e-turismo y servicios de información cultural.
- e-Comercio. Existen numerosos proyectos en distintas ciudades, destacando el famoso Oyster de la ciudad de Londres.

## 1.1. El modelo asociativo en las Smart Cities

El concepto de Smart Cities es interdisciplinar e involucra a todos los sujetos de la ciudad. Es por ello que, en torno a las Smart Cities, surge el modelo asociativo para rediseñar nuevos proyectos de mejora de la calidad de vida. Existen numerosos ejemplos de ciudades que han seguido estos modelos como Bari, donde se ha creado un entorno público-privado que reúne a representantes de la sociedad y al mundo empresarial para poner en común proyectos inteligentes (Riva Sanseverino, 2014). Otro ejemplo es la ciudad de Granada, que será analizado en el apartado 3 del presente Capítulo.

## 2. LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN UNA SMART CITY

La gestión de residuos en una Smart City es un aspecto clave para lograr una ciudad más sostenible, eficiente y rentable. La gestión inteligente de los residuos urbanos implica el uso de sensores, aplicaciones móviles, plataformas digitales y otros dispositivos que permiten recoger datos en tiempo real sobre la generación, el transporte y el tratamiento de los residuos. Estos datos se pueden analizar para mejorar la planificación, el control y la evaluación del servicio de recogida y gestión de residuos (Cárdenas, 2021; Fiwoo, 2020)

Por llevar la importancia de la gestión de residuos en una ciudad a números reales, hablamos de que en una ciudad de un millón de habitantes se establecen tres millones de recogidas de residuos domésticos al año repartidos en 33.000 ubicaciones. Además, se necesitan alrededor de 500 camiones para la recogida con un recorrido medio de 85 kilómetros cada día (Nielsen, 2021).

La gestión de residuos abarca un largo procedimiento que consta de varias etapas: generación de residuos, almacenamiento de residuos, recogida de residuos, transporte de residuos y, finalmente, se abren varias posibilidades que abarcan el reciclaje, el tratamiento o la eliminación (McLean & Muswema, 2007). Pese a que esta gestión de residuos dentro de una Smart City puede abarcar numerosos ámbitos como el uso de tecnologías para el correcto reciclado o el reciclaje de materia orgánica como combustible del transporte público (Díaz, 2023), entre otros, este Trabajo se centrará en la recogida de residuos urbanos en contenedores. Además, hay que tener en cuenta que el 80% de los gastos en la gestión de residuos derivan de la recogida de los mismos (Clark, 1975).

La realidad nos indica que los contenedores son recogidos o demasiado pronto o demasiado tarde, estando muy pocos en un punto óptimo de recogida. Veamos los problemas que acarrea una recogida fuera de ese punto óptimo (Nielsen, 2021):

Por un lado, una recogida anticipada genera problemas relacionados con los camiones de recogida. Se generan emisiones de CO<sub>2</sub>, gasto de combustible, tráfico y cortes de calles innecesarios ya que el contenedor no debería vaciarse en ese momento.

Por otro lado, la recogida tardía de los contenedores genera dificultades relacionadas con la contaminación: contaminación visual, contaminación olfativa, ilegal dumping e incremento en gastos de limpieza.

## **2.1. Breve referencia al sistema tradicional de recogida de residuos**

Históricamente, la recogida de residuos ha ido progresando de acuerdo a los avances tecnológicos. Sin embargo, se puede llegar al consenso de que, hasta ahora, las ciudades han sido administradas bajo el paradigma de un sistema de recogida estático (Schimmer, 2023; Anagnostopoulos et. al., 2017).

El principal problema de este sistema es la falta de información del mismo ya que todo se hace a ciegas. La frecuencia y horario de recogida -normalmente a las horas de noche-, la localización de los contenedores, el número de contenedores o el tamaño de los contenedores no impiden el desbordamiento de los contenedores con lo que ello implica: contaminación olfativa o contaminación visual, entre otros (Nielsen, 2021).

El cambio de paradigma a un sistema dinámico ha sido contrastado por numerosos estudios que establecen como principales ventajas: el ahorro de tiempo, el ahorro de distancia, el aumento de capacidad en el transporte de residuos y la reducción de emisiones contaminantes (McLeod et. al., 2014).

Otro aspecto propio de una recogida tradicional de residuos, es el uso de contenedores de ruedas de carga trasera. Este tipo de contenedores tiene una carga muy reducida y genera la necesidad del empleo de dos operarios: un conductor y un trabajador para la carga de los contenedores en el vehículo de recogida. De hecho, en la localidad de pequeño tamaño que

posteriormente analizaremos, se utilizaban este tipo de contenedores en años anteriores (figura 1).



*Figura 1. Contenedores de recogida trasera ubicados en la calle Sol de Villanueva de Córdoba ( Google Maps, 2012).*

## **2.2. Sistemas de recogida de residuos en una Smart City**

Principalmente, nos encontramos con dos tipos de recogida de residuos propios del modelo de Smart City (Bernad, 2016):

Por un lado, el sistema de contenedores soterrados, que se tratan de pequeños contenedores externos que conectan con unos volúmenes soterrados de mayor capacidad. Estos contenedores reducen el impacto visual, la contaminación olfativa y la basura alrededor de los contenedores gracias al aprovechamiento del espacio subterráneo.

Por otro lado, existe el sistema de recogida neumática de residuos. Este modelo consiste en buzones repartidos por las calles en los que, al echar la basura, esta es absorbida por aplicación de vacío en la red estanca de tuberías mediante el accionamiento de unos turboextractores.

Cabe mencionar que existen otros sistemas de recogida de residuos como el puerta a puerta o puntos limpios; no obstante, entendemos que no son de interés en este Trabajo ya que no permiten la generación de rutas óptimas de los vehículos de recogida (Ferrer, 2018).

### **2.3. Relación con Internet of Things**

Una vez hecha esta primera aproximación, hay que introducir el concepto de IoT y su relación con la gestión de residuos en una Smart City. El IoT es un concepto y paradigma que considera la presencia ubicua en el entorno de una variedad de cosas u objetos que, mediante conexiones inalámbricas y por cable y esquemas de direccionamiento únicos, interactúan entre sí y cooperan con otras cosas u objetos para crear nuevas aplicaciones y servicios y alcanzar objetivos comunes (Patel & Patel, 2016). Además, muchos sistemas IoT se basan en estructuras en la nube y se les conoce como CloudIoT y se ayudan del concepto Open IoT. Este último concepto es un proyecto que consiste en un middleware de código abierto para obtener información de las nubes de sensores (alfaIoT, 2022), aunque tenemos que tener en cuenta la información sensible que manejan los ayuntamientos en nuestro caso de estudio. En relación con la gestión de residuos, estas conexiones inalámbricas estarán compuestas, principalmente, del uso de tres distintos tipos de tecnología (Fayomi et. al., 2021):

- a. Tecnología espacial. El uso de sistemas GIS, GPS y RS será clave a la hora de mapear la distribución de los contenedores para su almacenamiento en la base de datos y, de esta manera, poder crear la ruta óptima para el camión de recogida. En este apartado también hay que considerar el uso de dispositivos GPS en los vehículos en el seguimiento de su recogida para un enrutamiento dinámico (Anagnostopoulos et. al., 2017).
- b. Tecnología sensorial. Los sensores son una parte muy importante en una recogida de residuos inteligente ya que introducen en la base de datos la información relativa al estado del contenedor: volumen de llenado, detección de fuego o detección de volcado, temperatura, humedad, reacciones químicas y presión (Nielsen, 2021; Anagnostopoulos et. al., 2017).

c. Tecnología de identificación. A través de la tecnología RFID, el camión de basura podrá identificar correctamente a cada contenedor e individualizar el envío de la información proporcionada por los sensores del contenedor.

En conclusión, el paradigma IoT se centra en la recogida masiva de datos para que, con ellos, se pueda optimizar el recorrido de los camiones de basura en sus labores de recogida. Es, por lo tanto, el primer paso que debe realizarse en el sistema que propone este Trabajo para la localidad de pequeño tamaño.

## **2.4. Esquema de proyecto de gestión de residuos inteligente**

Asentados los conceptos básicos sobre la gestión de residuos en una Smart City y el procedimiento de recolección de datos, es el momento de establecer el esquema básico de un proyecto de gestión de residuos inteligente. En esta primera aproximación, el punto de vista es plenamente técnico. Desde la Universidad de Málaga, se le ha dado una solución a través del sistema BIN-CT (Ferrer, 2018). El modelo (figura 2) consta de cuatro módulos:

### *2.4.1 Módulo de Manejo de Datos*

En este módulo se encontrará la base de datos con la información necesaria del municipio, las posibles rutas realistas de los camiones de recogida y los datos históricos de los sensores.

Respecto a los datos cartográficos, existen varias opciones para utilizar en el proyecto. Por un lado, el estudio que establece este esquema procedimental propone la API de Google Maps, pero hay otros estudios que ofrecen la posibilidad de otras API como Nominatim, parte del proyecto OpenStreetMap (Medvedev et. al., 2015).

### *2.4.2 Módulo de Decisiones Inteligentes*

Este módulo individualizará a cada contenedor para, de esta manera, generar predicciones de llenado de los contenedores a través del Machine Learning.. Para ello se seguirá el procedimiento establecido en un modelo predictivo de Machine Learning: normalización de los datos, análisis de los datos, estudio y aplicación de distintos modelos de

predicción y, por último, comparación de técnicas o modelos de predicción -métricas error- (Ramos Cueli et. al., 2019).

Un modelo predictivo es aquel que establece un valor, estado o resultado haciendo uso de técnicas estadísticas a diferentes datos (decide, 2020). Estos modelos son variados y se diferencian principalmente en las características de exactitud e interpretabilidad. Esto es, aquellos que son más fáciles en cuanto a su interpretación, nos ofrecen datos menos exactos; mientras que los modelos más difícilmente interpretables son más precisos (Luo et. al., 2019). Por otro lado, también se debe establecer una diferencia en función del resultado entre modelos de regresión y clasificación: los modelos de regresión tienen como resultado mientras que los modelos de clasificación, una clase entre un número determinado de ellas (Martínez Heras, ¿Clasificación o Regresión?, 2020). Con este contexto, pasemos a nombrar varios de los modelos más conocidos:

- a. Regresión lineal. Es un modelo que predice el valor de una variable dependiente, llamada  $y$  y representada en el eje vertical mediante el valor de variables independientes o explicativas, llamadas  $x$  y representadas en el eje horizontal. Es un modelo fácilmente interpretable ya que la correlación entre las variables viene dada por el factor de las  $x$ , a lo que se le conoce como betas ( $\beta$ ). No obstante, la precisión de este modelo no suele ser muy correcta. (AWS, 2022)
- b. KNN. El algoritmo KNN, también conocido como  $k$  vecinos más cercanos, en el que se utiliza la proximidad de un punto respecto a otros para predecir su valor gracias a la agrupación con otros valores similares. Un gran problema que tiene este algoritmo es su condición de *lazy learner* que implica un gran gasto computacional en el momento de la predicción (IBM, 2022).
- c. Árbol de decisión. Es un algoritmo que basa la predicción de los valores en variables independientes que se utilizan como datos. La principal característica de este algoritmo es su estructura de árbol que se divide en tres partes: nodos internos, representan las propiedades de entrada; ramas, son condiciones que se establecen a estas propiedades; y nodos finales, son la respuesta a las condiciones (Universidad Internacional de La Rioja, 2021).

- d. Support Vector Machine. El algoritmo SVM, normalmente utilizado para tareas de clasificación, categoriza los datos mediante la separación lineal de los datos con un hiperplano ubicado en un p-dimensional. Cuanto mayor sea el margen establecido por el hiperplano, más óptima será el modelo creado (Martínez Heras, Máquinas de Vectores de Soporte (SVM), 2019).
- e. Red neuronal. Modelo ubicado dentro del Deep Learning que consiste en el uso de nodos o neuronas. Estas neuronas reciben unos valores de entrada que, tras pasar por varias capas de neuronas, se convierten en valores de salida los cuales serán útiles tanto en modelos regresivos como de clasificación (Santana Vega, 2018).

Por otro lado, es interesante también cuestionarse si es mejor una predicción derivada o indirecta del llenado de los contenedores a través de la predicción de la producción de basura de la población o la predicción directa del llenado. El WPR es la tasa de producción de residuos que relaciona la cantidad de residuos generados con una medida temporal, normalmente un año. Esta tasa suele estudiarse en relación a la población, esto es, per cápita (Munizaga Plaza & García de Cortázar, 2013). Está demostrado que WPR actual e histórico están positivamente correlacionados y, por lo tanto, podría ser conveniente hacer una predicción indirecta ya que es más sencillo el acceso a los datos (Ramos Cueli et. al., 2019). Además, se ahorraría batería de los sensores y su vida útil sería más prolongada (Nielsen, 2021).

Finalmente, este módulo también incluirá los criterios de exclusión/inclusión de cada contenedor en las rutas de los camiones de basura. Estos se basarán en la capacidad de los contenedores, la capacidad del camión, el número de camiones, la compatibilidad entre los camiones y los contenedores, el pronóstico realizado y la lectura instantánea de los sensores. Esta última es de difícil inclusión debido a que el uso continuo de los sensores generaría un gasto excesivo de las baterías, como ya se ha dejado entrever en el párrafo anterior.

### *2.4.3 Módulo de Generación de Rutas*

Este módulo recibirá la información del anterior y, con ello, generará las rutas de los camiones de basura a través de un procedimiento de optimización. El principal escollo que podrá encontrarse será la compatibilidad entre el camión y el contenedor.

Siguiendo con el desarrollo de este módulo, es en el que nos encontramos ante el problema del viajante o del viajante de comercio (Ramos Cueli et. al., 2019). El TSP es uno de los problemas de optimización combinatoria más populares y consiste en *determinar el circuito óptimo que tiene que hacer un Viajante que partiendo desde un origen debe visitar n ciudades una y solo una vez, volviendo al punto de partida*. Es un problema de tipo NP-duro, lo cual significa que se da una complejidad exponencial en cuanto al tiempo necesario para encontrar soluciones. Por lo tanto, nos encontramos con que el factor tiempo computacional es clave a la hora de resolución de este problema. A lo anterior hay que añadirle que se trata de un TSP asimétrico ya que las distancias entre los contenedores no son igual a la ida que a la vuelta por las propias necesidades del tráfico de la ciudad (UCA, 2015). Es por ello que parte del sector científico opta por el uso de algoritmos heurísticos, los cuales ofrecen soluciones cercanas a la óptima en un menor tiempo computacional (Martinez & López, 2018). Dentro de los tipos de TSP, se encuentra el VRP y, entre sus subtipos, podemos hablar del CVRPTW. El CVRPTW tiene en cuenta varios factores: capacidad uniforme de los vehículos, demanda conocida, horarios determinados y punto de inicio y llegada determinado (LocalSolver, 2021). Por último, hay que diferenciar entre los diferentes tipos de CVRPTW que existen: (i) de envío: desde un mismo punto salen vehículos a dejar mercancías en diferentes destinos, (ii) de recogida: problema en el que se deben recoger mercancías de varios puntos, y (iii) de cargamento: los vehículos recogen mercancías de varios puntos para llevarlos a uno en concreto. En este caso, nos encontramos ante un CVRPTW de cargamento (Idwan et. al., 2020).

Relacionando los algoritmos heurísticos con el VRP, se ha generalizado el uso de un tipo concreto de algoritmo heurístico para resolver el problema ante el que nos encontramos: el algoritmo genético o GA. El GA establece una población de soluciones y un proceso reproductivo que permite seleccionar las mejores soluciones, esto es, el algoritmo se basa en ofrecer soluciones descendientes que presentan características de cada progenitor acercándose, cada vez en mayor medida, a una solución casi óptima. Para ello, se parte de unas posiciones individuales llamadas genes mientras que a la cadena de a la representación de cada solución se le denomina cromosoma. El GA ha sido tradicionalmente utilizado para resolver el GAP, pero desde el sector científico se defiende su aplicabilidad también para resolver el VRP (Baker & Ayechev, 2003).

Hay numerosos proyectos comerciales y de código abierto que han intentado poner una solución al TSP. Una de las más importantes es el paquete JSPLIT, la cual está basada en Java.

JSPRIT es un conjunto de resolución de problemas, entre los que destacan aquellos que son de interés en este Trabajo: TSP y VRP. Las principales ventajas de este paquete son su ligereza, flexibilidad y facilidad de uso. En este sentido, GraphHopper ha creado una plataforma de pago mensual que resuelve estos problemas y permite calcular las rutas óptimas para los camiones de recogida de residuos (Anagnostopoulos et. al., 2017).

Finalmente, este módulo enviará la información de las rutas óptimas al primer módulo para que los datos sean almacenados correctamente.

#### 2.4.4 Módulo de Visualización

A través de una plataforma provista al Ayuntamiento o a la empresa que tiene adjudicada la concesión de la gestión de residuos, se podrá acceder a las rutas generadas en el módulo anterior en un mapa navegable. Existe software de todo tipo para realizar estas tareas, destacando PowerBi, entre otros.

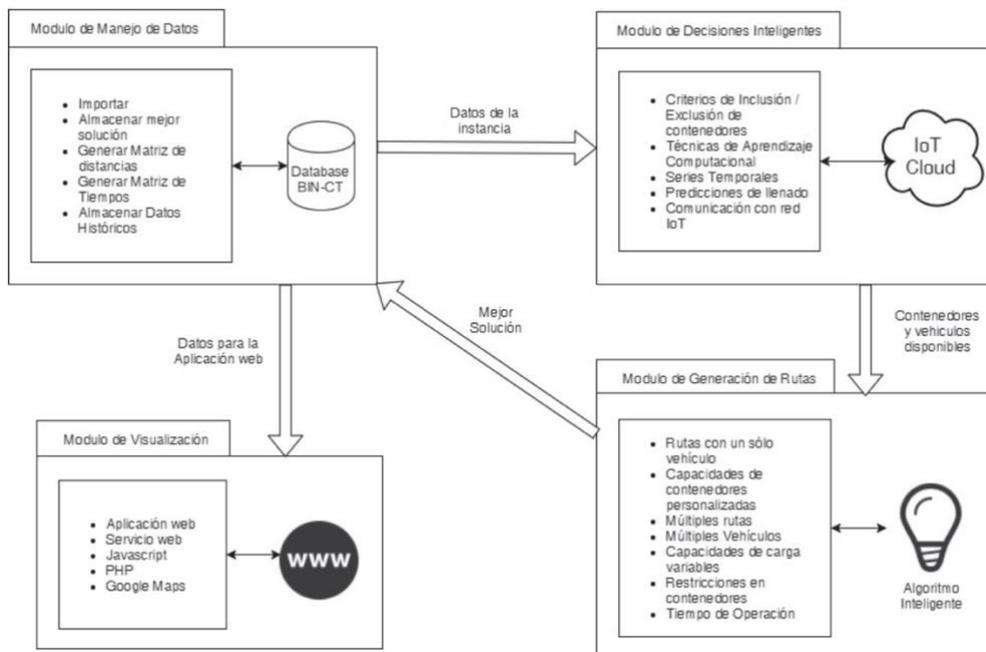


Figura 2. Esquema de proyecto de recogida de residuos urbanos inteligente (Ferrer, 2018)

## 2.5. Otra visión esquemática del proyecto

Desde el sector científico extranjero, se nos da otro punto de vista relativo al esquema de un proyecto de recogida inteligente de residuos urbanos que se relaciona con la visión del inversor en un proyecto de este tipo. En este caso, el proyecto es dividido en tres subconjuntos (Anagnostopoulos et. al., 2015):

### 2.5.1 *Infraestructura física*

Este subapartado contiene todo lo relativo a los contenedores y camiones de recogida. Por un lado, las características de los contenedores, sus sensores y los dispositivos de WSN; por el otro, las propiedades del vehículo de recogida y los dispositivos equipados para realizar la ruta como navegadores o smartphones. Dentro de las redes disponibles para el uso de los dispositivos WSN, se encuentran: NB-IoT, sigfox, GSM, LoRa o Cat-M (Adalid, 2020).

### 2.5.2 *Middleware*

Está compuesto por el OpenIoT, Cloud IoT y lo que en el modelo anterior hemos reconocido como módulo de manejo de datos; esto es, en el middleware se almacena toda la información relativa al proyecto. En este subapartado se incluye también la información GPS de los camiones en ruta.

Por otro lado, el middleware también contiene los modelos de rutas dinámicas, esto es: los modelos predictivos, los criterios de inclusión/exclusión y los algoritmos optimizadores.

### 2.5.3 *DSS*

El DSS es la última parte de la pirámide en la que se basa este esquema y se encarga tanto de enviar indicaciones de ruta a los conductores a través de una aplicación como de elaborar informes y estadísticas para las partes interesadas del municipio. Se podría decir que el DSS es la parte relacionada con la visualización del proyecto y que se ve involucrada en la toma de decisiones respecto del mismo. Además, es la parte del proyecto que pone en común las aportaciones de los distintos *stakeholders* involucrados lo cual va en consonancia con la generación de esos modelos asociativos ya comentados anteriormente.



Figura 3. Esquema piramidal (Anagnostopoulos et. al., 2015).

## 2.6. El SaaS en la recogida de residuos

En los apartados anteriores se ha explicado el esquema que tiene un proyecto de recogida de residuos inteligente, pero son muy numerosas las empresas del mercado que proveen de un servicio completo que compone todo el procedimiento ya explicado: es a lo que se le conoce como SaaS. Este tipo de empresas ofrecen productos que abarcan todos los módulos del esquema procedimental establecido en este Trabajo, incluso se dedican a la venta de los sensores de llenado y de las etiquetas RFID; esto es, lo que se le conoce como HaaS (Sensoneo, 2023). También hay software en el mercado que ofrecen soluciones más específicas como la optimización de rutas, por ejemplo, el software GraphHopper ya mencionado en el apartado 2.4.5.

## 3. LA RECOGIDA DE RESIDUOS INTELIGENTE: EL CASO DE GRANADA

La gestión de residuos inteligente es una forma de optimizar una de las labores principales de un Ayuntamiento en el ejercicio de su actividad administrativa de prestación tal y como establece el artículo 26 de la Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases del Régimen Local (Boletín Oficial del Estado, 1985). En Granada (España), se ha puesto en marcha un proyecto pionero en colaboración con Ferrovial Servicios y Cisco para implantar un modelo de Smart City en la gestión de residuos.

Granada es un municipio ubicado al este de la comunidad autónoma de Andalucía y cuenta con una población de 228.682 habitantes (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2022), situándose como la decimosexta capital de provincia más poblada de España (Fernández, 2022).

La prestación del servicio público de recogida de residuos urbanos se realiza en régimen de gestión indirecta por una sociedad de capital mixta llamada INAGRA, cuyo 20 por ciento pertenece al Ayuntamiento de Granada. La sociedad está controlada por la empresa privada PreZero desde 2004 (INAGRA, 2023).

Además, como ya se ha comentado en el apartado 1.1. del presente Capítulo, en Granada se da un modelo asociativo entre el propio Ayuntamiento y empresas tecnológicas del sector (Ferroviaal Servicios, Cisco e INAGRA) para así ofrecer un mayor abanico de soluciones al problema de la recogida de residuos.

### **3.1. El esquema procedimental de la recogida de residuos en Granada**

Desde INAGRA, se impulsó un laboratorio urbano que utiliza sensores en los contenedores y una plataforma de la ciudad que analiza los datos y propone soluciones eficientes. El procedimiento comenzó con la sensorización de los contenedores -en primer lugar, los de vidrio- de los barrios de Ronda, Zaidín, Genil, Beiro, Chana y Norte para luego ampliarse al resto de la red de contenedores (Residuos Profesional, 2017). Se han considerado estos barrios por su carácter periférico para así analizar la operabilidad y funcionamiento de una mejor manera (Ecovidrio, 2019).

Parece conveniente explicar el procedimiento que sigue la recogida de residuos en Granada según el esquema desarrollado en el apartado 2.3. del Capítulo 2.

En relación con el IoT, el Ayuntamiento utiliza sensores en cada contenedor que consisten en un pequeño dispositivo instalado en la parte superior del contenedor (para evitar que se dañe durante el llenado y vaciado del contenedor) que mide aquellos objetos que se encuentran entre 25 y 300 centímetros de distancia con un margen de error de 2 centímetros mediante ultrasonidos (Ecovidrio, 2019). La tecnología espacial también es usada a través de

GPS en los navegadores integrados en los camiones de recogida. Todo este sistema está desplegado por Cisco.

Una vez comentados los dispositivos IoT utilizados, pasaremos a analizar el esquema procedimental en estricto, en el cual interviene la empresa Ferroviaal Servicios. El módulo de manejo de datos almacena los datos relativos a la ciudad de Granada y recibe la información histórica de los sensores instalados en los contenedores granadinos. Para el transvase de información de los sensores, Cisco ha desarrollado una tecnología LoRa que consiste en la comunicación vía radiofrecuencia de los sensores con la plataforma IoT para luego almacenar los datos recogidos en la base de datos. Además de los sensores volumétricos, a través de esta tecnología también se recogen datos meteorológicos, de tráfico o de eventos puntuales que impliquen el corte de calles que serán también almacenados en la base de datos del proyecto (Ecovidrio, 2019).

En segundo lugar, el módulo de decisiones inteligentes recibe la información anterior y realiza modelos predictivos para que, de esta manera, el servicio se anticipe a cubrir la demanda de cada día. El criterio de inclusión/exclusión del proyecto es el siguiente: cuando el sensor detecta que el contenedor está al 70 por ciento de su capacidad, incorpora este a la ruta del vehículo de recogida.

Siguiendo con el esquema, el módulo de generación de rutas crea los recorridos óptimos para cada camión de recogida. Finalmente, el módulo de visualización del proyecto consiste en la representación de las rutas en navegadores instalados en los vehículos de recogida a través de un sistema de navegación a bordo (Bernad, 2016).

### **1.1. Objetivos y resultados**

En primer lugar, se debe tener en cuenta que el proyecto de gestión de residuos inteligente en la ciudad de Granada se enmarca dentro de la Agenda 21 Local, un Plan de Acción Global para el Desarrollo Sostenible que fue aprobado por 173 gobiernos en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992 (la conocida como Cumbre de la Tierra). Este plan establece un compromiso a todos los niveles de la Administración y, por tanto, uno de los enfoques tiene que ser desde

el punto de vista local, surgiendo el concepto de Agenda 21 Local (Echebarría Miguel & Aguado Moralejo, 2003).

El objetivo del proyecto era reducir hasta un 30% la emisión de gases contaminantes de los vehículos del servicio, mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y avanzar hacia la economía circular (IndeGranada , 2017).

Los resultados del proyecto granadino han sido los siguientes (Bernad, 2016):

- Conseguir una mejor ciudad. Se ha conseguido tener una ciudad más limpia y a menor coste gracias a la optimización de las rutas de los camiones. Además, se comentan otros beneficios relacionados como la mejora del tráfico, menor contaminación acústica y mejora de la calidad del aire debido a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Impulso digitalizador del Ayuntamiento de Granada. El Ayuntamiento actúa como ejemplo a seguir en las nuevas exigencias tecnológicas y ofrece mayor transparencia en la realización de los servicios encomendados.
- Mejor adaptación a posibles problemas en la realización del servicio.

#### 4. LOS BENEFICIOS DE LA RECOGIDA DE RESIDUOS INTELIGENTE

A pesar de que ya hemos comentado algunos de los beneficios en el punto anterior, conviene recoger en este apartado todas las ventajas que tiene la aplicación de un modelo de gestión inteligente de los residuos en una Smart City (Nielsen, 2021):

- Ahorro económico al optimizar el uso del combustible, el mantenimiento y la vida útil de los vehículos y contenedores. Este beneficio es comentado en primer lugar ya que es aquel más importante de entre todos. El ahorro económico que supone la gestión inteligente de residuos es aquello determinante que puede hacer que el ayuntamiento opte por aplicar el paradigma de Smart Cities en este ámbito.
- Eficiencia energética y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al disminuir el número y la distancia de los viajes de los camiones recolectores.

- Mejora en la calidad del servicio al adaptar la frecuencia y el horario de recogida a las necesidades reales de cada zona y evitar el desbordamiento o vaciado innecesario de los contenedores.
- Mayor participación ciudadana al facilitar el acceso a la información sobre el servicio, las buenas prácticas ambientales y las iniciativas para fomentar la reducción, la reutilización y el reciclaje de los residuos.
- Transparencia y rendición de cuentas al disponer de indicadores objetivos que permitan evaluar el cumplimiento de los objetivos ambientales, sociales y económicos establecidos.
- Bajada del riesgo de dolor de hombro de los trabajadores que participan en la recogida de residuos sólidos urbanos (Cejudo et. al., 2021).

### **CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS INTELIGENTE A LOCALIDAD DE PEQUEÑO TAMAÑO**

El objetivo de este Trabajo es estudiar la viabilidad de la aplicación del modelo de gestión de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño. Esto es, pese a que una nota definitoria de una Smart City sea un elevado índice de densidad poblacional, en este Trabajo se intentará aplicar el modelo a una localidad del entorno rural con los mismos objetivos que tiene la Smart City: mejorar la vida del ciudadano unido a la protección del medio ambiente. Para ello, se ha seleccionado como ejemplo a Villanueva de Córdoba.

#### **1. EL CASO CONCRETO DE VILLANUEVA DE CÓRDOBA: SITUACIÓN ACTUAL**

Villanueva de Córdoba es un municipio ubicado al norte de la provincia de Córdoba, en la zona de Los Pedroches (Ocaña Prados, 2007). La corporación municipal solo se compone de un núcleo urbano que tiene una población de 8.587 habitantes (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2022), aunque hay que tener en cuenta la despoblación del entorno rural ya que el decrecimiento demográfico en la zona es del todo evidente.

En relación a la gestión de residuos de Villanueva de Córdoba, está actualmente gestionada por Empresa Provincial de Residuos y Medio Ambiente S.A., dependiente de la Diputación Provincial de Córdoba. Para ello, el Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba firmó un Convenio con EPREMASA en 2021 que entró en vigor en enero de 2022 y estará vigente

por cuatro años (Pleno Municipal del Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba, 2021). En el Anexo II del Convenio mencionado, aparece la distribución de los contenedores soterrados a lo largo del municipio lo cual aparece en la siguiente imagen:



*Figura 4. Localización de los contenedores en Villanueva de Córdoba (Elaboración propia)*

En cuanto a EPREMASA, esta empresa se encarga de la Gestión Integral de los Residuos Urbanos (GIR) generados en la provincia de Córdoba, que incluye la recogida, el transporte, el tratamiento y el reciclaje de los residuos domiciliarios y municipales. La empresa pública no solo limita su función a acuerdos con las corporaciones locales, sino que ofrece también a la ciudadanía un servicio de recogida de muebles, enseres y voluminosos e, incluso, instalación de contenedores privados (Diputación de Córdoba, 2020).

EPREMASA recoge residuos en 70 de los 77 municipios de la provincia de Córdoba, cubriendo una extensión de 11.000 km<sup>2</sup> con una población de 390.000 personas, exceptuando a la capital. Para la recolección de residuos, se cuenta con una flota de 80 camiones y más de

15.000 contenedores (El Día de Córdoba, 2022). Cada contenedor dispone de un dispositivo electrónico de identificación que en comunicación con el camión por radio frecuencia, deja registrada la recogida, el lavado y mantenimiento (Diputación de Córdoba, 2016).

Tras la recogida, los residuos llegan a las plantas de transferencia de residuos, que actúan como punto intermedio para terminar llegando al Complejo Medioambiental de Montalbán, planta que se encuentra 124 km de la localidad que es objeto de estudio en el Trabajo. El Complejo cuenta con dos líneas de tratamiento: la primera, se encarga de la separación de los envases recogidos en toda la provincia; y, la segunda, realiza el tratamiento de la fracción orgánica y resto.

Finalmente, los subproductos generados en el Complejo Medioambiental son trasladados a los recicladores para su segundo uso (EPREMASA, 2023).

En este estudio nos parece de mayor relevancia el estudio de la recogida de residuos por las grandes diferencias que existen entre una gran ciudad donde se aplican las tecnologías propias de las Smart Cities y un municipio de pequeño tamaño en un entorno rural.

## 2. VIABILIDAD DE LA APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO EN LA LOCALIDAD DE PEQUEÑO TAMAÑO

### 2.1. Contexto actual

A modo de introducción, hay que establecer una serie de circunstancias que posibilitan el cuestionamiento sobre la aplicación del modelo de recogida de residuos inteligente en Villanueva de Córdoba.

En primer lugar, el modelo óptimo requiere de una recogida en contenedores, encontrándose en el justo medio entre la recogida en bordillo y los puntos limpios (Ferrer, 2018). Villanueva de Córdoba goza de una infraestructura correcta y en donde, además, se ha realizado una reciente inversión en contenedores soterrados. En suma a todo esto, tal y como se muestra en las figuras 5 y 6, los contenedores de la localidad están correctamente preparados para una recogida lateral, la cual consiste en que el contenedor es levantado por el lateral del camión y, de esta manera, se evitan posibles accidentes de los operarios en levantamientos traseros que podrían generar lesiones de hombro (Cejudo et. al.,2021). A esto hay que sumarle

la correcta delimitación en la acera de los contenedores para evitar la inaccesibilidad al contenedor a causa de vehículos estacionados (Anagnostopoulos et. al., 2017).



Figura 5. Contenedores ubicados en la calle Cruz de Piedra de Villanueva de Córdoba (Google Maps, 2022).



Figura 6. Contenedores ubicados en la calle San Antonio de Villanueva de Córdoba (Google Maps, 2022).

En segundo lugar, también hay que tener en cuenta la mancomunidad de la gestión de residuos en el contexto de la localidad cordobesa. Este hecho es favorable a la implantación de un sistema de recogida de residuos inteligente gracias a la escalabilidad del mismo. Ya de por sí es favorable para el medio ambiente y en el aspecto económico la mancomunidad del

servicio y, además, lo hace asimilable al contexto de una gran ciudad en cuanto al número de habitantes, contenedores y distancia recorrida. En este sentido, hay que tener en cuenta que EPREMASA administra el servicio para más de 390.000 personas.

## **2.2. Esquema procedimental**

Por otro lado, hay que plantear el esquema del proyecto que se realizará en la localidad de Villanueva de Córdoba. Como se ha desarrollado *supra*, el proyecto constará de cuatro módulos que se desarrollarán a continuación.

### *2.2.1 Módulo de Manejo de Datos*

En primer lugar, hay que tratar la recolección de los datos que se va a dar en nuestro proyecto. Por un lado, los datos estáticos estarán proporcionados por el Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba y la empresa encargada de la gestión de residuos en la localidad, esto es, EPREMASA. A modo de ejemplo, la localización de los contenedores es un dato de información pública ya que fue debatido en el Pleno Municipal (2021). No obstante, hay datos no públicos que están en las manos del Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba y EPREMASA como el volumen de los contenedores o la carga máxima de los vehículos de recogida. . A modo de ejemplo, la información relativa al tiempo medio de recogida será obtenida mediante los dispositivos electrónicos de identificación ya instalados en los contenedores que registran, entre otros datos, la recogida de cada contenedor (Diputación de Córdoba, 2016).

En segundo lugar, los datos históricos del volumen de llenado de los contenedores serán recogidos a través de la instalación de sensores de llenado en cada uno de los contenedores del municipio. Un ejemplo de ellos son los instalados en Granada, los cuales miden objetos a una distancia entre 25 y 300 centímetros con un error de 2 centímetros (Ecovidrio, 2019) mediante el uso de ultrasonidos. Es importante llegados a este punto establecer que la distancia máxima de medida de los sensores se corresponda con las medidas del contenedor. La información que se transmite de los sensores a la base de datos a través de un sistema de radiofrecuencia, llegará en centímetros, por lo que habrá que transformar estos datos en información relevante para nuestro proyecto. Utilizando el caso de Granada a modo de ejemplo, cuando el sensor transmita la información de 300 centímetros, entenderemos que el volumen de llenado es igual a 0 litros,

en cambio cuando se transmita la información de 137,5 centímetros, el volumen de llenado será igual a la mitad de la capacidad total del contenedor (tengamos en cuenta que 25 centímetros es un llenado completo aunque la información real sea que se encuentra cerca del llenado).

Como hemos advertido anteriormente, este módulo contendrá toda la información relativa al proyecto. Una parte importante de este módulo será la creación de una base de datos. En este Trabajo se propone la creación de un modelo híbrido de base de datos propio de las necesidades dinámicas de nuestro proyecto y de la estabilidad de cierta información en el mismo (Goyal et. al., 2015).

Por un lado, hay que establecer la parte del esquema de la base de datos que se basará en un modelo relacional. Esta será la información relativa a los vehículos de recogida y a los contenedores que poseerán un esquema estático y, con ello, se tratará de respetar las propiedades ACID del modelo relacional: atomicidad, consistencia, aislamiento y durabilidad. Esta información puede ser recogida en dos tablas diferenciadas -una para los vehículos y otra para los contenedores- que recojan todas las características propias de cada uno. Además, hay que tener en cuenta que, a la hora de realizar un modelo predictivo sobre los datos de los contenedores, este será más fácil si se tienen los datos de los mismos de una manera estructurada. En este ámbito, puede ser interesante el uso de plataformas como MySQL para la creación de esta parte de la base de datos.

Por otro lado, el uso de las tecnologías IoT y de algoritmos de optimización de rutas hacen que parte de la base de datos tenga que tener las características propias de un modelo no relacional. Hay que tener en cuenta que los datos relativos a las rutas de los camiones serán completamente no estructurados ya que el número de paradas será heterogéneo en cada uno de los casos. Para la gestión de esta parte de la base de datos podría hacerse uso de la plataforma MongoDB, la cual permite el almacenamiento de datos geográficos (Herrera-Ramírez et. al., 2021).

No obstante, y de acuerdo con ofrecer un sistema lo más simplificado, para la creación y administración de la base de datos del proyecto se recomienda el uso de la plataforma PostgreSQL, la cual se adscribe tradicionalmente a modelos relacionales; sin embargo, ha

venido incorporando funcionalidades que permiten el almacenamiento de archivos JSON y otros propios de los modelos no relacionales.

### 2.2.2 *Módulo de Decisiones Inteligentes*

Este módulo contendrá un modelo predictivo del volumen de llenado de los contenedores y el criterio de inclusión/exclusión de la ruta de los camiones de recogida de Villanueva de Córdoba. En concreto, nos centraremos en el desarrollo del modelo predictivo realizado en este proyecto.

En primer lugar, se ha realizado una tabla con los datos de la ubicación de los contenedores en Villanueva de Córdoba. En la localidad se encuentran dos tipos diferenciados de contenedores soterrados: residuos orgánicos y envases ligeros (Pleno Municipal del Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba, 2021). En la aproximación que ofrece este Trabajo, utilizaremos la información de los contenedores soterrados de residuos orgánicos. Hay que tener en cuenta la naturaleza de estos residuos y los malos olores que generan pese a encontrarnos en una recogida a través de contenedores soterrados. Además, nos encontramos en una localidad de la provincia de Córdoba donde las temperaturas se incrementan notablemente durante los meses de verano. Por lo tanto, en una primera respuesta al planteamiento, se debe mencionar la recogida diaria de los residuos orgánicos durante los meses de verano para evitar una contaminación olfativa excesiva.

Por otro lado, no se tienen datos sobre la capacidad de los contenedores soterrados de la localidad, por lo que se usará la capacidad media establecida por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021) de 4.000 litros.

En el proyecto final, los datos que se quieren utilizar para la creación de este modelo predictivo estarán separados en dos tablas diferenciadas: una llamada CONTENEDORES y otra tabla llamada HISTÓRICO\_CONTENEDORES. Ambos datos se ubicarían en la parte de modelo relacional de la base de datos. Esto se realizaría con el fin de mantener estables los datos de la primera y tan solo alterar la estructura de la segunda tabla mediante la sentencia ALTER TABLE. Para una mayor agilidad en este trabajo, se trabajará sobre estas tablas creados en Excel que contendrán una información, tal y como se explicará a continuación.

Por otro lado, no se disponen de datos sobre el histórico de cantidad de basura en cada uno de los contenedores de la localidad. Simplemente se dispone de un dato de 2013 por el que se estableció que la cantidad media de residuos generados en el municipio por habitante era de 1,013 kilogramos por habitante cada día (Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba, 2015); por lo que la creación arbitraria de los datos se corresponderá en torno a este parámetro. Para pasar nuestras aproximaciones a litros, de acuerdo con los datos que recogerán los sensores de llenado instalados en cada contenedor, se utiliza un multiplicador el cual establece que un litro de residuos corresponde a 0,1335 kilogramos, según la tabla de equivalencias realizada por el Agencia de Protección Medioambiental de EE.UU. (2016). También se tendrá en cuenta la estacionalidad de los datos; esto es, dependiendo de la zona, el porcentaje de viviendas no habituales en Villanueva se sitúa en torno al 30% (Instituto Nacional de Estadística, 2011) por lo que recibe más población en los meses estivales. Por tanto, tiene sentido que haya un aumento en la generación de basura durante el verano. Por otro lado, hay que tener en cuenta la progresiva reducción de la población rural, hecho que también afecta a la localidad cordobesa. Según datos del INE (2022), la población de Villanueva de Córdoba ha pasado de 9.326 a 8.587 habitantes en los últimos diez años y entendemos que esto también ha repercutido sobre las cantidades de residuos generados.

Hay que tener en cuenta que este modelo predictivo nos dará poca información ya que los datos no son reales. En este Trabajo se trata de establecer la implantación de un proyecto de gestión de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño y la creación de un modelo predictivo del llenado de los contenedores es un paso más. Esto es, la finalidad de este Trabajo es establecer la manera en la que tiene que proceder la implantación de un sistema de recogida de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño y los problemas adjuntos al mismo.

Para la elaboración del modelo predictivo se utilizará RStudio un software de código abierto que utiliza R como lenguaje programación (Kent State University, 2023). La elaboración de todo el modelo predictivo y de los datasets utilizados se encuentran ubicados en la plataforma GitHub, con acceso mediante el siguiente enlace: [https://github.com/jtorralborojas/TFG\\_analytics/](https://github.com/jtorralborojas/TFG_analytics/).

El procedimiento de creación del modelo predictivo es el siguiente:

En primer lugar y, a modo de simplificación, se utiliza el paquete *readxl* para pasar los datos del histórico de contenedores y de los contenedores de Excel a RStudio. Para ello, se utiliza la función *read\_excel* con la que se obtienen los datos del dataset “contenedores\_previo” (la cual contiene la información estática relativa a los contenedores) e “historico\_contenedores” (este dataset recoge los datos de las cantidades recogidas en cada uno de los contenedores en 9 tomas). En la elaboración del proyecto completo de gestión de residuos inteligente, estos datos se recogerán directamente de la parte de la base de datos creada en MySQL y, por lo tanto, habrá que utilizar el paquete *RODBC*. Dentro de esta, habrá que llamar primero a la función *odbcConnect* para conectar RStudio con la base de datos determinada mediante la introducción del usuario y contraseña y, finalmente, hacer uso de la función *sqlFetch* para tener utilizar la información de los contenedores y su histórico en RStudio. Otra opción alternativa para realizar todo este procedimiento es unir ambas tablas de datos en mediante una sentencia de MySQL usando INNER JOIN e importar los datos a un csv que será nuestro dataset.

Una vez tenemos los dos datasets en R, los unimos mediante la función *inner\_join* de *dplyr* creando el dataset “contenedores”. El dataset creado consta de las siguientes variables:

- a. “RFID”. Variable numérica discreta que da el valor del código de identificación del contenedor el cual se obtiene mediante el sistema de radio frecuencia ya mencionado anteriormente. Este código está compuesto por números y es único para cada contenedor (Amsler & Shea, 2021). Los números RFID de cada contenedor serán creados de forma arbitraria.
- b. “LATITUD”. Variable numérica continua que contiene la primera coordenada geográfica del contenedor medida en grados. Su valor se encuentra limitado entre -90 y 90.
- c. “LONGITUD”. Variable numérica continua que contiene la segunda coordenada geográfica del contenedor medida en grados. Su valor se encuentra limitado entre -180 y 180.

d. “CAPACIDAD”. Variable numérica continua -pueden existir contenedores de cantidades diversas- que establece el límite máximo de capacidad del contenedor. Como se ha explicado anteriormente, se utilizará la medida de 4.000 litros por cada contenedor soterrado que esté ubicado en cada localización.

e. “DENSIDAD\_POB”. Variable numérica continua que contendrá la densidad poblacional calculada dividiendo el número de habitantes entre el número de hogares del barrio en el que esté ubicado cada contenedor según los datos del censo del INE de 2011.

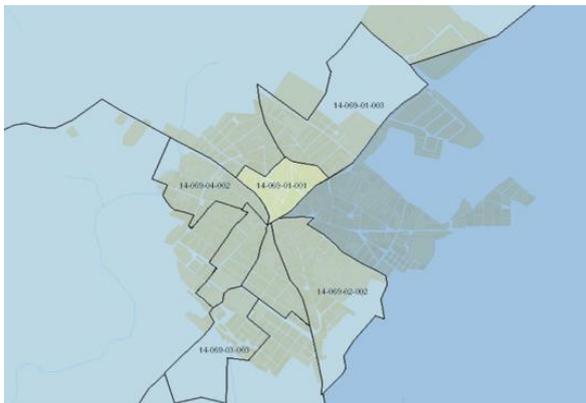


Figura 7. Densidad poblacional en Villanueva de Córdoba (Instituto Nacional de Estadística, 2011).

f. “VIVIENDA\_PPAL”. Variable numérica continua que recoge los datos del porcentaje de viviendas principales según los datos del censo del INE de 2011. Es un dato que recoge la información sobre la población estacional del municipio. Su valor se encuentra entre el 0 y el 100.

g. “TIEMPO\_MEDIO\_RECOGIDA”. Variable numérica continua la cual es el objeto de estudio o variable target. Mide en días el tiempo medio de recogida de cada contenedor. Este tiempo es interesante de estudio ya que se corresponde con los momentos en los que el volumen de llenado de cada contenedor llega a su pico.

h. “BASURA\_EN\_2019”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de enero del 2019 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.

- i. “BASURA\_JUL\_2019”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de julio del 2019 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.
- j. “BASURA\_EN\_2020”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de enero del 2020 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.
- k. “BASURA\_JUL\_2020”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de julio del 2020 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.
- l. “BASURA\_EN\_2021”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de enero del 2021 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.
- m. “BASURA\_JUL\_2021”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de julio del 2021 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.
- n. “BASURA\_EN\_2022”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de enero del 2022 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.
- o. “BASURA\_JUL\_2022”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de julio del 2022 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.
- p. “BASURA\_EN\_2023”. Variable numérica continua que mide la cantidad de residuos orgánicos en litros depositados en el mes de enero del 2023 en cada contenedor. Los valores de esta variable siempre serán positivos.

A continuación, se han creado histogramas de cada una de las variables para comprender de mejor manera cada una de ellas mediante la función *hist*. También se crea una matriz de correlación con la función *cor* y se plotea mediante la función *ggcorrplot* del paquete *ggcorrplot*.

Los histogramas de latitud y longitud pueden comentarse conjuntamente. Ambos presentan valores cercanos a las medias (38,22 y -4,627, respectivamente), las cuales coinciden con las medianas (38,22 y -4,627, respectivamente). Esto nos quiere decir que los contenedores se localizan alrededor del centro del pueblo, información que nos parece coherente.

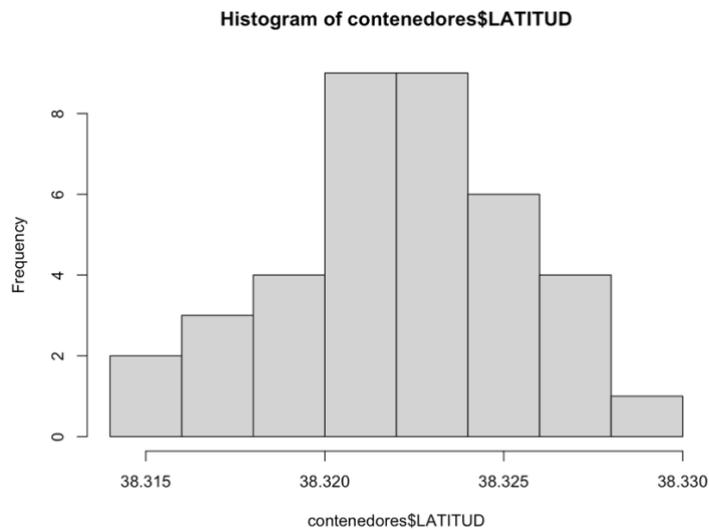


Figura 8. Histograma de la variable "LATITUD" (Elaboración propia).

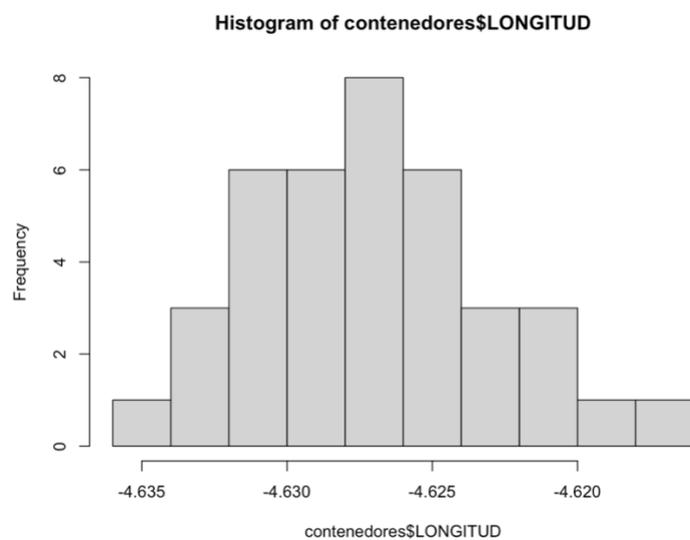


Figura 9. Histograma de la variable "LONGITUD" (Elaboración propia).

El histograma de capacidad muestra a todos los valores situados en 4000 excepto las dos localizaciones en las que la capacidad es igual a 8.000. Los valores se localizan alrededor de la mediana ya que la media se encuentra distorsionada por los dos contenedores de mayor capacidad.

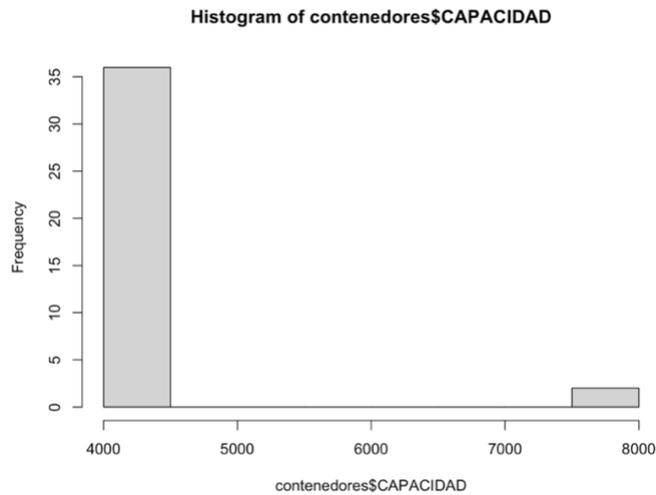


Figura 10. Histograma de la variable “CAPACIDAD” (Elaboración propia).

La densidad poblacional se concentra en torno a valores cercanos a su media y mediana con la excepción de valores de 3,24 recogidos en uno de los barrios de Villanueva de Córdoba.

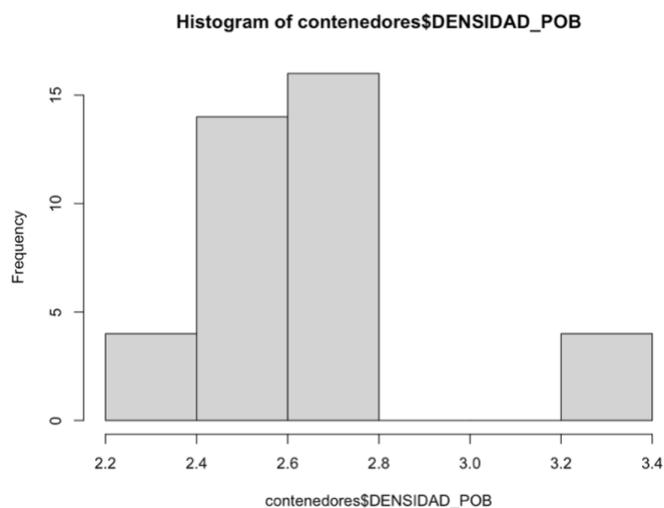


Figura 11. Histograma de la variable “DENSIDAD\_POB” (Elaboración propia).

El histograma de porcentaje de vivienda principal sitúa a los valores cerca de la media y la mediana, con la excepción de uno de los barrios en los que se da un porcentaje del 92,70%.

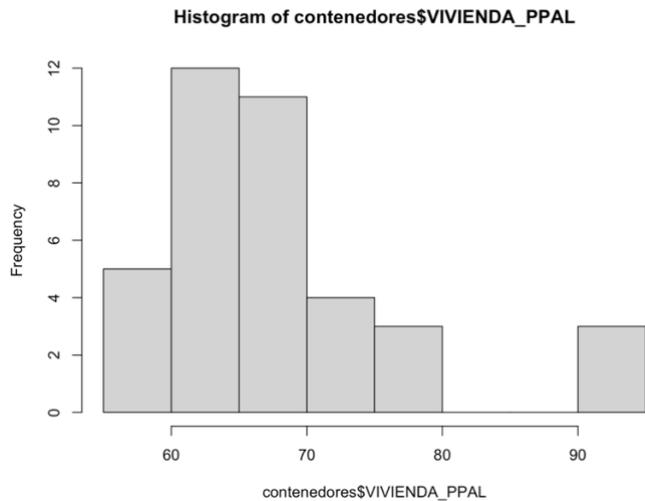


Figura 12. Histograma de la variable “VIVIENDA\_PPAL” (Elaboración propia).

Los datos del tiempo medio de recogida se reparte de una manera más equitativa que lo visto en los anteriores histogramas; no obstante, la media se encuentra movida hacia la izquierda de la mediana por valores que han informado de una recogida más temprana. Por otro lado, hay que comentar las circunstancias que rodean a nuestro caso. Se trata de una localidad ubicada en el sur de España, donde se alcanzan temperaturas muy altas durante los meses de verano. Por lo tanto, a pesar de que una futura predicción nos informe de valores cercanos a tres o incluso cuatro días, esta información debe ser apartada y procurar una recogida diaria.

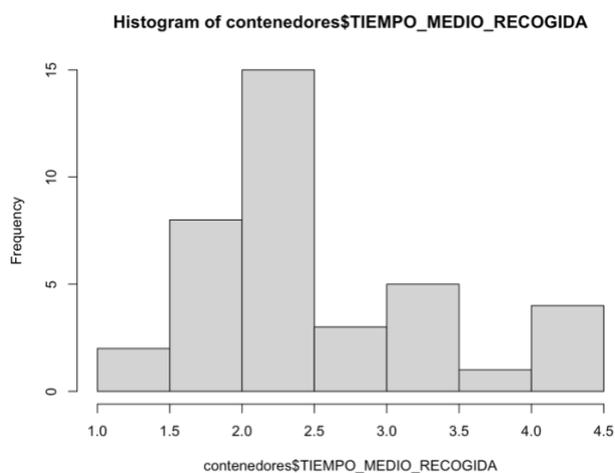


Figura 13. Histograma de la variable “TIEMPO\_MEDIO\_RECOGIDA” (Elaboración propia).

Los siguientes histogramas se pueden ver conjuntamente ya que la información es relativamente parecida: las tendencias de generación de residuos de cada uno de los contenedores son similares. Hay que tener en cuenta que los valores que se encuentran alejados de la media y la mediana son aquellos contenedores que tienen una capacidad mayor que el resto de observaciones.

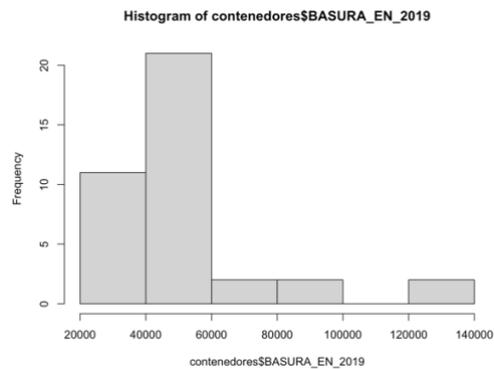


Figura 14. Histograma de la variable “BASURA\_EN\_2019” (Elaboración propia).

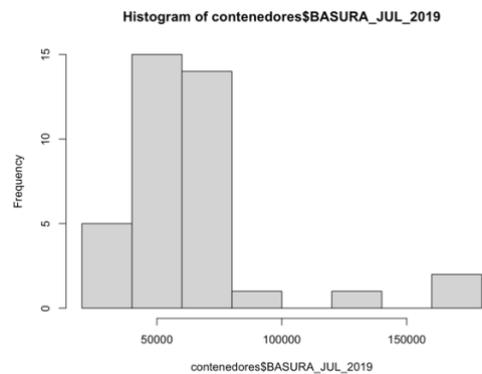


Figura 15. Histograma de la variable “BASURA\_JUL\_2019” (Elaboración propia).

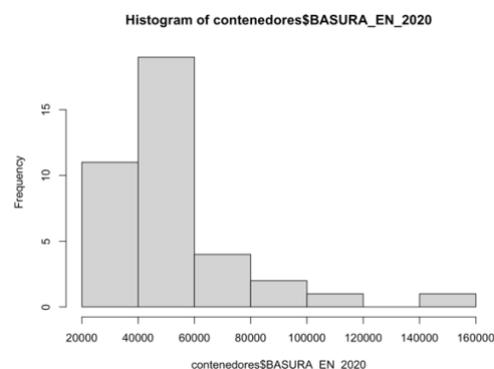


Figura 16. Histograma de la variable “BASURA\_EN\_2020” (Elaboración propia).

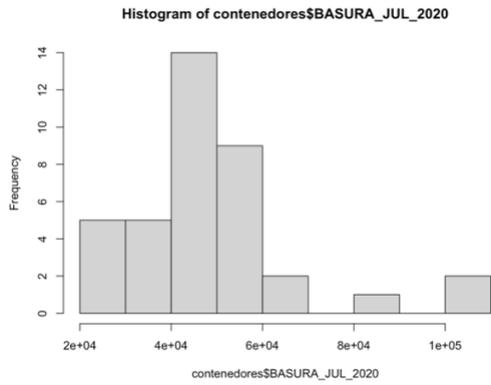


Figura 17. Histograma de la variable “BASURA\_JUL\_2020” (Elaboración propia).

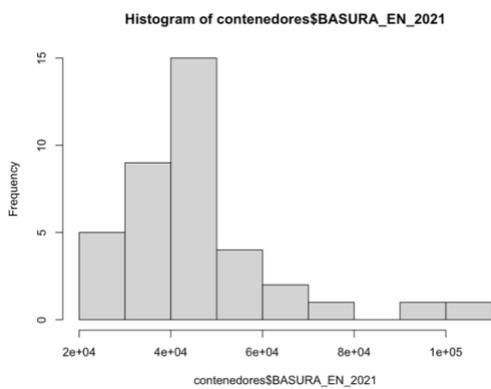


Figura 18. Histograma de la variable “BASURA\_EN\_2021” (Elaboración propia).

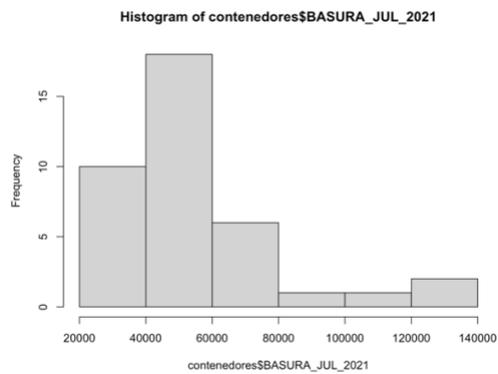


Figura 19. Histograma de la variable “BASURA\_JUL\_2021” (Elaboración propia).

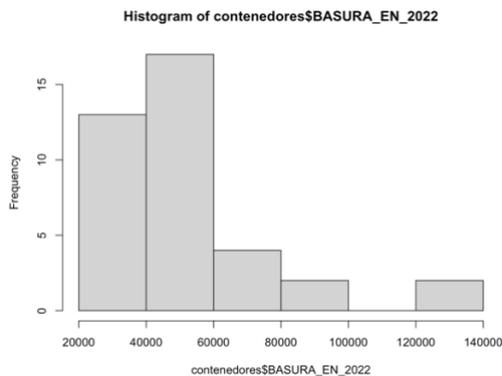


Figura 20. Histograma de la variable “BASURA\_EN\_2022” (Elaboración propia).

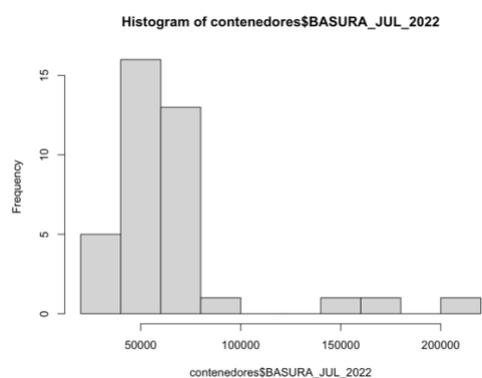


Figura 21. Histograma de la variable “BASURA\_JUL\_2022” (Elaboración propia).

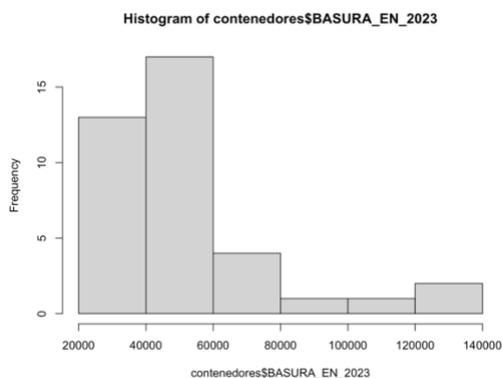


Figura 22. Histograma de la variable “BASURA\_EN\_2023” (Elaboración propia).

Finalmente, se plotean las matrices de correlación realizadas y se reproduce la información que nos da la función *summary* la cual recoge los datos estadísticos básicos de cada variable que ya se han ido mencionando junto con la explicación de cada histograma. En

cuanto a las correlaciones utilizadas, he utilizado la de Pearson debido a que todas las variables son continuas a excepción de “RFID”, la cual sirve únicamente para la identificación de cada una de las observaciones. En este sentido, se han planteado dos matrices de correlación distintas, una utilizando el dataset completo y otra con la única información de CONTENEDORES -con la excepción de la variable RFID ya que es omitida en ambas matrices-. Vemos como existe una fuerte correlación positiva entre los datos históricos y correlación negativa de estos con el tiempo medio de recogida, algo esperable. No obstante, también observamos datos interesantes como la correlación leve de la latitud y el porcentaje de viviendas principales respecto a las tomas históricas y el tiempo medio de recogida. Por un lado, cuanto más baja es la latitud, más residuos se generan; y la cantidad de basura también se incrementa cuanto mayor es el porcentaje de viviendas principales.:

```
> summary(contenedores)
  LATITUD      LONGITUD      CAPACIDAD      DENSIDAD_POB      VIVIENDA_PPAL      TIEMPO_MEDIO_RECOGIDA      BASURA_EN_2019      BASURA_JUL_2019
Min.   :38.32   Min.   :-4.634   Min.   :4000   Min.   :2.210   Min.   :56.70   Min.   :1.067   Min.   :26073   Min.   :31347
1st Qu.:38.32   1st Qu.:-4.630   1st Qu.:4000   1st Qu.:2.478   1st Qu.:60.36   1st Qu.:1.964   1st Qu.:37795   1st Qu.:42059
Median :38.32   Median :-4.627   Median :4000   Median :2.630   Median :65.81   Median :2.173   Median :50080   Median :59143
Mean   :38.32   Mean   :-4.627   Mean   :4211   Mean   :2.644   Mean   :67.34   Mean   :2.445   Mean   :52167   Mean   :61473
3rd Qu.:38.32   3rd Qu.:-4.625   3rd Qu.:4000   3rd Qu.:2.780   3rd Qu.:72.66   3rd Qu.:2.959   3rd Qu.:56568   3rd Qu.:63704
Max.   :38.33   Max.   :-4.617   Max.   :8000   Max.   :3.240   Max.   :92.70   Max.   :4.164   Max.   :137378   Max.   :161056

BASURA_EN_2020      BASURA_JUL_2020      BASURA_EN_2021      BASURA_JUL_2021      BASURA_EN_2022      BASURA_JUL_2022      BASURA_EN_2023
Min.   :25963   Min.   :24078   Min.   :24098   Min.   :26421   Min.   :25559   Min.   :29434   Min.   :25552
1st Qu.:37352   1st Qu.:37073   1st Qu.:33959   1st Qu.:39195   1st Qu.:37236   1st Qu.:41566   1st Qu.:37312
Median :50101   Median :48581   Median :44923   Median :53820   Median :49899   Median :59735   Median :50029
Mean   :52384   Mean   :48931   Mean   :46017   Mean   :55869   Mean   :51810   Mean   :63367   Mean   :51981
3rd Qu.:54992   3rd Qu.:53455   3rd Qu.:49540   3rd Qu.:60844   3rd Qu.:53952   3rd Qu.:64708   3rd Qu.:53553
Max.   :143837   Max.   :108606   Max.   :107116   Max.   :128213   Max.   :127839   Max.   :202574   Max.   :125339
```

Figura 23. Resumen de datos estadísticos básicos de cada variable obtenidos con la función summary (Elaboración propia).

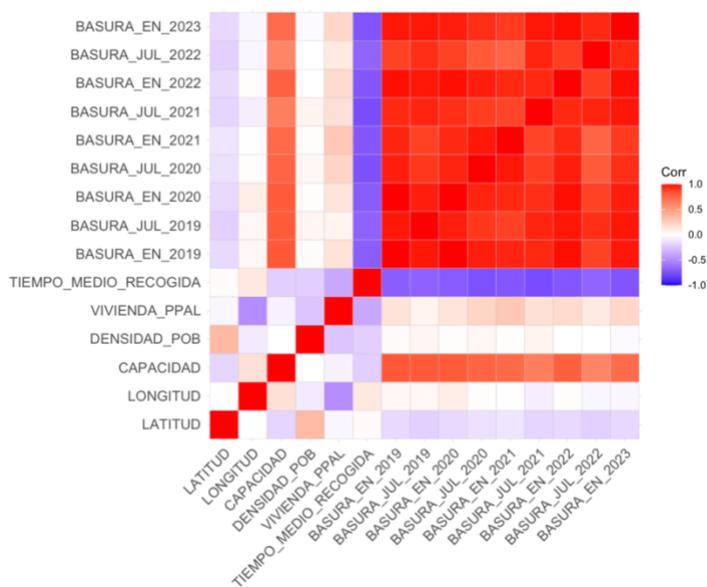


Figura 24. Matriz de correlaciones del dataset (Elaboración propia).

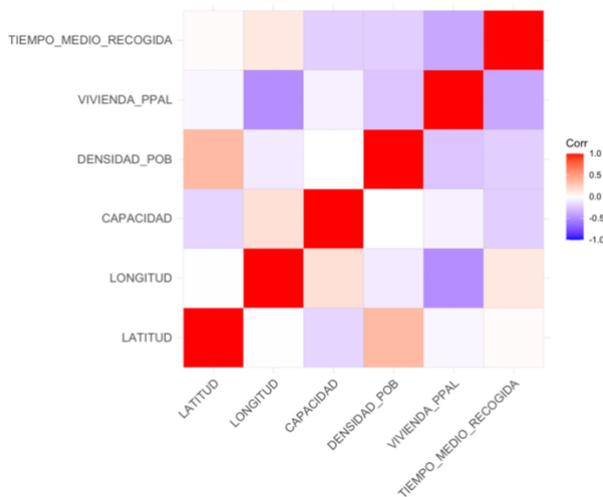


Figura 25. Matriz de correlaciones de CONTENEDORES (Elaboración propia).

Aunque no se dé el caso en el ejemplo que hemos utilizado, hay que tener en cuenta la posibilidad de que se generen outliers dentro de nuestro dataset. Si se diesen, debería procederse a su identificación y exclusión del modelo. Estos son fácilmente reconocibles mediante el histograma ya realizado y la función *summary*.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que alguno de los datos registrados por los sensores de llenado puede llegar de manera errónea ya sea por error causado por los sensores o por un fallo en la comunicación por radiofrecuencia. En caso de registrarse valores negativos, estos serían fácilmente identificables en el *summary*. Por otro lado, podrían registrarse valores nulos o NA, observaciones que se omitirían mediante la función *na.omit*.

Siguiendo los pasos naturales del procedimiento seguido en la elaboración de un modelo predictivo, se realiza un modelo de regresión lineal descriptivo para conocer mejor la relación de los datos respecto al tiempo medio de recogida. La variable TIEMPO\_MEDIO\_RECOGIDA es nuestra variable target o y, la cual nos resulta interesante predecir para cada contenedor con el fin de utilizar esta información en el siguiente módulo, esto es, en la optimización de rutas. En este sentido, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
\text{TIEMPO\_MEDIO\_RECOGIDA} = & B_1 + B_2 * \text{LATITUD} + B_3 * \text{LONGITUD} + B_4 * \\
& \text{CAPACIDAD} + B_5 * \text{DENSIDAD\_POB} + B_6 * \text{VIVIENDA\_PPAL} + B_7 * \\
& \text{BASURA\_EN\_2019} + B_8 * \text{BASURA\_JUL\_2019} + B_9 * \text{BASURA\_EN\_2020} + B_{10} * \\
& \text{BASURA\_JUL\_2020} + B_{11} * \text{BASURA\_EN\_2021} + B_{12} * \text{BASURA\_JUL\_2021} + B_{13} * \\
& \text{BASURA\_EN\_2022} + B_{14} * \text{BASURA\_JUL\_2022} + B_{15} * \text{BASURA\_EN\_2023} + u
\end{aligned}$$

Refiriéndonos en último lugar a un correcto conocimiento de los datos que se manejan, se realiza una regresión *Stepwise* la cual considera cuál es el subconjunto de variables que mejor se ajusta al conjunto de datos de acuerdo a realizar un modelo predictivo más preciso. De esta manera, se hace una selección automática de las variables independientes que más informan en nuestra predicción (Méndez González, 2019). Se utiliza la función *stepAIC* que combina la selección *forward* y *backward*: se comienza sin ningún predictor añadiendo uno tras otro en razón de su importancia para la predicción. Cada vez que se añade uno nuevo, se elimina cualquier otra que empeore el modelo. Según este modelo, se quedan en nuestro modelo las siguientes variables: CAPACIDAD, DENSIDAD\_POB, VIVIENDA\_PPAL, BASURA\_JUL\_2019, BASURA\_EN\_2020, BASURA\_JUL\_2020, BASURA\_EN\_2021, BASURA\_JUL\_2021 y BASURA\_JUL\_2022. Son mejores predictores en cuanto más estrellas(\*) tengan en la figura 26:

```

> summary(regstepwise)

Call:
lm(formula = TIEMPO_MEDIO_RECOGIDA ~ CAPACIDAD + DENSIDAD_POB +
    VIVIENDA_PPAL + BASURA_JUL_2019 + BASURA_EN_2020 + BASURA_JUL_2020 +
    BASURA_EN_2021 + BASURA_JUL_2021 + BASURA_JUL_2022, data = contenedores)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.19752 -0.13606 -0.01236  0.11585  0.27639

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  4.049e+00  4.914e-01  8.239 5.74e-09 ***
CAPACIDAD    9.300e-04  8.295e-05  11.212 7.27e-12 ***
DENSIDAD_POB -4.458e-01  1.198e-01 -3.722 0.000882 ***
VIVIENDA_PPAL -2.447e-02  4.486e-03 -5.456 7.99e-06 ***
BASURA_JUL_2019 -3.777e-05  9.219e-06 -4.097 0.000324 ***
BASURA_EN_2020 -3.890e-05  9.801e-06 -3.968 0.000457 ***
BASURA_JUL_2020 -2.008e-05  9.154e-06 -2.194 0.036705 *
BASURA_EN_2021  4.020e-05  1.238e-05  3.248 0.003014 **
BASURA_JUL_2021 -1.864e-05  1.130e-05 -1.649 0.110286
BASURA_JUL_2022  2.905e-05  7.419e-06  3.915 0.000527 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1659 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9662,    Adjusted R-squared:  0.9553
F-statistic: 88.81 on 9 and 28 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 26. Regresión Stepwise en R (Elaboración propia).

A continuación, se realiza la partición de los datos entre *training* y *test*. Llegados a este punto hay que decir que, pese a que han sido tenidos en cuenta en nuestra base de datos todos los contenedores de residuos orgánicos de Villanueva de Córdoba, se tratan de pocos datos para llegar a conclusiones relevantes. Una posible solución sea tener en consideración a pueblos cercanos con las mismas características que Villanueva de Córdoba en nuestro conjunto de observaciones para realizar el modelo predictivo. No obstante, continuamos con el procedimiento. Para la partición, se elige una *seed* aleatoria mediante las funciones *set.seed* y *RNGkind*. Posteriormente, se utiliza la función *createDataPartition* del paquete *caret* con un valor de  $p=0,8$ ; esto es, el 80% de los valores serán utilizados para el training set. Esto dejara el siguiente resultado: 8 observaciones dentro del test set y 32 observaciones compondrán el training set. Una vez realizada la partición, pasemos a desarrollar cada uno de los modelos predictivos realizados en RStudio.

```
> summary(contenedores_training)
  LATITUD      LONGITUD      CAPACIDAD      DENSIDAD_POB      VIVIENDA_PPAL      TIEMPO_MEDIO_RECOGIDA      BASURA_EN_2019      BASURA_JUL_2019
Min.   :38.32   Min.   :-4.634   Min.   :4000   Min.   :2.250   Min.   :56.70   Min.   :1.067   Min.   :26073   Min.   :31347
1st Qu.:38.32   1st Qu.:-4.631   1st Qu.:4000   1st Qu.:2.493   1st Qu.:60.36   1st Qu.:2.009   1st Qu.:38986   1st Qu.:41884
Median :38.32   Median :-4.627   Median :4000   Median :2.630   Median :65.81   Median :2.173   Median :50080   Median :59143
Mean   :38.32   Mean   :-4.627   Mean   :4250   Mean   :2.670   Mean   :66.64   Mean   :2.465   Mean   :52331   Mean   :62347
3rd Qu.:38.32   3rd Qu.:-4.625   3rd Qu.:4000   3rd Qu.:2.780   3rd Qu.:70.43   3rd Qu.:2.853   3rd Qu.:55970   3rd Qu.:63894
Max.   :38.33   Max.   :-4.617   Max.   :8000   Max.   :3.240   Max.   :92.70   Max.   :4.164   Max.   :137378   Max.   :161056
BASURA_EN_2020  BASURA_JUL_2020  BASURA_EN_2021  BASURA_JUL_2021  BASURA_EN_2022  BASURA_JUL_2022  BASURA_EN_2023
Min.   :25963   Min.   :24078   Min.   :24098   Min.   :26421   Min.   :25559   Min.   :29434   Min.   :25552
1st Qu.:38789   1st Qu.:39809   1st Qu.:37425   1st Qu.:40386   1st Qu.:38412   1st Qu.:41686   1st Qu.:37565
Median :50101   Median :48581   Median :45106   Median :53820   Median :50025   Median :59735   Median :50029
Mean   :52526   Mean   :48530   Mean   :45926   Mean   :56194   Mean   :51906   Mean   :64192   Mean   :52020
3rd Qu.:54739   3rd Qu.:52336   3rd Qu.:49231   3rd Qu.:59658   3rd Qu.:53814   3rd Qu.:64598   3rd Qu.:53257
Max.   :143837   Max.   :108606   Max.   :107116   Max.   :128213   Max.   :127839   Max.   :202574   Max.   :125339
```

Figura 27. Resumen de datos estadísticos básicos de cada variable en el training set (Elaboración propia).

```
> summary(contenedores_test)
  LATITUD      LONGITUD      CAPACIDAD      DENSIDAD_POB      VIVIENDA_PPAL      TIEMPO_MEDIO_RECOGIDA      BASURA_EN_2019      BASURA_JUL_2019      BASURA_EN_2020
Min.   :38.32   Min.   :-4.629   Min.   :4000   Min.   :2.210   Min.   :60.36   Min.   :1.319   Min.   :36278   Min.   :40462   Min.   :35966
1st Qu.:38.32   1st Qu.:-4.629   1st Qu.:4000   1st Qu.:2.320   1st Qu.:63.52   1st Qu.:1.909   1st Qu.:38065   1st Qu.:42437   1st Qu.:37623
Median :38.32   Median :-4.628   Median :4000   Median :2.580   Median :67.70   Median :2.390   Median :46718   Median :52237   Median :47139
Mean   :38.32   Mean   :-4.627   Mean   :4000   Mean   :2.505   Mean   :71.05   Mean   :2.338   Mean   :51291   Mean   :56812   Mean   :51624
3rd Qu.:38.33   3rd Qu.:-4.627   3rd Qu.:4000   3rd Qu.:2.630   3rd Qu.:73.70   3rd Qu.:2.957   3rd Qu.:55874   3rd Qu.:62898   3rd Qu.:57778
Max.   :38.33   Max.   :-4.623   Max.   :4000   Max.   :2.780   Max.   :92.70   Max.   :3.033   Max.   :83923   Max.   :90315   Max.   :83726
BASURA_JUL_2020  BASURA_EN_2021  BASURA_JUL_2021  BASURA_EN_2022  BASURA_JUL_2022  BASURA_EN_2023
Min.   :34237   Min.   :31675   Min.   :36574   Min.   :36571   Min.   :40413   Min.   :36263
1st Qu.:36903   1st Qu.:33959   1st Qu.:39475   1st Qu.:37453   1st Qu.:41882   1st Qu.:37562
Median :48225   Median :37313   Median :50159   Median :44765   Median :53468   Median :45998
Mean   :51070   Mean   :46503   Mean   :54132   Mean   :51293   Mean   :58967   Mean   :51773
3rd Qu.:57580   3rd Qu.:55501   3rd Qu.:60618   3rd Qu.:57550   3rd Qu.:70860   3rd Qu.:59305
Max.   :81908   Max.   :78315   Max.   :87884   Max.   :84831   Max.   :91775   Max.   :83889
```

Figura 28. Resumen de datos estadísticos básicos de cada variable en el test set (Elaboración propia).

### a. Modelo de regresión lineal predictiva

El código comienza creando la variable de control mediante la función *trainControl* del paquete *caret*. Tras ello, se selecciona una *seed* aleatoria mediante el procedimiento ya

explicado y se entrenan los datos del training set a través de la función *train* del paquete *caret*. Finalmente, se utiliza la función *predict* (*caret*) para aplicar el modelo de regresión lineal ya creado a través del entrenamiento del training set para predecir los valores en el test set.

Una vez terminado el modelo, se comparan los valores obtenidos relacionados con el test set con aquellos que ya se tenían anteriormente para valorar la precisión del modelo creado. Como se puede observar en la siguiente figura, existe un error significativo en la observación 4 del test set, por lo que este modelo no responde de manera efectiva a las necesidades de nuestro modelo predictivo.

```
> str(contenedores_test$TIEMPO_MEDIO_RECOGIDA)
num [1:6] 3.03 3.03 1.32 1.86 2.73 ...
> str(contenedores_test$pred_lineal)
num [1:6] 3.089 3.089 0.214 1.746 2.964 ...
```

Figura 29. Comparación entre valores observados y valores predichos en la regresión lineal (Elaboración propia).

#### b. Modelo KNN

Para este modelo se utilizarán las mismas funciones ya explicadas para el caso del modelo de regresión lineal predictiva ubicadas en el paquete *caret*. Observamos un error en cuanto a la variable capacidad por la ausencia de varianza, pero lo consideramos algo normal debido al número reducido de observaciones. No obstante, deben mencionarse ciertos detalles que diferencian a la elaboración de un modelo KNN respecto de una regresión lineal predictiva. En primer, lugar deben darse una serie de datos arbitrariamente, tales son: el número de repeticiones del procedimiento, el número de  *folds* en la *cross-validation* y el número de valores del hiperparámetro los cuales se van a probar en nuestro modelo. Por otro lado, también es importante mencionar que los modelos KNN se realizan sobre datos estandarizados. En el caso de la función *train*, se puede contemplar esta opción dentro del parámetro *preProcess*.

Por último y al igual que en el modelo anterior, los valores obtenidos en el subconjunto de test son comparados con los observados y, de esta manera, poder conocer el grado de error del modelo creado. En este caso, el modelo predice la variable *TIEMPO\_MEDIO\_RECOGIDA* con valores más alejados de las observaciones; no obstante,

no existe ningún valor predicho muy alejado de la observación real (figura 30). KNN puede considerarse un buen modelo en nuestro debido al pequeño tamaño del dataset, que contrarresta las grandes cantidades de tiempo y memoria que implica el modelo KNN.

```
> str(contenedores_test$TIEMPO_MEDIO_RECOGIDA)
num [1:6] 3.03 3.03 1.32 1.86 2.73 ...
> str(contenedores_test$pred_knn)
num [1:6] 2.69 2.69 1.93 2.04 2.31 ...
|
```

Figura 30. Comparación entre valores observados y valores predichos en el KNN(Elaboración propia).

### c. Árbol de decisión

El modelo de árbol de decisión requiere de muchos datos para que la información sea relevante, por lo que es difícil interpretación con el número de observaciones del dataset que se utiliza. Sin embargo, parte del sector científico cree que es una buena opción su uso en este tipo de problemas (Solano Meza et. al., 2019). En nuestro caso, la variable que más reducía la impureza en cada uno de los *splits* ha sido la variable *target*, lo cual tiene una difícil interpretación. Para realizar este modelo, hemos utilizado las funciones del paquete *caret* ya mencionadas en los apartados anteriores volviendo a aparecer concepto como *folds* o el número de repeticiones. A estos parámetros, debe añadirse la importancia del *cp* definido como el hiperparámetro que controla la penalización de la complejidad del modelo; esto es, se procura que sea lo mínimo posible.

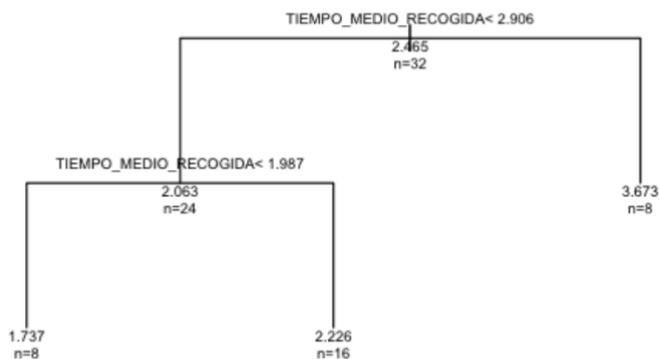


Figura 31. Árbol de decisión generado (Elaboración propia).

Estos son los tres modelos predictivos realizados, aunque podría haberse optado por el uso de redes neuronales o SVM, también recomendados en el estudio mencionado en el párrafo anterior (Solano Meza et. al., 2019).

La parte final de la elaboración de un modelo predictivo debe consistir en la realización de un *ensemble* o combinación de los modelos para conseguir una mejor predicción en nuestros valores, esto es, acercarnos al modelo óptimo de predicción. A esta técnica se le conoce como aprendizaje conjunto (Observatorio Tecnológico de Hidalgo, 2020). En nuestro código, esto se realiza mediante la función *caretList* del paquete *caretEnsemble*. Finalmente, es interesante realizar un *dotplot* del paquete *lattice* para comparar los valores que miden la probabilidad de acierto del training set. Según los datos de la figura 32, parece que el modelo más efectivo para nuestro caso es el modelo KNN debido a que el RMSE y el MAE son reducidos. Esto podría indicar sobreajuste por lo que nos fijamos en otras medidas estadísticas como el R cuadrado, el cual tiene un valor medio muy cercano a 1 y con poca varianza, algo que indica una buena bondad en el ajuste. Además, se debe hacer hincapié en que el modelo KNN es fácil de utilizar en nuestro ejemplo debido al reducido tamaño del dataset.

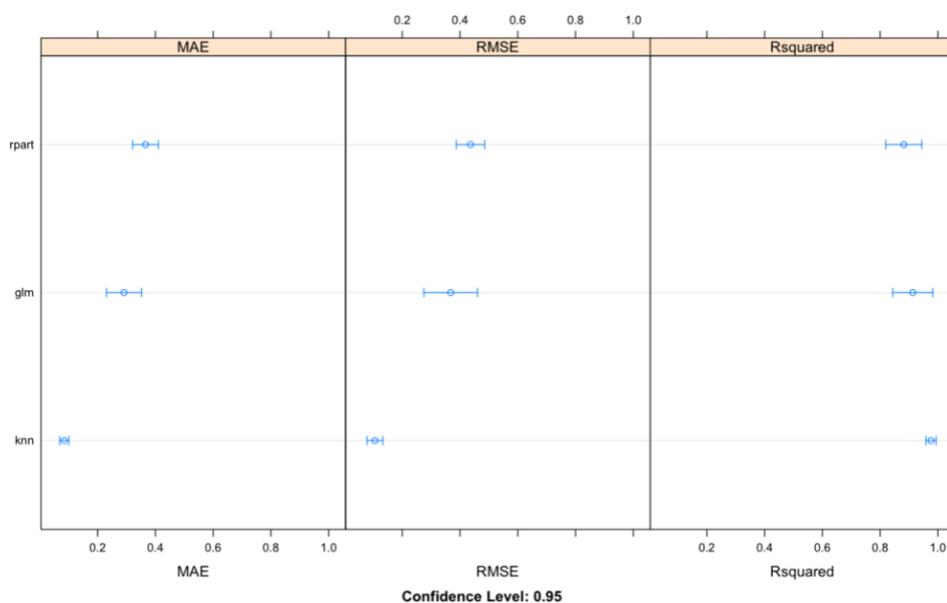


Figura 32. Dotplot de datos estadísticos relativos a cada uno de los modelos creados (Elaboración propia).

De acuerdo con esta parte final del ensemble, se ha creado un esquema clarificativo del procedimiento con Orange3 (figura 33), un software de código abierto que realiza tareas de Machine Learning, minado de datos y otros de manera muy intuitiva. En este esquema, y sirviendo a modo de resumen del código realizado, se puede observar cómo se crea una partición sobre los datos entre training set y test set. Las observaciones del training set son utilizadas en los tres modelos que se han desarrollado en nuestro código: regresión lineal, KNN y árbol de decisión. Los tres modelos son agregados al ensemble y, estos cuatro modelos, ofrecerán distintas predicciones del test set siendo comparados estos resultados con los datos observados.

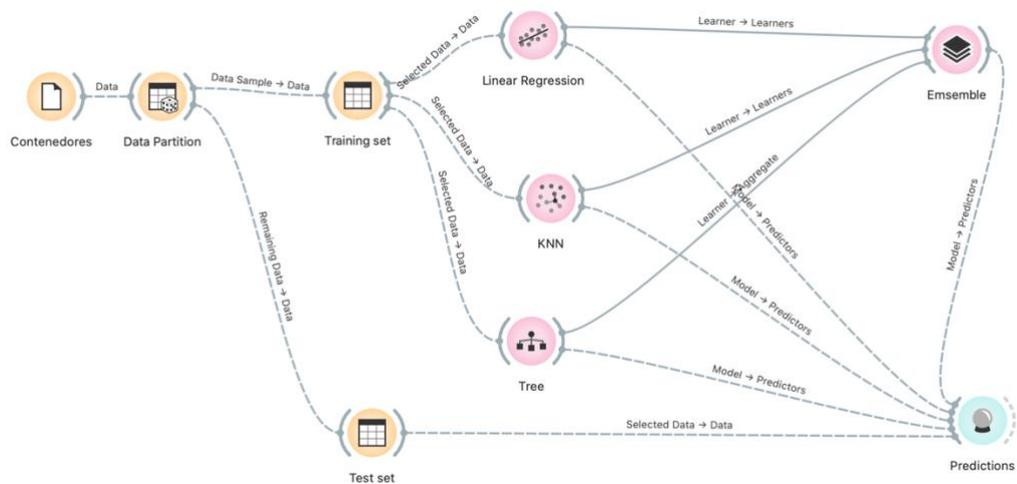


Figura 33. Elaboración propia utilizando Orange3.

En último lugar, este módulo también acogerá el criterio de inclusión/exclusión de aparición en el mapa para la optimización de rutas. Este criterio dependerá totalmente de la variable TIEMPO\_MEDIO\_RECOGIDA y será el nexo de unión entre este módulo y el de Generación de Rutas que se desarrolla a continuación.

### 2.2.3 Módulo de Generación de Rutas

Con la información del módulo anterior y utilizando una API de Google Maps, este módulo ya dispone de todos los datos necesarios para generar una ruta óptima para los vehículos de recogida de Villanueva de Córdoba. Hay que tener en cuenta que la disponibilidad

actual de vehículos de recogida en la localidad es de, al menos, uno por día ya que actualmente se recoge diariamente la fracción orgánica de la localidad cordobesa (El Quincenal de Los Pedroches, 2022).

En cuanto a las restricciones que puede encontrarse el propio algoritmo en sí, numerosos estudios destacan tres: la distancia, la inclinación de las calles y el porcentaje de carga del vehículo (Afonso Llorente, 2014). La distancia recorrida es la variable más trascendental en el cálculo de la optimización y el porcentaje de carga tiene sentido en todos los problemas de optimización de rutas. Sin embargo, la inclinación no es un factor muy determinante en el estudio de nuestro caso ya que nos encontramos en una localidad relativamente plana con un desnivel máximo de 40 metros aproximadamente. Tengamos en cuenta que el desnivel máximo del centro de Madrid es de unos 70 metros. Por lo que, para la simplificación del problema, obviamos la variable de inclinación de las calles.

El punto de fin e inicio de la ruta no se encuentra en la propia localidad ya que la gestión de residuos es realizada a nivel provincial por la empresa pública EPREMASA. EPREMASA ha ubicado varias plantas de transferencia de residuos por toda la provincia: Dos Torres, Nueva Carteya, Fuente Palmera, Rute, Montoro (Diputación de Córdoba, 2017) y, más recientemente, Priego de Córdoba (Europa Press, 2022). Tras pasar por estas plantas intermedias, los residuos llegaran al destino final para su reciclaje, esto es, el Complejo Medioambiental de Montalbán. Asumimos que, por cercanía geográfica, la planta de transferencia de residuos que se hará cargo del almacenamiento de los residuos de Villanueva de Córdoba será aquella ubicada en Dos Torres, ubicada a 34,4 kilómetros de la localidad objeto de estudio.

En una aproximación y de acuerdo a lo ya explicado en este apartado, tiene sentido que las rutas óptimas empiecen al oeste, norte o sur del municipio para acabar en el este del mismo, allí donde se encuentra la salida en dirección a la planta de transferencia de residuos de Dos Torres. De esta manera, se realizará más recorrido del trayecto con la carga al 0% y se reducirá el consumo de combustible del camión de recogida.

#### *2.2.4 Módulo de Visualización*

Este módulo estará compuesto por plataformas de visualización que permitan el uso e interpretación de los datos obtenidos de los módulos anteriores. Pueden usarse programas como

PowerBi para las gráficas y los cuadros de mando mientras que QGIS para la visualización del mapa dinámico (González Alonso, 2022). No obstante, considero que el uso de la API de Google Maps es más correcto pese a que suban los costes ya que incorpora un sistema de navegación en carretera avanzado. Posteriormente, puede utilizarse cualquier servidor web para el desarrollo de una web con acceso privado para EPREMASA y el Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba.

Centrando el desarrollo en lo más importante de este módulo, el mapa tendrá dos visualizaciones distintas dependiendo del tipo de usuario. Por un lado, los administradores tendrán acceso al mapa completo con iconos en cada uno de los contenedores los cuales cambiarán de color según el nivel de llenado del contenedor. El color verde para aquellos contenedores que no cumplen el criterio de inclusión, el color amarillo para aquellos que sí lo cumplen y el color rojo para los contenedores que se encuentran desbordados. Por otro lado, los conductores de los vehículos de recogida tendrán acceso a un mapa en el que automáticamente aparecerá la ruta del vehículo en concreto. Una vez pase el camión por cada uno de los puntos indicados, el contenedor cambiará al color verde indicado para aquellos puntos excluidos de las rutas.

## **CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES**

Este Trabajo ha abarcado muchos puntos distintos a lo largo de su desarrollo y ahora es el momento de exponer los resultados a los que ha llegado este.

- a. Necesidad de un modelo de gestión de residuos inteligente para las localidades de pequeño tamaño

A lo largo del Trabajo se han mencionado las numerosas ventajas que tienen los modelos de gestión inteligente de residuos en las Smart Cities que son aplicados. Evitar su integración en modelos no preparados para afrontar este reto, sería discriminar a sus habitantes ya que aquellos que viven en las ciudades gozarían de una mejor calidad de vida.

Además, las consecuencias de este hecho serían nefastas ya que incrementaría el éxodo rural que ya se da actualmente. Medidas como las que propone este Trabajo paliarían un problema que se está dando en todo el mundo. En el caso concreto de España, se habla del

concepto de España vacía o vaciada, una gran parte del territorio nacional que se enfrenta al reto de la despoblación (Esparza, 2019). Otra cuestión es la viabilidad de un proyecto de tales características, cuestión que abordaremos en el siguiente apartado.

b. Escalado y mancomunación de los servicios esenciales en las localidades de pequeño tamaño

Desde mi punto de vista, creo que está es la conclusión más importante de este Trabajo. Desde la Transición democrática, han surgido proyectos para la mancomunación de los servicios esenciales que los Ayuntamientos están obligados a prestar de acuerdo a la Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases del Régimen Local. Un ejemplo de ello, y que ha sido comentado en este Trabajo, es la creación de EPREMASA por parte de la Diputación de Córdoba en el año 1992 (EPREMASA, 2023).

Ya se ha comentado que la mancomunación de la gestión de residuos es un hecho positivo ya que posibilita una reducción de gastos y de la emisión de gases de efecto invernadero. En este sentido, es clave lo comentado por Fernández González et. al. (2016) en un estudio realizado sobre la recogida de residuos urbanos en áreas rurales. Este estudio demuestra con datos comparativos entre localidades con la gestión mancomunada y otras que no, que la mancomunación es un hecho positivo en la aplicación de un modelo de gestión de residuos. El *paper* se centra principalmente en los aspectos económicos y ambientales los cuales son claramente favorables en la mancomunación.

Por otro lado, este Trabajo ha decidido centrarse en los aspectos y cuestiones que surgen derivados del uso de las nuevas tecnologías. Respecto a esto, creo que es necesario volver a mencionar las preguntas a las que este Trabajo pretendía responder puesto que es el momento de abordarlas:

- ¿Se puede aplicar el modelo de Smart Cities en una localidad de pequeño tamaño?
- ¿Es posible la aplicación de un modelo de gestión de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño?

En un primer lugar, en el marco teórico que hemos asentado al principio de este Trabajo, comentábamos la nota de *ciudad* en el concepto de Smart City y como muchos autores deciden

despreciarla en pro de darle importancia a otros ámbitos como el económico o la gobernanza. Sin embargo, creo que, si hablamos de Smart Cities, tenemos que concebirlo como un modelo tecnológico para mejorar la vida de las personas que habitan en una ciudad. Considero que una nota esencial del concepto de Smart Cities es su relación con el Big Data. Si definimos al Big Data como análisis de un gran volumen de datos de gran variedad y a alta velocidad (Gartner, 2023), se puede considerar que este contexto tan solo es posible en localidades de gran tamaño en las que pueda producirse una generación de datos descontrolada. Por lo tanto, es difícil llevar el enfoque de Smart Cities a localidades de pequeño tamaño debido a que en estas no se generan los datos que posibilitan el uso de tecnologías propias de las Smart Cities.

De acuerdo con lo ya expuesto, es el caso que se ha dado en nuestro modelo predictivo para conocer el tiempo medio de recogida de los contenedores. Aunque el objetivo de la creación del modelo predictivo no era la interpretación de los datos puesto que habían sido creados de una manera más o menos arbitraria, su interpretación es más difícil debido al reducido tamaño de las observaciones, que impide a los algoritmos de Machine Learning funcionar de una manera óptima. El modelo de árbol de decisión ha sido el más afectado por este problema ya que por sus propias características necesita de una gran cantidad de datos para que su precisión se acerque al rendimiento óptimo. Tengamos en cuenta que solo existen 38 localizaciones con contenedores de residuos orgánicos en Villanueva de Córdoba y que, además, la población no tiene por sí sola la capacidad económica para hacer viable la implantación de sensores de llenado en cada uno de los contenedores del municipio.

En definitiva, considero que el concepto de *ciudad* es una nota esencial dentro del paradigma de Smart Cities debido a su relación con el Big Data. Es decir, sin la existencia de Big Data, el paradigma de Smart Cities tiene una aplicación muy reducida o prácticamente nula y para ello se necesita un elevado número de población que genere datos de manera indiscriminada, hecho que ocurre en las ciudades.

En relación a la segunda pregunta, considero que, a pesar de que tenemos que excluir del paradigma de Smart Cities a los municipios del ámbito rural, es posible la implantación de un modelo de gestión de residuos inteligente en localidades de pequeño tamaño. La solución pasa por lo que ha sido comentado a lo largo de todo este punto: la mancomunación. Desde este punto de vista, podrán solucionarse los principales problemas que se encuentran los municipios pequeños en población respecto de la aplicación de un modelo inteligente en la

recogida de residuos. En primer lugar, desde un punto de vista económico y como ya hemos introducido en un párrafo anterior, la financiación de un proyecto de tales características será más viable si varios ayuntamientos ponen en común parte de su presupuesto para de esta manera ahorrar en gastos. En segundo lugar, en el Capítulo 3 se comentó que EPREMASA realiza la gestión de residuos para una población que ronda las 390.000 personas, asimilable al dato demográfico de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria (Fernández, 2022). Con esta cantidad de personas y junto a la viabilidad de una financiación del proyecto conjunta entre los ayuntamientos, es posible la implantación de un modelo de gestión de residuos inteligente en el ámbito de la recogida de residuos urbanos.

Respecto a la materialización de este proyecto, creo que es interesante el cuestionamiento sobre si realizar un proyecto diferenciado por cada planta de transferencia de residuos. Esto es, en el caso de Villanueva de Córdoba, todas las localidades que tienen asignada la planta de transferencia de residuos de Dos Torres podrían implantar un proyecto de recogida de residuos inteligente diferenciado. Esta planta de transferencia es la única situada al norte de la provincia cordobesa, área que cuenta con una población en torno a los 80.000 habitantes (López, 2021). De acuerdo con lo expuesto, existen proyectos de recogida inteligente de residuos en localidades de menor población como Hlohovec o Bratislava (Adalid, 2020).

A modo de conclusión, la respuesta a la segunda pregunta planteada en el Trabajo es un claro sí. Un modelo de gestión de residuos inteligente es posible en localidades de pequeño tamaño a través de la mancomunación del servicio que asimile la suma de pequeños municipios a una ciudad, destacando el aspecto económico y la generación masiva de datos.

Hay que tener en cuenta que el mayor beneficio que proporciona una gestión inteligente de residuos es la reducción del gasto económico, variable que más interviene en la toma de decisiones de los ayuntamientos.

#### c. Valoración de la opción de SaaS y otras opciones

Otra posibilidad que se plantea y que incrementa el abanico de opciones y oportunidades que tienen las localidades de pequeño tamaño para la implantación de un sistema de recogida de residuos inteligente, es la contratación de un servicio SaaS. Existen numerosas

empresas en el mercado que ofrecen el servicio de recogida de residuos inteligente sin tener que desarrollar ningún proyecto de implementación como Sensoneo (2023). Este método ahorraría tiempo en la implantación de la recogida de residuos inteligente en la localidad

Por último, hay que valorar también la posibilidad de la creación de entornos de trabajo público-privados que pongan en común a la Administración con empresas del sector para conseguir soluciones bajo el paradigma de Smart Cities. En este sentido, hemos estudiado el caso de la ciudad de Granada, en el que el Ayuntamiento de Granada, INAGRA, Cisco y Ferrovial Servicio se han puesto en común para la implantación de un modelo inteligente en la recogida de residuos. La similitud de las circunstancias de la ciudad de Granada en la gestión de residuos con el caso estudiado hace pensar que es posible una colaboración de los ayuntamientos cordobeses y EPREMASA con empresas del ámbito privado que se muestren dispuestas a ofrecer soluciones inteligentes en el entorno rural. Es a lo que se le ha definido en el Capítulo 2 como el modelo asociativo, una metodología de trabajo relacionada con el paradigma de las Smart Cities.

#### a. Conclusiones del modelo predictivo

Este Trabajo ha desarrollado un modelo predictivo basado en datos arbitrarios creados en torno a valores cercanos a los que se podrían dar en observaciones reales; no obstante, es necesaria la instalación de sensores de llenado para poder llegar a conclusiones convincentes en la predicción del tiempo medio de recogida de cada contenedor. Pese a esto, se han podido obtener algunas conclusiones que se exponen a continuación.

El modelo KNN utilizado ha podido predecir con cierto grado de precisión los valores del tiempo medio de recogida. Creo que es un modelo que tiene un buen uso en datasets pequeños como el nuestro y podría ser una buena opción en caso de una implementación del proyecto de recogida de residuos inteligente en Villanueva de Córdoba.

Sin embargo, en conclusiones anteriores se ha recomendado la mancomunación del servicio, lo que supondría una recolección mucho mayor de datos. En este caso podrían utilizarse otros modelos predictivos como el ya desarrollado árbol de decisión, que necesita de un dataset de gran tamaño para establecer predicciones con alto grado de precisión.

## **CAPÍTULO 5. PRÓXIMOS PASOS**

Este Trabajo ha tratado de desarrollar la implantación de un proyecto de recogida de residuos inteligente en una localidad de pequeño tamaño; no obstante, este abarca muchos ámbitos lo cuales no han podido ser desarrollados con gran profundidad en estas líneas.

El principal paso que se debe seguir para la implementación del modelo en el municipio de Villanueva de Córdoba es la recolección de datos reales del llenado de los contenedores a través de la instalación de sensores en los contenedores soterrados de los que dispone la localidad. Con estos datos y el modelo predictivo ya desarrollado, deberá realizarse la optimización de las rutas que ha sido brevemente explicada en el módulo 3.

Finalmente, se deberá desarrollar el cuarto módulo relacionado con la visualización mediante la creación de una página web a la que tengan acceso tanto el Ayuntamiento como aquellos que gestionarán la recogida de residuos en la localidad.

## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Adalid, H. (02 de 2020). *Gestión de residuos inteligente. Soluciones para Smart Cities*. Obtenido de Greenllood: <https://greenllood.org/wp-content/uploads/2020/02/Greenllood-Gesti%C3%B3n-de-Residuos-Inteligente.pdf>
- Afonso Llorente, T. (2014). *Optimización de rutas de recogida de residuos en zonas mixtas urbana-rurales y orografía singular*. Universidad de La Laguna.
- Agencia de Protección Medioambiental de EE.UU. (Abril de 2016). *Volume-to-Weight Conversion Factors*. Obtenido de EPA: <https://www.epa.gov/smm/volume-weight-conversion-factors-solid-waste>
- alfaIoT. (2022). *SOFTWARE IOT*. Obtenido de alfaIoT: <https://alfaiot.com/blog/actualidad-14/software-iot-28>
- Amsler, S., & Shea, S. (2021). *RFID (radio frequency identification)*. Obtenido de TechTarget: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definicion/RFID-radio-frequency-identification>
- Anagnostopoulos, T., Kolomvatsos, K., Anagnostopoulos, C., Zaslavsky, A., & Hadjiefthymiades, S. (2015). Assessing dynamic models for high priority waste collection in smart cities. *Journal of Systems and Software*, 178-192.
- Anagnostopoulos, T., Zaslavsky, A., Kolomvatsos, K., Medvedev, A., Amirian, P., Morley, J., & Hadjiefthymiades, S. (2017). Challenges and Opportunities of Waste Management in IoT-Enabled Smart Cities: A Survey. *IEEE transactions on sustainable computing*, 275-289.
- AWS. (2022). *¿Qué es la regresión lineal?* Obtenido de Amazon Web Services: <https://aws.amazon.com/es/what-is/linear-regression/>
- Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba. (2015). *Agenda 21 Local. Agenda de Desarrollo Sostenible Municipal*.

- Baker, B., & Ayechev, M. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 787–800.
- Bernad, C. (07 de 09 de 2016). *La gestión de los residuos en el marco de la Smart City*. Obtenido de eSmartCity: <https://www.esmartcity.es/comunicaciones/gestion-residuos-marco-smart-city>
- Boletín Oficial del Estado. (03 de 04 de 1985). *Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases del Régimen Local*. Obtenido de BOE: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1985-5392>
- Bouskela, M., Casseb, M., Bassi, S., De Luca, C., & Facchina, M. (2016). *La ruta hacia las Smart Cities. Migrando de una gestión tradicional a la ciudad inteligente*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Cárdenas, Á. (21 de 03 de 2021). *Gestión inteligente de residuos urbanos en tu Smart City*. Obtenido de Secmotic: <https://secmotic.com/gestion-inteligente-de-residuos-urbanos-en-tu-smart-city/>
- Cejudo, A., Igualada-Fernández, A., Abril-Guiote, J., & Sainz de Baranda, P. (2021). Valoración del riesgo de dolor de hombro en trabajadores de limpieza viaria y recogida de residuos. Proyecto PRE-REFILAB. *Journal of Universal Movement and Performance*, 17-27.
- Clark, R. (1975). Analysis of solid waste management operations in Cleveland, Ohio: a case study. *Interfaces*, 32-42.
- decide. (07 de 10 de 2020). *Ejemplos e implementación de un modelo de Analítica Predictiva y Machine Learning*. Obtenido de decide: <https://decidesoluciones.es/ejemplos-implementacion-analitica-predictiva-machine-learning/>
- Díaz, C. (09 de 02 de 2023). *Sevilla convierte sus naranjas amargas en biogás*. Obtenido de Diario de Sevilla: [https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Sevilla-convierte-naranjas-amargas-biogas-video\\_0\\_1764424415.html](https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Sevilla-convierte-naranjas-amargas-biogas-video_0_1764424415.html)

Diputación de Córdoba. (16 de 11 de 2016). *Epremasa impulsa la modernización de la gestión de puntos limpios y del transporte de enseres y residuos voluminosos de la provincia*. Obtenido de Diputación de Córdoba: <https://dipucordoba.es/epremasa-impulsa-la-modernizacion-de-la-gestion-de-puntos-limpios-y-del-transporte-de-enseres-y-residuos-voluminosos-de-la-provincia/>

Diputación de Córdoba. (11 de 2017). *EPREMASA*. Obtenido de Diputación de Córdoba: <https://dipucordoba.es/wp-content/uploads/2017/11/epremasa.pdf>

Diputación de Córdoba. (2020). *EPREMASA*. Obtenido de Diputación de Córdoba: <https://dipucordoba.es/areas/asistencia-tecnica-a-los-municipios/epremasa/>

Echebarría Miguel, C., & Aguado Moralejo, I. (2003). La Agenda Local 21 como instrumento de sostenibilidad. *Revista española de estudios agrosociales y pesqueros*, 61-91.

Ecovidrio. (2019). *Utilización de sensores en los contenedores de recogida de residuos. Ejemplo de implementación*. Obtenido de Ecovidrio: [https://www.sostenibilidadresiduos.es/media/files/Actuaciones/Codigo\\_09/Codi\\_09\\_2.pdf](https://www.sostenibilidadresiduos.es/media/files/Actuaciones/Codigo_09/Codi_09_2.pdf)

El Día de Córdoba. (2022). *Epremasa celebra sus 30 años de "revolución en el modo de gestionar los residuos" en Córdoba*. Obtenido de El Día de Córdoba: [https://www.eldiadecordoba.es/provincia/Epremasa-revolucion-gestionar-residuos-Cordoba\\_0\\_1739827800.html](https://www.eldiadecordoba.es/provincia/Epremasa-revolucion-gestionar-residuos-Cordoba_0_1739827800.html)

El Quincenal de Los Pedroches. (07 de 01 de 2022). *Epremasa recogerá la basura los 7 días de la semana en Villanueva de Córdoba*. Obtenido de El Quincenal de Los Pedroches: <https://www.elquincenaldelospedroches.es/epremasa-recogera-la-basura-7-dias-de-la-semana-en-villanueva-de-cordoba/>

EPREMASA. (2023). *Instalaciones*. Obtenido de EPREMASA: <https://www.epremasa.es/instalaciones>

EPREMASA. (2023). *Quiénes somos*. Obtenido de EPREMASA:  
<https://www.epremasa.es/quienessomos>

Esparza, P. (29 de 04 de 2019). *Elecciones en España: ¿qué es la "España vacía" (y por qué es decisiva en estas elecciones)?* Obtenido de BBC:  
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-48054125>

Europa Press. (18 de 08 de 2022). *Epremasa moderniza la planta de transferencia de Priego de Córdoba para atender distintas fracciones de recogida*. Obtenido de Europa Press:  
<https://www.europapress.es/andalucia/cordoba-unica-01012/noticia-epremasa-moderniza-planta-transferencia-priego-cordoba-atender-distintas-fracciones-recogida-20220818135231.html>

Fayomi, G., Mini, S., Chisom, C., Fayomi, O., Udoye, N., Agboola, O., & Oomole, D. (2021). Smart Waste Management for Smart City: Impact on Industrialization. *IOP conference series*, 1-8.

Fernández González, J., García Pérez, J., Ruiz Lozano, A., & Villaplana Cerdá, D. (2016). Logística y optimización del servicio de recogida de residuos urbanos en áreas rurales. *XII Congreso de Ingeniería del Transporte*.

Fernández, R. (09 de 09 de 2022). *Las 20 capitales españolas con más habitantes en 2021*. Obtenido de Statista: <https://es.statista.com/estadisticas/501078/las-10-ciudades-espanolas-con-mas-habitantes/>

Ferrer, J. (2018). BIN-CT: Sistema inteligente para la gestión de la recogida de residuos urbanos. *Greencities & Sostenibilidad. Convocatoria de Comunicaciones Científicas*, 117-128.

Fiwoo. (10 de 07 de 2020). *La gestión inteligente de los residuos en una Smart City*. Obtenido de Fiwoo: <https://www.fiwoo.eu/la-gestion-inteligente-de-los-residuos-clave-en-una-smart-city/>

Fundación Telefónica. (2011). *Smart Cities: un primer paso hacia la internet de las cosas*. Ariel.

Gartner. (2023). *Big Data*. Obtenido de Gartner: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data#:~:text=Big%20data%20is%20high%2Dvolume,decision%20making%2C%20and%20process%20automation>.

González Alonso, C. (2022). *Tecnologías Fiware aplicadas a la gestión inteligente de residuos*. Universidad de La Laguna.

Goyal, S., Srivastava, P., & Kumar, A. (2015). An Overview of Hybrid DataBases. *International Conference on Green Computing*, 285-288.

Herrera-Ramírez, J., Treviño-Villalobos, M., & Viquez-Acuña, L. (2021). Hybrid storage engine for geospatial data using NoSQL and SQL paradigms. *Tecnología en Marcha*, 40-54.

IBM. (2022). *¿Qué es el algoritmo de k vecinos más cercanos?* Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/es-es/topics/knn#:~:text=El%20algoritmo%20de%20k%20vecinos%20m%C3%A1s%20cercanos%2C%20tambi%C3%A9n%20conocido%20como,un%20punto%20de%20datos%20individual>

Ical. (12 de 04 de 2022). *La Junta pide revisar la Ley de Movilidad Sostenible por no recoger el medio rural*. Obtenido de La Nueva Crónica: <https://www.lanuevacronica.com/la-junta-pide-revisar-la-ley-de-movilidad-sostenible-por-no-recoger-el-medio-rural>

Idwan, S., Mahmood, I., Zubairi, J., & Matar, I. (2020). Optimal Management of Solid Waste in Smart Cities using Internet of Things. *Wireless Personal Communications*, 485-501.

INAGRA. (2023). *INAGRA. Historia*. Obtenido de INAGRA: <https://www.inagra.es/historia/>

IndeGranada . (14 de 11 de 2017). *La 'recogida inteligente de residuos' en Granada permitirá reducir hasta un 30% la emisión de gases contaminantes de vehículos del servicio*. Obtenido de El Independiente de Granada: <https://elindependientedegranada.es/economia/recogida-inteligente-residuos-granada-permitira-reducir-30-emision-gases-contaminantes>

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2022). *Andalucía pueblo a pueblo - Fichas Municipales. Granada*. Obtenido de Junta de Andalucía: <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/ficha.htm?mun=18087>

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2022). *Andalucía pueblo a pueblo - Fichas Municipales. Villanueva de Córdoba*. Obtenido de Junta de Andalucía: <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/ficha.htm?mun=14069>

Instituto Nacional de Estadística. (2011). *Sistema de información de Censo 2011*. Obtenido de INE: <https://www.ine.es/censos2011/visor/>

Instituto Nacional de Estadística. (2022). *Cifras oficiales de población de los municipios españoles en aplicación de la Ley de Bases del Régimen Local (Art. 17)*. Obtenido de INE: <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2901>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Publications.

Kent State University. (22 de 03 de 2023). *Statistical & qualitative data analysis software: about R and RStudio*. Obtenido de Kent State University: <https://libguides.library.kent.edu/statconsulting/r>

LocalSolver. (2021). *Vehicle Routing with Time Windows (CVRPTW)*. Obtenido de LocalSolver: <https://www.localsolver.com/docs/last/exampletour/vrptw.html>

- Lundin, A., Özkil, A., & Schuldt-Jensen, J. (2017). Smart Cities: A Case Study in Waste Monitoring and Management. *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*, 1392-1401.
- Luo, Y., Tseng, H., Cui, S., Wei, L., Haken, R., & Naqa, I. (2019). Balancing accuracy and interpretability of machine learning approaches for radiation treatment outcomes modeling. *BJR/open*, 1-12.
- López, B. (12 de 10 de 2021). *El Norte es la zona de Córdoba donde más cayó la población en dos décadas: 11.000 habitantes menos*. Obtenido de ABC de Córdoba: [https://sevilla.abc.es/andalucia/cordoba/sevi-norte-zona-provincia-cordoba-donde-mas-poblacion-decadas-12-por-ciento-202110102039\\_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fsevilla.abc.es%2Fandalucia%2Fcordoba%2Fsevi-norte-zona-provincia-cordoba-donde-mas-poblacion-d](https://sevilla.abc.es/andalucia/cordoba/sevi-norte-zona-provincia-cordoba-donde-mas-poblacion-decadas-12-por-ciento-202110102039_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fsevilla.abc.es%2Fandalucia%2Fcordoba%2Fsevi-norte-zona-provincia-cordoba-donde-mas-poblacion-d)
- Marcos, A. (2021). *Smart cities, innovación social y jurídica o el reto de la transición ecológica*. Tirant lo Blanch.
- Martínez Heras, J. (28 de 05 de 2019). *Máquinas de Vectores de Soporte (SVM)*. Obtenido de IArtificial.net: <https://www.iartificial.net/maquinas-de-vectores-de-soporte-svm/>
- Martínez Heras, J. (29 de 09 de 2020). *¿Clasificación o Regresión?* Obtenido de IArtificial.net: [https://www.iartificial.net/clasificacion-o-regresion/#Tecnicas\\_de\\_Machine\\_Learning\\_para\\_Clasificacion](https://www.iartificial.net/clasificacion-o-regresion/#Tecnicas_de_Machine_Learning_para_Clasificacion)
- Martinez, A., & López, L. (2018). Variante Heurística para el Problema del Viajante. Caso de Aplicación: Circuito de Pesca Deportiva. *XXIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 695-704.
- McLean, M., & Muswema, A. (2007). Veterinary waste disposal: Practice and policy in Durban, South Africa (2001- 2003). *Waste Management*, 902-911.

- McLeod, F., Erdoğan, G., Cherrett, T., Bektaş, T., Davies, N., Dickinson, J., & Norgate, S. (2014). Improving collection efficiency through remote monitoring of charity assets. *Waste Management*, 273-280.
- Medvedev, A., Fedchenkov, P., Zaslavsky, A., Anagnostopoulos, T., & Khoruzhnikov, S. (2015). Waste Management as an IoT-Enabled Service in Smart Cities. *Springer eBooks*, 104-115.
- Méndez González, J. (13 de 10 de 2019). *Stepwise Regresión*. Obtenido de RPubs: [https://rpubs.com/jorge\\_mendez/609253#:~:text=La%20regresi%C3%B3n%20paso%20a%20paso,modelos%20con%20cientos%20de%20variables](https://rpubs.com/jorge_mendez/609253#:~:text=La%20regresi%C3%B3n%20paso%20a%20paso,modelos%20con%20cientos%20de%20variables).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Sistemas de Recogida. Tipos de sistemas de recogida*. Obtenido de Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-recogida/Contenedores-superficie-soterrados.aspx>
- Munizaga Plaza, J., & García de Cortázar, A. (2013). Generación de residuos domésticos y su variabilidad en comunidades de tamaño intermedio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 9-17.
- Nielsen, J. (15 de 07 de 2021). *Sensorización: La recogida de residuos inteligente*. Obtenido de Equipamiento y Servicios Municipales: [https://www.youtube.com/watch?v=06yPS-EGHk4&ab\\_channel=EquipamientoyServiciosMunicipales](https://www.youtube.com/watch?v=06yPS-EGHk4&ab_channel=EquipamientoyServiciosMunicipales)
- Observatorio Tecnológico de Hidalgo. (27 de 10 de 2020). *¿Qué es Ensemble Learning?* Obtenido de OTech UAEH: <https://otech.uaeh.edu.mx/noti/index.php/ia/ai-101que-es-ensemble-learning/>
- Ocaña Prados, J. (2007). *Historia de la villa de Villanueva de Córdoba*. La Fuente Vieja.
- Parlamento Europeo. (22 de 02 de 2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. Obtenido de Parlamento Europeo:

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Patel, K., & Patel, S. (2016). Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6122-6131.

Phillips, A. (20 de 02 de 2021). *La historia de la humanidad contada a través de la basura*. Obtenido de Vanguardia: <https://www.lavanguardia.com/historiayvida/20210220/6255806/historia-humanidad-contada-traves-basura.html>

Pleno Municipal del Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba. (02 de 11 de 2021). *Acta. Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba*. Obtenido de Ayuntamiento de Villanueva de Córdoba: [https://villanuevadecordoba.sedelectronica.es/?x=Gaa1-OW11WWB73X959R9HI3gXFoCWAMr2klknQJDamwuWMYBHt\\*epcsmoKI16amYs1Rfa60SOSR5Mj\\*K4fS\\*WYUmsj6\\*d\\*CjnLSxXp6jqLbVy2dZH8-hrQ](https://villanuevadecordoba.sedelectronica.es/?x=Gaa1-OW11WWB73X959R9HI3gXFoCWAMr2klknQJDamwuWMYBHt*epcsmoKI16amYs1Rfa60SOSR5Mj*K4fS*WYUmsj6*d*CjnLSxXp6jqLbVy2dZH8-hrQ)

Ramos Cueli, J., Luque, A., Muñoz, D., & Barbancho Concejero, J. (2019). Machine Learning para la optimización inteligente de la recogida de residuos. *Avances en la investigación en ciencia e ingeniería*, 233-241.

Residuos Profesional. (11 de Octubre de 2017). *Granada impulsa la recogida de residuos con sensores en los contenedores*. Obtenido de Residuos Profesional: <https://www.residuosprofesional.com/granada-recogida-inteligente/>

Riva Sanseverino, R. (2014). Competitive Urban Models. *SxI Springer per l'Innovazione*, 1-14.

Santana Vega, C. (19 de 03 de 2018). *¿Qué es una Red Neuronal? Parte 1 : La Neurona / DotCSV*. Obtenido de DotCSV: [https://www.youtube.com/watch?v=MRIv2IwFTPg&ab\\_channel=DotCSV](https://www.youtube.com/watch?v=MRIv2IwFTPg&ab_channel=DotCSV)

Schimmer, M. (Marzo de 2023). *Recogida dinámica de residuos: mejora de la sostenibilidad y reducción de costes*. Obtenido de AMCS: <https://www.amcsgroup.com/es/blogs/recogida-dinamica-de-residuos-mejora-de-la-sostenibilidad-y-reduccion-de-costes/>

Sensoneo. (2023). *Gestione los residuos de forma más inteligente*. Obtenido de Sensoneo: <https://sensoneo.com/es/solucion-monitoreo-residuos/>

Solano Meza, J., Orjuela Yepes, D., Rodrigo-Illarri, J., & Cassiraga, E. (2019). Predictive analysis of urban waste generation for the city of Bogotá, Colombia, through the implementation of decision trees-based machine learning, support vector machines and artificial neural networks. *Heliyon*, 1-11.

UCA. (04 de 07 de 2015). *El viajante de comercio*. Obtenido de knuth.uca.es: <https://knuth.uca.es/moodle/mod/page/view.php?id=3416#:~:text=Podemos%20tener%20en%20cuenta%20dos,no%20existir%20una%20de%20ellas>

Universidad Internacional de La Rioja. (07 de 05 de 2021). *Árboles de decisión: en qué consisten y aplicación en Big Data*. Obtenido de UNIR: <https://www.unir.net/ingenieria/revista/arboles-de-decision/>

World Bank. (2016). *Smart cities*. Obtenido de World Bank: [https://documents1.worldbank.org/curated/en/896971468194972881/310436360\\_201602630200228/additional/102725-PUB-Replacement-PUBLIC.pdf](https://documents1.worldbank.org/curated/en/896971468194972881/310436360_201602630200228/additional/102725-PUB-Replacement-PUBLIC.pdf)