



## LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CONTENEDORES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN ALCALÁ DE HENARES

Arturo BLANCO ALONSO

arturbla@ucm.es

Recibido: 10 de mayo del 2016

Enviado a evaluar: 12 de mayo del 2016

Aceptado: 28 de junio del 2016

### RESUMEN

El aumento de la generación de los residuos es un problema que afecta al medio ambiente en su conjunto y que no debemos obviar. Una buena gestión de los residuos es clave para mejorar la perspectiva futura, y dentro de las actividades de gestión es clave la recogida de los residuos. Buscar la forma más óptima de recoger los residuos lleva consigo una reducción del coste social, económico y ambiental. Con la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se ha pretendido elaborar una metodología que nos permita localizar los lugares más recomendables para la ubicación de los contenedores de recogida de las diferentes fracciones de residuos sólidos urbanos. Sabiendo que existen diferentes tipos de residuos, no todos deben gestionarse de la misma manera, de modo que hay que diferenciar entre modelos en los que se aplica la eficiencia y modelos en los que se aplica la equidad para la recogida de los residuos, teniendo en cuenta las necesidades de cada residuo.

**Palabras clave:** Sistemas de Información Geográfica (SIG), residuos sólidos urbanos (RSU), recogida de residuos, localización de contenedores.

## OPTIMAL LOCATION OF SOLID WASTE CONTAINERS IN ALCALÁ DE HENARES

### ABSTRACT

The waste's rise is a problem that affects the environment as a whole and we cannot forget about it. A good waste's management is the key to improve the future prospect, and the waste collection is key within the management activities. To find out the better way to collect wastes leads to a reduction of the social, economic and environmental cost. With the use of the Geographic Information Systems it has been intended to elaborate a methodology which allowed us to identify the most suitable places for the location of the collection containers of the different sorts of the solid urban wastes. Taking into account that different types of wastes exist, not all of them should be managed in the same way. Therefore we have to differentiate between models where we apply efficiency and models where we apply equity for the collection of wastes, bearing in mind the necessities of each waste.

**Keywords:** Geographic Information System (GIS), solid urban waste (SUW), collect residues, container location.

## LOCALISATION OPTIMALE DES CONTENEURS DE DÉCHETS SOLIDES A ALCALA DE HENARES

### RÉSUMÉ

La génération accrue de déchets est un problème qui affecte l'environnement dans son ensemble et il ne faut pas ignorer. Une bonne gestion des déchets est essentielle pour améliorer les perspectives d'avenir, et dans les activités de gestion est la remise des clés des déchets. Trouver la manière la plus optimale pour collecter les déchets entraîne une réduction du coût social, économique et environnemental. Avec l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG), il a cherché à développer une méthodologie qui nous permet de localiser le plus approprié pour l'emplacement des conteneurs de collecte de différentes fractions de sites de déchets solides municipaux. Sachant qu'il existe différents types de déchets, pas tous devraient être gérés de la même manière, de sorte que nous devons faire la différence entre les modèles dans lesquels l'efficacité et des modèles dans lesquels l'équité pour la collecte des déchets est appliquée est appliquée, en tenant compte les besoins de chaque résidu.

**Mots-clés:** Systemes D'information Geographique (SIG), les dechets solides municipaux (MSW), la collecte des dechets, emplacement du conteneur.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los residuos constituyen uno de los problemas ambientales más graves de las sociedades modernas y en particular de las más avanzadas e industrializadas. El rápido proceso de urbanización que se ha llevado a cabo durante las últimas décadas ha originado la explotación sin límites de valiosos recursos naturales y con ello el incremento en la generación de residuos (Velázquez, 2008). Se trata de un problema en aumento debido al creciente volumen de residuos que se generan. A la vista de tal incremento en la generación de residuos, se llega a la conclusión de la necesidad de que realizar una buena gestión conlleva un beneficio social, económico y medioambiental.

La recogida de los residuos urbanos consiste en su recolección para efectuar su traslado a las plantas de tratamiento. Existen principalmente dos tipos de recogida: la no selectiva y la selectiva.

La recogida selectiva consiste en agrupar y clasificar los residuos de acuerdo con sus características y propiedades, con el fin de facilitar posteriormente su tratamiento. Su importancia recae principalmente sobre los ciudadanos, que son los primeros en realizar una selección de los productos recuperables, colocándolos en recipientes independientes (Yurena, 2014). En España la recogida separada de papel, cartón, vidrio y envases está ampliamente extendida.

Todas las actividades de gestión de residuos municipales, incluyendo la recogida, el transporte, el tratamiento y la eliminación, generan, en mayor o menor medida, emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que contribuyen a agravar el fenómeno del cambio climático que actualmente afecta a nuestro planeta.

En conjunto las actividades de gestión de residuos contribuyen con un 2,8% al total de emisiones de GEI producidas en España. No es un

porcentaje muy elevado pero su contribución ha aumentado más de un 60% respecto al año 1990, lo que hace que este sector tenga cada vez mayor importancia en el contexto de la prevención del cambio climático (Ministerio de Medio Ambiente, 2016).

Los servicios públicos vinculados con el medio ambiente han sido sometidos a un grado intenso de reforma tanto de su organización como de su regulación. Los servicios de residuos sólidos son buen ejemplo, desde la recogida en el entorno urbano hasta el depósito en instalaciones de eliminación o tratamiento, pasando por el transporte desde el entorno urbano hasta estas últimas instalaciones (Germà Bel, 2006).

A través de la directiva marco europea de residuos (Directiva 2006/12/CE) se señala la necesidad de que los Estados miembros dispongan de instrumentos jurídicos y de planificación sobre residuos. En España, la elaboración y posterior ejecución de estrategias y planes de gestión de residuos urbanos, se realiza fundamentalmente a nivel estatal y, sobre todo, autonómico. No obstante, la entrada en vigor de la Ley 10/1998, de Residuos confirmó las competencias en materia de gestión de residuos municipales ya establecidas en la Ley 7/1985, Reguladora de las Bases de Régimen Local. La Ley 10/1998 garantiza las competencias de las Entidades Locales en materia de recogida, transporte y eliminación de residuos sólidos urbanos y establece unas directrices generales sobre la forma en la que debe hacerse. En cuanto a nivel autonómico la Ley 5/2003, de 20 de Marzo, de Residuos de la Comunidad de Madrid, establece el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos, fomentando, por éste orden, su reducción, su reutilización, reciclado y otras formas de valorización. La regulación de los residuos sólidos urbanos, dentro del ámbito de competencias del Ayuntamiento de Alcalá de Henares, se encuentra en el Título IV de la Ordenanza Municipal Limpieza Viaria y Residuos del 19 de junio del 2007.

Es destacable la gran importancia que presentan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta informática imprescindible para capturar, almacenar, gestionar, manipular, analizar, modelar y representar datos referenciados, y son de gran utilidad para resolver problemas complejos de planificación y gestión territorial. Su constante evolución, los ha convertido en herramientas informáticas indispensables a la hora de llevar a cabo cualquier estudio relacionado con temas de localización geográfica y gestión de flotas.

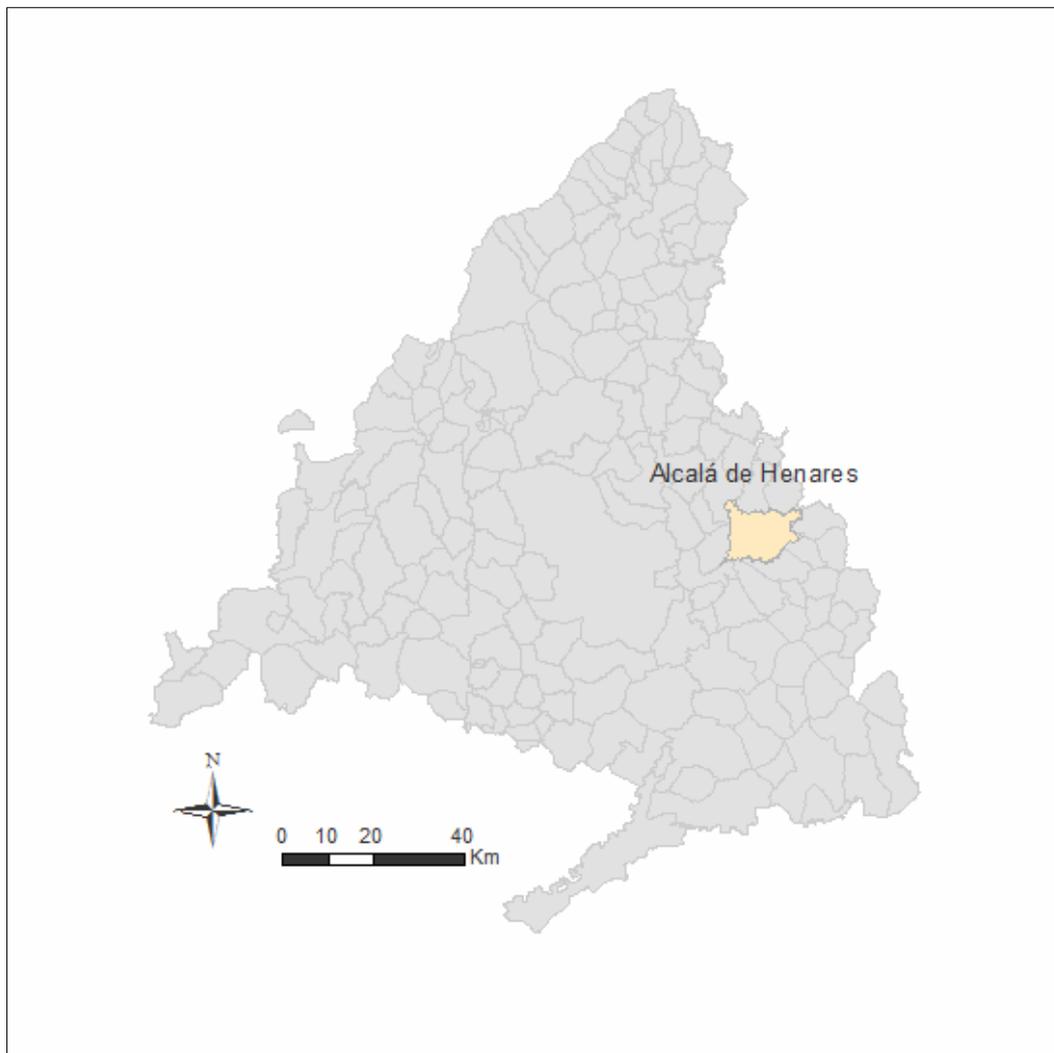
En la vida cotidiana es muy habitual la necesidad de desplazarse sobre el espacio geográfico para poder hacer uso de diversos servicios. Los trabajadores deben moverse de su domicilio a su lugar de trabajo, los estudiantes deben trasladarse a las escuelas, institutos o centros universitarios para recibir sus enseñanzas, los enfermos se desplazan hasta los centros de salud, etc.

Todos estos desplazamientos suponen un esfuerzo, gasto económico y tiempo, por ello la organización de la sociedad y su plasmación en el territorio geográfico implica considerar la posibilidad de estudiar cómo son estos desplazamientos, tan numerosos y que afectan al conjunto de la población de manera cotidiana, para intentar reducirlos y simplificarlos en alguna medida (Bosque y Moreno, 2004).

La utilización de estas herramientas informáticas posibilita la obtención de modelos óptimos de localización de contenedores de recogida de los

residuos urbanos para la ciudad de Alcalá de Henares, dejando muy lejos los diseños manuales y la utilización de mapas en formato papel.

Figura 1. Localización del municipio de Alcalá de Henares en la Comunidad de Madrid.



Fuente: Elaboración propia.

Ubicar correctamente los contenedores en el paisaje urbano es una tarea importante en la gestión de los residuos urbanos. En primer lugar, desde el punto de vista de la recogida de los RSU, una correcta ubicación de los contenedores facilita dicha recogida. En segundo lugar, sobre todo en el caso de la recogida selectiva, una buena ubicación es fundamental para garantizar la colaboración ciudadana en la recuperación de los materiales separados.

El objetivo general del presente trabajo es proponer una metodología de análisis, utilizando las herramientas de análisis de redes dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permita implantar los puntos de localización óptima de los contenedores de residuos sólidos urbanos (RSU) atendiendo a los modelos de equidad y eficiencia, y basándonos en el modelo de recogida implantado en el municipio de Alcalá de Henares.

## 2. METODOLOGÍA

Para la consecución del objetivo se han seguido una serie de pasos que se han ido desarrollando a lo largo del trabajo.

Para la localización óptima de los contenedores aplicaremos modelos de localización óptima de equipamientos (*Location-Allocation*).

Chuch y Murray (2009) han enunciado algunos principios básicos que se dan en la localización de un elemento:

- Algunas localizaciones son mejores que otras.
- La eficiencia de una localización se puede ver alterada por el contexto espacial.
- Los emplazamientos de un patrón espacial con múltiples instalaciones deben ser seleccionados simultáneamente, en lugar de independientemente unos de otros.

Los modelos de localización-asignación se pueden clasificar según el objetivo perseguido (Bosque y Moreno, 2011), destacando los siguientes:

Eficiencia: Consiste en la reducción al mínimo de las impedancias (costes de desplazamiento), localizando así un número determinado de instalaciones. Esto se puede conseguir con tres modelos distintos: el modelo mediano, la maximización de la accesibilidad y la maximización de los beneficios.

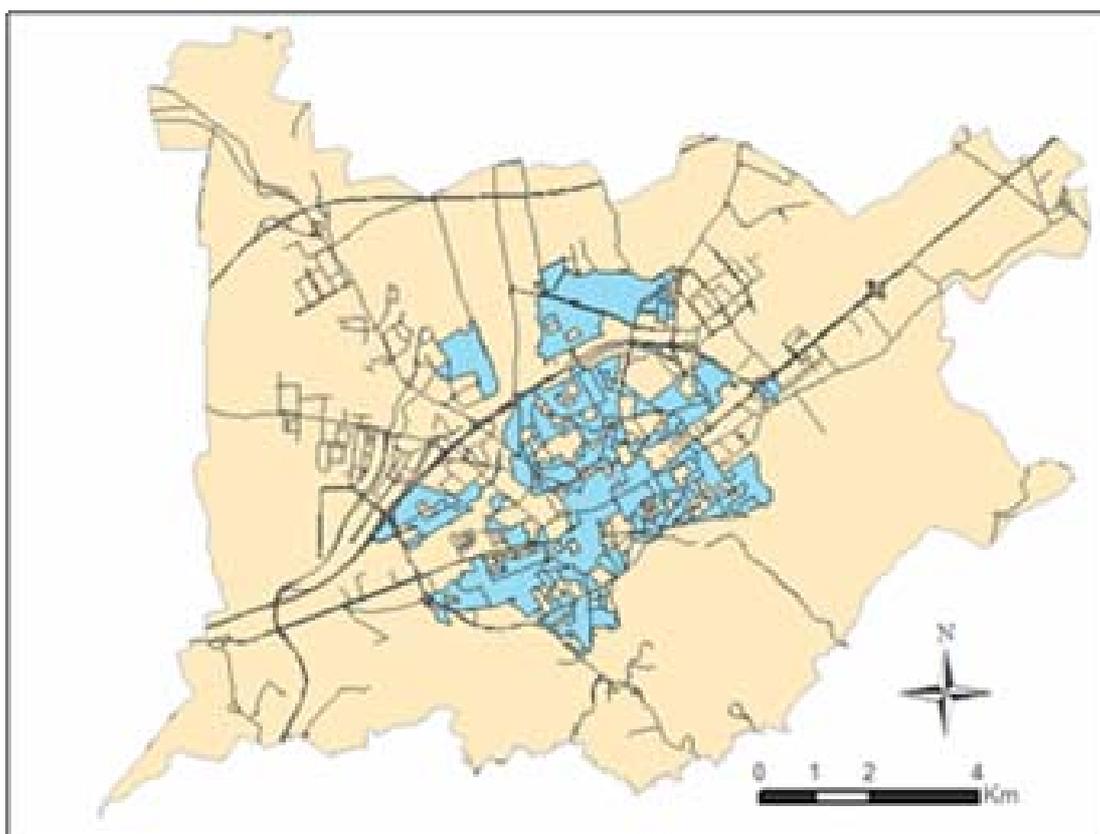
Equidad: Consiste en conseguir que las diferencias en la accesibilidad espacial de la demanda sean mínimas. La inaccesibilidad provoca una penalización para aquellos que la sufren, por tanto se intenta compensar la inaccesibilidad perdiendo así eficiencia. En definitiva, se persigue maximizar la igualdad forzando que la impedancia sea la menor posible.

En nuestro estudio utilizaremos ambas opciones atendiendo a las necesidades de las diferentes fracciones recogidas por los contenedores de residuos.

### 2.1. ÁREA DE ESTUDIO

Alcalá de Henares es un municipio de la Comunidad de Madrid situado en la zona este a 31 Km al este de la capital. Forma parte del denominado Corredor del Henares del que es núcleo central, junto a otras ciudades del Área Metropolitana de Madrid hacia el oeste (Torrejón de Ardoz, San Fernando de Henares Coslada y de la provincia de Guadalajara hacia el este (Alovera, Azuqueca de Henares y la propia Guadalajara).

Figura 2. Municipio de Alcalá de Henares con el suelo de uso residencial.



Fuente: Elaboración propia.

Su término municipal tiene una extensión de 87,7 Km<sup>2</sup> y tiene una población de 198.750 habitantes, a 1 de enero de 2.015, lo que hace una densidad de población de 2.288,74 hab/km<sup>2</sup>.

### 3. ESTIMACIÓN DE LA POBLACIÓN

A las capas iniciales se les debe realizar una serie de transformaciones que nos permitan trabajar con ellas posteriormente y así obtener la población correspondiente a cada portal. Esto nos sirve para conocer la cantidad de residuos generados en cada portal.

En primer lugar se debe delimitar la zona de estudio, correspondiente al municipio de Alcalá de Henares, por ello se ha obtenido una capa con la delimitación del municipio de Alcalá de Henares mediante una selección por atributos desde la capa municipios de Madrid. Esta capa la utilizaremos para recortar las siguientes capas mediante la herramienta de geoprocésamiento *Clip*.

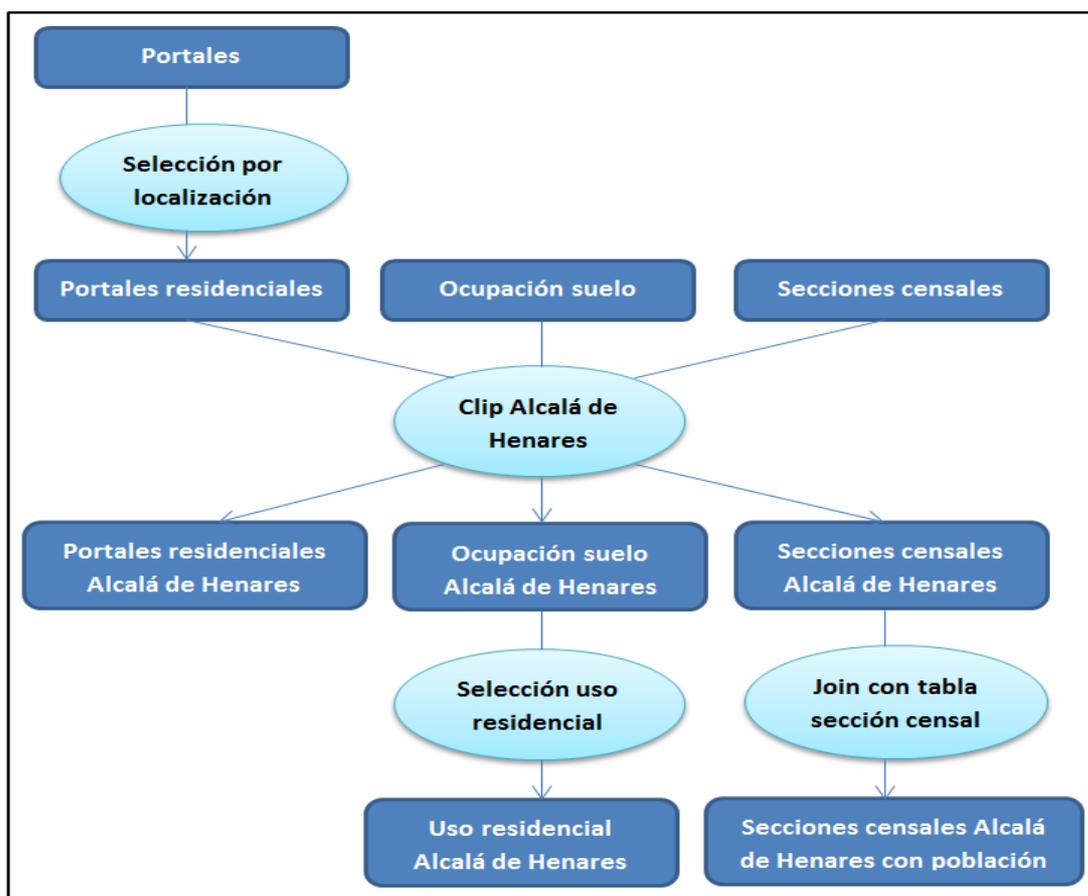
Para determinar el suelo residencial perteneciente a nuestra área de estudio, se ha recortado la capa de ocupación del suelo con la capa del municipio de Alcalá de Henares. A continuación se han seleccionado los usos del suelo que nos interesan para el estudio, que son los dedicados al uso residencial y se han exportado los datos a una capa nueva que sólo contiene el suelo dedicado a uso residencial.

De la capa de portales se han obtenido los correspondientes a edificios residenciales mediante una selección por localización y como en el caso del uso residencial se han exportado a una capa nueva.

Por último recortamos la capa de secciones censales con nuestro municipio, para posteriormente unirle la tabla Excel descargada del INE que contiene los datos de población de cada sección censal mediante el comando *Join*, obteniendo las secciones censales de Alcalá de Henares con su población correspondiente.

Una vez que disponemos de la población por secciones, debemos realizar una estimación de la población que vive en cada portal.

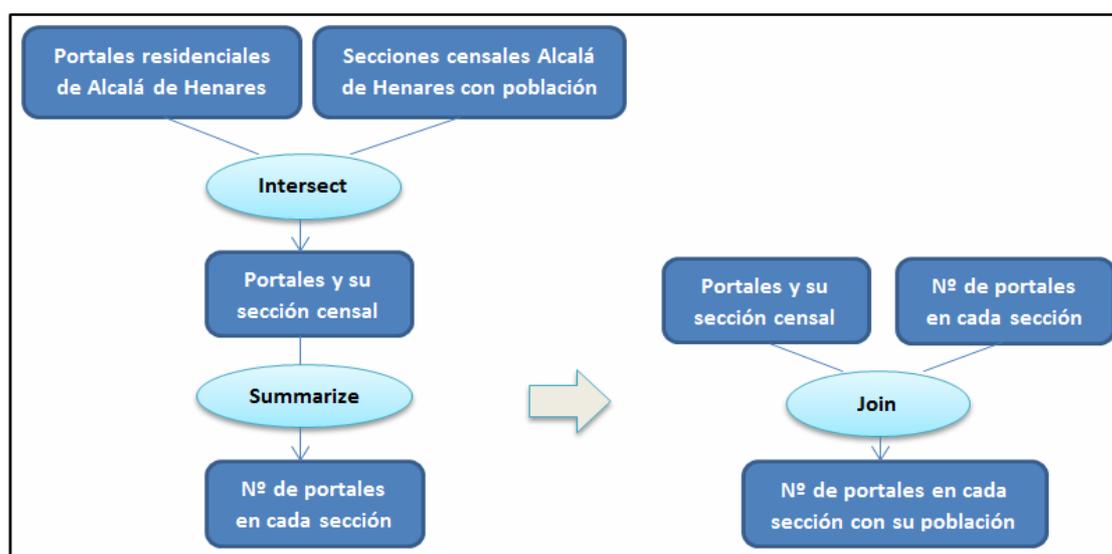
Figura 3. Proceso de transformación de las capas iniciales.



Fuente: Elaboración propia.

Para ello, primero hay que hacer una intersección de la capa de portales y la de secciones censales, y así obtener en qué sección cae cada portal. A continuación nos interesa saber el número de portales que corresponden a cada sección, esto se obtiene realizando un *Summarize* (comando que nos permite crear una nueva tabla agrupando los valores deseados) que nos da como resultado una tabla con el número de portales correspondientes a cada sección. Para obtener en la misma tabla la población y el número de portales de cada sección, debemos hacer una unión de tablas (*Join*) de forma que la tabla de la capa de portales intersectada reciba la información de la tabla del *Summarize*.

Figura 4. Transformaciones para obtener las secciones censales con sus portales y su población.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para poder realizar una estimación de la población que vive en cada portal, abrimos un nuevo campo en la tabla de la capa de portales para poder dividir la población perteneciente a cada sección entre el número de portales que se encuentran en cada sección (Tabla 1).

#### 4. GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN ALCALÁ DE HENARES

A través de la página Web del ayuntamiento de Alcalá de Henares, desde apartado de Medio Ambiente, se ha obtenido la cantidad de residuos que genera la población residente correspondiente al año 2013. Con estos datos y el número de habitantes que se ha obtenido de la página Web del INE a fecha de 1 de enero de 2015 (198.750 hab) se puede obtener la cantidad de residuos que genera cada habitante.

Tabla 1. Residuos generados por la población residente en Alcalá de Henares.

	KG/AÑO	KG/HAB/AÑO	KG/HAB/DIA
<b>Papel-cartón</b>	2.021.970	10,17	0,0279
<b>Vidrio</b>	1.956.609	9,84	0,0269
<b>Envases</b>	3.313.980	16,67	0,0457
<b>Resto</b>	54.088.660	272,14	0,7466
<b>Total</b>	61.381.219	308,83	0,8461

Fuente: Elaboración propia.

Para una óptima localización de los contenedores es necesario conocer la densidad de las diferentes fracciones de residuos para determinar la cubicación de los contenedores. Para ello tendremos que calcular el volumen de los materiales: resto, envases, vidrio y papel-cartón.

La densidad de los envases comprende un abanico que va desde 9 kg/m<sup>3</sup> hasta los 187 kg/m<sup>3</sup>, el vidrio presenta una densidad media de 340 kg/m<sup>3</sup> dependiendo del material que le adicionen, el papel presenta densidades comprendidas entre los 33 kg/m<sup>3</sup> y los 98 kg/m<sup>3</sup>, según el gramaje del papel, y la fracción resto puede presentar densidades muy diferentes dependiendo de la composición. Como hemos visto existen densidades muy diferentes, para facilitararlo y que resulte más claro unificaremos las densidades de los materiales utilizando una media de sus densidades. De modo que para los envases utilizaremos una densidad de 98 kg/m<sup>3</sup>, para el vidrio 340kg/m<sup>3</sup>, para el papel-cartón 66 kg/m<sup>3</sup> y para el resto 340 kg/m<sup>3</sup> (Allasia et al., 2014).

A partir de la densidad y la masa de los residuos sólidos urbanos, podemos obtener el volumen de residuos que genera la población de Alcalá de Henares al día mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Dónde  $V$  es el volumen,  $m$  es la masa y  $\rho$  la densidad.

Tabla 2. Datos de generación de residuos por habitante al día.

	<b>Residuos (kg/hab)</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (litros)</b>
<b>Papel- cartón</b>	0,0279	66	0,0004227	0,4227
<b>Vidrio</b>	0,0269	340	0,0000791	0,0791
<b>Envases</b>	0,0457	98	0,0004666	0,4666
<b>Resto</b>	0,7466	340	0,0021958	2,1958

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el volumen de cada fracción podemos calcular el volumen generado en cada portal de Alcalá de Henares al multiplicar la población de cada portal por el volumen de residuos de cada fracción.

## 5. ELABORACIÓN DE UNA RED VIARIA

Para cumplir el objetivo de localizar los contenedores y optimizar las rutas de recogida, utilizaremos herramientas de *Location-Allocation* que se encuentra en la extensión *Network Analyst*. Esta herramienta trabaja sobre una red, lo que hace necesaria la creación de la misma para la utilización de las diferentes herramientas asociadas. Para trabajar con la herramienta *Network Analyst* previamente debemos activar su extensión.

Una red es un sistema de elementos interconectados, como bordes (líneas) y cruces de conexión (puntos), que representa las posibles rutas desde una ubicación a otra.

En primer lugar debemos crear una *Geodatabase*, ésta es una base de datos geográfica en la que en un archivo se incluye todo el trabajo y nos permite mantener un orden dentro del mismo.

Dentro de ArcCatalog, seleccionamos la carpeta donde queremos localizar la *Geodatabase* y con el botón derecho "*New/Personal Geodatabase*". Dentro de la *Geodatabase* debemos crear la carpeta que almacenará la información, la *Feature Dataset*, que contendrá la red o *Network Dataset* a diseñar. Para ello, dentro de la *Geodatabase*, botón derecho "*New/Feature Dataset*". A continuación importamos la información de que disponíamos anteriormente al *Feature Dataset* (portales y red viaria).

Previamente a la construcción del *Network Dataset*, debemos añadir un campo "LENGTH" con la longitud de cada tramo de vía a la tabla de atributos, correspondiente a la Red Viaria de Alcalá de Henares, para que lo reconozca y los tome como campo por defecto para la impedancia cuando hagamos cualquier tipo de análisis a través de la red. Lo obtenemos calculando la geometría cada tramo.

Para la creación del *Network Dataset*, botón derecho sobre la *Feature Dataset* que hemos creado "*New/Network Dataset*". Ahora se deben añadir las características de nuestra red (conectividad, modelar giros, elección de los atributos...). Dejamos las características como vienen por defecto, pues para realizar los análisis no necesitamos cambiarlas.

En los análisis que realizamos a continuación, tomamos como puntos candidatos para la localización de los contenedores, las intersecciones de las calles de nuestra red vial, también se podía haber optado por añadir los centroides de las calles y/o portales, posibilitando un mejor reparto y cubrir mejor la demanda. Sin embargo por un problema técnico con ArcGis no ha sido posible.

## 6. UBICACIÓN DE LOS CONTENEDORES

La gestión de los residuos municipales la lleva a cabo el propio ayuntamiento, desarrollando el modelo de recogida más adecuado y teniendo en cuenta las características propias. Se pueden distinguir diferentes modelos de recogida, basándonos en la modalidad y ubicación del sistema de recogida (Arévalo y Martínez, 2009).

Figura 5. Modelos de recogida implantados en las ciudades españolas.

	ACERA	AA
MODELO 1		
MODELO 2		
MODELO 3		
MODELO 4		

Fuente: Gallardo et al, 2009.

Para la localización de nuestros contenedores nos basamos en el modelo implantado en Alcalá de Henares, que es el que se corresponde con el "Modelo 2" (Figura 5). Éste modelo se corresponde a la combinación del sistema de acera para las fracciones envases y resto, y el sistema de áreas de aportación para las fracciones vidrio y papel-cartón.

## 6.1. ELECCIÓN DE LOS CONTENEDORES

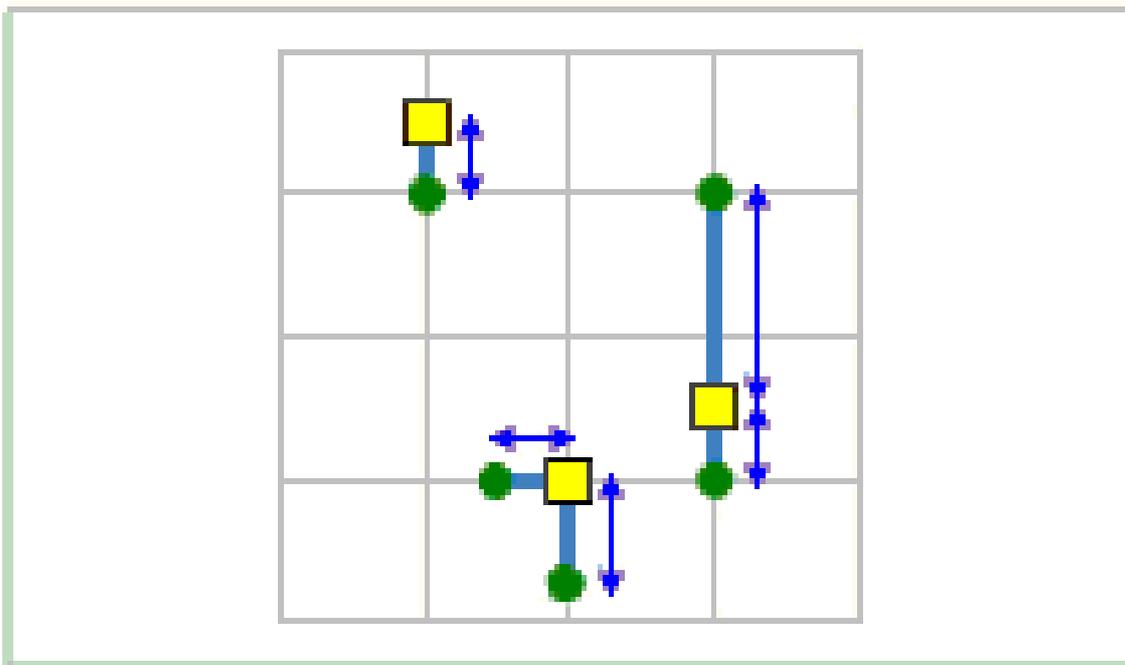
Actualmente es posible encontrar una gran variedad de contenedores, cuyo diseño varía en función de su capacidad, sistema de retirada, y tipo de residuo que contengan. En nuestro caso, para simplificar, utilizaremos contenedores de carga trasera de 2.400 litros para las fracciones envases y resto, y para el papel-cartón y vidrio optamos por el contenedor iglú de 2.500 litros; con la capacidad de estos contenedores podemos cubrir la demanda al completo.

## 6.2. DISTRIBUCIÓN DE CONTENEDORES MINIMIZANDO LA IMPEDANCIA

De la *web* del ayuntamiento ([www.ayto-alcaladehenares.es/](http://www.ayto-alcaladehenares.es/)) hemos obtenido el número de contenedores que tienen distribuidos para las diferentes fracciones (Fracción resto: 1.383 contenedores, fracción envases: 824 contenedores, fracción vidrio: 610 contenedores, fracción papel-cartón: 475 contenedores).

Localizamos los contenedores de forma que, prácticamente, la totalidad de la población quede cubierta, ubicando las instalaciones de modo que se minimice la suma de todas las distancias entre los puntos de demanda (los portales) y los puntos de oferta (los contenedores). Es decir, reducimos la distancia total que debe recorrer el público para llegar a los contenedores de las diferentes fracciones. Lo realizamos con la opción de minimizar impedancias dentro de la herramienta "Location-Allocation".

Figura 6. Ilustración de Minimizar Impedancia.

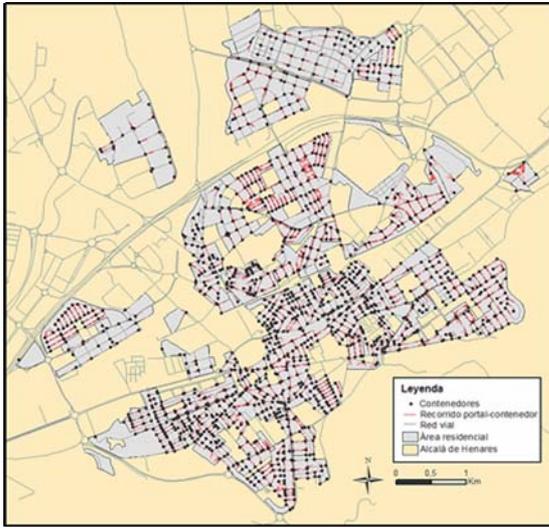


Fuente: ArcGis 10.1.

Atendiendo al modelo de recogida implantado en Alcalá de Henares, para las fracciones "resto" y "envases" hay que tener en cuenta que la localización de los contenedores deben seguir el sistema de acera. Al situarse los contenedores cada 50 o 60 metros, establecemos que el recorrido máximo desde los portales hasta los contenedores sea de 100 metros.

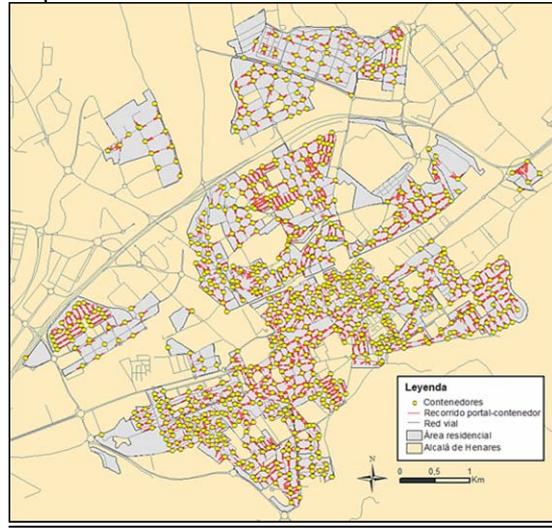
Para los contenedores de "vidrio" y "papel-cartón" al utilizarse el sistema de áreas de aportación, los contenedores se colocan con distancias entre sí de 100 a 400 metros. En nuestro caso establecemos que los contenedores no se pueden encontrar a más de 200 metros de los portales, para que la distancia recorrida sea la mínima posible.

Figura 7. Distribución contenedores de resto, modelo minimizar impedancia.



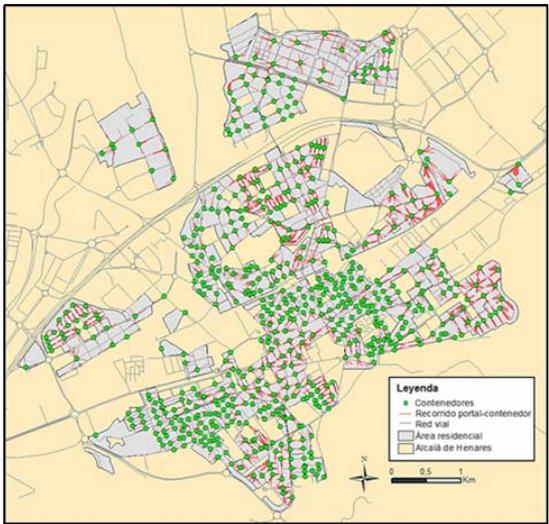
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Distribución de contenedores de envases, modelo minimizar impedancia.



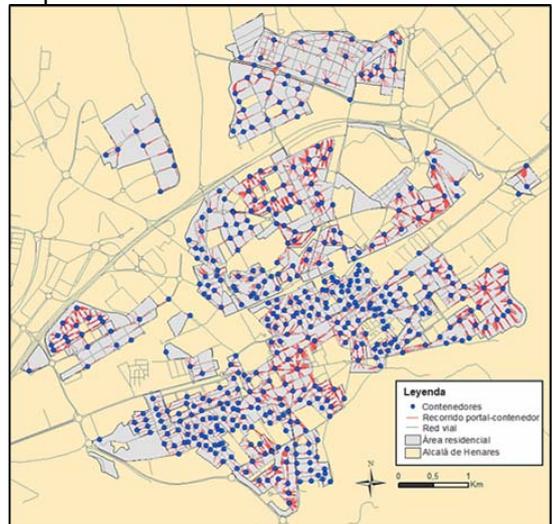
Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Distribución de contenedores de vidrio, modelo minimizar impedancia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Distribución de contenedores de papel-cartón, modelo minimizar impedancia.



Fuente: Elaboración propia.

Analizando los viajes realizados por la población, hemos obtenido el número de personas que realizan viajes desde los portales hasta los contenedores: de menos de 50 metros, entre 50 y 100 metros y la media del conjunto de viajes (Tabla 3).

Tabla 3: Personas que realizan los recorridos para las dos franjas de distancia media del recorrido para las diferentes fracciones.

	Resto	Envases	Vidrio	Papel-cartón
Recorrido menor a 50 m.	156.638	138.921	129.124	111.036
Recorrido entre 50 y 100 m.	35.110	52.827	56.801	67.925
Distancia media (m)	34,75	42,62	55,11	63,54

Fuente: Elaboración propia.

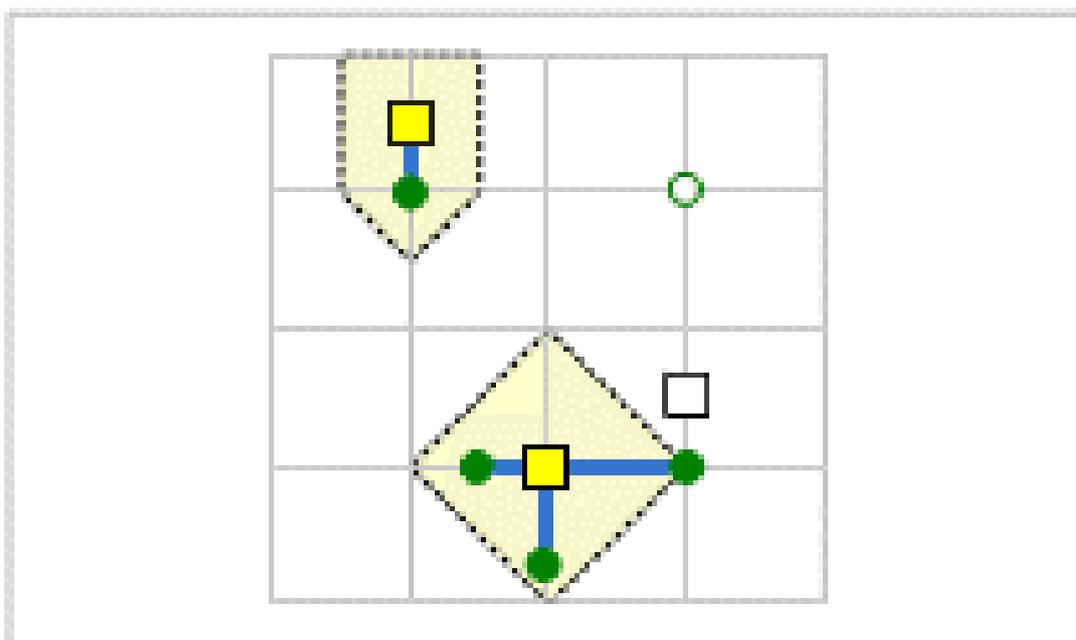
Es una distancia media bastante baja, concretamente las de los contenedores de resto y envases, debido principalmente a que al disponer de un número bastante elevado de contenedores, se disminuye la distancia de localización entre ellos.

### 6.3. SISTEMA DE RECOGIDA EN ACERA, PARA RESTO Y ENVASES, MODELO MINIMIZAR INSTALACIONES

Como ya hemos comentado anteriormente, para la localización de los contenedores debemos aplicar o el modelo de la equidad o el de la eficiencia.

Utilizamos la aplicación *Location-Allocation* del módulo de análisis de redes para obtener la localización de los contenedores. Dentro de la aplicación encontramos las herramientas *Minimize Facilities* y *Maximize Attendance*.

Figura 11. Ilustración de Minimizar Instalaciones.

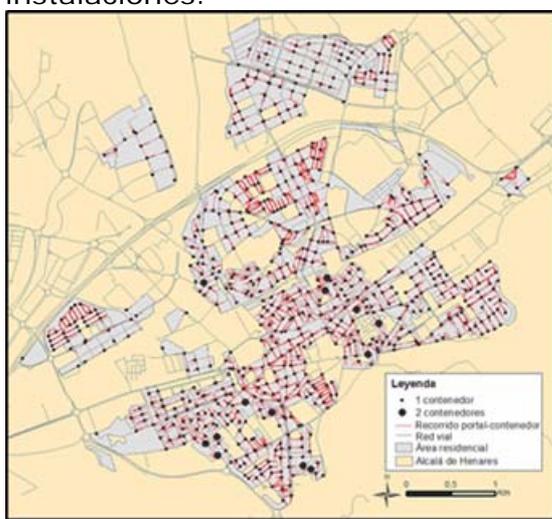


Fuente: ArcGis 10.1.

Para la demanda de los contenedores de resto y de envases, lo que nos interesa es que quede la mayor parte de la población cubierta sin importar el peso de la misma, por ello aplicamos el modelo de equidad con la herramienta *Minimize Facilities* (Minimizar Instalaciones). Minimiza el número de puntos de oferta de forma que toda la demanda quede dentro de un umbral de distancia (determina el número de puntos de oferta y su localización).

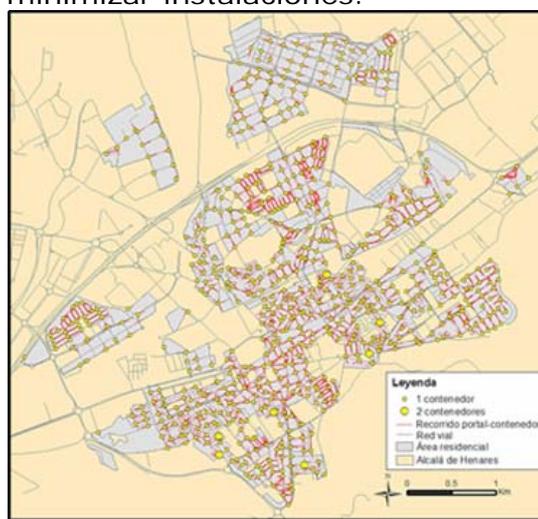
Utilizamos el modelo "*Minimize Facilities*" para obtener los contenedores de resto y envases. Al igual que para distribuir los contenedores existentes, los localizamos de tal forma que el viaje desde el portal a los contenedores sea como máximo de 100 metros.

Figura 12. Distribución contenedores de resto, modelo minimizar instalaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Distribución de contenedores de envases, modelo minimizar instalaciones.



Fuente: Elaboración propia.

El modelo minimizar instalaciones nos permite ajustar los contenedores necesarios a la demanda de los ciudadanos, favoreciendo un ahorro económico a la administración tanto por la distribución de contenedores como por el dinero invertido para su traslado.

Con éste modelo tenemos la posibilidad de dimensionar los contenedores o el número de ellos que son necesarios para cubrir la demanda en aquellos contenedores que tienen una demanda asignada mayor a la de su capacidad, obteniendo:

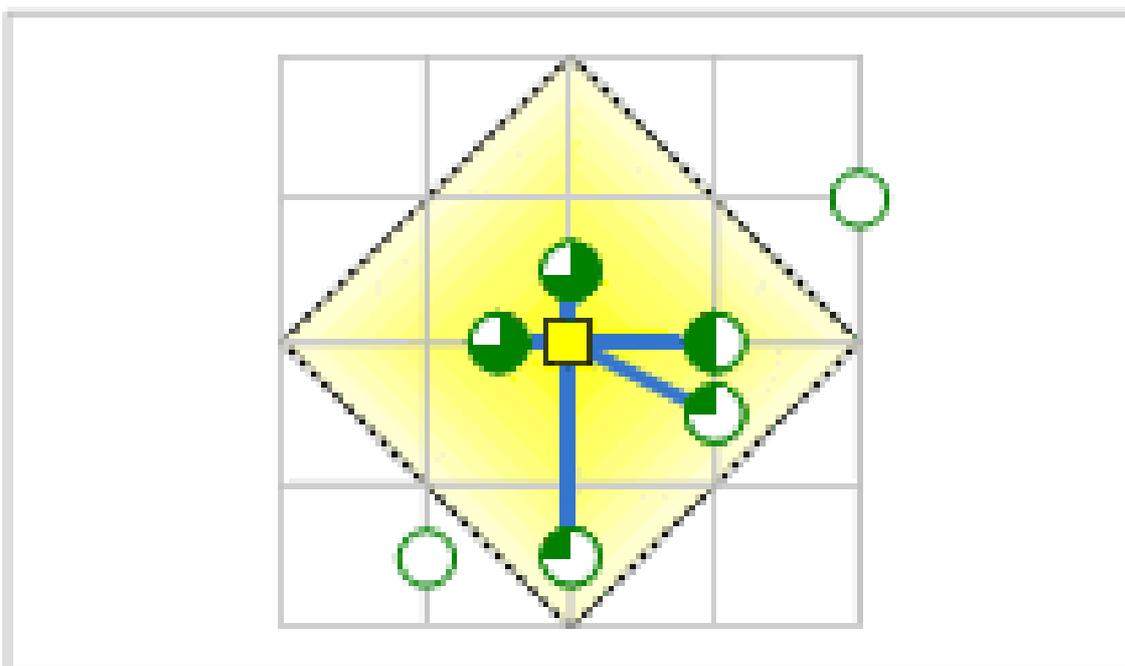
- Contenedores de resto: 697, de los cuales 13 se han asignado posteriormente al análisis para poder cubrir la demanda en aquellos puntos dónde hay una mayor concentración de población y, por tanto, una mayor generación de residuos.
- Contenedores de envases: 691, de los cuales 7 se han asignado debido a una concentración de la demanda que sobrepasa la capacidad de un solo contenedor.

En cuanto a la distancia media de los recorridos, se obtiene que para depositar los residuos de resto debe recorrerse una media de 47,38 metros y para depositar los envases 47,46 metros. Es una media más alta que la obtenida mediante la minimización de impedancia debido a que para el primer análisis se ha utilizado el número de contenedores actuales en Alcalá de Henares y en éste segundo análisis el número mínimo de contenedores que se deben distribuir para cubrir la demanda nos lo proporciona el propio análisis.

#### 6.4. SISTEMA DE RECOGIDA ÁREAS DE APORTACIÓN, PARA VIDRIO Y PAPEL-CARTÓN, MODELO MAXIMIZAR ASISTENCIA

Para el vidrio y papel y cartón, aplicaremos el modelo de la eficiencia, utilizando la herramienta *Maximize Attendance* (Maximizar asistencia), que maximiza la demanda localizada dentro de un umbral de distancia, dando más peso a la demanda localizada más cerca de los puntos de oferta.

Figura 14. Ilustración de Maximizar Asistencia.



Fuente: ArcGis 10.1.

Las instalaciones se eligen de modo que se asigne el máximo peso de demanda posible a las mismas asumiendo que el peso de la demanda se reduce en relación con la distancia entre la instalación y el punto de demanda.

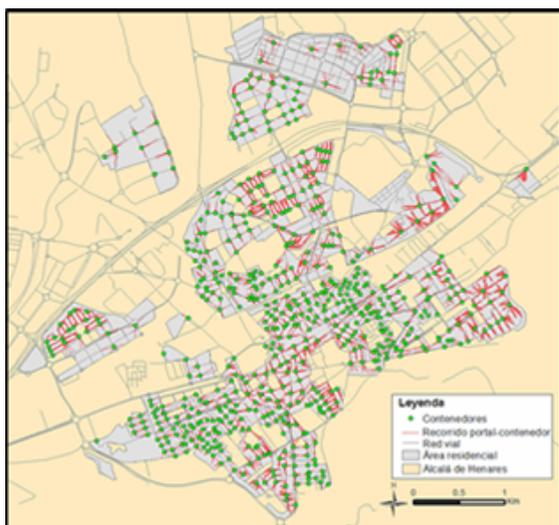
Hay estudios que indican que cuanto más cerca se encuentren los contenedores de la población, mayor predisposición a separar los residuos. A medida que alejamos los contenedores de los puntos de demanda menor será la población que separe los residuos en las diferentes fracciones (Rojas et al., 2011).

A groso modo, teniendo en cuenta el estudio de Rojas et al (2011), el 64% de la población que se encuentra a menos de 50 metros reciclaría siempre, el 51% de la población que dispone de un contenedor a una distancia entre 50 y 100 metros reciclaría siempre, el 35% de la población que dispone de un contenedor a una distancia entre los 100 y 200 metros reciclaría alguna vez, y si la distancia es mayor a 200 metros, el 32% de la población reciclaría siempre.

El número de contenedores utilizado corresponde a los que hay repartidos actualmente en Alcalá de Henares y que ya hemos utilizado para análisis anteriores. Para la fracción vidrio disponemos de 610 contenedores y para el papel-cartón de 475 contenedores.

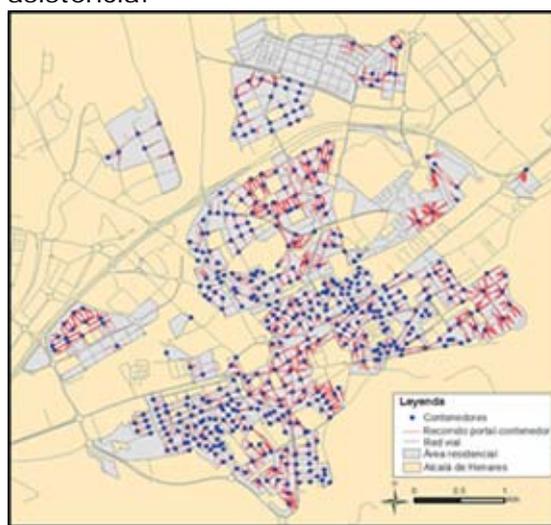
En las propiedades, indicamos al igual que en el análisis anterior, que los viajes se realicen desde los puntos de demanda hacia los puntos de oferta. En este caso la distancia máxima que deban recorrer los ciudadanos será de 200 metros. Los lugares candidatos para ubicar los contenedores se obtienen de los nodos contenidos en la red viaria creada.

Figura 15. Distribución de contenedores de vidrio, modelo maximizar asistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Distribución de contenedores de papel-cartón, modelo maximizar asistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Con este modelo, independientemente de la distancia, la población cubierta sería de 195.581 personas, el 99%; pero no todos reciclarían por igual. Si atendemos al estudio realizado por Rojas et al (2011), hay que diferenciar la disposición a reciclar dependiendo de la distancia, y dependiendo de esta distancia se reciclará más o menos.

Atendiendo al estudio mencionado anteriormente y a que el número total de viajes, desde los portales a los contenedores, es de 10.222, obtenemos:

- Desplazamientos inferiores a 50 metros son 5.476, que se corresponde con 131.236 habitantes. El 66% de la población dispone de un contenedor a menos de 50.
- Desplazamientos entre 50 y 100 metros son 3.661, correspondiente a 54.692 habitantes, el 28% de la población.
- Desplazamientos entre 100 y 200 metros son 1.085, correspondiente a 9.659 habitantes, el 5% de la población.
- El 1% de la población tiene que recorrer más de 200 metros para llegar al contenedor, 3.163 personas.

Se ha obtenido que la distancia media que debe recorrer la población para separar el vidrio es de 54,02 metros, bastante más alta que en los modelos de minimización de la impedancia al guiarnos por el modelo de la eficiencia.

Del mismo modo que en el análisis del vidrio, determinamos la cantidad de población que reciclaría en función de las distancias que tendrían que recorrer los ciudadanos. El número total de desplazamientos desde los portales a los contenedores es de 9.889 correspondiente a 194.427 personas, determinando:

- Viajes inferiores a 50 metros son 4.484, que se corresponde con 116.884 habitantes. El 59% de la población dispone de un contenedor a menos de 50 metros.
- Viajes entre 50 y 100 metros son 3.875, correspondiente a 63.264 habitantes, el 32% de la población.
- Viajes entre 100 y 200 metros son 1.530, correspondiente a 14.279 habitantes, el 7% de la población.
- Casi el 2% de la población tiene que recorrer más de 200 metros hasta llegar a un contenedor de papel-cartón, 4.323 personas.

En éste caso, la distancia media que debe recorrer una persona de Alcalá de Henares para depositar el papel- cartón en su contenedor correspondiente es de 61,24 metros.

A pesar de que la distancia media que debe andar la población para separar los residuos de vidrio y papel-cartón obtenida por el modelo de maximizar asistencia sea más alta que en los análisis anteriores, debe destacarse que en éste último la cantidad de población que se encuentra a menos de 50 metros de distancia comprende al 66% de la población para el vidrio y al 59% de la población para el papel; siendo mayor que con el modelo en el que se minimiza la impedancia para éstos mismos residuos.

Teniendo en cuenta la gente que reciclaría siempre en función de cada franja de distancia de los resultados obtenidos del estudio de Rojas et al (2011) hemos calculado la población que reciclaría siempre tanto vidrio como papel-cartón en Alcalá de Henares.

Tabla 4. Porcentaje de población que reciclaría siempre vidrio y papel-cartón en función de las franjas de distancia.

Franjas de distancia	Porcentaje de personas que reciclarían siempre en función de la franja (Rojas et al., 2011)	Personas que reciclarían siempre	
		Vidrio	Papel-cartón
0-50 metros	64%	83.991	74.805
50-100 metros	51%	27.893	32.264
100-200 metros	35%	3.380	4.997
>200 metros	32%	1.012	1.383
Total personas		116.276	113.449
Porcentaje total		58%	57%

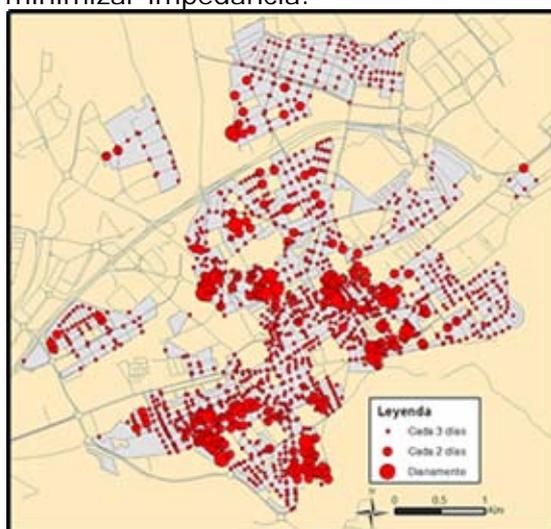
Fuente: Elaboración propia.

## 6.5. ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE RECOGIDA DE LOS CONTENEDORES

Finalmente hemos determinado los períodos de recogida de los contenedores de las diferentes fracciones (Figuras 17 a 24) teniendo en cuenta la cantidad de residuos que genera la población y la capacidad de los contenedores: 2.400 litros para las fracciones envases y resto, y para el papel-cartón y vidrio optamos por el contenedor iglú de 2.500 litros.

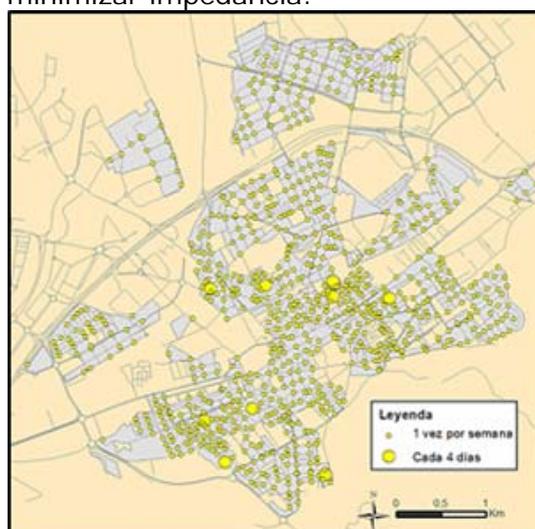
Para establecer los períodos de recogida, hemos considerado los contenedores localizados gracias a los análisis anteriores, y a partir de ellos y sabiendo el volumen de residuos que recogen al día, se puede hacer una estimación de la frecuencia con la que se tienen que vaciar. También es interesante en cuanto a la reducción de costes, pues según los volúmenes que recojan, necesitarán ser vaciados con mayor o menor frecuencia, y nos permite recogerlos cuando los contenedores se encuentren lo más llenos posible.

Figura 17. Frecuencia de recogida de contenedores de resto, modelo minimizar impedancia.



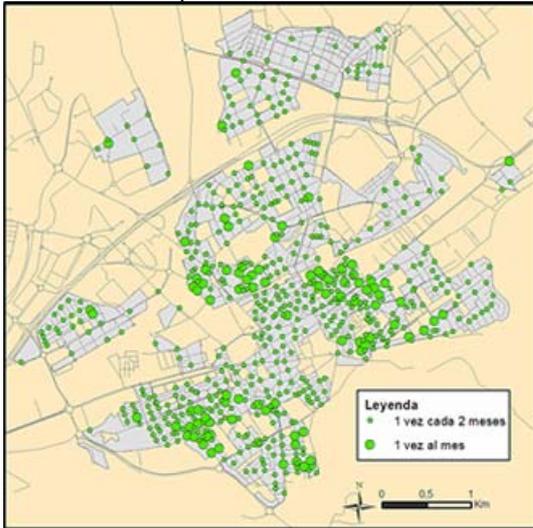
Fuente: Elaboración propia.

Figura 18: Frecuencia de recogida de contenedores de envases, modelo minimizar impedancia.



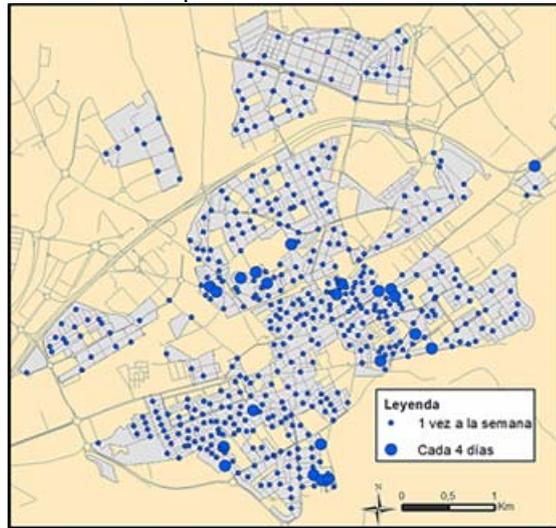
Fuente: Elaboración propia.

Figura 19: Frecuencia de recogida de contenedores de vidrio, modelo minimizar impedancia.



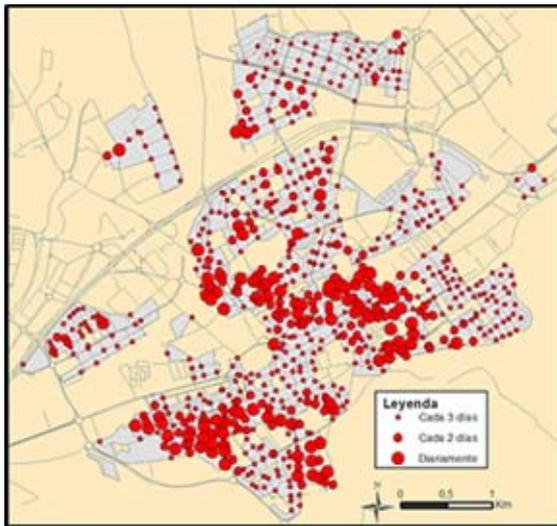
Fuente: Elaboración propia.

Figura 20: Frecuencia de recogida de contenedores de papel-cartón, modelo minimizar impedancia.



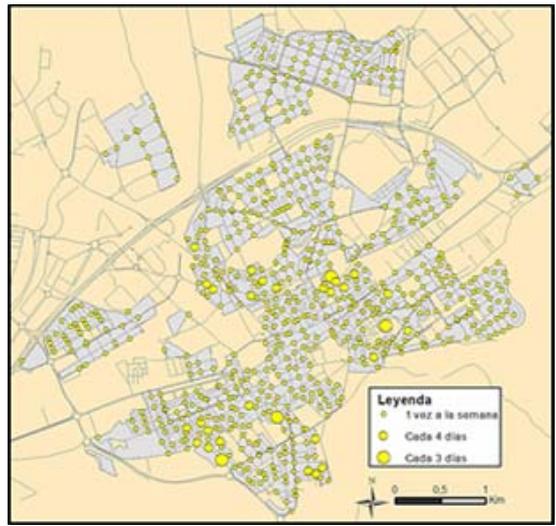
Fuente: Elaboración propia.

Figura 21: Frecuencia de recogida de contenedores de resto, modelo minimizar instalaciones.



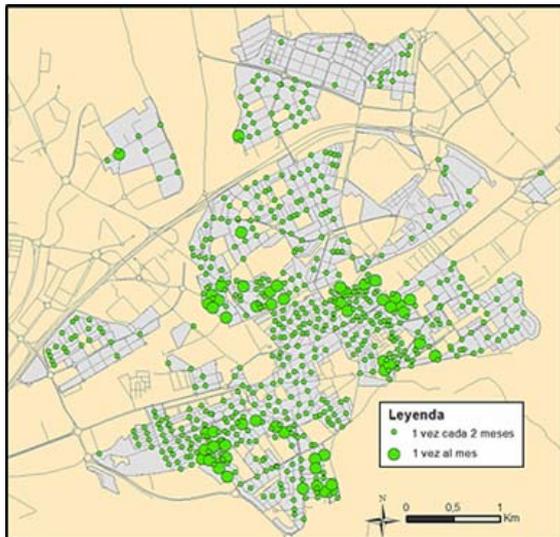
Fuente: Elaboración propia.

Figura 22: Frecuencia de recogida de contenedores de envases, modelo minimizar instalaciones.



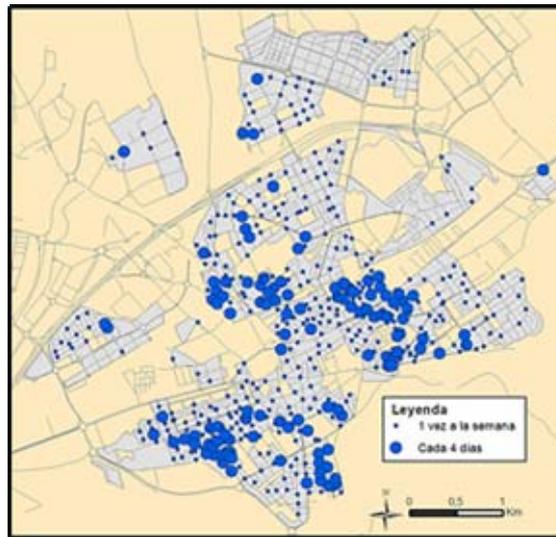
Fuente: Elaboración propia.

Figura 23: Frecuencia de recogida de contenedores de vidrio, modelo maximizar asistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: Frecuencia de recogida de contenedores de papel-cartón, modelo maximizar asistencia.



Fuente: Elaboración propia.

## 7. CONCLUSIONES

Mediante este trabajo se ha querido proponer una metodología de análisis para establecer los puntos de localización óptima de los contenedores de recogida de los residuos sólidos urbanos en Alcalá de Henares, haciendo distinción entre las diferentes fracciones.

Este objetivo se ha logrado a través de dos modelos ejecutados con herramientas distintas de location-allocation (minimizar impedancia, minimizar instalaciones y maximizar asistencia).

Mediante la minimización de la distancia se han obtenido los resultados en los que la población debe recorrer la distancia media más corta, entre los portales y los contenedores, de las tres herramientas utilizadas, en parte debido a que se han repartido los contenedores existentes actualmente en Alcalá de Henares y en el caso de los contenedores dedicados a resto y envases es un número de contenedores bastante más elevado que con las otras dos herramientas.

Para la localización de los contenedores de resto y envases se ha querido aplicar el modelo de equidad, puesto que son las fracciones con una mayor predisposición a ser separadas, permitiendo que toda la población quede dentro de un umbral de distancia determinado, y se ha conseguido mediante la utilización de la herramienta que nos permite minimizar las instalaciones necesarias para cubrir la población, la cual ha permitido presentar unos resultados más equitativos, con una distancia media de traslado a los contenedores mayores pero con menores desigualdades entre la demanda.

Por último, con la utilización de la herramienta que permite maximizar la asistencia se ha respondido al modelo de eficiencia para localizar los contenedores correspondientes a las fracciones vidrio y papel-cartón, lo que nos ha permitido localizar los contenedores en aquellos lugares en los que hay una mayor concentración de población a pesar de privar a ciertos ciudadanos de la posibilidad de separar estas fracciones al tener que recorrer mayores distancias hasta los contenedores.

Se ha tratado de utilizar los modelos de eficiencia y equidad atendiendo a las necesidades que presentan las diferentes fracciones en cuanto a su separación por parte de los ciudadanos. De todo esto y, una vez revisado los resultados finales, podemos destacar que teniendo en cuenta las características de los residuos que se quieran recoger mediante sus contenedores habrá que aplicar un modelo u otro.

Se ha demostrado que la utilización de Sistemas de Información Geográfica, concretamente las herramientas de análisis de redes, proporciona una gran ayuda a la hora de optimizar la localización equipamientos atendiendo a las necesidades de cada uno de ellos.

Para posteriores estudios sería ideal ampliar las fracciones de residuos, siendo interesante la localización de puntos de recogida aceites usados, pilas, residuos vegetales, etc. También se deberían ampliar los puntos candidatos a la localización de los contenedores, añadiendo entre otras posibilidades los centroides de las calles para conseguir una mejor distribución de los contenedores.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- ALLASIA M.R., et al. (2014) "III Jornadas Nacionales GIRSU Chubut 2013 Experiencias nacionales en: Gestión integral de residuos sólidos" San Martín: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- ARÉVALO, R., MARTÍNEZ, J. (2009). Sistema de información geográfica (SIG) para la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) del municipio del Prat de Llobregat.
- BEL, G. (2006) "Gasto municipal por el servicio de residuos sólidos urbanos" *Revista de Economía Aplicada*, número 41 (vol. XIV), págs. 5 a 32.
- BOSQUE SENDRA, J. y MORENO JIMÉNEZ, A. (2004), "La localización óptima como problema: cuestiones teóricas y metodológicas". *Sistemas de información geográfica y localización de equipamientos*, Madrid, Edit RA-MA.
- GALLARDO, A., BOVEDA, M.D., COLMENAR, F.J., CARLOS, M., PRADES, M. (2009). "Estudio de los modelos de recogida selectiva de residuos urbanos implantados en ciudades españolas. Análisis de su eficiencia"
- INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO 1990 – 2014, Edición 2016.  
Fuente: <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/>

LEY 10/1998, de Residuos.

LEY 7/1985, Reguladora de las Bases de Régimen Local.

LEY 5/2003, de 20 de Marzo, de Residuos de la Comunidad de Madrid.

ORDENANZA MUNICIPAL LIMPIEZA VIARIA Y RESIDUOS del 19 de junio del 2007, Alcalá de Henares.

PÁGINA *WEB* DEL AYUNTAMIENTO DE ALCALÁ DE HENARES. Fuente: [www.ayto-alcaladehenares.es/](http://www.ayto-alcaladehenares.es/)

ROJAS, L.D., GALLARDO, A. PIÑERO, A. (2011). La distancia del domicilio al contenedor como un factor influyente en la frecuencia de separación de residuos urbanos.

VELÁZQUEZ PATIÑO, A.C. (2008), "La gestión de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Hannover: un modelo exitoso". *Anales de Geografía*, vol. 28, núm.1 163-177.

YURENA AFONSO, T. (2014) "Optimización de rutas de recogida de residuos en zonas mixtas urbana-rurales y orografía singular". Disponible en: <http://docplayer.es/6663343-Optimizacion-de-rutas-de-recogida-de-residuos-en-zonas-mixtas-urbana-rurales-y-orografia-singular-routing-optimization-for-waste-collection-in.html>