

Trabajo Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de
Empresas

Localización de Ecopuntos urbanos como
instalaciones semi-deseables

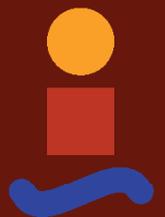
Autor: María Hernández Montesinos

Tutor: Jesús Muñuzuri Sanz

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

Localización de Ecopuntos urbanos como instalaciones semi-deseables

Autor:

María Hernández Montesinos

Tutor:

Jesús Muñuzuri Sanz

Catedrático de Universidad

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: Localización de Ecopuntos urbanos como instalaciones semi-deseables

Autor: María Hernández Montesinos

Tutor: Jesús Muñuzuri Sanz

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis padres y hermano

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido a la realización del presente trabajo.

En primer lugar, a mi tutor, Jesús Muñuzuri, por haber confiado en mí para la realización de este trabajo, así como por su disponibilidad y ayuda cada vez que lo he necesitado.

A mis amigos, pero en especial a mis compañeros de clase, por haberme acompañado en esta etapa y haberla hecho mucho más llevadera y divertida.

En último lugar, mención especial a mi familia, por el apoyo constante, y por su confianza y motivación en todo aquello que me propongo. Gracias por estar siempre.

María Hernández Montesinos

Sevilla, 2021

Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster se centra en la elaboración de un modelo de localización de instalaciones semi-deseables, con el que se pretende realizar el análisis de la ubicación de instalaciones llamadas Ecopuntos en los distintos barrios de la ciudad de Sevilla, y compararlo posteriormente con la ubicación ya existente de estas instalaciones en la ciudad. Para ello, se ha desarrollado un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MILP) con un enfoque bi-objetivo, cuya función objetivo está compuesta por un objetivo relacionado con el coste de inversión de las instalaciones y otro que hace referencia a la minimización del nivel de insatisfacción que genera la instalación en los vecinos asignados a ésta, comprendido este último por factores tanto de aceptación como de rechazo.

Para llevar a cabo la resolución del modelo, éste se ha implementado en el optimizador Gurobi, habiendo realizado el código en Python, del cual se han extraído los resultados para su posterior análisis. La resolución del modelo proporciona el número de Ecopuntos que deben abrirse, la ubicación de cada uno de ellos en los barrios de la ciudad de Sevilla, los barrios asignados a cada instalación y los valores de coste e insatisfacción de cada solución obtenida.

Con los resultados obtenidos para la ubicación de estas instalaciones en los barrios de la ciudad de Sevilla, se demuestra que es posible aplicar el enfoque bi-objetivo en la resolución de problemas reales.

Abstract

This thesis is focused on the development of a decision model for locating semi-desirable facilities, with the aim of analyzing the location of Ecopuntos facilities in different neighborhoods of the city of Seville and then comparing it with the existing location of these type of facilities in the city. In order to do that, a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model has been developed with a bi-objective approach, whose objective function is composed of an objective related to the investment cost of the facilities and another that refers to the minimization of the dissatisfaction level caused by facilities amongst residents assigned to them, consisting of both acceptance and rejection factors.

In order to carry out the model resolution, it has been implemented in the mathematical programming solver Gurobi Optimizer, the code has been created in Python, from which results have been extracted for their future analysis. The resolution of the model provides the number of Ecopuntos to be opened, the location of each one of them in different neighborhoods of the city of Seville, neighborhoods assigned to each installation and the values of cost and dissatisfaction level for each solution obtained.

The results obtained for the location of these installations in the neighborhoods of the city of Seville show that it is possible to apply the bi-objective approach to a real planning scenario.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xvi
Índice de Tablas	xviii
Índice de Figuras	xx
1 Introducción y Objeto del Trabajo	1
1.1. <i>Introducción</i>	1
1.1.1 <i>Ecopuntos</i>	1
1.2. <i>Objeto del Trabajo</i>	2
1.3. <i>Estructura del Trabajo</i>	3
2 Estado del Arte	4
2.1. <i>Problema Tradicional de Localización de Instalaciones</i>	4
2.2. <i>Localización de Instalaciones No Deseables</i>	4
2.3. <i>Localización de Instalaciones Semi-Deseables</i>	5
2.4. <i>Modelos Bi-Objetivo para la Localización de Instalaciones Semi-Deseables</i>	5
3 Metodología Empleada	6
3.1. <i>Construcción de la función de insatisfacción</i>	6
3.2. <i>Formulación del Modelo</i>	7
3.3. <i>Procedimiento de Resolución</i>	8
4 Caso de Estudio	10
4.1. <i>Consideraciones en el Caso de Estudio</i>	11
4.2. <i>Función de Insatisfacción en el Caso Estudiado</i>	12
4.2.1 <i>Función de Repulsión</i>	12
4.2.2 <i>Función de Atracción</i>	12
5 Generación de Datos	14
5.1. <i>Datos de los Barrios</i>	14
5.2. <i>Matriz de Distancias</i>	15
6 Procedimiento de Resolución	17
6.1. <i>Generación Soluciones No Dominadas</i>	17
7 Resultados Obtenidos	20
7.1. <i>Solución (57)</i>	21
7.2. <i>Solución (58)</i>	24
7.3. <i>Solución (60)</i>	27
7.4. <i>Solución (74) y Ecopuntos Instalados en la ciudad de Sevilla</i>	30
8 Conclusiones	36

9 Bibliografía	37
Anexo I	39
Anexo II	40
Anexo III	43

Índice de Tablas

Tabla 1 - Distritos y barrios de la ciudad de Sevilla	11
Tabla 2 - Coordenadas barrios Casco Antiguo	14
Tabla 3 - Datos población barrios Casco Antiguo	15
Tabla 4 - Resumen del conjunto de soluciones no dominadas	18
Tabla 5 - Barrios con Ecopuntos en Solución (57)	21
Tabla 6 - Ecopuntos por distrito en Solución (57)	22
Tabla 7 - Barrios asignados a cada Ecopunto de la solución (57)	23
Tabla 8 - Barrios con Ecopuntos en la Solución (58)	24
Tabla 9 - Ecopuntos por distrito en Solución (58)	25
Tabla 10 - Barrios asignados a cada Ecopunto de la solución (58)	26
Tabla 11 - Barrios con Ecopuntos en la Solución (60)	27
Tabla 12 - Ecopuntos por distrito en Solución (60)	28
Tabla 13 - Barrios asignados a cada Ecopunto de la solución (60)	29
Tabla 14 - Barrios con ecopuntos en la Solución (74)	30
Tabla 15 - Barrios de Sevilla con ecopuntos instalados	30
Tabla 16 - Comparativa Ecopuntos por distrito en Solución (74) y real	32
Tabla 17 - Barrios asignados a cada Ecopunto de la solución (74)	33
Tabla 18- Barrios asignados a cada Ecopunto de la situación real de Sevilla	34
Tabla 19 - Resumen de los parámetros de los resultados estudiados	35

Índice de Figuras

Figura 1 - Ejemplo Ecopunto instalado en Sevilla	2
Figura 2 - Representación gráfica de las métricas usadas	9
Figura 3 - Mapa delimitado de la ciudad de Sevilla	10
Figura 4 - Representación gráfica de la función de insatisfacción adoptada en el problema.	13
Figura 5 - Ejemplo arco Feria/Los Pájaros	16
Figura 6 - Restricción añadida al modelo en Gurobi	17
Figura 7 - Mapa distribución Ecopuntos en solución (57).....	22
Figura 8 - Mapa distribución Ecopuntos en solución (58).....	25
Figura 9 - Mapa distribución Ecopuntos en solución (60).....	28
Figura 10 - Mapa distribución Ecopuntos en solución (74).....	31
Figura 11 - Mapa Ecopuntos instalados en la ciudad de Sevilla	31
Figura 12 - Modificación en el código para obtener resultados de la situación real en Gurobi	33

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL TRABAJO

La finalidad de este primer capítulo es describir el propósito que se persigue con la realización del presente Trabajo Fin de Máster, introduciendo la situación de partida, la problemática que se aborda y el objetivo buscado con la realización del mismo. Así como una breve explicación de la estructura seguida a lo largo del documento para la ejecución del trabajo.

1.1. Introducción

Gran cantidad de instalaciones de la actual sociedad moderna y económica en la que vivimos están destinadas a la realización de actividades que, a pesar de su escaso atractivo, generan grandes beneficios a la sociedad. Algunos ejemplos de estas instalaciones son aeropuertos, centrales nucleares, vertederos o plantas industriales químicas. Sin embargo, a pesar de los beneficios que generan las actividades llevadas a cabo en infraestructuras de esa índole, existe a su vez cierto rechazo en las personas que viven en las proximidades de las mismas, debido al miedo a la aparición de diversos factores como pueden ser la contaminación tanto atmosférica como acústica, la pérdida de valor de las propiedades o futuros problemas de salud causados por la instalación, los cuales afectan negativamente a la calidad de vida de los habitantes que se encuentren cerca de instalaciones de este tipo.

Es por ello, que no se pueden considerar a las instalaciones de este tipo, puramente deseables o por su contrario, no deseables, apareciendo, por tanto, el término de instalación semi-deseable, que será el tipo de instalación que se estudia en el problema abordado a lo largo del presente trabajo.

En este sentido, a la hora de plantear problemas de instalación de infraestructuras de carácter semi-deseable, es importante tener en cuenta, además de la distancia de la instalación a las viviendas de sus proximidades, el efecto que dicha distancia provoca en los habitantes que se pueden ver afectados negativamente en el caso de tener su vivienda cerca de la instalación. Es aquí donde entra en juego el otro gran enfoque tratado en el presente trabajo, que es el del planteamiento de un modelo bi-objetivo para la resolución del problema en cuestión, con el que se pretende ubicar la instalación lo más alejada posible de la población afectada, pero a su vez, lo más próxima posible de cara a los usuarios que van a hacer uso de ella.

1.1.1 Ecopuntos

Una vez conocido en qué consiste una instalación de tipo semi-deseable, se introduce el concepto de Ecopunto, que es la instalación sobre la que se plantea el problema que se va a llevar a cabo en este trabajo. Los Gestores de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) de Andalucía definen los Ecopuntos como instalaciones alimentadas con energía solar, que reciben, clasifican y reúnen diferentes tipos de residuos de origen domiciliario para su posterior reciclado o gestión, que tienen como objetivo completar la función que realizan los puntos limpios.

En lo referente a los productos de origen domiciliario admitidos por los Ecopuntos, son los siguientes: tóner y cartuchos de tinta; pilas normales; aceite vegetal usado; pequeños electrodomésticos, chatarra electrónica, móviles, baterías pequeñas, cargadores, etc.; cápsulas de café de aluminio; envases vacíos contaminados de disolventes, pinturas, aerosoles, aceite motor, etc.; cápsulas de café de plástico; fluorescentes; CD, DVD, cintas de vídeo o audio; lámparas de bajo consumo usadas; neumáticos pequeños; termómetros de mercurio; vidrio como espejos, cristel de ventanas, vasos, etc.; radiografías y material fotográfico, pilas de botón y agujas y objetos cortantes.

De acuerdo con estas características, este tipo de instalaciones podrían ser consideradas como deseables ya que ofrecen un servicio útil a la población y facilita el reciclaje de residuos que no pueden ser depositados en los contenedores de la vía pública, los cuales deberían llevarse a puntos limpios mucho más alejados de sus domicilios en caso de no existir instalaciones de este tipo en su ciudad. En el caso de la ciudad de Sevilla, que es donde se lleva a cabo el problema en cuestión, el objetivo de los Ecopuntos es complementar la función que realizan los cuatro puntos limpios ubicados en la ciudad. Sin embargo, existen factores como la suciedad en el suelo y el entorno de los Ecopuntos, que han desencadenado numerosas quejas por parte de los vecinos que tienen su vivienda en las proximidades de estas edificaciones, siendo ello lo que impide que la instalación pueda ser considerada puramente deseable y convirtiéndola en una instalación semi-deseable.

La Figura 1 mostrada a continuación, es un ejemplo del exterior de un Ecopunto actualmente instalado en uno de los barrios de la ciudad de Sevilla.



Figura 1 - Ejemplo Ecopunto instalado en Sevilla

1.2. Objeto del Trabajo

Actualmente, existen dieciséis Ecopuntos instalados en los distritos de la ciudad de Sevilla, pero el hecho de no conocer el criterio seguido para su distribución ni si su combinación es la óptima, hace que surja la necesidad de llevar a cabo el presente trabajo.

De este modo, el objetivo que se persigue con la realización de este Trabajo Fin de Máster es el planteamiento de un modelo matemático que proporcione el número de Ecopuntos a instalar en la ciudad de Sevilla y la ubicación en la que se debe abrir cada uno de ellos. Para ello, se lleva a cabo un enfoque bi-objetivo con el que además de tener en cuenta el coste de las instalaciones, se tendrá en cuenta el nivel de insatisfacción que la distribución de dichas instalaciones causa en los habitantes de las proximidades.

Una vez se obtengan los resultados, se va a comparar la ubicación de los Ecopuntos proporcionada por el modelo planteado en el trabajo con la distribución real que actualmente existe en la ciudad de Sevilla, comprobando si dichas ubicaciones ya establecidas en la ciudad cumplen con las condiciones impuestas en el modelo propuesto.

1.3. Estructura del Trabajo

A continuación, se describe la forma en la que se ha estructurado el documento en cuestión. En primer lugar, en el capítulo 2 se lleva a cabo la revisión de la literatura sobre los aspectos más significativos que intervienen en la ejecución del trabajo. Una vez hecho eso, en el capítulo 3 se expone la metodología empleada para la resolución del problema que se abarca, adaptándola en el capítulo 4 al caso específico de estudio en el que se centra el trabajo realizado. Posteriormente, en el capítulo 5 se procede a la generación de los datos necesarios para el análisis del problema, así como el procedimiento seguido para su resolución en el capítulo 6, y los resultados obtenidos en el capítulo 7. Finalmente, el capítulo 8 recoge las principales conclusiones a las que se llega con la realización de dicho trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

De acuerdo con lo mencionado en el apartado introductorio, el problema que se aborda en el presente trabajo es el del planteamiento de un modelo matemático de enfoque bi-objetivo que optimice la ubicación de instalaciones de tipo semi-deseable. Para ello, en este capítulo se ha recopilado información de la literatura que trata este problema y que ha servido de base para poner en contexto la situación y llevar a cabo el propósito buscado.

2.1. Problema Tradicional de Localización de Instalaciones

La localización de instalaciones es una decisión que toma gran importancia, ya que es una decisión a largo plazo debido al elevado coste que presenta la apertura de una instalación, además de la cantidad de recursos y tiempo empleado en ello. Es por ello, que la decisión de la ubicación de éstas juega un papel fundamental. Para relajar dicha responsabilidad existen alternativas, como por ejemplo la posibilidad del alquiler de las instalaciones, lo cual da mayor flexibilidad a la hora de tomar decisiones y realizar cambios a medio plazo (Carro Paz and González Gómez, 2012).

Existen muchos tipos de modelos de ubicación de instalaciones, aunque una forma de diferenciar entre ellos es según su objetivo, pudiendo ser de tipo minisum, incluyendo modelos diseñados para minimizar las distancias medias como por ejemplo el problema de la p -mediana, o de tipo maxisum, que, a diferencia de los anteriores, buscan minimizar las distancias máximas como por ejemplo lo hace el problema del p -centro (Klose and Drexler, 2005).

Otro tipo de clasificación puede ser según la topografía del problema, donde las distancias se calculan usando métricas como la de distancia Euclídea o Manhattan, entre otras. Además de todo ello, también se pueden clasificar según tengan o no restricciones de capacidad, según si son multietapas o de una sola, o si entran en juego uno o múltiples productos. Todos estos factores mencionados, además de otros, fueron en los que se basaron (Klose and Drexler, 2005) en su trabajo para proponer la clasificación de los modelos de ubicación de instalaciones.

Además de ello, una clasificación que toma gran importancia en la formulación de los modelos de localización es la de los dos grandes tipos de instalaciones de servicios: las deseables y las no deseables. Algunos ejemplos de instalaciones de servicios deseables pueden ser colegios, hospitales, sitios de ocio, etc., mientras que entre las instalaciones no deseables se encuentran los vertederos de residuos sólidos urbanos, cárceles, centrales nucleares o centros de tratamiento de residuos tóxicos y peligrosos, entre otros (Sendra and Maass, 1995).

2.2. Localización de Instalaciones No Deseables

Se conoce como instalaciones no deseables a aquellas instalaciones que, en cierta medida, provocan una actitud de rechazo por parte de las personas que viven cerca de ellas, como puede ser un vertedero o una planta química. Además, dependiendo de su finalidad, el peligro que pueden provocar para la salud de las personas puede agravarse, como por ejemplo en el caso de la ubicación de un reactor nuclear (Erkut and Neuman, 1989).

A diferencia de la localización de las instalaciones de servicios deseables, en las que se busca minimizar alguna función de las distancias entre instalaciones, en el caso de la localización de este tipo de instalaciones no deseables por parte de la población, se busca la generación de un modelo cuyo objetivo considere la maximización de alguna función de distancia (Erkut and Neuman, 1989).

2.3. Localización de Instalaciones Semi-Deseables

Numerosas instalaciones ofrecen servicios que de alguna manera benefician a la sociedad, pero causan a su vez ciertos efectos negativos de cara a la calidad de vida de las personas que habitan cerca de ellas. En esta línea, Brimberg y Juel introdujeron el término de instalación semi-deseable, destacando la existencia de una gran cantidad de instalaciones que no pueden ser consideradas puramente deseables o indeseables (Brimberg and Juel, 1998a).

En este término se adentraron más estos mismos autores, definiéndolo como un tipo de instalaciones que pueden causar efectos adversos en la sociedad debido a la percepción de contaminación tanto ambiental como acústica, de peligro o de aumento de tráfico, entre otros factores que tienden a disminuir la calidad de vida de las personas que habiten cerca de la instalación, pero que en su contra, ofrecen servicios de utilidad a la sociedad (Brimberg and Juel, 1998b).

2.4. Modelos Bi-Objetivo para la Localización de Instalaciones Semi-Deseables

Erkut y Neumann destacaron que para hacer frente a las decisiones de localización de instalaciones semi-deseables, es necesario recurrir a modelos multiobjetivo en los que se puedan tener en cuenta los objetivos opuestos que presentan este tipo de problemas (Erkut and Neuman, 1989).

En este contexto, (Rakas *et al.*, 2004) desarrollaron un modelo bi-objetivo para el problema de la ubicación de vertederos. En primer lugar, propusieron un primer objetivo que establecía que el vertedero debía estar lo más cerca posible de los lugares donde se generaran los desechos, con el fin de minimizar los costes de transporte y de inversión inicial. En segundo lugar, buscaban minimizar la oposición política, ya que ninguna comunidad quiere almacenar los desechos generados en otra comunidad diferente. Por tanto, es un modelo que busca minimizar tanto el coste total como la oposición política, de forma simultánea.

En su trabajo, (Wang and Zhao, 2014) estudiaron el problema de localización de empresas dedicadas a los metales pesados. En este sentido, las empresas buscan estar lo más cerca posible de las ciudades, ya que tendrán cierto grado de desarrollo en ellas. Sin embargo, los habitantes de la ciudad las van a querer lo más alejadas posibles de su residencia, debido al riesgo para la salud que conlleva este tipo de industrias. De este modo, la satisfacción de los habitantes que conlleva maximizar las distancias y la búsqueda de la minimización de costes se convierten en objetivos contradictorios.

Para tratar el problema del transporte de materiales peligrosos o desagradables, (Marianov *et al.*, 2002) propusieron dos modelos. El primero, tiene un primer objetivo que minimiza los costes de transporte, y un segundo objetivo que trata de minimizar el coste de compensar a las personas que viven a lo largo de la ruta, debido al riesgo de pérdida de calidad de vida o del valor de su propiedad cada vez que la ruta pasa por su zona. Por otra parte, el segundo modelo que proponen sigue la misma filosofía, con la diferencia de que la pérdida de valor de las propiedades o de calidad de vida de los vecinos cercanos a la ruta, no es necesariamente proporcional al número de exposiciones a las que se someten.

3 METODOLOGÍA EMPLEADA

Para la resolución del problema de ubicación de instalaciones semi-deseables, se sigue la metodología empleada por Coutinho en su trabajo (Coutinho-Rodrigues *et al.*, 2012), donde se pretenden abordar los factores contradictorios existentes en la resolución del problema. De esta forma, el problema consta de un enfoque bi-objetivo que agrega el factor de minimizar el nivel de insatisfacción y el de minimizar el coste total de la inversión en el que hay que incurrir a en el momento de abrir instalaciones.

En este sentido, el presente capítulo se centra en la explicación de la metodología empleada para la resolución del problema tratado, centrándose en primer lugar, en la construcción de la función de insatisfacción utilizada como parte de la función objetivo del modelo, sobre la cual se profundizará en el capítulo 4. Posteriormente, se presenta el modelo planteado desde un punto de vista genérico, así como la forma en la que se lleva a cabo la obtención de resultados.

3.1. Construcción de la función de insatisfacción

En este apartado se presenta la construcción de la función de insatisfacción, la cual representa uno de los objetivos adoptados por el enfoque bi-objetivo. Dicha función agrega las características tanto de repulsión como de atracción de los vecinos según la ubicación de su vivienda y la de la instalación que se le asigna. La construcción de dicha función se inspira en la propuesta desarrollada por (Coutinho-Rodrigues *et al.*, 2012) en su trabajo.

El problema en cuestión considera un par de nodos i y j , que representan la red de viviendas del problema, de forma que una vivienda se sitúa en i y una instalación semi-deseable está ubicada en j . Entre las características del problema, se persigue el deseo por parte de las personas de tener las instalaciones semi-deseables ubicadas no muy lejos de sus viviendas, con el fin de no tener que caminar demasiado cuando necesiten hacer uso de ellas. Esto se lleva a cabo con la “función de atracción” $s^{(a)}(d_{ij})$, que es una función acotada decreciente y no negativa, cuyo valor va disminuyendo a medida que la distancia a pie entre la vivienda y la instalación aumenta.

Por otra parte, la función de insatisfacción debe incluir la postura de rechazo por parte de los habitantes cuando tienen una instalación de este tipo demasiado cerca de sus viviendas, debido a características como estética u olor, en el caso del artículo. Esto se consigue con una “función de repulsión” no positiva $s^{(r)}(d_{ij})$.

Como se menciona en el artículo, es posible considerar la distancia del nodo i al nodo j en línea recta, por lo que la métrica usada para dicho cálculo será la de la distancia Euclídea.

En este punto, ya es posible agregar ambas funciones, dando como resultado la siguiente función, con la que se va a medir la insatisfacción de los habitantes respecto a las instalaciones de carácter semi-deseables.

$$u(i, j) = M^{(f)} - \left(s^{(r)}(d_{ij}) + s^{(a)}(d_{ij}) \right)$$

Donde:

$u(i, j)$: función de insatisfacción

$s^{(r)}$: función de repulsión

$s^{(a)}$: función de atracción

$M^{(f)}$: máximo de la tasa de aceptación

d_{ij} : distancia de la vivienda en i a la instalación ubicada en j

En su trabajo, (Coutinho-Rodrigues *et al.*, 2012) considera que $M^{(f)}$ es el límite superior de la imagen de f , donde f es la probabilidad de que un habitante esté satisfecho con la instalación que le ha sido asignada a la distancia de atracción y de repulsión, siendo este el enfoque que tendrá dicho parámetro en el análisis que se realiza, el cual se ha definido como valor máximo de la tasa de aceptación.

3.2. Formulación del Modelo

En el trabajo de (Coutinho-Rodrigues *et al.*, 2012), el problema se aborda con la formulación de un modelo de programación lineal entera-mixta (MILP), siendo esta la filosofía seguida para la resolución del problema que se resuelve en el presente trabajo. De esta forma, se definen los términos que toman parte en el problema de ubicación de instalaciones semi-deseables.

- Instalación: entidad física de carácter semi-deseable situada en el interior de la ciudad.
- Ubicación candidata: lugar donde es posible ubicar una instalación.
- Instalación abierta: lugar donde el modelo de programación lineal (MILP) ha ubicado una instalación de ese tipo.
- Umbral de distancia: distancia máxima a pie que un vecino debe recorrer desde su vivienda hasta la instalación a la que está asignado.
- Sector: es la unidad de demanda básica. Cada uno consta de un conjunto de viviendas y la distancia entre una instalación y un sector se mide desde el punto medio del sector.

A continuación, se definen los conjuntos, parámetros y variables que intervienen en la formulación del modelo matemático, habiendo adaptado la formulación propuesta por (Coutinho-Rodrigues *et al.*, 2012) a las necesidades requeridas en el problema que se va a abordar, viéndolo desde el punto genérico de la decisión de ubicación de las instalaciones semi-deseables en las que posteriormente se va a profundizar.

- **Conjuntos**

C : conjunto de ubicaciones candidatas para la apertura de una instalación semi-deseable.

S : conjunto de sectores.

- **Parámetros**

d_{ij} : distancia entre el sector $i \in S$ y la instalación semi-deseable $j \in C$.

δ_i : número de habitantes en el sector $i \in S$.

c : coste de apertura de una instalación semi-deseable.

D : umbral de distancia a recorrer por un vecino del sector i a la instalación abierta en j .

- **Variables**

$$x_{i,j} \begin{cases} 1 & \text{si el sector } i \text{ está asignado a la instalación abierta en la ubicación } j \\ 0 & \text{c. c.} \end{cases}$$

$$y_j \begin{cases} 1 & \text{si se abre una instalación en la ubicación candidata } j \\ 0 & \text{c. c.} \end{cases}$$

Una vez visto esto, la formulación matemática del modelo queda de la siguiente forma:

$$z_1 = \text{Min} \sum_{j \in C} c \cdot y_j \quad (1)$$

$$z_2 = \text{Min} \sum_{i \in S} \delta_i \sum_{j \in C} u(i,j) \cdot x_{i,j} \quad (2)$$

s. a.:

$$\sum_{j \in C} x_{ij} = 1, \quad i \in S \quad (3)$$

$$K \cdot y_j \geq \sum_{i \in S} x_{ij}, \quad j \in C, K \geq |S| \quad (4)$$

$$d_{ij} x_{ij} \leq D, \quad i \in S, j \in C \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i \in S, j \in C \quad (6)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad j \in C \quad (7)$$

Mientras que el primer objetivo representa la minimización de los costes derivados de la apertura de las instalaciones semi-deseables (1), el segundo hace referencia a la minimización de la insatisfacción total que causa la instalación de dichas instalaciones en los habitantes a los que les afecta. Esto último se consigue multiplicando la población total de cada sector en los que se abre una instalación, por el grado de insatisfacción que esa apertura causa en los vecinos afectados (2).

La ecuación (3) se corresponde con la restricción que obliga a que cada sector esté asignado a una instalación, de forma que la totalidad de los habitantes estén cubiertos por una instalación de este tipo. La restricción (4) asegura que, si un sector está asignado a una instalación abierta en una determinada ubicación, al menos haya una instalación abierta en esa ubicación, donde K es una constante que toma un valor mayor o igual al número total de ubicaciones candidatas. La ecuación (5) se encarga de satisfacer el umbral de distancia, donde la distancia entre el sector en el que reside una persona y la instalación abierta a la que está asignado, no puede superar lo establecido como distancia máxima a recorrer.

Por último, las ecuaciones (6) y (7) se refieren a las dos variables adoptadas en el problema, tratándose ambas de variables binarias.

3.3. Procedimiento de Resolución

Para llevar a cabo la resolución del problema, debido a que la función objetivo del modelo contiene más de un objetivo, la finalidad del procedimiento seguido es identificar soluciones no dominadas para la ubicación de las instalaciones semi-deseables (Saborido and Chicano, 2015). De este modo, se ha implementado el modelo matemático en Python, usando el solver Gurobi para la optimización de este. El código en Python se muestra en el Anexo III del presente documento.

Una vez implementado el modelo, se sigue un procedimiento iterativo con el que se generan las soluciones no dominadas para las instalaciones. Esto se hace tomando como punto de referencia el valor del objetivo del coste obtenido en la iteración anterior y estableciéndolo como limitación añadiendo una restricción, obteniendo con ello el conjunto de soluciones no dominadas, conocido como conjunto óptimo de Pareto.

Posteriormente, cuando se genera el conjunto completo de soluciones, se utilizan tres métricas para calcular la distancia de cada solución obtenida a la solución ideal, siendo estas métricas la de distancia Euclídea, Manhattan y Chebyshev, cuya finalidad y expresión se muestra a continuación.

- **Distancia Euclídea.** Es la distancia en línea recta, es decir, la distancia más corta de un punto otro. Se calcula a partir de las coordenadas cartesianas de los puntos.

$$d(x, y)_{Euclídea} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

- **Distancia de Manhattan.** Métrica que calcula la distancia entre dos vectores si sólo pudieran realizar movimientos en ángulo recto.

$$d(x, y)_{Manhattan} = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

- **Distancia de Chebyshev.** Se dice de la mayor de las diferencias entre dos vectores a lo largo de cualquier dimensión de coordenadas.

$$d(x, y)_{Chebyshev} = \max (|x_i - y_i|)$$

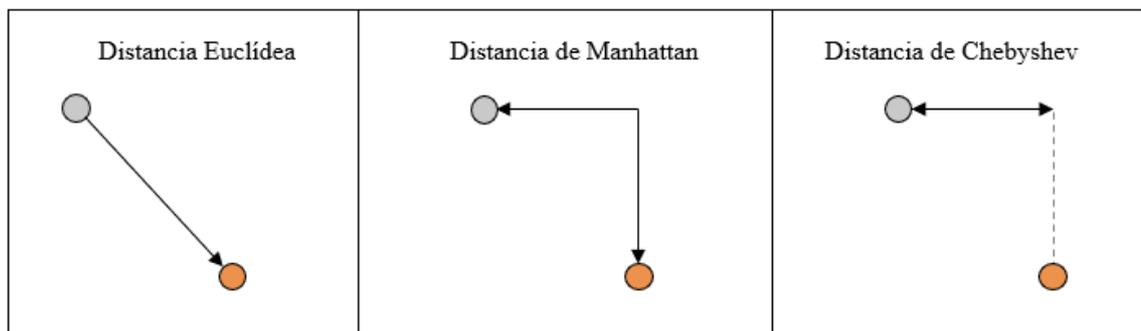


Figura 2 - Representación gráfica de las métricas usadas

Como se ha mencionado, estas tres métricas se usan para el cálculo de la distancia de cada solución estudiada con la solución ideal, con lo que se obtendrán las tres soluciones que equilibran mejor ambos objetivos según estos tres criterios de cálculo.

4 CASO DE ESTUDIO

El presente capítulo se centra en la aplicación del modelo propuesto a la ciudad de Sevilla, la cual está compuesta por once distritos, divididos cada uno de ellos en barrios, sumando un total de 108 a lo largo de la ciudad, como se puede observar en la Figura 3. De este modo, la aplicación del modelo propuesto consiste en la decisión de la ubicación y cantidad de Ecopuntos que se deben abrir en la ciudad de Sevilla, de forma que toda su población tenga una instalación de este tipo relativamente cercana a sus residencias. Asimismo, aunque es necesario que estas instalaciones se encuentren cerca de la población, los vecinos no quieren que haya un Ecopunto justo al lado su vivienda debido a distintos factores de riesgo, como la disminución de calidad de vida que esa proximidad pueda conllevar.

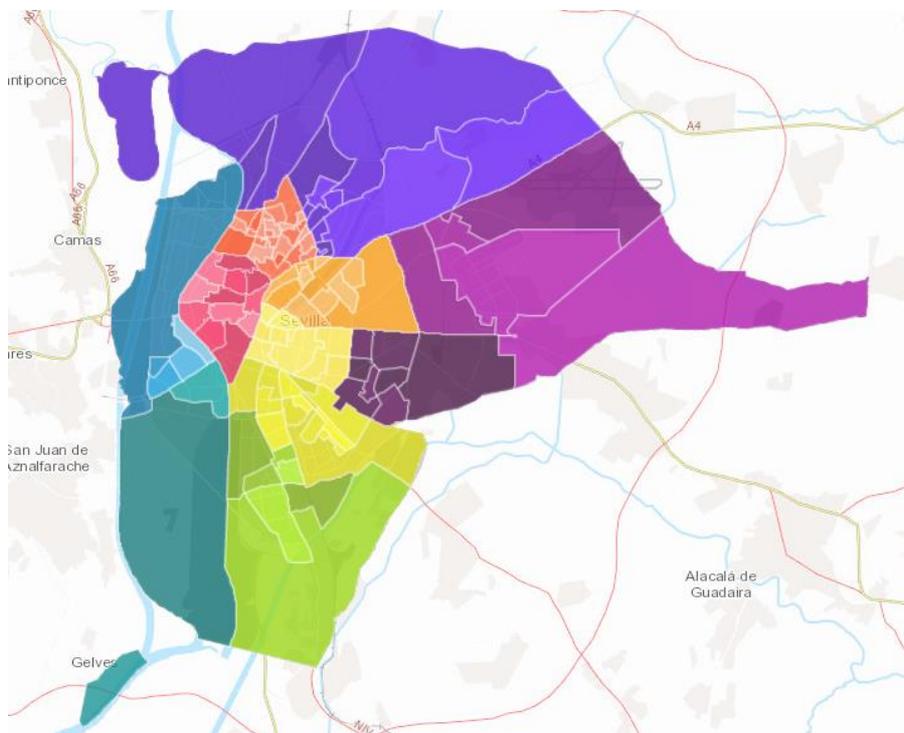


Figura 3 - Mapa delimitado de la ciudad de Sevilla
(Fuente: Sistema de Información Geográfica)

En este sentido, la ciudad se asemeja a una red formada por arcos y nodos, donde los nodos lo conforman los 108 barrios que constituyen la ciudad, siendo los arcos las conexiones entre los nodos mencionados, es decir, entre los distintos barrios. A continuación, la Tabla 1 recoge el conjunto de distritos de Sevilla con sus respectivos barrios.

- Los Ecopuntos son instalaciones iguales entre ellas, por lo que el coste de su instalación es el mismo para todos. Se ha establecido un coste de instalación que será el mismo para todos los Ecopuntos que se abran en la ciudad, cuya elección se ha realizado en base a la última inversión a la que el Ayuntamiento de Sevilla ha hecho frente para la instalación del Ecopunto situado en el distrito Este en el año 2020, que suma una cuantía total de 46.222 euros.

4.2. Función de Insatisfacción en el Caso Estudiado

El capítulo 3 explica la construcción de la función de insatisfacción usada en el modelo planteado para la resolución del trabajo, donde se observa que dicha función se compone de una función de repulsión y otra de atracción. En este sentido, los siguientes apartados se centran en la construcción de dichas funciones aplicadas al caso de estudio de ubicación de Ecopuntos en la ciudad de Sevilla, lugar en el que se centra el análisis en cuestión.

4.2.1 Función de Repulsión

En lo que a la función de repulsión respecta, no se ha considerado como una función, sino como un valor constante negativo que afecta únicamente a los barrios en los que se abre un Ecopunto. Esto se debe al supuesto en el que se indica que la distancia entre una persona que vive en un barrio i y el ecopunto abierto en el barrio $j = i$ es nula.

Sin embargo, no se va a dar una repulsión por parte de la totalidad de los vecinos de un barrio en el que se ubique un Ecopunto, ya que habrá una gran cantidad de viviendas que estén lo suficientemente alejadas y no les afecte. Por ello, se ha supuesto que, de los habitantes de un barrio i , alrededor de un 15% sería el total de personas no satisfechas con la localización del ecopunto, por lo que es ese porcentaje el que se le ha aplicado a la tasa máxima de aceptación. Esto se expresa de la siguiente manera:

$$s^{(r)}(d_{ij}) = \begin{cases} -0.15 \times 24 & \text{si } d_{ij} = 0 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

4.2.2 Función de Atracción

La función de atracción consta de una primera parte de atracción escalonada, con un primer escalón de 400 metros y el resto con escalones de 200 metros; y un descenso lineal suave hasta 2000 metros, aunque este descenso es efectivo realmente hasta 1500 metros, debido al umbral de distancia previamente establecido.

$$s^{(a)}(d_{ij}) = \begin{cases} 24 & \text{si } d_{ij} \in [0, 400) \\ 17.5 & \text{si } d_{ij} \in [400, 600) \\ 10 & \text{si } d_{ij} \in [600, 800) \\ 6 & \text{si } d_{ij} \in [800, 1000) \\ 12 - \frac{6d_{ij}}{1000} & \text{si } d_{ij} \in [1000, 2000) \\ 0 & \text{si } d_{ij} \geq 2000 \end{cases}$$

Además, para el caso que se estudia, se ha considerado 24 como el valor del parámetro que se corresponde con la tasa máxima de aceptación de $M^{(f)}$, mismo valor que el establecido por (Coutinho-Rodrigues *et al.*, 2012) en su trabajo.

Una vez conocidos todos los términos que componen la función de insatisfacción y su correspondiente comportamiento, en la Figura 4 se muestra una representación gráfica de dicha función.

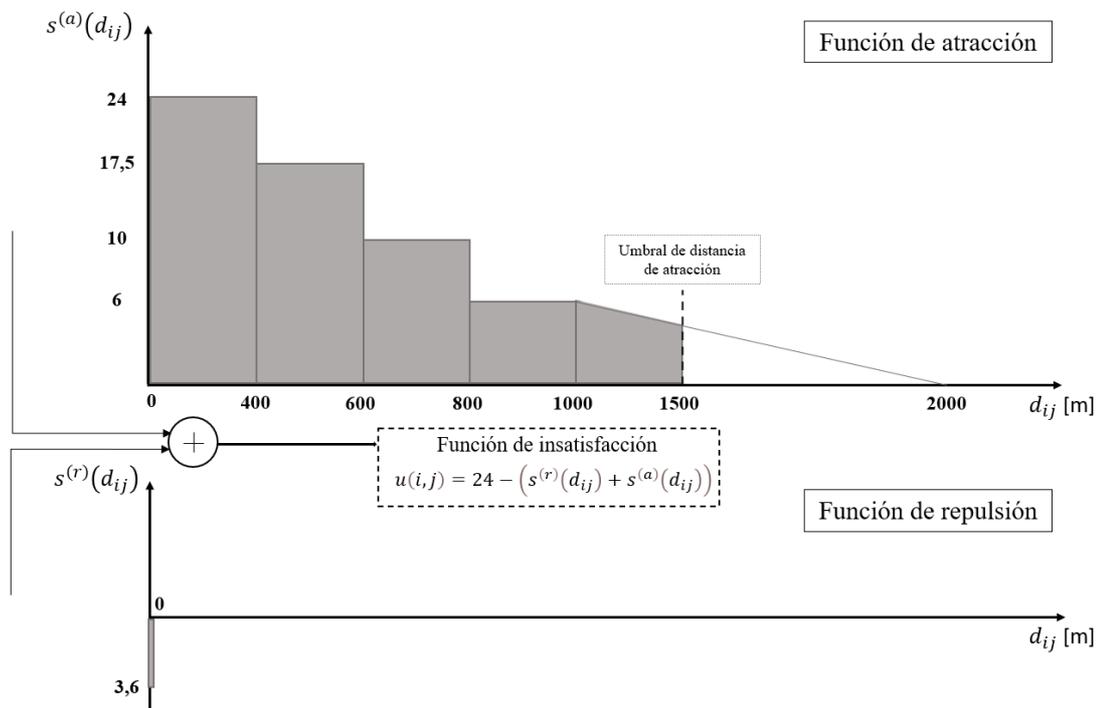


Figura 4 - Representación gráfica de la función de insatisfacción adoptada en el problema.

Para llevar a cabo el problema de ubicación de Ecopuntos en la ciudad de Sevilla, se implementa en el optimizador Gurobi el modelo de enfoque bi-objetivo visto anteriormente, ya adaptado a las consideraciones mencionadas. Así, el primer objetivo se centra en la minimización de los costes de instalación, mientras que el segundo término se basa en la minimización de la insatisfacción que estos Ecopuntos producen en los habitantes cercanos a él. Se observa que los objetivos son conflictivos, ya que no es posible ponderar el coste con la insatisfacción de los vecinos de forma adecuada, de ello el enfoque bi-objetivo.

5 GENERACIÓN DE DATOS

El capítulo en cuestión se centra en la explicación de cómo se ha llevado a cabo la generación de los datos necesarios para la ejecución del problema. Así, los datos necesarios para la correcta resolución del modelo han sido generados en una hoja de Excel a la que posteriormente se acude para llevar a cabo la implementación del modelo en el optimizador. Los datos relativos a la población existente en cada barrio de la ciudad se han extraído del documento de Indicadores demográficos de Sevilla, realizado por el Servicio de Estadística del Ayuntamiento de Sevilla, correspondiéndose con los datos del año 2017, ya que es el último año recogido en el documento en cuestión.

5.1. Datos de los Barrios

De acuerdo con lo mencionado en el capítulo 4, cada barrio de la ciudad de Sevilla será considerado como un nodo del problema, cada uno de ellos situado en el punto medio de cada barrio. De cada uno de estos nodos se conocen sus coordenadas geográficas, expresadas en grados decimales, por lo que cada nodo presenta un valor de latitud (x) y un valor de longitud (y). En la Tabla 2 se muestra un ejemplo con los datos recopilados tanto de latitud como de longitud correspondientes a los barrios pertenecientes al distrito Casco Antiguo.

Tabla 2 - Coordenadas barrios Casco Antiguo

Barríos	x	y
Alfalfa	37,3908	-5,9929
Arenal	37,3866	-5,9969
Encarnación-Regina	37,3942	-5,9932
Feria	37,3977	-5,9913
Museo	37,3910	-5,9998
San Bartolomé	37,3888	-5,9870
San Gil	37,4018	-5,9912
San Julián	37,3981	-5,9853
San Lorenzo	37,3994	-5,9969
San Vicente	37,3954	-5,9997
Santa Catalina	37,3934	-5,9861
Santa Cruz	37,3850	-5,9903

Además de su posición en el mapa, es necesario tener en cuenta también los datos de población de cada uno de estos nodos, es decir, de cada barrio. Siguiendo con el ejemplo de los barrios que forman parte del distrito Casco Antiguo, los datos de población de cada uno de ellos se muestran en la Tabla 3 que se muestra a continuación.

Tabla 3 - Datos población barrios Casco Antiguo

Distrito	Barrios	Población
CASCO ANTIGUO	Alfalfa	4.777
	Arenal	3.773
	Encarnación-Regina	4.277
	Feria	6.665
	Museo	5.464
	San Bartolomé	4.020
	San Gil	6.810
	San Julián	6.154
	San Lorenzo	4.306
	San Vicente	5.692
	Santa Catalina	4.456
	Santa Cruz	2.557

Tanto los datos de población como las coordenadas de cada uno de los barrios que conforman la ciudad de Sevilla se recogen en una hoja Excel para su posterior importación en el código en Python. Todos estos datos aparecen recogidos en el Anexo I.

5.2. Matriz de Distancias

Por otra parte, los arcos que componen el problema se corresponden con todas las conexiones existentes entre los nodos. Cada arco se caracteriza por tener un nodo inicial y un nodo final, así como la distancia entre el nodo inicial y final de cada uno de ellos.

Es importante señalar que, las distancias que se han considerado para el problema (d_{ij}) no se corresponden con las distancias reales de la red, sino que se han estimado con la métrica de la distancia euclídea. Además, se ha generado una matriz de distancias simétrica, con lo que la distancia del nodo i al nodo j es la misma que la del nodo j al nodo i . Por tanto, en este enfoque, partiendo de las coordenadas geográficas de cada barrio, la estimación de d_{ij} , se ha llevado a cabo de la siguiente forma:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

Donde:

d_{ij} : distancia de la vivienda en barrio i al ecopunto en barrio j .

x_i, x_j : coordenadas latitudinales.

y_i, y_j : coordenadas longitudinales.

Así, la Figura 5 presenta un ejemplo de los datos que se tienen en cuenta en cada uno de los nodos y la construcción del arco, siendo posible con esos datos el cálculo de la distancia euclídea a través de la expresión mencionada. Siguiendo dicho procedimiento para el cálculo de las distancias, se ha generado una matriz simétrica de distancias entre barrios de dimensiones 108×108 , recogida en el Anexo II del presente documento.

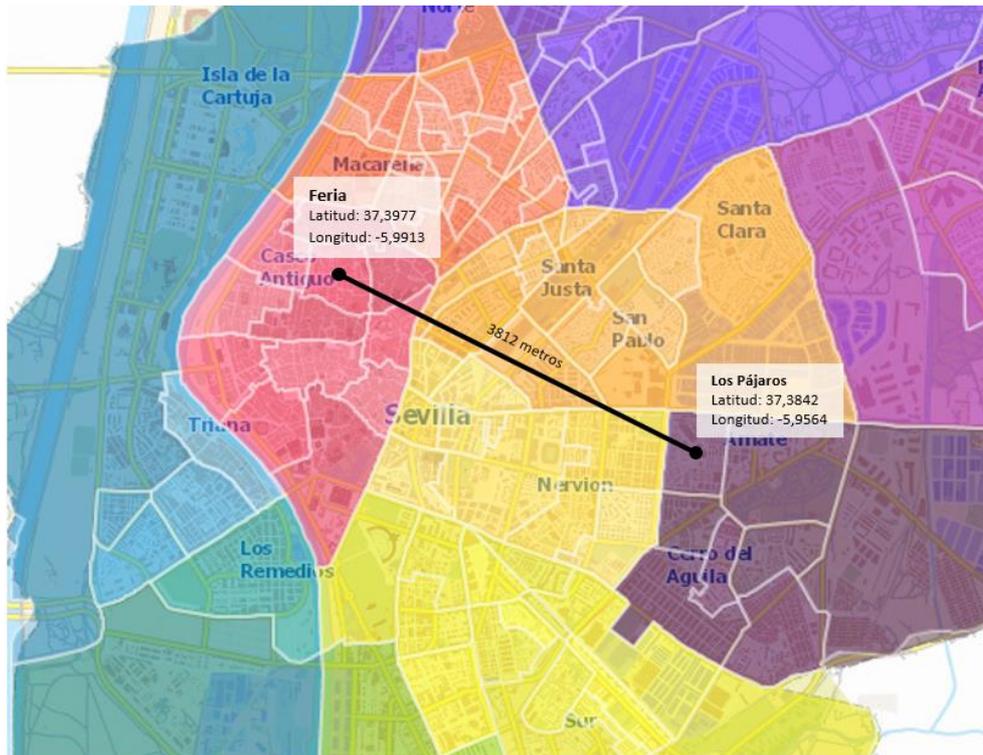


Figura 5 - Ejemplo arco Feria/Los Pájaros

6 PROCEDIMIENTO DE RESOLUCIÓN

El capítulo que nos ocupa recoge la metodología seguida para la resolución del problema que se aborda, la cual sigue la misma filosofía que (Coutinho-Rodrigues *et al.*, 2012) llevó a cabo en el procedimiento de resolución de su trabajo, generando así, un conjunto de soluciones no dominadas que posteriormente será de utilidad para la toma de decisiones sobre las mejores soluciones obtenidas. De esta forma, el modelo de programación lineal propuesto en el capítulo 3 trata de buscar una solución que consista en un conjunto de Ecopuntos abiertos, así como los barrios cubiertos por cada una de estas instalaciones.

En el caso que nos ocupa, el modelo consta de dos funciones objetivo que son conflictivas entre ellas, por lo que el cálculo de coeficientes que consigan un ajuste de la equivalencia entre coste e insatisfacción se vuelve una tarea compleja. En este sentido, para realizar la búsqueda de soluciones que contengan valores aceptables para ambas funciones objetivo, se opta por la generación de un conjunto de soluciones no dominadas.

El procedimiento de resolución comienza con la búsqueda de los valores óptimos ejecutando los dos objetivos que componen el modelo por separado. Una vez hecho esto, se obtienen dos soluciones:

- Solución (1): es la solución que el modelo ha dado como resultado de la minimización del objetivo que se corresponde con la medida del nivel de insatisfacción por arte de los vecinos afectados.
- Solución (77): solución obtenida al optimizar el modelo teniendo únicamente en cuenta el objetivo que se centra en la minimización del coste de las instalaciones que se abren.

Estas dos soluciones extremo servirán como puntos de referencia para comparar las soluciones no dominadas generadas posteriormente.

6.1. Generación Soluciones No Dominadas

A continuación, se comienza con el proceso de generación de soluciones no dominadas, en el que se optimiza el objetivo que se centra en la minimización de la función de insatisfacción total, definida por la ecuación (2) del modelo presentado en el apartado 3.2.

De este modo, para continuar con el procedimiento, se incluye en el modelo una restricción adicional que limita el valor máximo que puede tomar el coste de la inversión que ha de realizarse con la apertura de Ecopuntos, lo cual se corresponde con la función del Objetivo 1, definida por la ecuación (1) del modelo en el apartado 3.2. del documento. El criterio seguido para limitar dicha restricción se basa en que el valor del coste en el que se incurre debe ser menor que el valor obtenido en la iteración anterior, siendo esto lo que se lleva a cabo para la obtención de las soluciones comprendidas en el intervalo (2) - (76) de la primera columna de la Tabla 4.

Es decir, por ejemplo, para generar la solución (2) no dominada, se añade al modelo la restricción que impone que el valor del Objetivo 1 sea inferior a 4.991.976 (Figura 6), que es el valor de ese objetivo obtenido en la iteración anterior y, una vez hecho eso, se ejecuta el código minimizando únicamente el objetivo 2, que mide el nivel de insatisfacción, y así sucesivamente hasta completar las columnas de coste, insatisfacción y Ecopuntos abiertos.

```
m.addConstr(F01 <= 4991976 - 1)
```

Figura 6 - Restricción añadida al modelo en Gurobi

Además, para cada solución, las columnas “ $\Delta Obj1$ ” y “ $\Delta Obj2$ ” proporcionan información sobre las distancias de cada valor objetivo a su óptimo. Siguiendo con el ejemplo de la solución (2), su incremento respecto al óptimo del Objetivo 1 es de un 550%, que se ha obtenido de la siguiente forma:

$$\Delta Obj1_{(2)}(\%) = \left(\frac{Coste_{(2)}}{Solución(77)} - 1 \right) \times 100 = \left(\frac{4206202}{647108} - 1 \right) \times 100 = 550\%$$

De lo que se deduce que la solución (2) se aleja un 550% de la solución ideal del coste en el que se debe incurrir por la instalación de los Ecopuntos que el modelo generado para dicha solución ha dado como resultado.

Tabla 4 - Resumen del conjunto de soluciones no dominadas

Soluciones objetivo (1-77)		Objetivo 1		Objetivo 2			Ecopuntos		
		Coste	$\Delta Obj1$	Insatisfacción	$\Delta Obj2$	$\Delta L_{Manhattan}$	$\Delta L_{Euclidea}$	$\Delta L_{Chebyshev}$	Abiertos
(1)	Min FO2	4991976	+ 671,4%	1614254	+ 0,0%	671,4%	671,4%	671,4%	108
(2)	Coste < 4991976	4206202	+ 550,0%	1614254	+ 0,0%	550,0%	550,0%	550,0%	91
(3)	Coste < 4206202	4067536	+ 528,6%	1614254	+ 0,0%	528,6%	528,6%	528,6%	88
(4)	Coste < 4067536	4021314	+ 521,4%	1614254	+ 0,0%	521,4%	521,4%	521,4%	87
(5)	Coste < 4021314	3928870	+ 507,1%	1614254	+ 0,0%	507,1%	507,1%	507,1%	85
(6)	Coste < 3928870	3882648	+ 500,0%	1614254	+ 0,0%	500,0%	500,0%	500,0%	84
(7)	Coste < 3882648	3836426	+ 492,9%	1614254	+ 0,0%	492,9%	492,9%	492,9%	83
(8)	Coste < 3836426	3790204	+ 485,7%	1614254	+ 0,0%	485,7%	485,7%	485,7%	82
(9)	Coste < 3790204	3743982	+ 478,6%	1616737	+ 0,2%	478,7%	478,6%	478,6%	81
(10)	Coste < 3743982	3697760	+ 471,4%	1620771	+ 0,4%	471,8%	471,4%	471,4%	80
(11)	Coste < 3697760	3651538	+ 464,3%	1625080	+ 0,7%	465,0%	464,3%	464,3%	79
(12)	Coste < 3651538	3605316	+ 457,1%	1630193	+ 1,0%	458,1%	457,1%	457,1%	78
(13)	Coste < 3605316	3559094	+ 450,0%	1637608	+ 1,4%	451,4%	450,0%	450,0%	77
(14)	Coste < 3559094	3512872	+ 442,9%	1645951	+ 2,0%	444,8%	442,9%	442,9%	76
(15)	Coste < 3512872	3466650	+ 435,7%	1655700	+ 2,6%	438,3%	435,7%	435,7%	75
(16)	Coste < 3466650	3420428	+ 428,6%	1665899	+ 3,2%	431,8%	428,6%	428,6%	74
(17)	Coste < 3420428	3374206	+ 421,4%	1676224	+ 3,8%	425,3%	421,4%	421,4%	73
(18)	Coste < 3374206	3327984	+ 414,3%	1686635	+ 4,5%	418,8%	414,3%	414,3%	72
(19)	Coste < 3327984	3281762	+ 407,1%	1697082	+ 5,1%	412,3%	407,2%	407,1%	71
(20)	Coste < 3281762	3235540	+ 400,0%	1708024	+ 5,8%	405,8%	400,0%	400,0%	70
(21)	Coste < 3235540	3189318	+ 392,9%	1719070	+ 6,5%	399,4%	392,9%	392,9%	69
(22)	Coste < 3189318	3143096	+ 385,7%	1730328	+ 7,2%	392,9%	385,8%	385,7%	68
(23)	Coste < 3143096	3096874	+ 378,6%	1741808	+ 7,9%	386,5%	378,7%	378,6%	67
(24)	Coste < 3096874	3050652	+ 371,4%	1753606	+ 8,6%	380,1%	371,5%	371,4%	66
(25)	Coste < 3050652	3004430	+ 364,3%	1766093	+ 9,4%	373,7%	364,4%	364,3%	65
(26)	Coste < 3004430	2958208	+ 357,1%	1779015	+ 10,2%	367,3%	357,3%	357,1%	64
(27)	Coste < 2958208	2911986	+ 350,0%	1792767	+ 11,1%	361,1%	350,2%	350,0%	63
(28)	Coste < 2911986	2865764	+ 342,9%	1807871	+ 12,0%	354,9%	343,1%	342,9%	62
(29)	Coste < 2865764	2819542	+ 335,7%	1823268	+ 12,9%	348,7%	336,0%	335,7%	61
(30)	Coste < 2819542	2773320	+ 328,6%	1839079	+ 13,9%	342,5%	328,9%	328,6%	60
(31)	Coste < 2773320	2727098	+ 321,4%	1856926	+ 15,0%	336,5%	321,8%	321,4%	59
(32)	Coste < 2727098	2680876	+ 314,3%	1875161	+ 16,2%	330,4%	314,7%	314,3%	58
(33)	Coste < 2680876	2634654	+ 307,1%	1893719	+ 17,3%	324,5%	307,6%	307,1%	57
(34)	Coste < 2634654	2588432	+ 300,0%	1913628	+ 18,5%	318,5%	300,6%	300,0%	56
(35)	Coste < 2588432	2542210	+ 292,9%	1934487	+ 19,8%	312,7%	293,5%	292,9%	55
(36)	Coste < 2542210	2495988	+ 285,7%	1956468	+ 21,2%	306,9%	286,5%	285,7%	54
(37)	Coste < 2495988	2449766	+ 278,6%	1979019	+ 22,6%	301,2%	279,5%	278,6%	53
(38)	Coste < 2449766	2403544	+ 271,4%	2003031	+ 24,1%	295,5%	272,5%	271,4%	52
(39)	Coste < 2403544	2357322	+ 264,3%	2027823	+ 25,6%	289,9%	265,5%	264,3%	51
(40)	Coste < 2357322	2311100	+ 257,1%	2054161	+ 27,3%	284,4%	258,6%	257,1%	50
(41)	Coste < 2311100	2264878	+ 250,0%	2081881	+ 29,0%	279,0%	251,7%	250,0%	49
(42)	Coste < 2264878	2218656	+ 242,9%	2113227	+ 30,9%	273,8%	244,8%	242,9%	48
(43)	Coste < 2218656	2172434	+ 235,7%	2144730	+ 32,9%	268,6%	238,0%	235,7%	47
(44)	Coste < 2172434	2126212	+ 228,6%	2177500	+ 34,9%	263,5%	231,2%	228,6%	46
(45)	Coste < 2126212	2079990	+ 221,4%	2210917	+ 37,0%	258,4%	224,5%	221,4%	45
(46)	Coste < 2079990	2033768	+ 214,3%	2244890	+ 39,1%	253,4%	217,8%	214,3%	44

(47)	Coste <	2033768	1987546	+ 207,1%	2285136	+ 41,6%	248,7%	211,3%	207,1%	43
(48)	Coste <	1987546	1941324	+ 200,0%	2325403	+ 44,1%	244,1%	204,8%	200,0%	42
(49)	Coste <	1941324	1895102	+ 192,9%	2368381	+ 46,7%	239,6%	198,4%	192,9%	41
(50)	Coste <	1895102	1848880	+ 185,7%	2449480	+ 51,7%	237,5%	192,8%	185,7%	40
(51)	Coste <	1848880	1802658	+ 178,6%	2532981	+ 56,9%	235,5%	187,4%	178,6%	39
(52)	Coste <	1802658	1756436	+ 171,4%	2618539	+ 62,2%	233,6%	182,4%	171,4%	38
(53)	Coste <	1756436	1710214	+ 164,3%	2705119	+ 67,6%	231,9%	177,6%	164,3%	37
(54)	Coste <	1710214	1663992	+ 157,1%	2792373	+ 73,0%	230,1%	173,3%	157,1%	36
(55)	Coste <	1663992	1617770	+ 150,0%	2881901	+ 78,5%	228,5%	169,3%	150,0%	35
(56)	Coste <	1617770	1571548	+ 142,9%	2973588	+ 84,2%	227,1%	165,8%	142,9%	34
(57)	Coste <	1571548	1525326	+ 135,7%	3085670	+ 91,2%	226,9%	163,5%	135,7%	33
(58)	Coste <	1525326	1479104	+ 128,6%	3214798	+ 99,2%	227,7%	162,4%	128,6%	32
(59)	Coste <	1479104	1432882	+ 121,4%	3358419	+ 108,0%	229,5%	162,5%	121,4%	31
(60)	Coste <	1432882	1386660	+ 114,3%	3507154	+ 117,3%	231,5%	163,7%	117,3%	30
(61)	Coste <	1386660	1340438	+ 107,1%	3657466	+ 126,6%	233,7%	165,8%	126,6%	29
(62)	Coste <	1340438	1294216	+ 100,0%	3812655	+ 136,2%	236,2%	169,0%	136,2%	28
(63)	Coste <	1294216	1247994	+ 92,9%	3983932	+ 146,8%	239,7%	173,7%	146,8%	27
(64)	Coste <	1247994	1201772	+ 85,7%	4175654	+ 158,7%	244,4%	180,3%	158,7%	26
(65)	Coste <	1201772	1155550	+ 78,6%	4376626	+ 171,1%	249,7%	188,3%	171,1%	25
(66)	Coste <	1155550	1109328	+ 71,4%	4582807	+ 183,9%	255,3%	197,3%	183,9%	24
(67)	Coste <	1109328	1063106	+ 64,3%	4818811	+ 198,5%	262,8%	208,7%	198,5%	23
(68)	Coste <	1063106	1016884	+ 57,1%	5074197	+ 214,3%	271,5%	221,8%	214,3%	22
(69)	Coste <	1016884	970662	+ 50,0%	5354145	+ 231,7%	281,7%	237,0%	231,7%	21
(70)	Coste <	970662	924440	+ 42,9%	5620173	+ 248,2%	291,0%	251,8%	248,2%	20
(71)	Coste <	924440	878218	+ 35,7%	5941400	+ 268,1%	303,8%	270,4%	268,1%	19
(72)	Coste <	878218	831996	+ 28,6%	6284919	+ 289,3%	317,9%	290,7%	289,3%	18
(73)	Coste <	831996	785774	+ 21,4%	6705926	+ 315,4%	336,8%	316,1%	315,4%	17
(74)	Coste <	785774	739552	+ 14,3%	7151937	+ 343,0%	357,3%	343,3%	343,0%	16
(75)	Coste <	739552	693330	+ 7,1%	7615214	+ 371,7%	378,9%	371,8%	371,7%	15
(76)	Coste <	693330	647108	+ 0,0%	8099827	+ 401,8%	401,8%	401,8%	401,8%	14
(77)	Min FO1		647108	+ 0,0%	10616896	+ 557,7%	557,7%	557,7%	557,7%	14
Ideal			647108	+ 0,0%	1614254	+ 0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
Anti Ideal		4991976	+ 671,4%	10616896	+ 557,7%	1229,1%	872,8%	671,4%		

Como se puede observar, la última columna de la tabla indica el número de Ecopuntos que el modelo decide abrir en cada una de las soluciones generadas. Por último, las columnas “ $\Delta L_{Manhattan}$ ”, “ $\Delta L_{Euclídea}$ ” y “ $\Delta L_{Chebyshev}$ ” representan la distancia de cada solución a la solución ideal, para lo que se han usado las métricas Manhattan ($\Delta L_{Manhattan}$), Euclídea ($\Delta L_{Euclídea}$) y Chebyshev ($\Delta L_{Chebyshev}$), previamente mencionadas en el apartado 3.3. Serán estas tres columnas en las que nos centraremos para llevar a cabo la elección de las soluciones que más se acercan al equilibrio entre los dos objetivos del modelo.

7 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez generado todo el conjunto de soluciones no dominadas, el capítulo que nos ocupa recoge los resultados que se han obtenido. Debido a que no hay una única solución válida, se prueban distintas métricas para realizar la elección de las mejores soluciones. Por último, debido a que uno de los grandes objetivos del presente trabajo es comparar la distribución de los Ecopuntos ya instalados en la ciudad de Sevilla con la distribución que el modelo planteado proporciona, se dedica un apartado a comentar dichos resultados.

A continuación, la Figura 1 muestra de forma más visual el conjunto de soluciones no dominadas (1) – (77) que se han generado en el capítulo anterior, donde el eje vertical hace referencia a los valores que se corresponden con el objetivo que mide la insatisfacción y el eje horizontal al coste de instalación de los Ecopuntos.

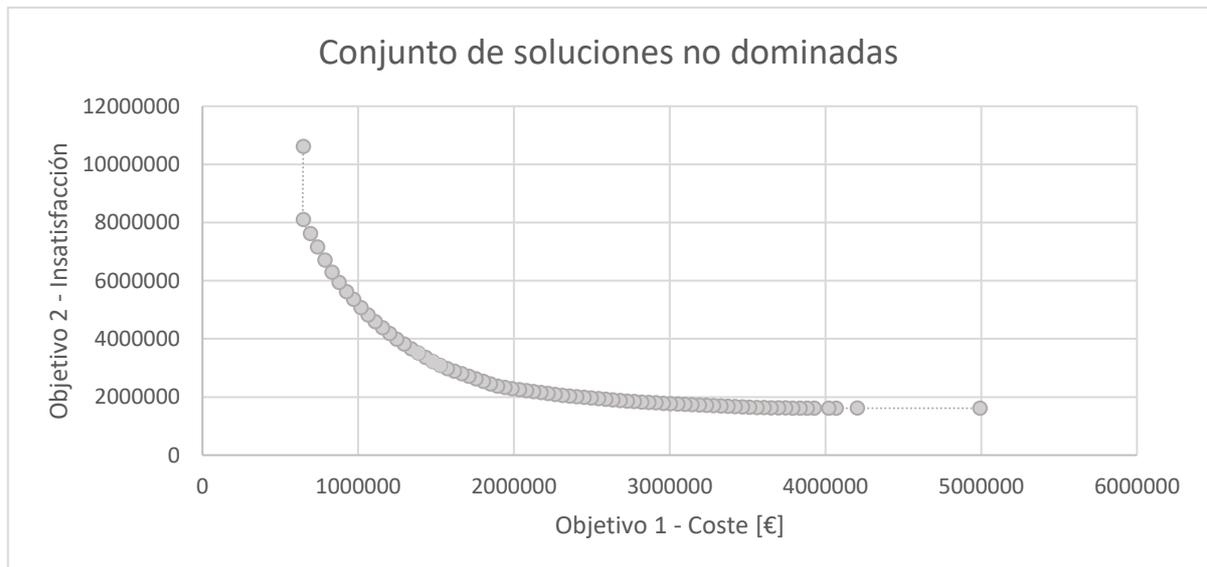


Figura 1 - Conjunto de soluciones no dominadas

En la Tabla 4 del capítulo anterior, es notable observar que las dos últimas soluciones generadas abren 14 Ecopuntos. Esto se debe a que, aunque se abran los mismos Ecopuntos en la última iteración del método de la restricción que en el óptimo del objetivo de coste, su distribución es diferente, lo que hace que el valor de la insatisfacción también lo sea. De este modo, la solución óptima del objetivo de costes sería peor que la de la última iteración realizada con el método de la restricción, ya que, para un mismo coste, la insatisfacción que causa en los vecinos es mayor.

Para facilitar la elección de las mejores soluciones, se ha calculado la distancia de cada solución a la solución idea a través de las tres métricas mencionadas en el anterior apartado. De esa evaluación se ha elegido el valor mínimo de distancia que proporciona cada métrica, resaltado en negrita en las respectivas columnas de la Tabla 4. Por tanto, las mejores soluciones siguiendo este criterio las dan las soluciones (57), (58) y (60), con la apertura de 33, 32 y 30 Ecopuntos, respectivamente. En los siguientes puntos se analizan estas tres soluciones obtenidas de forma más detallada.

7.1. Solución (57)

Siguiendo el criterio de elección según la métrica de distancia de Manhattan, la solución que menos distancia presenta a la solución ideal es la solución (57), resultando esta un 226,9%. En este sentido, dicha solución propone la apertura de un total de 33 Ecopuntos en los barrios de la ciudad de Sevilla que se muestran en la Tabla 5, debiendo incurrir en unos costes de instalación de 1.525.326 euros y siendo 3.085.669,5 el valor total de la insatisfacción que los vecinos deben asumir.

Tabla 5 - Barrios con Ecopuntos en Solución (57)

Ecopuntos abiertos
Feria
Museo
El Cerezo
Pino Flores
Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores
San Roque
Amate
La Plata
Palmete
Rochelambert
Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería
Bami
Felipe II-Los Diez Mandamientos
Huerta de la Salud
Poligono Sur
Triana Casco Antiguo
Triana Oeste
Barriada Pino Montano
El Gordillo
Las Almenas
San Jerónimo
Valdezorras
El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona
La Corza
San Pablo A y B
San Pablo D y E
Colores Entreparkes
Palacio de Congresos Urbadiez Entrepuentes
Parque Alcosa-Jardines del Edén
Torreblanca
Bellavista
Elcano-Bermejales
Los Remedios

A continuación, se muestra de forma visual la distribución de los Ecopuntos en la ciudad de Sevilla. Para ello, se ha indicado en el mapa de la Figura 7 en el que aparecen los distritos de la ciudad distinguidos por colores y delimitados todos los barrios de esta, los Ecopuntos que la solución (57) ha dado como mejor combinación.

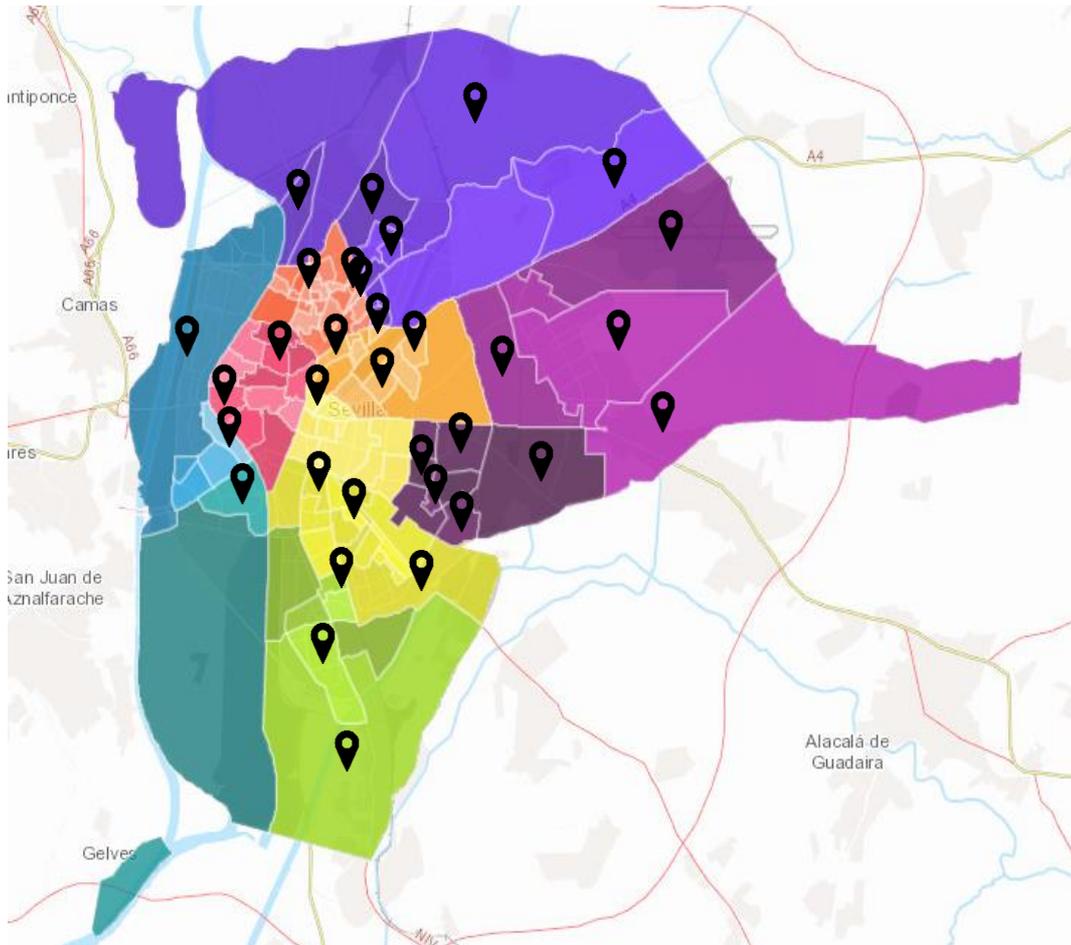


Figura 7 - Mapa distribución Ecopuntos en solución (57)

Se observa que los Ecopuntos se distribuyen en los barrios de los once distritos de la ciudad, quedando cubiertos todos ellos. En la siguiente tabla (Tabla 6) se recopilan los distritos cubiertos y el número de instalaciones de este tipo que se han abierto en cada uno de ellos.

Tabla 6 - Ecopuntos por distrito en Solución (57)

Distrito	Nº Ecopuntos abiertos
Casco Antiguo	2
Macarena	3
Nervión	1
Cerro-Amate	5
Sur	4
Triana	2
Norte	5
San Pablo-Santa Justa	4
Este - Alcosa - Torreblanca	4
Bellavista-La Palmera	2
Los Remedios	1
Total Ecopuntos	33

Por último, la Tabla 7 recoge los barrios que están cubiertos por cada uno de los Ecopuntos abiertos en la ciudad, de forma que siempre se va a cumplir que una instalación ubicada en un determinado barrio va a cubrir como mínimo, a los vecinos que viven en ese barrio.

Tabla 7 - Barrios asignados a cada Ecopunto de la solución (57)

Barrio en el que se abre un Ecopunto	Barrios asignados a cada Ecopunto
Feria	Alfalfa, Encarnación-Regina, Feria, San Gil, San Lorenzo
Museo	Arenal, Museo, San Vicente
El Cerezo	Doctor Barraquer-Grupo Renfe-Policlínico, El Carmen, El Cerezo, El Rocío, El Torrejón, Hermandades-La Carrasca, La Barzola, La Palmilla-Doctor Marañón, La Paz-Las Golondrinas, Las Avenidas, León XIII-Los Naranjos, Macarena Tres Huertas-Macarena Cinco, Polígono Norte, La Bachillera
Pino Flores	Begoña-Santa Catalina, Campos de Soria, Los Príncipes-La Fontanilla, Pino Flores, Pío XII, Santa María de Ordas-San Nicolás, Villegas, Los Arcos
Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores	Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores, Huerta del Pilar, Nervión
San Roque	San Bartolomé, Santa Catalina, Santa Cruz, La Calzada, La Florida, San Roque
Amate	Ciudad Jardín, Amate, Los Pájaros
La Plata	La Plata
Palmete	Palmete
Rochelambert	El Cerro, Juan XXIII, Rochelambert
Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería	Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería
Bami	Bami, Tabladilla-La Estrella, Pedro Salvador-Las Palmeritas-Guadaira, Sector Sur-La Palmera-Reina Mercedes
Felipe II-Los Diez Mandamientos	La Oliva, El Juncal-Hispalis, El Plantinar, Felipe II-Los Diez Mandamientos, Tiro de Línea-Santa Genoveva
Huerta de la Salud	La Buhaira, San Bernardo, El Porvenir, El Prado-Parque María Luisa, Giralda Sur, Huerta de la Salud
Polígono Sur	Avenida de la Paz, Las Letanías, Polígono Sur
Triana Casco Antiguo	Barrio León, El Tardón-El Carmen, Triana Casco Antiguo, Triana Este
Triana Oeste	Triana Oeste
Barriada Pino Montano	Barriada Pino Montano
El Gordillo	El Gordillo
Las Almenas	Consolación, Las Almenas, Los Carteros, San Diego
San Jerónimo	San Jerónimo
Valdezorras	Aeropuerto Viejo, Valdezorras
El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona	San Julián, Cruz Roja-Capuchinos, Retiro Obrero, El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona, San José Obrero
La Corza	Cisneo Alto-Santa María de Gracia, Las Naciones-Parque Atlántico-Las Dalias, San Matías, Árbol Gordo, La Corza, Las Huertas, San Carlos-Tartessos, Zodiaco
San Pablo A y B	Huerta de Santa Teresa, San Pablo A y B
San Pablo D y E	San Pablo C, San Pablo D y E, Santa Clara
Colores Entreparkes	Colores Entreparkes
Palacio de Congresos Urbadiez Entreparkes	Palacio de Congresos Urbadiez Entreparkes
Parque Alcosa-Jardines del Edén	Parque Alcosa-Jardines del Edén
Torreblanca	Torreblanca
Bellavista	Bellavista
Elcano-Bermejales	Barriada de Pineda, Elcano-Bermejales, Heliópolis
Los Remedios	Los Remedios, Tablada

7.2. Solución (58)

Según el criterio de la métrica Euclídea, la solución que menor distancia presenta a la ideal y que se ha elegido como óptima es la solución (58), siendo esta distancia de un 162,4%. De este modo, la combinación resultante de las instalaciones que se deben abrir suma un total de 32 Ecopuntos, instalados en los barrios que se muestran en la Tabla 8. En cuanto a los resultados obtenidos, se debe incurrir en unos costes de instalación de 1.479.104 euros y tomando un valor de 3.214.797,9 el total de la insatisfacción que los vecinos deben asumir.

Como se puede observar, el coste en el que se incurre es menor que en el que se debiera incurrir en el caso de abrir las instalaciones dadas por la solución (57), ya que se propone abrir un Ecopunto menos. Sin embargo, el nivel de insatisfacción que causa esta solución es mayor que en la solución previamente expuesta.

Tabla 8 - Barrios con Ecopuntos en la Solución (58)

Ecopuntos abiertos
Feria
Museo
El Cerezo
Pino Flores
Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores
San Roque
Amate
La Plata
Palmete
Rochelambert
SantaAurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería
Bami
Felipe II-Lo Diez Mandamientos
Huerta de la Salud
Poligono Sur
Triana Casco Antiguo
Triana Oeste
Consolación
El Gordillo
San Jerónimo
Valdezorras
El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona
La Corza
San Pablo A y B
San Pablo D y E
Colores Entreparkes
Palacio de Congresos Urbadiez Entrepuentes
Parque Alcosa-Jardines del Edén
Torreblanca
Bellavista
Elcano-Bermejales
Los Remedios

La siguiente figura es la representación gráfica de los barrios propuestos por la solución actual en los que se abren Ecopuntos.

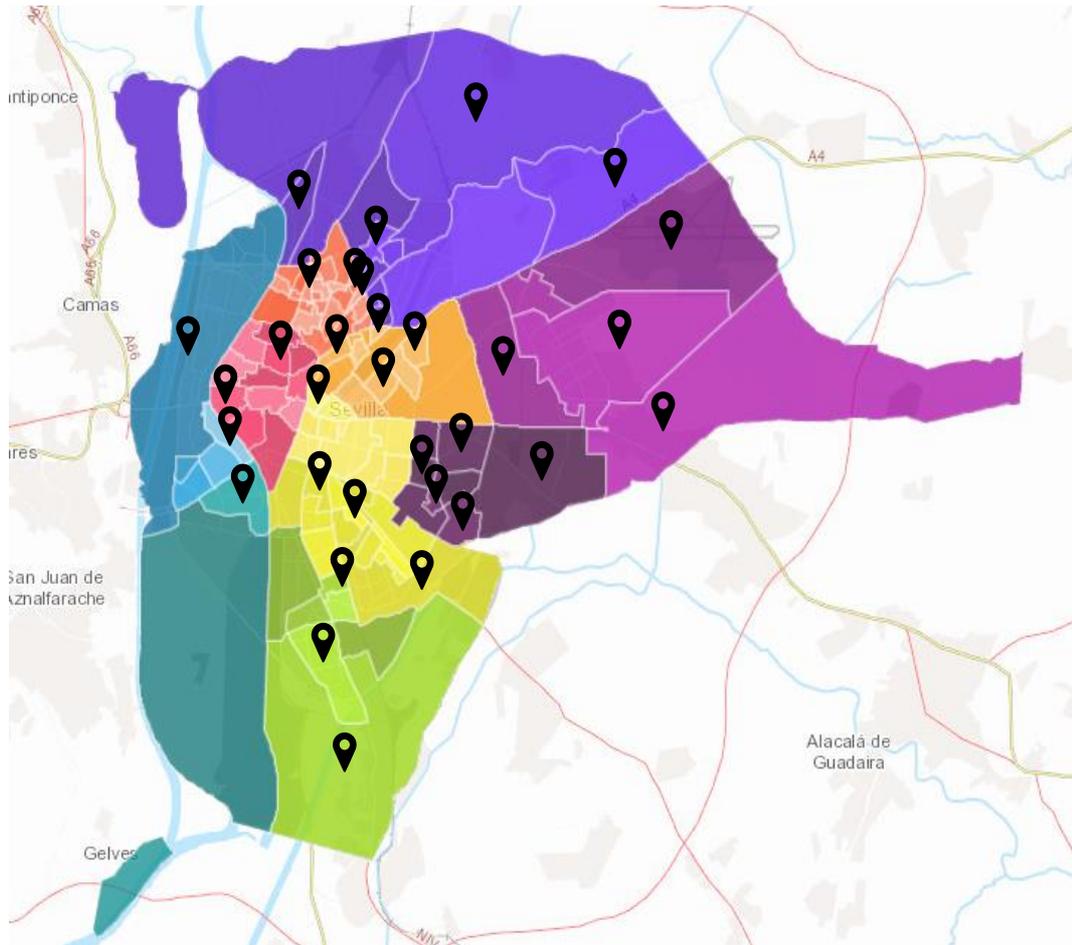


Figura 8 - Mapa distribución Ecopuntos en solución (58)

Aunque la propuesta de dicha solución sea abrir un Ecopunto menos que en la solución (57) y la distribución no sea la misma, aunque sí muy parecida, con la distribución de instalaciones obtenida en esta solución, quedan cubiertos los once distritos de la ciudad de Sevilla por al menos un Ecopunto, como se recoge en la Tabla 9.

Tabla 9 - Ecopuntos por distrito en Solución (58)

Distrito	Nº Ecopuntos abiertos
Casco Antiguo	2
Macarena	3
Nervión	1
Cerro-Amate	5
Sur	4
Triana	2
Norte	4
San Pablo-Santa Justa	4
Este - Alcosa - Torreblanca	4
Bellavista-La Palmera	2
Los Remedios	1
Total Ecopuntos	32

La similitud mencionada entre la solución objeto de estudio (58) y la previamente estudiada (57) se observa también en la Tabla 10 que se muestra a continuación, en la que se recogen los barrios que quedan cubiertos

por cada uno de los 32 Ecopuntos instalados en distintos barrios de la ciudad. Con ello, se observa que todos los barrios existentes están asignados a una instalación de este tipo, quedando por tanto todos los habitantes de la ciudad de Sevilla asignados a un Ecopunto a una distancia de menos de 1500 metros del barrio en el que tienen su vivienda.

La diferencia respecto a la solución anterior es que desaparecen los Ecopuntos de los barrios Barriada Pino Montano y Las Almenas, y aparece en el barrio de Consolación.

Tabla 10 - Barrios asignados a cada Ecopunto de la solución (58)

Barrio en el que se abre un Ecopunto	Barrios asignados a cada Ecopunto
Feria	Alfalfa, Encarnación-Regina, Feria, San Gil, San Lorenzo
Museo	Arenal, Museo, San Vicente
El Cerezo	Doctor Barraquer-Grupo Renfe-Policlínico, El Carmen, El Cerezo, El Rocío, El Torrejón, Hermandades-La Carrasca, La Barzola, La Palmilla-Doctor Marañón, La Paz-Las Golondrinas, Las Avenidas, León XIII-Los Naranjos, Macarena Tres Huertas-Macarena Cinco, Polígono Norte, La Bachillera
Pino Flores	Begoña-Santa Catalina, Campos de Soria, Los Principes-La Fontanilla, Pino Flores, Pío XII, Santa María de Ordas-San Nicolás, Villegas, Los Arcos, Los Carteros
Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores	Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores, Huerta del Pilar, Nervión
San Roque	San Bartolomé, Santa Catalina, Santa Cruz, La Calzada, La Florida, San Roque
Amate	Ciudad Jardín, Amate, Los Pájaros
La Plata	La Plata
Palmete	Palmete
Rochelambert	El Cerro, Juan XXIII, Rochelambert
Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería	Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería
Bami	Bami, Tabladilla-La Estrella, Pedro Salvador-Las Palmeritas-Guadaira, Sector Sur-La Palmera-Reina Mercedes
Felipe II-Lo Diez Mandamientos	La Oliva, El Juncal-Hispalis, El Plantinar, Felipe II-Los Diez Mandamientos, Tiro de Línea-Santa Genoveva
Huerta de la Salud	La Buhaira, San Bernardo, El Porvenir, El Prado-Parque María Luisa, Giralda Sur, Huerta de la Salud
Polígono Sur	Avenida de la Paz, Las Letanías, Polígono Sur
Triana Casco Antiguo	Barrio León, El Tardón-El Carmen, Triana Casco Antiguo, Triana Este
Triana Oeste	Triana Oeste
Consolación	Barriada Pino Montano, Consolación, Las Almenas, San Diego
El Gordillo	El Gordillo
San Jerónimo	San Jerónimo
Valdeorras	Aeropuerto Viejo, Valdeorras
El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona	San Julián, Cruz Roja-Capuchinos, Retiro Obrero, El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona, San José Obrero
La Corza	Cisneo Alto-Santa María de Gracia, Las Naciones-Parque Atlántico-Las Dalias, San Matías, Árbol Gordo, La Corza, Las Huertas, San Carlos-Tartessos, Zodiaco
San Pablo A y B	Huerta de Santa Teresa, San Pablo A y B
San Pablo D y E	San Pablo C, San Pablo D y E, Santa Clara
Colores Entreparques	Colores Entreparques
Palacio de Congresos Urbadiéz Entrepuentes	Palacio de Congresos Urbadiéz Entrepuentes
Parque Alcosa-Jardines del Edén	Parque Alcosa-Jardines del Edén
Torreblanca	Torreblanca
Bellavista	Bellavista
Elcano-Bermejales	Barriada de Pineda, Elcano-Bermejales, Heliópolis
Los Remedios	Los Remedios, Tablada

7.3. Solución (60)

En este caso, la solución (60) es la solución que menor distancia presenta respecto a la solución ideal siguiendo la métrica de distancia Chebyshev. De este modo, la solución propone la apertura de 30 Ecopuntos en la ciudad, uno en cada barrio recogido en la Tabla 11. Además de ello, se debe incurrir en unos costes de instalación de 1.386.660 euros y siendo 3.507.153,9 el valor total de la insatisfacción que los vecinos deben asumir.

Tabla 11 - Barrios con Ecopuntos en la Solución (60)

Ecopuntos abiertos
Feria
Museo
El Cerezo
Pino Flores
Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores
San Roque
La Plata
Los Pájaros
Palmete
Rochelambert
Felipe II-Los Diez Mandamientos
Huerta de la Salud
Poligono Sur
Triana Casco Antiguo
Triana Oeste
Consolación
El Gordillo
San Jerónimo
Valdezorras
El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona
La Corza
San Pablo A y B
San Pablo D y E
Colores Entreparkes
Palacio de Congresos Urbadiez Entrepuentes
Parque Alcosa-Jardines del Edén
Torreblanca
Bellavista
Elcano-Bermejales
Los Remedios

A continuación, el mapa de la ciudad de Sevilla de la Figura 9 recoge todos estos barrios en los que se deben abrir Ecopunto, de manera que queda representado de una forma más visual.

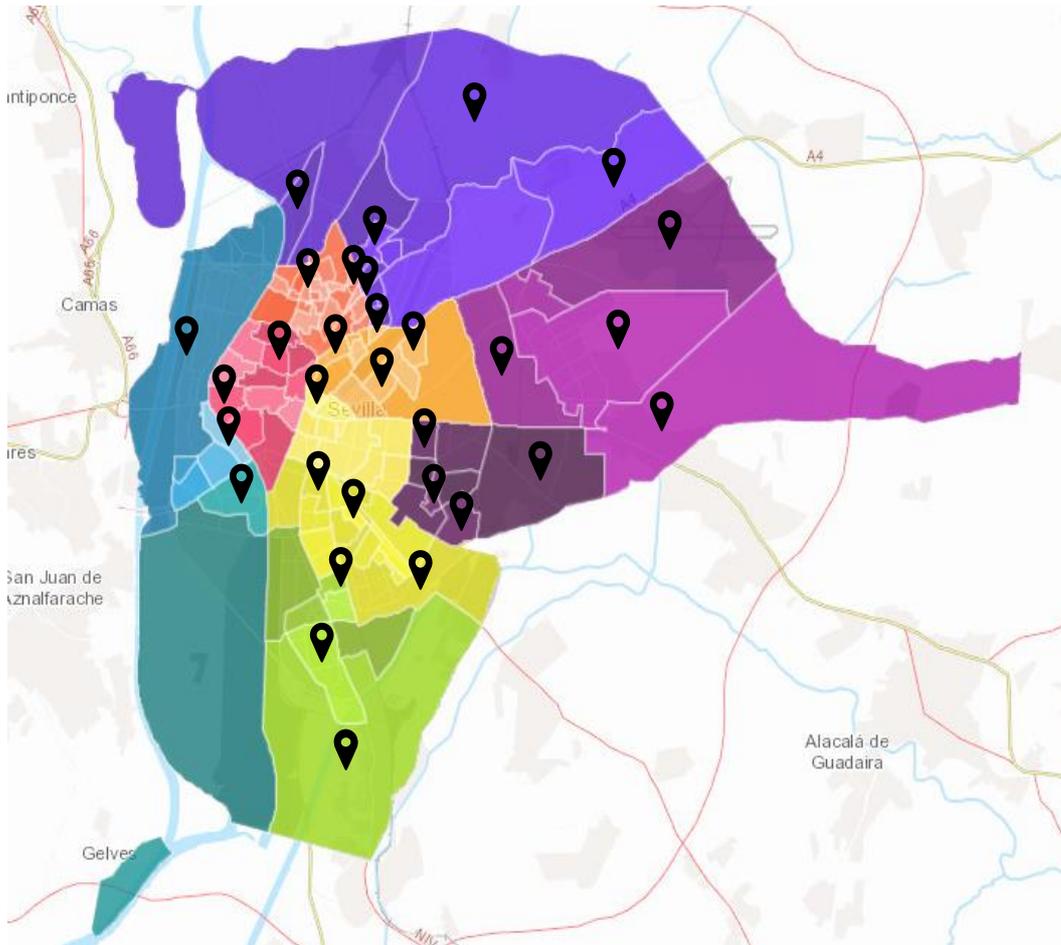


Figura 9 - Mapa distribución Ecopuntos en solución (60)

La siguiente tabla recoge el número de instalaciones abiertas en cada uno de los once distritos de la ciudad, comprobándose que en cada uno de ellos hay al menos un Ecopunto instalado.

Tabla 12 - Ecopuntos por distrito en Solución (60)

Distrito	Nº Ecopuntos abiertos
Casco Antiguo	2
Macarena	3
Nervión	1
Cerro-Amate	4
Sur	3
Triana	2
Norte	4
San Pablo-Santa Justa	4
Este - Alcosa - Torreblanca	4
Bellavista-La Palmera	2
Los Remedios	1
Total Ecopuntos	30

Como se puede comprobar a continuación (Tabla 13), la diferencia de los resultados de la distribución de Ecopuntos de esta solución con la vista en el anterior apartado 7.2, es que desaparecen los Ecopuntos anteriormente abiertos en los barrios de Amate, Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería y Bami,

y se abre uno en el barrio de Los Pájaros, que no había sido propuesto como ubicación para un Ecopunto hasta el momento.

Tabla 13 - Barrios asignados a cada Ecopunto de la solución (60)

Barrio en el que se abre un Ecopunto	Barrios asignados a cada Ecopunto
Feria	Encarnación-Regina, Feria, San Gil, San Lorenzo
Museo	Alfalfa, Arenal, Museo, San Vicente
El Cerezo	Doctor Barraquer-Grupo Renfe-Policlínico, El Carmen, El Cerezo, El Rocío, La Barzola, El Torrejón, Hermandades-La Carrasca, La Palmilla-Doctor Marañón, La Paz-Las Golondrinas, Las Avenidas, León XIII-Los Naranjos, Macarena Tres Huertas-Macarena Cinco, Polígono Norte, La Bachillera
Pino Flores	Begoña-Santa Catalina, Campos de Soria, Los Príncipes-La Fontanilla, Pino Flores, Pío XII, Santa María de Ordas-San Nicolás, Villegas, Los Arcos, Los
Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores	Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores, Huerta del Pilar, Nervión
San Roque	San Bartolomé, Santa Catalina, Santa Cruz, La Calzada, La Florida, San Roque
La Plata	La Plata
Los Pájaros	Ciudad Jardín, Los Pájaros, Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería
Palmete	Palmete
Rochelambert	Amate, Juan XXIII, Rochelambert, El Cerro
Felipe II-Los Diez Mandamientos	La Oliva, El Juncal-Hispalis, El Plantinar, Felipe II-Los Diez Mandamientos, Tabladilla-La Estrella, Tiro de Línea-Santa Genoveva
Huerta de la Salud	La Buhaira, San Bernardo, El Porvenir, El Prado-Parque María Luisa, Giralda Sur, Huerta de la Salud
Poligono Sur	Avenida de la Paz, Las Letanías, Poligono Sur
Triana Casco Antiguo	Barrio León, El Tardón-El Carmen, Triana Casco Antiguo, Triana Este
Triana Oeste	Triana Oeste
Consolación	Barriada Pino Montano, Las Almenas, San Diego, Consolación
El Gordillo	El Gordillo
San Jerónimo	San Jerónimo
Valdeorras	Aeropuerto Viejo, Valdeorras
El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona	San Julián, Cruz Roja-Capuchinos, Retiro Obrero, El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona, San José Obrero
La Corza	Cisneo Alto-Santa María de Gracia, Las Naciones-Parque Atlántico-Las Dalias, San Matías, Árbol Gordo, La Corza, Las Huertas, San Carlos-Tartessos, Zodiaco
San Pablo A y B	Huerta de Santa Teresa, San Pablo A y B
San Pablo D y E	San Pablo C, San Pablo D y E, Santa Clara
Colores Entreparkes	Colores Entreparkes
Palacio de Congresos Urbadiéz Entreparkes	Palacio de Congresos Urbadiéz Entreparkes
Parque Alcosa-Jardines del Edén	Parque Alcosa-Jardines del Edén
Torreblanca	Torreblanca
Bellavista	Bellavista
Elcano-Bermejales	Bami, Barriada de Pineda, Elcano-Bermejales, Heliópolis, Pedro Salvador-Las Palmeritas-Guadaira, Sector Sur-La Palmera-Reina Mercedes
Los Remedios	Los Remedios, Tablada

7.4. Solución (74) y Ecopuntos Instalados en la ciudad de Sevilla

Como ya se mencionó en el apartado 1.2 del presente documento, uno de los objetivos perseguidos con la realización de este trabajo es la comparativa de la situación actual de los Ecopuntos que hay instalados en la ciudad de Sevilla con la solución aportada por el modelo propuesto.

Para ello, se ha buscado en la Tabla 4 que recoge todo el conjunto generado de soluciones no dominadas, la solución que propone abrir 16 Ecopuntos, ya que es ésta la cantidad de instalaciones de este tipo que hay en la actualidad abiertas en la ciudad de Sevilla.

Aunque de los dieciséis Ecopuntos instalados en la ciudad, uno de ellos aparezca como fuera de servicio temporalmente en la página web de Lipasam haciendo ello que en otros sitios conste como quince Ecopuntos, en el presente trabajo se tienen en cuenta todas las instalaciones ya que, aunque no esté actualmente operativa, se ha incurrido ya en un coste de inversión y se ha tomado la decisión de ubicación de esta.

En este sentido, la siguiente tabla recoge los barrios en los que el modelo planteado en el presente trabajo propone para en cada uno de ellos haya un Ecopunto abierto.

Tabla 14 - Barrios con ecopuntos en la Solución (74)

Ecopuntos abiertos
San Lorenzo
El Torrejón
Retiro Obrero
Huerta del Pilar
Palmete
Rochelambert
Felipe II-Los Diez Mandamientos
Triana Casco Antiguo
Consolación
El Gordillo
Valdezorras
La Corza
Colores Entreparques
Torreblanca
Bellavista
Elcano-Bermejales

Por otra parte, se han identificado los barrios de Sevilla en los que hay Ecopuntos instalados, lo cual se recoge en la Tabla 15 que se muestra a continuación.

Tabla 15 - Barrios de Sevilla con ecopuntos instalados

Ecopuntos abiertos
Feria
Cruz Roja-Capuchinos
Begoña-Santa Catalina
La Paz-Las Golondrinas
Nervión
Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería
Avenida de la Paz
Barrio León
Barriada Pino Montano
San Jerónimo
Las Almenas
San Pablo A y B
Parque Alcosa-Jardines del Edén
Colores, Entreparques
Bellavista
Los Remedios

Al igual que se ha visto en apartados anteriores, se ha representado de forma visual la distribución de los Ecopuntos en el mapa de la ciudad de Sevilla, haciendo la Figura 10 referencia a la distribución propuesta por nuestro modelo, y la Figura 11 a la distribución ya establecida en la ciudad de Sevilla.

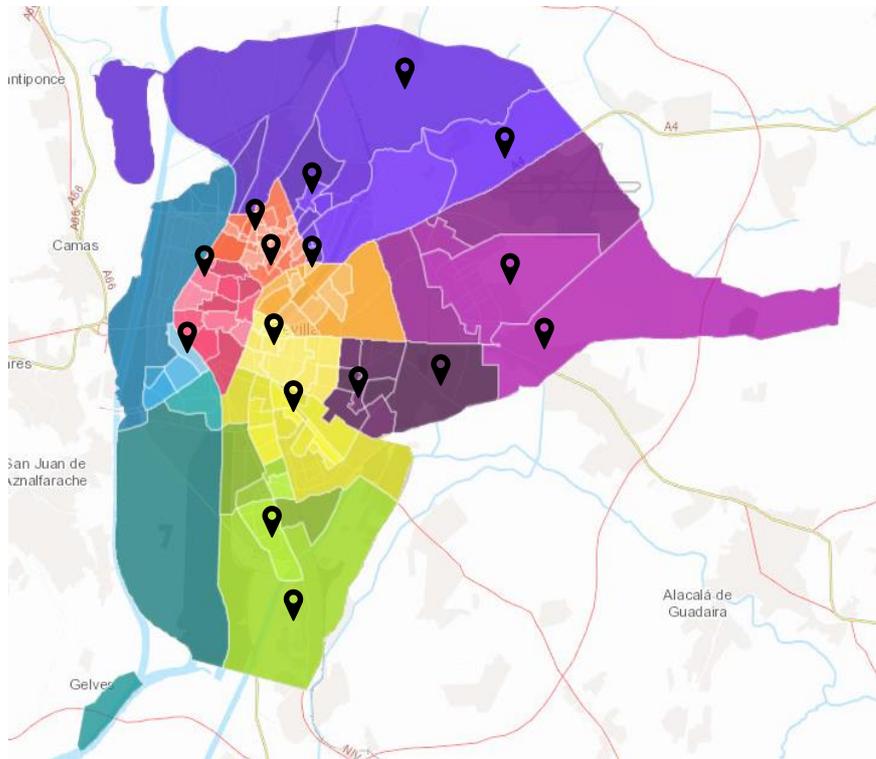


Figura 10 - Mapa distribución Ecopuntos en solución (74)

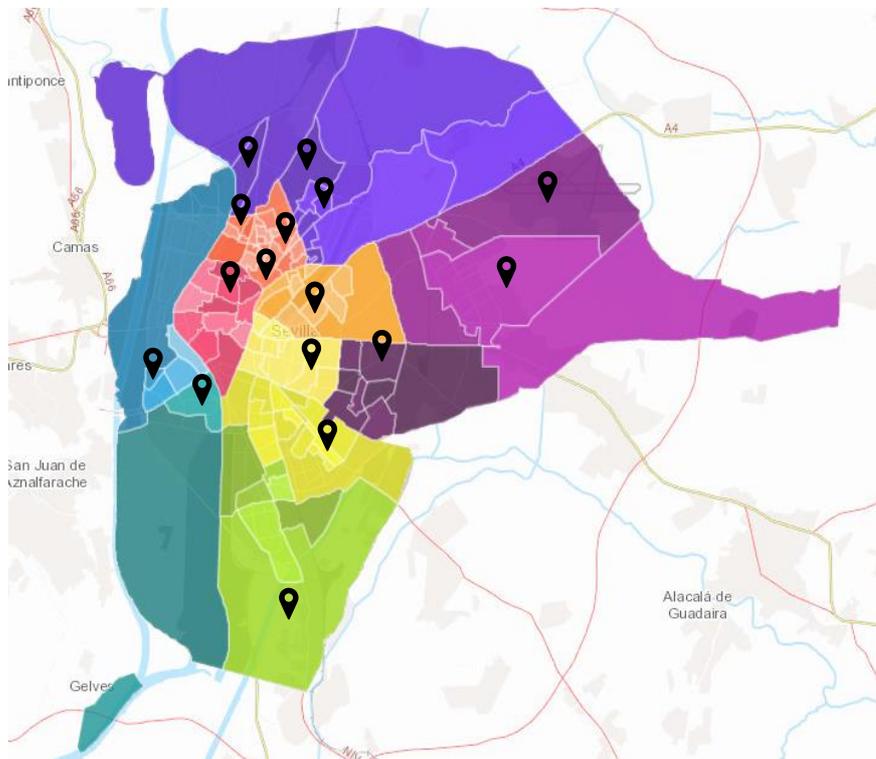


Figura 11 - Mapa Ecopuntos instalados en la ciudad de Sevilla

Una vez visto esto, la siguiente tabla recoge el número de Ecopuntos abiertos en cada uno de los distritos de la ciudad de Sevilla, tanto en la solución (74) generada como en la situación actual en la que se encuentran las instalaciones en la ciudad.

En el caso de la solución (74), a diferencia del resto de resultados obtenidos, es posible observar que no todos los distritos están cubiertos por un Ecopunto, en concreto, el distrito de Los Remedios no es una ubicación propuesta para abrir una instalación de este tipo. Esto se debe a que, aunque no haya en ese distrito, en los distritos colindantes (Sur, Bellavista-La Palmera, Casco Antiguo y Triana) sí que se abren, lo que hace innecesario abrir uno en ese distrito para el caso de abrir 16 Ecopuntos, ya que la combinación óptima no lo concibe.

Tabla 16 - Comparativa Ecopuntos por distrito en Solución (74) y real

Solución (74)		Situación Actual Sevilla	
Distrito	Nº Ecopuntos abiertos	Distrito	Nº Ecopuntos abiertos
Casco Antiguo	1	Casco Antiguo	1
Macarena	2	Macarena	3
Nervión	1	Nervión	1
Cerro-Amate	2	Cerro-Amate	1
Sur	1	Sur	1
Triana	1	Triana	1
Norte	3	Norte	3
San Pablo-Santa Justa	1	San Pablo-Santa Justa	1
Este - Alcosa - Torreblanca	1	Este - Alcosa - Torreblanca	2
Bellavista-La Palmera	3	Bellavista-La Palmera	1
Los Remedios	0	Los Remedios	1
Total Ecopuntos	16	Total Ecopuntos	16

Comparando la solución obtenida con lo ya establecido en la ciudad, se observa que los distritos Casco Antiguo, Nervión, Sur, Triana, Norte y San Pablo-Santa Justa, coinciden en número de Ecopuntos. Sin embargo, la solución actualmente existente en la ciudad opta por concentrarlos más en el interior de la ciudad, ya que por ejemplo hay más instalaciones ubicadas en los distritos Macarena, Este-Alcosa-Torreblanca y Bellavista-La Palmera que los propuestos por la solución (74), que supera en número de Ecopuntos a la solución real en los distritos Cerro-Amate y Bellavista-La Palmera.

Una vez llegados a este punto, surge la necesidad de simular en el optimizador la situación real actualmente presente en la ciudad de Sevilla para obtener los valores de ambos objetivos y poder así hacer comparaciones más exhaustivas. Para ello, se modifica el modelo matemático planteado en el apartado 3.2, imponiendo las restricciones que obligan a que el número de Ecopuntos instalados sumen dieciséis y añadiendo una restricción por cada Ecopunto instalado (Figura 12). Sin embargo, al ejecutar la solución, el modelo resulta infactible, debiéndose ello a que no todos los Ecopuntos instalados en Sevilla cumplen la condición de estar a menos de 1500 metros del barrio al que cubren, por lo que es necesario eliminar la restricción (5) del modelo para poder obtener una solución. El resultado tras dicha implementación genera un coste total de 739.552 € y un valor de insatisfacción de 7784169.24, que es asumido por los vecinos de la ciudad de Sevilla en la actualidad.

```

# Activar disstritos con Ecopuntos
m.addConstr(y['Feria'] == 1)
m.addConstr(y['Cruz Roja-Capuchinos'] == 1)
m.addConstr(y['Begoña-Santa Catalina'] == 1)
m.addConstr(y['La Paz-Las Golondrinas'] == 1)
m.addConstr(y['Nervi3n'] == 1)
m.addConstr(y['Santa Aurelia-Cant3brico-Atl3ntico-La Romer3a'] == 1)
m.addConstr(y['Avenida de la Paz'] == 1)
m.addConstr(y['Barrio Le3n'] == 1)
m.addConstr(y['Barriada Pino Montano'] == 1)
m.addConstr(y['San Jer3nimo'] == 1)
m.addConstr(y['Las Almenas'] == 1)
m.addConstr(y['San Pablo A y B'] == 1)
m.addConstr(y['Parque Alcosa-Jardines del Ed3n'] == 1)
m.addConstr(y['Colores, Entreparkes'] == 1)
m.addConstr(y['Bellavista'] == 1)
m.addConstr(y['Los Remedios'] == 1)

# Limitar n3mero de Ecopuntos abiertos a 16
m.addConstrs((y.sum('*') == 16 for j in C))

```

Figura 12 - Modificaci3n en el c3digo para obtener resultados de la situaci3n real en Gurobi

Una vez implementados y simulados los cambios en Python, se obtienen los resultados de la distribuci3n de barrios asociados a cada Ecopunto de la soluci3n actualmente implantada en la ciudad de Sevilla (Tabla 18), compar3ndose esta con los barrios asignados a cada uno de los Ecopuntos propuestos para ser abiertos en la soluci3n 74 (Tabla 17).

Tabla 17 - Barrios asignados a cada Ecopunto de la soluci3n (74)

Barrio en el que se abre un Ecopunto	Barrios asignados a cada Ecopunto
San Lorenzo	Alfalfa, Encarnaci3n-Regina, Feria, Museo, San Gil, San Lorenzo, San Vicente, Doctor Barraquer-Grupo Renfe-Polic3nico, Triana Oeste
El Torrej3n	El Carmen, El Cerezo, El Roc3o, El Torrej3n, Hermandades-La Carrasca, La Palmilla-Doctor Mara3n, La Paz-Las Golondrinas, Las Avenidas, Los Principes-La Fontanilla, Macarena Tres Huertas-Macarena Cinco, Pol3gono Norte, Villagas, La Bachillera, San Jer3nimo
Retiro Obrero	San Juli3n, Santa Catalina, Begoña-Santa Catalina, Cruz Roja-Capuchinos, La Barzola, Le3n XIII-Los Naranjos, P3o XII, Retiro Obrero, Santa Mar3a de Ordas-San Nicol3s, El Fontanal-Mar3a Auxiliadora-Carretera Carmona, San Jos3 Obrero
Huerta del Pilar	San Bartolom3, Santa Cruz, Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores, Huerta del Pilar, La Buhaira, La Calzada, La Florida, Nervi3n, San Roque, El Prado-Parque Mar3a Luisa, Huerta de la Salud, Huerta de Santa Teresa
Palmete	Palmete
Rochelambert	Ciudad Jard3n, Amate, El Cerro, Juan XXIII, La Plata, Los P3jaros, Rochelambert, Santa Aurelia-Cant3brico-Atl3ntico-La Romer3a
Felipe II-Los Diez Mandamientos	San Bernardo, La Oliva, Avenida de la Paz, El Juncal-Hispalis, El Plantinar, El Porvenir, Felipe II-Los Diez Mandamientos, Giralda Sur, Las Letanias, Pol3gono Sur, Tabladilla-La Estrella, Tiro de L3nea-Santa Genoveva
Triana Casco Antiguo	Arenal, Barrio Le3n, El Tard3n-El Carmen, Triana Casco Antiguo, Triana Este, Los Remedios, Tablada
Consolaci3n	Barriada Pino Montano, Consolaci3n, Las Almenas, Los Carteros, San Diego
El Gordillo	El Gordillo
Valdezorras	Aeropuerto Viejo, Valdezorras
La Corza	Campos de Sor3a, Cisneo Alto-Santa Mar3a de Gracia, Pino Flores, Las Naciones-Parque Atl3ntico-Las Dalias, Los Arcos, San Mat3as, 3rbol Gordo, La Corza, Las Huertas, San Carlos-Tartessos, San Pablo A y B, San Pablo C, San Pablo D y E, Santa Clara, Zodiaco
Colores Entreparkes	Colores, Entreparkes, Palacio de Congresos, Urbadi3ez, Entrepuentes, Parque Alcosa-Jardines del Ed3n
Torreblanca	Torreblanca
Bellavista	Bellavista
Elcano-Bermejales	Bami, Barriada de Pineda, Elcano-Bermejales, Heli3polis, Pedro Salvador-Las Palmeritas-Guadaira, Sector Sur-La Palmera-Reina Mercedes

Tabla 18- Barrios asignados a cada Ecopunto de la situación real de Sevilla

Barrio en el que se abre un Ecopunto	Barrios asignados a cada Ecopunto
Feria	Alfalfa, Encarnación-Regina, Feria, Museo, San Bartolomé, San Gil, San Lorenzo, San Vicente, Santa Catalina, Santa Cruz, Palmete, El Gordillo, Valdezorras, Torreblanca, Elcano-Bermejales, Heliópolis, Sector Sur-La Palmera-Reina Mercedes
Cruz Roja-Capuchinos	San Julián, Cruz Roja-Capuchinos, La Barzola, León XIII-Los Naranjos, Retiro Obrero, San Roque, El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona, San José Obrero
Begoña-Santa Catalina	Begoña-Santa Catalina, Campos de Soria, Cisneo Alto-Santa María de Gracia, El Rocío, Hermandades-La Carrasca, Los Principes-La Fontanilla, Pino Flores, Pío XII, Polígono Norte, Santa María de Ordas-San Nicolás, Villegas, San Matías, Árbol Gordo
La Paz-Las Golondrinas	Doctor Barraquer-Grupo Renfe-Policlínico, El Carmen, El Cerezo, El Torrejón, La Palmilla-Doctor Marañón, La Paz-Las Golondrinas, Las Avenidas, Macarena Tres Huertas-Macarena Cinco, La Bachillera
Nervión	Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores, Ciudad Jardín, Huerta del Pilar, La Buhaira, La Calzada, La Florida, Nervión, San Bernardo, El Plantinar, El Porvenir, Giralda Sur, Huerta de la Salud
Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería	Amate, Juan XXIII, La Plata, Los Pájaros, Rochelambert, Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería, Santa Clara
Avenida de la Paz	El Cerro, La Oliva, Avenida de la Paz, Bami, El Juncal-Hispalis, Felipe II-Los Diez Mandamientos, Las Letanías, Polígono Sur, Tabladilla-La Estrella, Tiro de Línea-Santa Genoveva, Barriada de Pineda, Pedro Salvador-Las Palmeritas-Guadaira
Barrio León	Barrio León, El Tardón-El Carmen, Triana Casco Antiguo, Triana Este, Triana Oeste
Barriada Pino Montano	Barriada Pino Montano
San Jerónimo	San Jerónimo
Las Almenas	Consolación, Las Almenas, Las Naciones-Parque Atlántico-Las Dalías, Los Arcos, Los Carteros, San Diego
San Pablo A y B	Huerta de Santa Teresa, La Corza, Las Huertas, San Carlos-Tartessos, San Pablo A y B, San Pablo C, San Pablo D y E, Zodiaco
Parque Alcosa-Jardines del Edén	Aeropuerto Viejo, Palacio de Congresos, Urbadiez, Entrepuentes, Parque Alcosa-Jardines del Edén
Colores, Entreparkes	Colores, Entreparkes
Bellavista	Bellavista
Los Remedios	Tablada

En lo referente a los resultados obtenidos, en ambos casos se debe incurrir en el mismo coste de instalación, ya que el número de Ecopuntos instalados es el mismo, resultando este coste de 739522 euros. Si embargo, en lo que al nivel de insatisfacción asumido por los vecinos respecta, en la situación actual de los Ecopuntos instalados en la ciudad dicho parámetro toma un valor de 7784169,24, reduciéndose este en un 8,12% en el caso de haber optado por la implantación en la ciudad de la distribución de Ecopuntos obtenidas propuesta por la solución (74), cuyo nivel de insatisfacción se reduce hasta los 7151937,10 puntos.

Por último, la Tabla 19 recoge de forma resumida el conjunto de soluciones estudiadas con sus respectivos valores obtenidos para cada función objetivo, así como el número de Ecopuntos instalados en cada uno de los distritos de la ciudad de Sevilla.

Tabla 19 - Resumen de los parámetros de los resultados estudiados

	Solución (57)	Solución (58)	Solución (60)	Solución (74)	Situación Real
Ecopuntos abiertos	33	32	30	16	16
Coste	1525326 €	1479104 €	1386660 €	739552 €	739552 €
Insatisfacción	3085669,52	3214797,92	3507153,94	7151937,10	7784169,24
	<i>N.º de Ecopuntos abiertos en cada distrito</i>				
Casco Antiguo	2	2	2	1	1
Macarena	3	3	3	2	3
Nervión	1	1	1	1	1
Cerro-Amate	5	5	4	2	1
Sur	4	4	3	1	1
Triana	2	2	2	1	1
Norte	5	4	4	3	3
San Pablo-Santa Justa	4	4	4	1	1
Este - Alcosa - Torreblanca	4	4	4	1	2
Bellavista-La Palmera	2	2	2	3	1
Los Remedios	1	1	1	0	1

8 CONCLUSIONES

En último lugar, este capítulo recoge un repaso general de cómo se ha llevado a cabo la realización del presente Trabajo Fin de Máster, así como las conclusiones a las que se ha llegado con la ejecución del mismo.

El motivo que ha impulsado a llevar a cabo el presente trabajo ha sido el análisis de la ubicación de Ecopuntos en los distintos barrios de la ciudad de Sevilla, tratándose este de un problema de ubicación de instalaciones semi-deseables. En este sentido, se ha desarrollado un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MILP), cuya función objetivo comprende un objetivo relacionado con el coste de inversión y otro que hace referencia a la minimización del nivel de insatisfacción que genera la instalación en los vecinos asignados a ésta, comprendido este último por factores tanto de aceptación como de rechazo.

La problemática encontrada en el análisis de modelos de localización con más de un objetivo es la cantidad de soluciones no dominadas que presenta, así como la relación existente entre los distintos objetivos. En el caso estudiado, la generación de soluciones no dominadas se lleva a cabo a través del método de la restricción, al igual que hizo (Coutinho-Rodrigues *et al.*, 2012) en su trabajo, donde se impone una restricción al valor máximo del objetivo del coste de instalación y se minimiza el objetivo que mide el nivel de insatisfacción asumido por los vecinos de la ciudad. De este modo, la forma de evaluar las soluciones ha sido a través de tres métricas encargadas de medir la distancia a de cada solución generada a la solución ideal.

En lo referente a los resultados obtenidos, se observa que no hay una única solución para el problema que se aborda, ya que la solución elegida irá en concordancia con los factores del problema a los que el decisor prefiera darle más prioridad. Es decir, la toma de una decisión no será igual en el caso en el que el decisor se incline más por la satisfacción de los vecinos, que, si prioriza el presupuesto existente para realizar la inversión, o si en otro caso, se inclina más por una solución que equilibre ambos objetivos, siendo esto último lo más habitual, ya que es lo que da el sentido al planteamiento llevado a cabo en el trabajo.

Es por ello por lo que se ha analizado más de una solución en el presente trabajo, en concreto, cuatro. De forma que, tres de las soluciones estudiadas se corresponden con los resultados obtenidos que mejor equilibran ambos objetivos, para cuya elección se han llevado a cabo distintos criterios de métricas de distancia, como son el de distancia Euclídea, Manhattan y Chebyshev. Sin embargo, aunque se buscaba una solución de este tipo, se ha querido ir más allá y estudiar cómo de acertado es según el modelo planteado, la actual disposición de los Ecopuntos en los barrios de la ciudad de Sevilla.

Al realizar lo mencionado, se ha observado que la solución existente en la ciudad no cumple con todos los requisitos impuestos en el modelo llevado a cabo, en concreto con el umbral de distancia máximo entre los habitantes de un barrio y su Ecopunto asignado, establecido en 1500 metros en el caso llevado a cabo. De este modo, se ha comprobado que, si al modelo planteado se le hubiera impuesto que el número de Ecopuntos a abrir fuera el mismo que los que hay abiertos en la actualidad, el nivel de insatisfacción causado en los vecinos de la ciudad hubiera sido inferior al actual.

Gracias al estudio realizado, se comprueba que a pesar de encontrarnos ante un problema de grandes dimensiones y con un grado de toma de decisiones complejo, se es capaz de extraer información relevante que puede ser determinante a la hora de tomar una decisión. Además, se proporciona una nueva formulación lineal entera mixta con un enfoque bi-objetivo a un problema común como es el de localización urbana, en el que se han agregado dentro de una misma función objetivo factores de aceptación y rechazo que componían al problema abordado de instalaciones semi-deseables.

Queda demostrado, por tanto, que el enfoque utilizado puede aplicarse a escenarios de planificación real, sobre todo en áreas urbanas como pueden ser el centro de antiguas ciudades.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Brimberg, J. and Juel, H. (1998a), “A bicriteria model for locating a semi-desirable facility in the plane”, *European Journal of Operational Research*, Elsevier, Vol. 106 No. 1, pp. 144–151.
- Brimberg, J. and Juel, H. (1998b), “A minisum model with forbidden regions for locating a semi-desirable facility in the plane”, *Location Science*, Springer-Verlag France, Vol. 6 No. 1–4, pp. 109–120.
- Carro Paz, R. and González Gómez, D. (2012), *Localización de instalaciones*. Nülan. Deposited Documents 1619, Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Centro de Documentación.
- Coutinho-Rodrigues, J., Tralhão, L. and Alçada-Almeida, L. (2012), “A bi-objective modeling approach applied to an urban semi-desirable facility location problem”, *European Journal of Operational Research*, Elsevier B.V., Vol. 223 No. 1, pp. 203–213.
- Erkut, E. and Neuman, S. (1989), “Analytical models for locating undesirable facilities”, *European Journal of Operational Research*, North-Holland, 15 June.
- Klose, A. and Drexl, A. (2005), “Facility location models for distribution system design”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 162 No. 1, pp. 4–29.
- Marianov, V., ReVelle, C. and Shih, S. (2002), “Anticoverage models for obnoxious material transportation”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Pion Limited, Vol. 29 No. 1, pp. 141–150.
- Rakas, J., Teodorović, D. and Kim, T. (2004), “Multi-objective modeling for determining location of undesirable facilities”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier Ltd, Vol. 9 No. 2, pp. 125–138.
- Saborido, R. and Chicano, F. (2015), “Optimización Multi-objetivo Basada en Preferencias para la Planificación de Proyectos Software”. En *X Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2015)*, Mérida, España.
- Bosque Sendra, J. and Franco Maass, S. (1995), “Modelos de localización-asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables”, *Serie geográfica*, No. 5, pp. 97-114.
- Wang, C.J. and Zhao, S.T. (2014), “Based on multi-objective theory researching on location problem of heavy metals enterprises”, *Advanced Materials Research*, Vol. 864–867, pp. 1078–1082.
- Ayuntamiento de Sevilla. “*Indicadores demográficos de Sevilla. Servicio de Estadística*”. Instituto Nacional de Estadística (INE). Disponible en: <https://www.sevilla.org/servicios/servicio-de-estadistica/datos-estadisticos/indicadores-demograficos/analisis-indicadores-demograficos.pdf>

Urbanismo. Delegación de Urbanismo. Ayuntamiento de Sevilla. Disponible en:
<https://sig.urbanismosevilla.org/VisorGis/geoSevilla.asp?Layers=IDES&Selected=01>

ANEXO I

Nº	Distrito	Barrios	Población	Barrios	x	y
1	CASCO ANTIGUO	Alfalfa	4.777	Alfalfa	37,3908	-5,9929
2		Arenal	3.773	Arenal	37,3866	-5,9969
3		Encarnación-Regina	4.277	Encarnación-Regina	37,3942	-5,9932
4		Feria	6.665	Feria	37,3977	-5,9913
5		Museo	5.464	Museo	37,3910	-5,9998
6		San Bartolomé	4.020	San Bartolomé	37,3888	-5,9870
7		San Gil	6.810	San Gil	37,4018	-5,9912
8		San Julián	6.154	San Julián	37,3981	-5,9853
9		San Lorenzo	4.306	San Lorenzo	37,3994	-5,9969
10		San Vicente	5.692	San Vicente	37,3954	-5,9997
11		Santa Catalina	4.456	Santa Catalina	37,3934	-5,9861
12		Santa Cruz	2.557	Santa Cruz	37,3850	-5,9903
13		MACARENA	Begoña-Santa Catalina	3.255	Begoña-Santa Catalina	37,4075
14	Campos de Soria		3.195	Campos de Soria	37,4069	-5,9711
15	Cisneo Alto-Santa María de Gracia		1.533	Cisneo Alto-Santa María de Gracia	37,4038	-5,9702
16	Cruz Roja-Capuchinos		5.141	Cruz Roja-Capuchinos	37,4008	-5,9819
17	Doctor Barraquer-Grupo Renfe-Policínico		4.097	Doctor Barraquer-Grupo Renfe-Policínico	37,4062	-5,9903
18	El Carmen		1.026	El Carmen	37,4063	-5,9844
19	El Cerezo		2.596	El Cerezo	37,4095	-5,9839
20	El Rocio		1.981	El Rocio	37,4082	-5,9818
21	El Torrejón		1.310	El Torrejón	37,4123	-5,9829
22	Hermandades-La Carrasca		5.971	Hermandades-La Carrasca	37,4093	-5,9806
23	La Barzola		1.424	La Barzola	37,4061	-5,9805
24	La Palmilla-Doctor Marañón		1.632	La Palmilla-Doctor Marañón	37,4083	-5,9866
25	La Paz-Las Golondrinas		2.856	La Paz-Las Golondrinas	37,4110	-5,9879
26	Las Avenidas		2.841	Las Avenidas	37,4110	-5,9852
27	León XIII-Los Naranjos		5.630	León XIII-Los Naranjos	37,4042	-5,9840
28	Los Príncipes-La Fontanilla		6.257	Los Príncipes-La Fontanilla	37,4127	-5,9755
29	Macarena Tres Huertas-Macarena Cinco		1.398	Macarena Tres Huertas-Macarena Cinco	37,4097	-5,9900
30	Pino Flores	2.409	Pino Flores	37,4081	-5,9724	
31	Pío XII	4.401	Pío XII	37,4054	-5,9776	
32	Polígono Norte	5.318	Polígono Norte	37,4123	-5,9798	
33	Retiro Obrero	1.269	Retiro Obrero	37,4022	-5,9792	
34	Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores	1.197	Santa Justa y Rufina-Parque Miraflores	37,3828	-5,9732	
35	Santa María de Ordas-San Nicolás	4.292	Santa María de Ordas-San Nicolás	37,4030	-5,9752	
36	Villegas	3.334	Villegas	37,4114	-5,9732	
37	NERVIÓN	Ciudad Jardín	3.882	Ciudad Jardín	37,3795	-5,9632
38		Huerta del Pilar	7.197	Huerta del Pilar	37,3858	-5,9775
39		La Buhaira	10.863	La Buhaira	37,3823	-5,9802
40		La Calzada	4.392	La Calzada	37,3891	-5,9781
41		La Florida	2.877	La Florida	37,3862	-5,9827
42		Nervión	14.577	Nervión	37,3830	-5,9740
43		San Bernardo	3.277	San Bernardo	37,3777	-5,9795
44	San Roque	4.228	San Roque	37,3907	-5,9817	
45	CERRO - AMATE	Amate	4.381	Amate	37,3788	-5,9574
46		El Cerro	11.715	El Cerro	37,3720	-5,9587
47		Juan XXIII	8.021	Juan XXIII	37,3763	-5,9503
48		La Plata	13.314	La Plata	37,3705	-5,9477
49		Los Pájaros	13.878	Los Pájaros	37,3842	-5,9564
50		Palmete	17.843	Palmete	37,3732	-5,9312
51		Rochelambert	6.670	Rochelambert	37,3755	-5,9541
52	Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería	12.657	Santa Aurelia-Cantábrico-Atlántico-La Romería	37,3847	-5,9488	
53	SUR	La Oliva	5.208	La Oliva	37,3659	-5,9698
54		Avenida de la Paz	2.902	Avenida de la Paz	37,3654	-5,9643
55		Bami	3.517	Bami	37,3600	-5,9782
56		El Juncal-Hispalis	4.957	El Juncal-Hispalis	37,3736	-5,9683
57		El Plantinar	5.391	El Plantinar	37,3749	-5,9718
58		El Porvenir	6.579	El Porvenir	37,3713	-5,9828
59		El Prado-Parque María Luisa	717	El Prado-Parque María Luisa	37,3788	-5,9895
60		Felipe II-Los Diez Mandamientos	2.235	Felipe II-Los Diez Mandamientos	37,3710	-5,9726
61		Giralda Sur	3.590	Giralda Sur	37,3739	-5,9769
62		Huerta de la Salud	4.864	Huerta de la Salud	37,3766	-5,9818
63	Las Letanias	3.637	Las Letanias	37,3646	-5,9660	
64	Polígono Sur	16.964	Polígono Sur	37,3580	-5,9651	
65	Tabladilla-La Estrella	5.347	Tabladilla-La Estrella	37,3654	-5,9805	
66	Tiro de Línea-Santa Genoveva	5.105	Tiro de Línea-Santa Genoveva	37,3686	-5,9749	
67	TRIANA	Barrio León	3.189	Barrio León	37,3795	-6,0120
68		El Tardón-El Carmen	7.744	El Tardón-El Carmen	37,3784	-6,0105
69		Triana Casco Antiguo	7.316	Triana Casco Antiguo	37,3806	-6,0057
70		Triana Este	13.769	Triana Este	37,3804	-6,0050
71		Triana Oeste	16.536	Triana Oeste	37,3965	-6,0114
72		Aeropuerto Viejo	2.042	Aeropuerto Viejo	37,4219	-5,9344
73		Barrada Pino Montano	32.151	Barrada Pino Montano	37,4234	-5,9655
74	NORTE	Consolación	5.930	Consolación	37,4185	-5,9665
75		El Gordillo	1.377	El Gordillo	37,4471	-5,9389
76		La Bachillera	1.391	La Bachillera	37,4149	-5,9864
77		Las Almenas	3.820	Las Almenas	37,4157	-5,9662
78		Las Naciones-Parque Atlántico-Las Dalias	3.338	Las Naciones-Parque Atlántico-Las Dalias	37,4053	-5,9664
79		Los Arcos	3.063	Los Arcos	37,4085	-5,9676
80		Los Carteros	1.011	Los Carteros	37,4135	-5,9711
81		San Diego	4.353	San Diego	37,4128	-5,9681
82		San Jerónimo	11.539	San Jerónimo	37,4259	-5,9845
83		San Matías	901	San Matías	37,4037	-5,9677
84	SAN PABLO - SANTA JUSTA	Valdezorras	2.826	Valdezorras	37,4298	-5,9260
85		Árbol Gordo	1.445	Árbol Gordo	37,4010	-5,9730
86		El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona	5.155	El Fontanal-María Auxiliadora-Carretera Carmona	37,3971	-5,9798
87		Huerta de Santa Teresa	6.288	Huerta de Santa Teresa	37,3899	-5,9714
88		La Corza	972	La Corza	37,4020	-5,9678
89		Las Huertas	4.694	Las Huertas	37,4004	-5,9664
90		San Carlos-Tartessos	4.626	San Carlos-Tartessos	37,3985	-5,9717
91	San José Obrero	9.545	San José Obrero	37,3961	-5,9763	
92	San Pablo A y B	7.502	San Pablo A y B	37,3923	-5,9677	
93	San Pablo C	3.809	San Pablo C	37,3945	-5,9600	
94	San Pablo D y E	7.312	San Pablo D y E	37,3988	-5,9588	
95	Santa Clara	7.776	Santa Clara	37,3993	-5,9532	
96	Zodiaco	1.610	Zodiaco	37,4014	-5,9705	
97	ESTE	Colores, Entreparques	46.451	Colores, Entreparques	37,4029	-5,9218
98		Palacio de Congresos, Urbadiez, Entrepuentes	16.469	Palacio de Congresos, Urbadiez, Entrepuentes	37,4035	-5,9331
99		Parque Alcosa-Jardines del Edén	22.993	Parque Alcosa-Jardines del Edén	37,4103	-5,9319
100		Torreblanca	18.295	Torreblanca	37,3855	-5,9064
101		Barrada de Pineda	856	Barrada de Pineda	37,3511	-5,9745
102	BELLAVISTA - LA PALMERA	Bellavista	16.181	Bellavista	37,3268	-5,9673
103		Elicano-Bermejales	14.007	Elicano-Bermejales	37,3498	-5,9805
104		Heliópolis	1.763	Heliópolis	37,3546	-5,9846
105		Pedro Salvador-Las Palmeritas-Guadaira	3.536	Pedro Salvador-Las Palmeritas-Guadaira	37,3558	-5,9760
106		Sector Sur-La Palmera-Reina Mercedes	5.299	Sector Sur-La Palmera-Reina Mercedes	37,3595	-5,9863
107	LOS REMEDIOS	Los Remedios	23.516	Los Remedios	37,3747	-5,9993
108		Tablada	1.925	Tablada	37,3675	-6,0052


```

import openpyxl
#####
##### FUNCIONES #####
#####
### Función para Leer y guardar datos de filas y columnas de una tabla de Excel
#####
def Read_Excel_to_NesteDic(sheet, Range1, Range2):
    dict1={}
    multiple_cells = sheet[Range1:Range2]
    Aux={}
    Aux.update({0:'Empty'})

    Column=0
    for cell in multiple_cells[0]:
        if Column >=1:
            Aux.update({Column:cell.value})
            Column=Column+1

    RowNumber=len(multiple_cells)
    for Row in range(1,RowNumber):
        dict2 = {}
        Column=0
        key = multiple_cells[Row][Column].value
        for cell in multiple_cells[Row]:
            if Column>=1:
                dict2.update({Aux[Column]:cell.value})
                Column=Column+1
            dict1.update({key:dict2})

    return dict1
#####
### Función para Leer y guardar listas en un rango
#####
def Read_Excel_to_List(sheet,Range1, Range2):
    listaAux = []
    multiple_cells = sheet[Range1:Range2]
    for row in multiple_cells:
        for cell in row:
            listaAux.append(cell.value)

    return listaAux
#####
### Función para escribir listas en un archivo Excel
#####
def getList(dict):
    list = []
    for key in dict.keys():
        list.append(key)
    return list

def Write_List_to_Excel(wb, name, sheet, List1, Range1, Range2):
    multiple_cells = sheet[Range1:Range2]
    k=0
    for row in multiple_cells:
        for cell in row:
            cell.value=List1[k]
            k=k+1

    wb.save(name)
#####
from gurobipy import *

# Lectura de datos
name = "DatosTFM.xlsm"
excel_document1 = openpyxl.load_workbook(name, data_only=True)
sheet1 = excel_document1['Datos']
C = Read_Excel_to_List(sheet1, 'C3', 'C110') #Cjto barrios
B = Read_Excel_to_List(sheet1, 'C3', 'C110') #Cjto posibles ubicaciones (barrios)
poblacion = Read_Excel_to_NesteDic(sheet1, 'C2', 'D110')
dist=Read_Excel_to_NesteDic(sheet1, 'J2', 'DN110')
coste=46222

##### CÁLCULOS PREVIOS #####
# Pares barrios-sectores
IJ=[(i,j) for i in B for j in C]

```

```

# Distancias entre pares barrios (i,j)
distancias = {}
for i,j in IJ:
    d = dist[i][j]
    par = (i,j)
    distancias.update({par: d})

## Función de repulsión ##
repulsion = {}
for i in B:
    for j in C:
        r = 0
        if dist[i][j] == 0:
            r = -0.15*24
            par = (i,j)
            repulsion.update({par: r})
        else:
            par = (i,j)
            repulsion.update({par: r})

## Función de atracción ##
atraccion = {}
for i in B:
    for j in C:
        a = 0
        if dist[i][j] >= 0 and dist[i][j] < 400:
            a=24
            par = (i,j)
            atraccion.update({par: a})
        if dist[i][j] >= 400 and dist[i][j] < 600:
            a=17.5
            par = (i,j)
            atraccion.update({par: a})
        if dist[i][j] >= 600 and dist[i][j] < 800:
            a=10
            par = (i,j)
            atraccion.update({par: a})
        if dist[i][j] >= 800 and dist[i][j] < 1000:
            a=6
            par = (i,j)
            atraccion.update({par: a})
        if dist[i][j] >= 1000 and dist[i][j] < 2000:
            a = 12-((6*(dist[i][j]))/1000)
            par = (i,j)
            atraccion.update({par: a})
        if dist[i][j] >= 2000:
            par = (i,j)
            atraccion.update({par: a})
        else:
            par = (i,j)
            atraccion.update({par: a})

## Función de insatisfacción ##
insatisfaccion = {}
for i in B:
    for j in C:
        ins = 24 - (repulsion[(i,j)]+atraccion[(i,j)])
        par = (i,j)
        insatisfaccion.update({par: ins})

##### MODELO #####
m=Model('Ecopuntos')

K = 108          #Número de barrios
D = 1500        #Umbral de distancia máximo

### VARIABLES ###
x = m.addVars(IJ, vtype=GRB.BINARY, name='x')
y = m.addVars(C, vtype=GRB.BINARY, name='y')

F01 = m.addVar(name='F01')
F02 = m.addVar(name='F02')

### RESTRICCIONES ###
# Cada barrio asignado a un ecopunto
m.addConstrs((x.sum(i,'*') == 1 for i in B), 'R1')

```

```

# Si un barrio asignado a un EP, debe existir EP en ese barrio
m.addConstrs((x.sum('*',j) <= K * y[j] for j in C), 'R2')

# La distancia entre el EP y el barrio asignado a él no supera el límite establecido
m.addConstrs((distancias[(i,j)] * x[i,j] <= D for i in B for j in C), 'R3')

# Definición objetivos
m.addConstr(F01 == y.sum('*') * coste)
m.addConstr(F02 == quicksum(poblacion[i]['Población'] * insatisfaccion[(i,j)] * x[i,j] for i in B for j in C))

m.setObjective(quicksum(poblacion[i]['Población'] * insatisfaccion[(i,j)] * x[i,j] for i in B for j in C))
# m.setObjective(y.sum('*') * coste)
m.optimize()

### BARRIO i ASIGNADO AL ECOPUNTO EN j ###
for i in B:
    for j in C:
        if x[i,j].x > 0:
            print('x'[(i,j)] = {}'.format(i,j,x[i,j].x))

### ECOPUNTOS ABIERTOS ###
Ecopuntos=[]
cnt=0
for j in C:
    if y[j].x == 1:
        cnt=cnt+1
        Ecopuntos.append(j)

### BARRIOS ASIGNADOS A CADA ECOPUNTO ###
b_asig = []
cont=0
print('')
for j in C:
    if y[j].x == 1.0:
        eco = j
        for i in B:
            if x[i,j].x == 1.0:
                cont = cont+1
                b_asig.append(i)
        print('Barrios asignados al ecopunto en {}'.format(eco))
        print('{}' .format(b_asig))
        print('')
        b_asig.clear()

##### MOSTRAR RESULTADOS POR PANTALLA #####
print('BARRIOS CON ECOPUNTOS:')
print(Ecopuntos)
print('')
print('Ecopuntos abiertos: {}'.format(cnt))
print('Coste: {} euros.'.format(F01.x))
print('Insatisfacción: {}'.format(F02.x))

##### ESCRITURA RESULTADOS EN HOJA EXCEL #####
Write_List_to_Excel(excel_document, 'res.xlsx', sheet2, Obj1, 'E4', 'E79')
Write_List_to_Excel(excel_document, 'res.xlsx', sheet2, Obj2, 'G4', 'G79')
name = "res.xlsx"
excel_document2 = openpyxl.load_workbook(name, data_only=True)
sheet2=excel_document2['Hoja2']
Write_List_to_Excel(excel_document2, 'res.xlsx', 'Hoja2', cnt, 'I4', 'I79')

```