



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica  
Superior d'Enginyeria  
Informàtica

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica  
Universitat Politècnica de València

# **Diseño de red de carril bici basado en el tráfico de bicicletas**

**Trabajo Fin de Grado**

**Grado en Ingeniería Informática**

**Autor:** Silvia Albiñana Matilla

**Tutor:** César Ferri Ramírez

**Director Experimental:** Fernando Martínez Plumed

**Curso 2019/2020**



# Resumen

---

La movilidad urbana eficiente y limpia es un factor clave de la calidad de vida y la sostenibilidad de las ciudades. El objetivo de este trabajo se centra en el estudio, análisis y utilización de datos abiertos acerca del uso históricos de los sistemas de alquiler de bicicletas en distintas ciudades de Europa con el objetivo de diseñar redes de carriles bici más optimizados. Se pretende ayudar a los usuarios de estos servicios a desplazarse de manera más eficiente a sus respectivos destinos optimizando la conexión de las distintas estaciones de alquiler en base a distintos aspectos que se han demostrado relevantes para su diseño (e.g. uso histórico, localización, climatología, etc. ). Concretamente, modelaremos esta tarea como un problema de diseño de red (NDP) y estudiamos cinco estrategias de optimización diferentes para resolverlo. Para el diseño de las distintas redes se parte de presupuestos de ejecución máximos (e.g., número de kilómetros) que permiten restringir las soluciones óptimas. Como casos de uso se analizarán los datos referentes a cuatro ciudades europeas (Valencia, Bruselas, Toulouse y Sevilla). Los métodos de optimización propuestos pueden utilizarse de forma sencilla para la mejora o ampliación de las redes de carriles en otras ciudades donde existan redes de alquiler de bicicletas.

**Palabras clave:** movilidad, eficiente, bicicletas, red, carril, presupuestos, diseño, optimización.

# Abstract

---

Efficient and clean urban mobility is a key factor of life quality and sustainability of the cities. The goal of this job focuses on the study, analysis and use of open data related to the historical use of bike rental systems in different European cities, with the aim of designing more optimized networks of bike lanes. The objective is to help users who use these services reach in a more efficient way their respective destinations, optimizing the connection between the different rental bike stations based on different aspects which have been proved to be relevant for their design (e.g. historical use, location, climatology, etc.). In particular, we will model this task as a network design problem (NDP) and we will study five optimization strategies to solve it. In order to design the different networks, we start from maximum execution budgets (e.g. number of kilometres) that allow the restriction of the optimal solutions. As use cases, we will analyze data from four European cities (Valencia, Brussels, Toulouse and Seville). The optimization methods proposed can be used in a simple way to improve or develop the network lanes of other cities where exist bike rental networks.

**Keywords :** mobility, efficient, network, lane, budgets , bicycle, design, optimization.



# Índice de figuras

---

Figura 1: Ejemplo de áreas a las que afectarían las Smart Cities.....	13
Figura 2: Estación de bicicletas de la ciudad de Sevilla .....	15
Figura 3: Plano de la red ciclista de la ciudad de Columbus .....	17
Figura 4: Plano zona Lisboa en la que implementar el servicio de bike-sharing.....	18
Figura 5: Logotipo de Rstudio.....	21
Figura 6: Ejemplo de código a ejecutar en Rstudio.....	21
Figura 7: Sección superior izquierda de Rstudio.....	22
Figura 8: Sección superior derecha de Rstudio.....	22
Figura 9: Sección inferior izquierda.....	23
Figura 10: Sección inferior derecha de Rstudio.....	23
Figura 11: Ejemplo de gráfico con valores aleatorios.....	25
Figura 12: Ejemplo web información topográfica de un volcán.....	25
Figura 13: Media de demanda de bicicletas por hora cada día de la semana.....	28
Figura 14: Parte de datos de Estaciones de Bicicletas de Sevilla.....	31
Figura 15: Código en R para realizar agregación de la ciudad de Dublín.....	32
Figura 16: Parte de código de rutas.R para cargar los datos.....	41
Figura 17: Plano actual de carril bici de la ciudad de Valencia.....	51
Figura 18: Estación de Valenbisi.....	51
Figura 19: Carril bici de la ciudad de Bruselas actual y ampliación para 2020.....	52
Figura 20: Cambios canal Charleroi -nueva infraestructura ciclista.....	53
Figura 21: Desarrollo carril bici Sevilla a lo largo de los años.....	54
Figura 22: Red de carril bici de la ciudad de Toulouse.....	55
Figura 23: Gráfico Sexo encuestados.....	58
Figura 24: Gráfico Rango de edad encuestados.....	58
Figura 25: Gráfico uso de la bicicleta.....	59
Figura 26: Gráfico forma de transporte.....	59
Figura 27: Gráfico motivos de utilizar la bicicleta.....	60
Figura 28: Gráfico opciones para fomentar el uso de la bicicleta.....	61
Figura 29: Gráfico motivos de no utilizar la bicicleta.....	61
Figura 30: Gráfico mejora de infraestructura para NO usuarios.....	62

Figura 31: Gráfico mejora de infraestructura para usuarios.....	62
Figura 32: Método Tournament del código opt.R.....	69
Figura 33: Método getbestsol del código opt.R.....	70
Figura 34: Método costsol del código opt.R.....	70
Figura 35: Método getlistneigh del código opt.R.....	71

## Índice de Tablas

---

Tabla 1: Resumen de 1165 estaciones de bicicleta en 4 ciudades de 3 países.....	29
Tabla 2: correlaciones en base a aspectos meteorológicos.....	29
Tabla 3: Parte de datos de Estaciones de Bicicletas de Sevilla.....	30
Tabla 4: Parte de datos de Summary Bikes para la ciudad de Sevilla.....	31
Tabla 5: Resultados para la ciudad de Valencia.....	41
Tabla 6: Resultados para la ciudad de Bruselas.....	43
Tabla 7: Resultados para la ciudad de Sevilla.....	44
Tabla 8: Resultados para la ciudad de Toulouse.....	46



# Índice de contenidos

---

1. Introducción.....	10
1.1    Objetivos.....	11
1.2    Motivación.....	11
1.3    Estructura del proyecto.....	12
2. Smart Cities .....	13
3. Estado del arte .....	16
3.1    Crítica al estado del arte y propuesta.....	19
4. Herramientas.....	21
4.1    Tecnología utilizada.....	24
5. Recogida de datos.....	27
6. Formulación del problema.....	33
7. Análisis del Problema.....	36
7.1    Identificación.....	36
7.2    Análisis y desarrollo de soluciones posibles.....	36
8. Resultados.....	41
8.1    Comparación resultados.....	41
8.2    Mejor solución.....	47
9. Implantación.....	51
10. Encuesta Movilidad .....	57
11. Conclusiones.....	64
11.1    Experiencia Personal.....	64
11.2    Relación del trabajo con estudios cursados.....	65
12. Referencias .....	66
13. ANEXOS.....	69
13.1    Librerías y funciones de R.....	71





# 1. Introducción

---

Hoy en día la bicicleta es cada vez más utilizada por los ciudadanos como medio de transporte. Este tipo de transporte ha ganado gran fama en muchas ciudades como alternativa al uso del coche y de la moto sobre todo porque es fácil y cómodo de trasladar. No solo se trata de un medio de transporte confortable y sencillo de utilizar, sino que también éste cuenta con grandes ventajas tanto para el medio ambiente como para la salud y para nuestra economía que comentamos a continuación.

- En primer lugar, en relación al medio ambiente, la utilización de la bicicleta no contamina, en especial no emite gases tóxicos y además ocupa menos espacio que un automóvil. Teniendo en cuenta lo anterior se podría reducir, según los autores [29], hasta 203.000 toneladas de CO<sub>2</sub>.
- Si hablamos de ventajas respecto a la salud, la bicicleta tiene efectos beneficiosos para nuestro cuerpo de los cuales podemos destacar la bajada de nuestros niveles de colesterol en sangre, la mejora del sistema respiratorio y cardiaco y la reducción del estrés. Si tenemos en cuenta este aspecto podríamos evitar, según los autores [29], unas 66 muertes anuales si la mitad de los viajes realizados hubieran sido en bicicleta o transporte público
- Por último nuestra economía se vería favorecida ya que ahorraríamos en muchos gastos que una bicicleta no necesita como puede ser gasolina, seguro o impuestos.
- Pero por encima de que la bicicleta sea una manera cómoda de moverse por la ciudad, el motivo principal por el cual se ha acentuado su uso en los últimos años tiene que ver con la implantación de empresas de alquiler de bicicletas y de la colocación de diferentes estaciones de bicicleta en diversos puntos de las ciudades y sobre todo con la creación de una gran infraestructura de carril bici la cual hace posible que los ciclistas puedan recorrer trayectos de manera más segura.

Una de las problemáticas en el uso de estos servicios de alquiler de bicicleta es la posibilidad de que estas estaciones puedan quedar vacías (o llenas) y por ello los sistemas de alquiler de bicicletas necesitan aplicar técnicas adicionales que consisten en trasladar bicicletas de unas estaciones a otras en base a la demanda de cada estación en un momento determinado.

La ciencia de datos y la inteligencia artificial proporcionan técnicas avanzadas que pueden tener aplicaciones interesantes, un gran ejemplo es el diseño de redes de transporte y punto en el que se centra nuestro TFG. Lo que se quiere conseguir en nuestro estudio consiste en la utilización de los datos del Uso de las bicicletas para estudiar la red, buscando una red subóptima que conecte la red de estaciones de manera eficiente sin superar unos costes para las ciudades de Bruselas, Toulouse, Sevilla y para la ciudad de Valencia. Una vez obtengamos los resultados aplicando nuestro código a estas ciudades, compararemos éstos entre ellas. Para conseguir que nuestro carril bici sea lo más eficiente posible se han analizado e implementado cinco métodos de optimización (Montecarlo, Hillclimb, Annealing, Genetic, Tournament). Estos cinco métodos se han aplicado a las cuatro ciudades con las que hemos trabajado, llevando a cabo diferentes experimentos para comprobar cuál de éstos es mejor en base a diferentes aspectos relacionados con el coste y el tiempo.

Este proyecto que hemos llevado a cabo es una ampliación del estudio ya realizado para la ciudad de Valencia donde se comparan cuatro métodos de optimización con la intención de determinar cuál de estos es más eficiente para la optimización del diseño de red de carril bici de la ciudad.

En definitiva lo que queremos lograr es un futuro donde prevalezca el uso de un transporte limpio , sano y respetuoso con el medio ambiente como es la bicicleta y ayudar con ello a la transición al ya conocido termino "Smart cities".

## 1.1 OBJETIVOS

Este proyecto tiene como objetivo general la creación de una red de carril bici para las ciudades de Valencia, Bruselas, Toulouse y Sevilla y para ello contamos con unos objetivos más específicos los cuales se detallan a continuación.

En primer lugar partimos de un presupuesto máximo (coste) el cual no podemos superar y, por lo tanto, deberemos diseñar nuestra red teniendo en cuenta que no podemos conectar todas las estaciones de bicicleta (que constituiría la red más eficiente para los usuarios) ya que el proceso sería muy costoso. Para conseguirlo se tiene como objetivo desarrollar varios métodos de optimización que aplicaremos a nuestras ciudades europeas seleccionadas, a partir de los cuales podremos decidir cuál de ellos es más eficaz.

Con el objetivo de determinar cuál de todos los métodos es más eficiente analizaremos los resultados en función del coste y en función del tiempo empleado. Una vez tengamos los resultados, otro de los objetivos del proyecto consiste en estudiar éstos. Identificaremos que diferencias significativas encontramos entre cada método de optimización desarrollado y aquellas que podamos observar entre las ciudades estudiadas.

## 1.2 MOTIVACIÓN

El motivo principal por el que me llamó la atención este TFG fue su propósito de fomentar el transporte saludable en bicicleta mediante la creación de una buena infraestructura de carril bici y con ello ayudar al desarrollo de las "Smart cities" en el ámbito de medio ambiente y movilidad. Es muy importante impulsar el transporte en bicicleta porque influye en diversos aspectos positivos de nuestras vidas y a mí, como persona sana y deportista que me considero, me pareció una gran idea ser capaz de desarrollar este punto desde mi campo que es la informática.

En los últimos años se ha ido desarrollando y optimizando más esta red de carril bici, un claro ejemplo de ello es la ciudad de Valencia donde ya se llevó a cabo un estudio de optimización de la actual red de carril bici existente; y poder ampliarlo a un mayor número de ciudades me motivó y me pareció muy interesante.

Otro motivo por el cual llamó mi atención fue la oportunidad de conocer otro tipo de lenguaje de programación del cual nunca había escuchado hablar como es R y así ampliar mis conocimientos acerca de éste y también poder ser capaz de desenvolverme fuera de mi campo que es la rama de tecnologías de la información y adentrarme ligeramente en la rama de la computación de la mano de la inteligencia artificial.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El presente trabajo se divide en diversas secciones, una vez establecida la introducción, el resto del proyecto se organiza en otros 12 puntos.

El punto 2 habla sobre la importancia de las Smart cities, en el siguiente punto 3 exponemos diversos trabajos relacionados y las mejoras y diferencias que introduce el nuestro. A continuación exponemos las herramientas que hemos utilizado en la realización del TFG (punto 4) y cómo hemos obtenido la información y datos que vamos a analizar (punto 5). En el punto 6 analizamos nuestro problema, explicamos las posibles soluciones y métodos de optimización utilizados y su funcionamiento tanto a nivel general como de manera específica enfocada a nuestro proyecto. El punto 7 recoge los resultados de aplicar los diversos métodos de optimización detallados en los puntos anteriores. Una vez analizados los resultados, en el punto 8 se expone la implantación de la red de carril bici en las ciudades con las que hemos trabajado, cómo ha afectado a éstas, cómo continúa haciéndolo y cómo seguiría influenciando el transporte en un futuro. Por último concluimos nuestro trabajo en el punto 9 con una encuesta realizada sobre la movilidad y el transporte en bicicleta y, a continuación las conclusiones del proyecto en el punto 10 y dando paso a la bibliografía en la sección 11.

En los Anexos del punto 12 detallamos el funcionamiento de algunos de los métodos utilizados y de diversas funciones empleadas en nuestro código.

## 2. Smart Cities

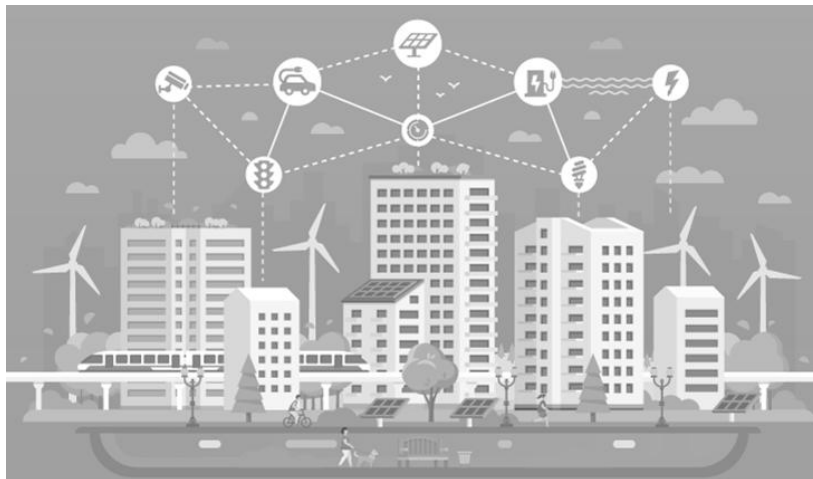
---

En este punto vamos a hablar del significado de las Smart cities y la relación que tiene nuestro proyecto con el término Smart city.

Las, cada vez más conocidas, Smart Cities o Ciudades Inteligentes hacen referencia al concepto de desarrollar nuestras ciudades integrando Tecnologías de la Información y comunicación (Tics) y el internet de las Cosas a gran escala, de manera que se gestionen de una forma segura y eficiente los activos de una metrópoli.

Aunque el factor principal consiste en incorporar la tecnología, una Smart city no es un proyecto tecnológico sino un proyecto de ciudad.

Las áreas a las que se aplicarían estas nuevas tecnologías son variadas y van desde la industria, para mejorar los servicios públicos; seguridad, sociedad, salud, y movilidad.



*Figura1: Ejemplo de áreas a las que afectarían las Smart Cities.*

Una Smart city es por tanto una ciudad inteligente cuyo objetivo consiste en ser más sostenible y ofrecer mejor calidad de vida gracias a la colaboración ciudadana.

Las ventajas de las Smart Cities son muchas y variadas, a continuación se expondrán unas cuantas:

- Medio Ambiente
  - Eficiencia energética: Lograremos la eficiencia energética mediante la utilización de dispositivos inteligentes con el fin de minimizar la energía usada para proporcionar productos y servicios.

- Sostenibilidad: Dado que cada vez las ciudades crecen más , ya que la población rural emigra a las grandes metrópolis, gracias a la tecnología se podrá soportar este aumento de ciudadanos
  - Reducir la contaminación: los entornos serán más saludables con menos emisiones de CO2 por ejemplo con la sustitución total de los coches por vehículos eléctricos y con la mayor utilización de las bicicletas, lo que nos llevaría a tener transporte más eficiente y menos contaminante.
- Gobierno
    - Seguridad: Esta aumentará mediante la instalación de sensores que por ejemplo sean capaces de anticipar incidencias relacionados con el clima como inundaciones.
    - Urbanismo: Mediante edificios inteligentes que incluirán controles y sensores para vigilar su interior y administrados de manera central.
- Aspecto humano
    - Educación: Nuevos métodos de aprendizaje y renovación de infraestructuras anticuadas.
    - Salud: El desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito de la salud podría ayudar a salvar más vidas.
- Economía
    - Productividad: Otra gran ventaja de las Smart cities en el ámbito de la economía sería el aumento de rendimiento en relación al capital humano.
    - Innovación: Mediante nuevos modelos de negocio y el desarrollo de soluciones nuevas.

Si profundizamos en el beneficio del medio ambiente de las Smart cities, lo podremos conseguir mediante el aumento en el uso de las bicicletas. Este tiene que ver con la creación de una buena red de carril bici y ahí es donde podemos relacionar nuestro trabajo con el beneficioso impacto que tienen las bicicletas en nuestra salud y en nuestras ciudades y el medioambiente.



*Figura 2: Estación de bicicletas de la ciudad de Sevilla*

## 3. Estado del arte

---

En este apartado se estudian aquellas aplicaciones y/o trabajos similares al que se ha desarrollado para este proyecto y cuál es su funcionalidad.

A lo largo de los años se ha ido incrementando el uso de bicicletas y con ello la necesidad de construir una buena infraestructura de carril bici; Es por ello que para la correcta implementación de éstas, se ha de realizar con anterioridad un estudio y tener en cuenta caminos mínimos, los tipos de vías, posibles pendientes, etc. Para ello existen varios proyectos ya realizados relacionados con procesos de realizar decisiones a la hora de diseñar carriles de bicicleta.

En primer lugar y la relación directa más importante con nuestro trabajo es Network design problem (NDP) o lo que es lo mismo el problema de diseño de red [8]. Definimos esta cuestión de la siguiente manera: "Dado un grafo con pesos, se quiere seleccionar un subgrafo que cumpla la demanda de transporte y cuyo coste total de transporte sea mínimo".

Este es sin duda uno de los problemas de transporte más desafiantes y se puede llevar a cabo de dos maneras diferentes:

- Soluciones exactas: Son precisas pero tratan el problema de diseño de red de manera ineficiente.
- Soluciones heurísticas: Proporcionan soluciones aproximadas pero eficientes incluso para redes de alta escala para el mundo real. Estas soluciones son más utilizadas que las soluciones exactas.

En concreto, nuestro trabajo se basa en las ideas propuestas de diseño de red con base biológica. Estas redes con base biológica son capaces de llegar a soluciones razonables para problemas de optimización combinatoria (rama de la optimización relacionada con la investigación de operaciones y la teoría de algoritmos). En particular, se aplica un modelo matemático de un moho con memoria espacial llamado *Physarum polycephalum* (se trata de una criatura singular que realiza caminos eficientes para buscar y encontrar su comida), con la intención de resolver un NDP maximizando la capacidad de transporte de la red y minimizando el tamaño de la red. Para ser más exactos, en el experimento realizado de redes con base biológica se muestra como el moho creó una red parecida a la existente y de manera eficiente para el sistema de trenes de Tokio.

Como casos de uso vinculados al objetivo de nuestro proyecto, tenemos ejemplos de mejora de la infraestructura de la red de carril bici como el de la ciudad Columbus en EEUU [10]. Este trabajo muestra una posible red de carril bici basada en diferentes aspectos analizados y estudiados como las necesidades y tipos de



ciclistas, una estimación de la demanda existente, los beneficios de la calidad del aire, etc. Teniendo en cuenta toda esta información, los autores del proyecto exponen las posibilidades de la ciudad de planificar y promover el ciclismo teniendo una nueva red de carril bici, buenos aparcamientos para éstas y un buen mantenimiento de la red.

Seguidamente en la Figura 3 se puede contemplar el plano de carril bici de la ciudad de Columbus donde aparecen tanto la red existente como la red propuesta. En líneas discontinuas la red ciclista propuesta y en líneas continuas la actual red.

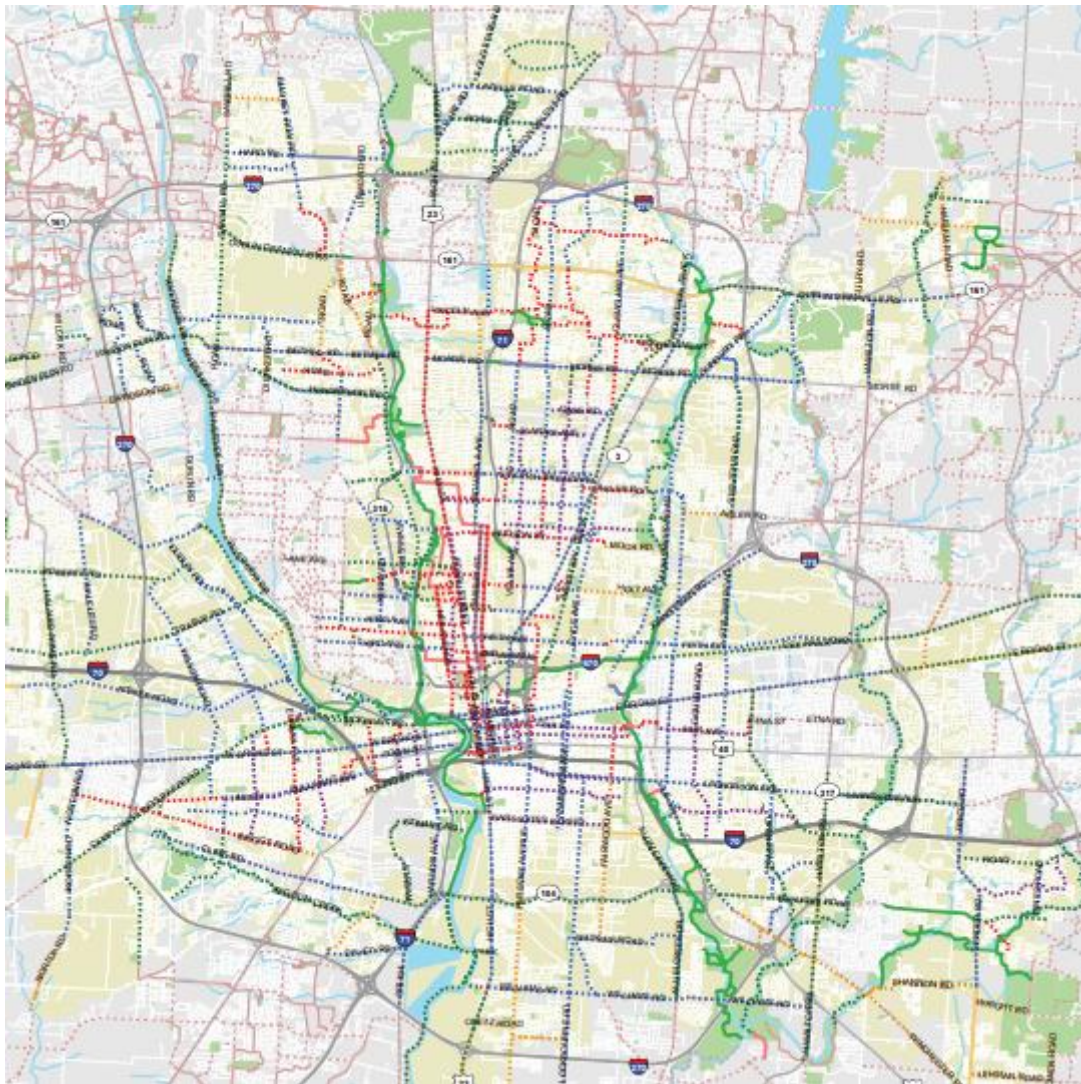


Figura 3: Plano de la red ciclista de la ciudad de Columbus

Otro ejemplo relacionado con nuestro proyecto es la Optimización de la posición de las estaciones de bicicleta compartida centrado en la ciudad de Milán [11].

Este proyecto se centra en el servicio de bicicletas compartidas en Milan llamado "BikeMi", también se analiza el aumento del servicio de bicicletas compartidas en

todo el mundo, pero su foco principal recae en detectar que factores hacen que las estaciones de bicicleta tengan un mayor o menor peso. En concreto recoge que la presencia del metro, universidades, museos, cine y zonas restringidas de tráfico aumentan la importancia de estaciones de bicicleta cercanas mientras que la presencia del tranvía y paradas de autobús tienen el efecto contrario.

Un tercer ejemplo relacionado con nuestro trabajo se desarrolla en Lisboa sobre la creación de un algoritmo de optimización para establecer la localización perfecta de las estaciones de bicicleta de la ciudad [12].

Este artículo centrado en la ciudad de Lisboa, presenta el diseño e implementación de un sistema de bicicletas compartidas en la ciudad de Lisboa. Este diseño se realiza empleando un programa lineal de enteros mixta (*Mixed integer linear program-MILP*). Los MILP, "son programas lineales en los que se requiere que algunas variables tomen valores enteros, y surgen naturalmente en muchas aplicaciones" [13]; Y en este caso nos sirve para optimizar la localización de las estaciones de bicicleta, la dimensión de la flota, y para calcular las actividades de recolocación de bicicletas necesarias.

La intención de este trabajo consiste en realizar diversos experimentos para averiguar como mejorar el diseño y el funcionamiento de este sistema, teniendo en cuenta el coste de recolocación de bicicletas, el coste de la flota y de las infraestructuras. En la siguiente figura 4 podemos observar el resultado final de la organización de estas estaciones donde en rojo se encuentran aquellas estaciones que más capacidad tendrán hasta llegar a las representadas en amarillo que son aquellas estaciones que menos docks tendrán.

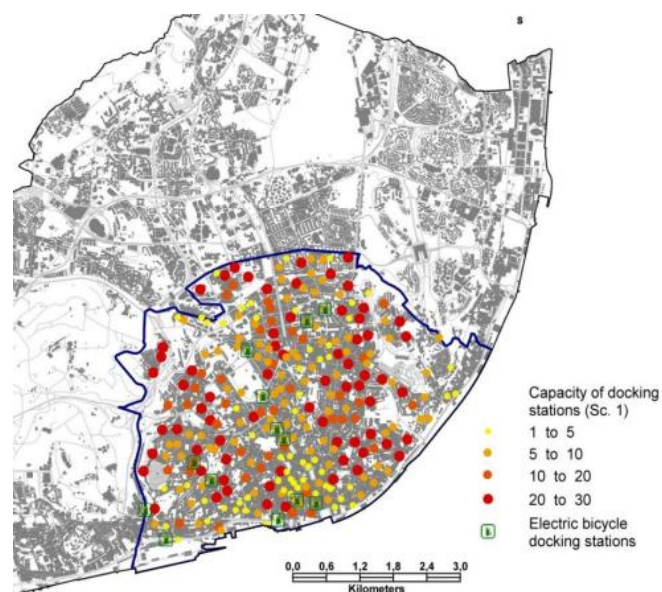


Figura 4: Plano de la zona de Lisboa en la que implementar el servicio de bike-sharing.

Otro trabajo relacionado con la optimización de redes consiste en la planificación de trenes mediante la optimización de la red [14]. En concreto el proyecto consiste en, dada una red ferroviaria con puntos de origen y destino específicos en conjunto con las horas iniciales de salida de los trenes, tienen que realizar una planificación que respete las normas de seguridad. Para ello, se necesita que la planificación sea óptima.

Los autores definen un algoritmo eficiente el cual sea capaz de encontrar una buena solución y rápida para redes de alcance real. Es por ello que se parte de *Sorthest path algorithm* [24]. La programación de este algoritmo se realiza utilizando el lenguaje de programación Fortran.

Por último y no menos importante, otro gran ejemplo comparable a nuestro trabajo es el *Estudio y optimización de las infraestructuras de los carriles para bicicletas*, trabajo que se centra en la ciudad de Málaga [7].

Este trabajo es muy similar al nuestro ya que su objetivo principal consiste en diseñar una red de carril bici óptima para Málaga y estudiar la repercusión que tiene el resultado final. Es por ello que para la realización de su proyecto también comentan diversos algoritmos existentes para el camino mínimo como Floyd-Warshall [25], Bellman-Ford [26], Dijkstra [27] o Algoritmo A\* (Método más actual de resolución de problemas de camino mínimo)[28].

### 3.1 CRÍTICA AL ESTADO DEL ARTE Y PROPUESTA

En este punto detallamos aquellos aspectos en los que estos trabajos anteriores se diferencian al nuestro y que mejoras aportan nuestra propuesta de proyecto. Como es de esperar, nuestro proyecto difiere en cierta medida de los anteriores comentados, en algunos casos tiene más aspectos en común y en otros casos únicamente tienen en común la idea principal.

En primer lugar expondremos los puntos comunes con cada uno de estos trabajos anteriormente explicados; Y a continuación y más importante, vamos a comentar los aspectos/mejoras de nuestro proyecto que se diferencian de todos los proyectos esclarecidos en el punto anterior.

Nuestro proyecto tiene en común con el resto de trabajos:

- En primer lugar el concepto de transporte en bicicleta es sin duda el punto que más se repite con el resto de proyectos abarcando aspectos relacionados con los factores de uso de la bicicleta, como el clima, y dando un peso a cada estación de bicicleta como realizamos en nuestro TFG.

- Por otro lado, al igual que en el problema de Network design problem y como también se aplica en la tesis de optimización de carril bici de Málaga, el objetivo es diseñar y optimizar una red de carril bici. Objetivo que también encontramos a la hora de optimizar la red ferroviaria donde el objetivo es encontrar un camino mínimo.

Por otro lado nuestro proyecto se diferencia del resto en:

- Uno de los aspectos más diferentes es el lenguaje de programación empleado ya que en otros casos se han utilizado diferentes lenguajes como Java con Matlab en el caso de la tesis doctoral [7] o Fortran para la planificación de trenes optimizando la red [14] y en nuestro caso utilizamos R, lenguaje de programación con fines de análisis estadístico y que desarrollaremos con más detenimiento en el siguiente punto *Herramientas*.
- Otra diferencia tiene que ver con los métodos de optimización utilizados ya que en este trabajo se utilizan cinco diferentes que no han sido utilizados en conjunto en ningún otro proyecto con la intención de elegir el mejor para el diseño de nuestra red de carril bici.
- También podemos destacar que los objetivos de nuestro proyecto también difieren en cierta medida con el resto de proyectos en cuanto a completitud en el análisis realizado ya que además de optimizar nuestra red, compararemos los resultados de cada método de optimización, seleccionando, en su caso, el que mejores resultados ofrezca.
- Asimismo, otro factor con el que no cuentan otros proyectos es la amplitud geográfica que éste tiene. En el caso de nuestro trabajo, se aplica a cuatro ciudades europeas diferentes las cuales son Valencia, Sevilla, Toulouse y Bruselas y una vez concluidos los resultados para estas ciudades, se realiza un estudio comparativo entre ellas.

Es por todo esto que el presente trabajo es un proyecto interesante, con enfoques diferentes a otros trabajos estudiados en la red y con una visión más completa que engloba ya no solo más de una ciudad analizada, sino además más de un método de optimización utilizado con la intención de aumentar la precisión de análisis en nuestro proyecto.

## 4. Herramientas

---

Para realizar este proyecto hemos hecho uso de RSTUDIO como IDE.



Figura 5: Logotipo de Rstudio.

Rstudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) construido exclusivo para R. Su uso va dirigido principalmente a la computación estadística y gráficos y está disponible tanto para Windows, Mac, Linux o navegadores conectados a Rstudio Server o Rstudio server Pro.

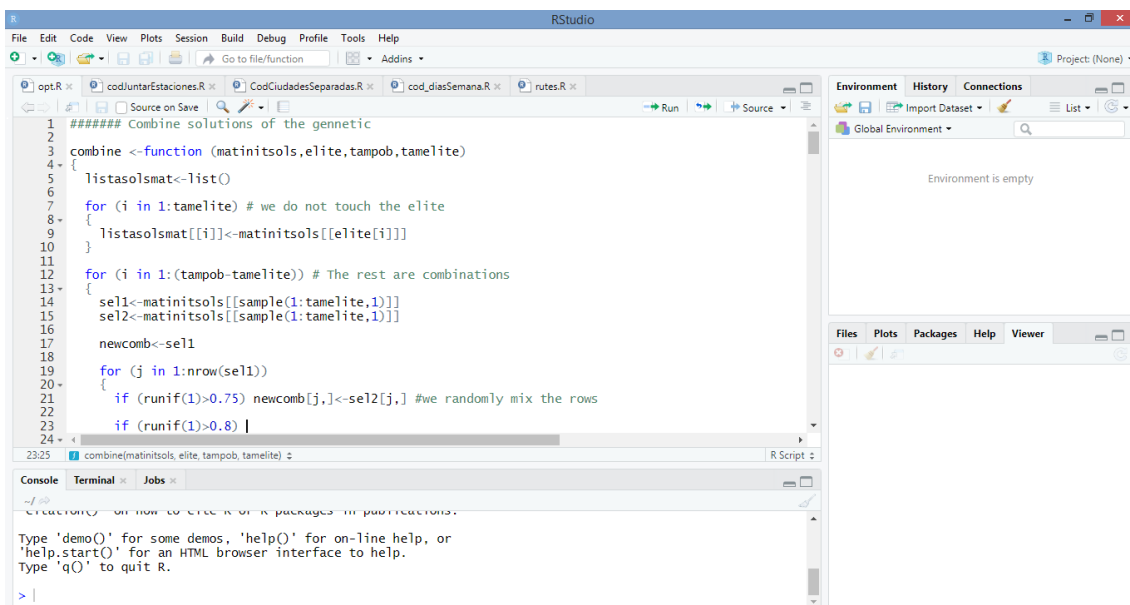


Figura 6: Ejemplo de código a ejecutar en Rstudio.

En la Figura 7 podemos ver la interfaz del entorno de programación Rstudio que se divide en cuatro ventanas diferentes.

En la ventana superior izquierda se despliega nuestro código el cual podemos escribir directamente creando un nuevo documento o bien podemos importarlo desde nuestros documentos.

En la figura siguiente se pueden observar los tipos de Script y en que diferentes lenguajes de programación se pueden importar, desde HTML, R, C++, Python...



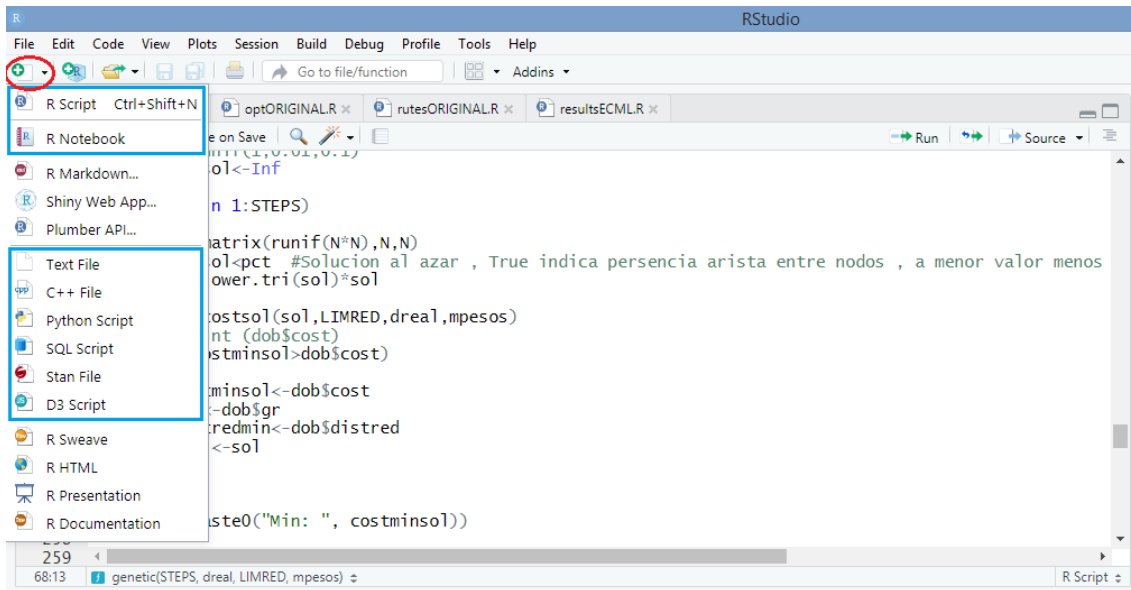


Figura 7: Sección superior izquierda de Rstudio con pestaña de nuevo Script desplegada.

En la zona superior derecha nos irán apareciendo conforme ejecutemos nuestro código, todas las asignaciones tanto de nuestras variables como de ficheros que modifiquemos o creamos.

Como podemos ver a continuación en la figura 6 aparecen parte de los datos y valores tras ejecutar nuestro código para la ciudad de Valencia.

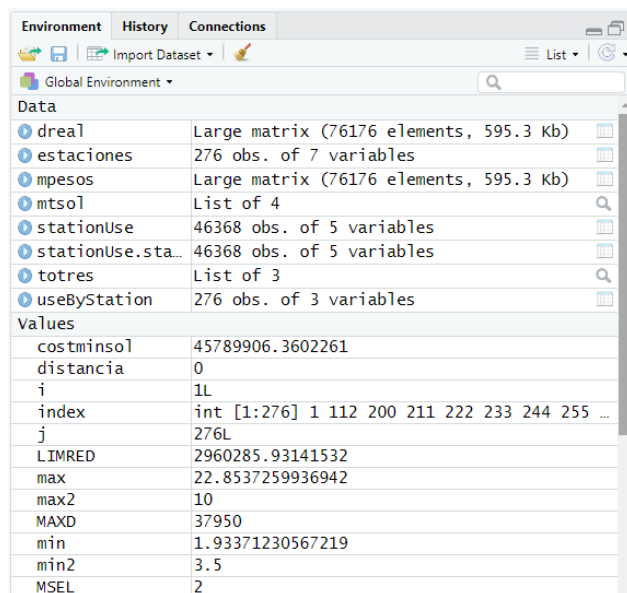
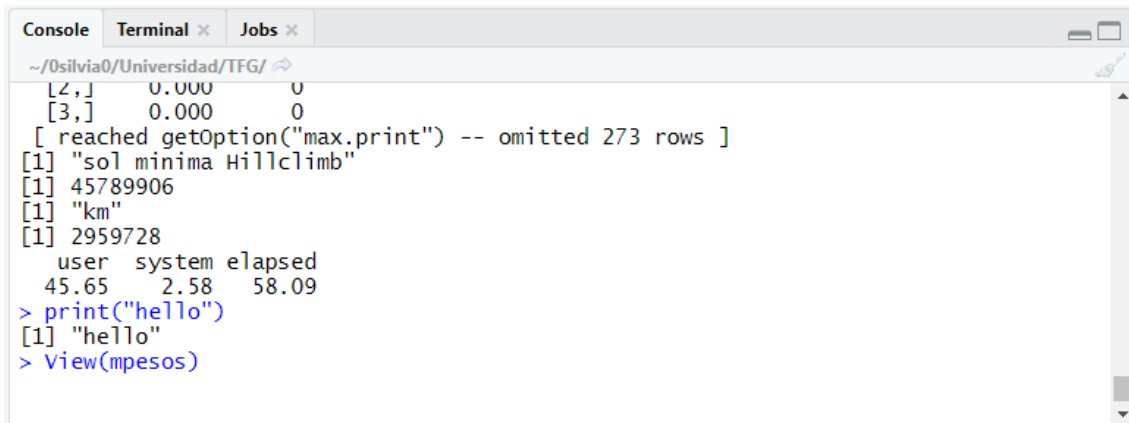


Figura 8: Sección superior derecha de Rstudio.

En nuestra ventana inferior izquierda se encuentra nuestra consola donde podemos ejecutar diversos comandos y donde también podemos visualizar los

resultados de la ejecución de nuestro código en el caso de que hayamos introducido comandos de print en el código ejecutado.

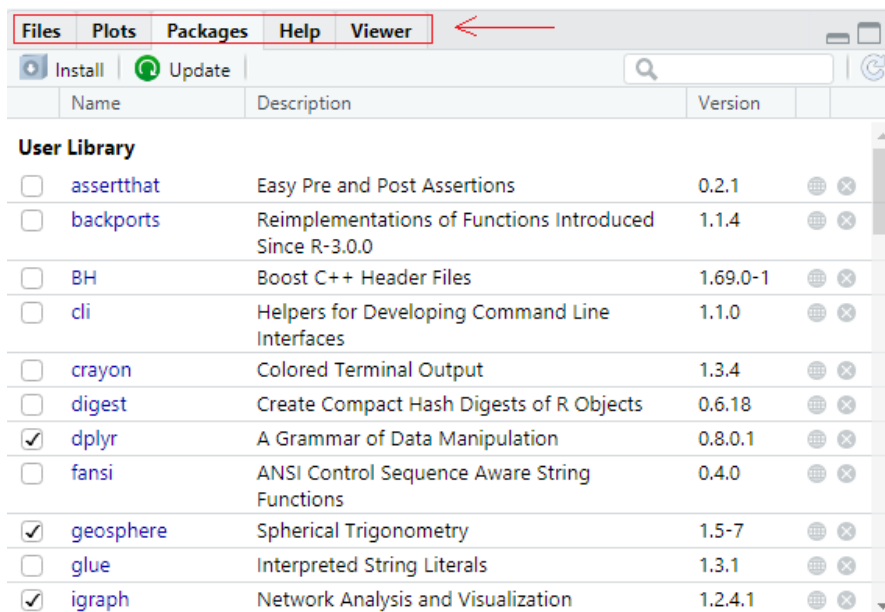
En la siguiente figura se pueden analizar los resultados específicos de ejecutar el código para la ciudad de Valencia con el método Hillclimb para un tamaño de red con alfa valor 40; También apreciamos la ejecución de un print directamente escrito en la consola; Y por último el comando View(mpesos) que se ejecuta y muestra por pantalla si queremos ver el contenido de la matriz mpesos.



```
~/0silvia0/Universidad/TFG/ ↵
[2,] 0.000 0
[3,] 0.000 0
[ reached getOption("max.print") -- omitted 273 rows ]
[1] "sol minima Hillclimb"
[1] 45789906
[1] "km"
[1] 2959728
  user system elapsed
 45.65  2.58  58.09
> print("hello")
[1] "hello"
> View(mpesos)
```

Figura 9: Sección inferior izquierda

Por último en la ventana inferior derecha contamos con herramientas de visualización de gráficas, para depuración y para la gestión del espacio de trabajo como bien podemos percibir en la siguiente figura donde está desplegada la ventana *packages* y marcados aquellos que hemos implementado en nuestro código.



	Name	Description	Version	
<b>User Library</b>				
<input type="checkbox"/>	assertthat	Easy Pre and Post Assertions	0.2.1	⊕ ⊗
<input type="checkbox"/>	backports	Reimplementations of Functions Introduced Since R-3.0.0	1.1.4	⊕ ⊗
<input type="checkbox"/>	BH	Boost C++ Header Files	1.69.0-1	⊕ ⊗
<input type="checkbox"/>	cli	Helpers for Developing Command Line Interfaces	1.1.0	⊕ ⊗
<input type="checkbox"/>	crayon	Colored Terminal Output	1.3.4	⊕ ⊗
<input type="checkbox"/>	digest	Create Compact Hash Digests of R Objects	0.6.18	⊕ ⊗
<input checked="" type="checkbox"/>	dplyr	A Grammar of Data Manipulation	0.8.0.1	⊕ ⊗
<input type="checkbox"/>	fansi	ANSI Control Sequence Aware String Functions	0.4.0	⊕ ⊗
<input checked="" type="checkbox"/>	geosphere	Spherical Trigonometry	1.5-7	⊕ ⊗
<input type="checkbox"/>	glue	Interpreted String Literals	1.3.1	⊕ ⊗
<input checked="" type="checkbox"/>	igraph	Network Analysis and Visualization	1.2.4.1	⊕ ⊗

Figura 10: Sección inferior derecha de Rstudio.

Rstudio se trata de un software libre gratuito que incorpora todas las herramientas que se utilizan en R lo que hace que sea más sencilla la implementación de código en el lenguaje de programación R.

Rstudio está diseñado para mejorar la productividad, incluye soporte para Git y permite una navegación rápida a archivos y funciones.

## 4.1 TECNOLOGÍA UTILIZADA

Como se ha comentado en el punto anterior para realizar el proyecto se ha utilizado el lenguaje de programación R a través del entorno de desarrollo Rstudio. R es un potente lenguaje orientado principalmente al análisis estadístico, de hecho es uno de los lenguajes de programación más utilizados para la investigación por los estadísticos.

R surgió como una nueva implementación de software libre del lenguaje de programación S. Éste lenguaje de programación tiene diversas características y ventajas entre ellas:

- Se trata de una buena herramienta de cálculo numérico muy preciso y muy rápida a la hora de realizar diversas operaciones.
- La mayoría de sus funciones están escritas en R pero algunas están escritas en otros lenguajes de programación como C por tema de rendimiento.
- Al tratarse de código abierto y gratuito se puede utilizar la interfaz como uno de desee y escribir funciones que luego puedan aportarse como paquetes para que otros usuarios puedan utilizarla u optimizarla. Es por esto que el número de paquetes que se pueden encontrar para R aumenta cada día más.
- Al poder incorporar nuevas funciones continuamente de manera sencilla y gratis, existen funciones muy especializadas capaces de realizar análisis estadísticos avanzados.
- R puede incorporarse con diferentes bases de datos y hay bibliotecas que facilitan su uso desde lenguajes de programación interpretados como Perl o Python. De hecho R es capaz de leer una gran cantidad de tipos de datos, desde .txt hasta .csv
- Es muy fácil organizar un proyecto mediante la creación de un proyecto en Rstudio y además soporta una gran cantidad de volúmenes de datos.



- En R mucho más sencillo corregir errores ya que se utilizan secuencias de comandos a la cual se puede acceder de forma rápida desde el historial de acciones y solucionar cualquier error realizado.
- Por último, R es capaz de crear gráficos de una gran calidad, desde tridimensionales hasta circulares, de dispersión o incluso histogramas.

A continuación las siguientes figuras muestran ejemplos de gráficos que son posibles de crear utilizando únicamente nuestra herramienta Rstudio mediante el lenguaje de programación R.

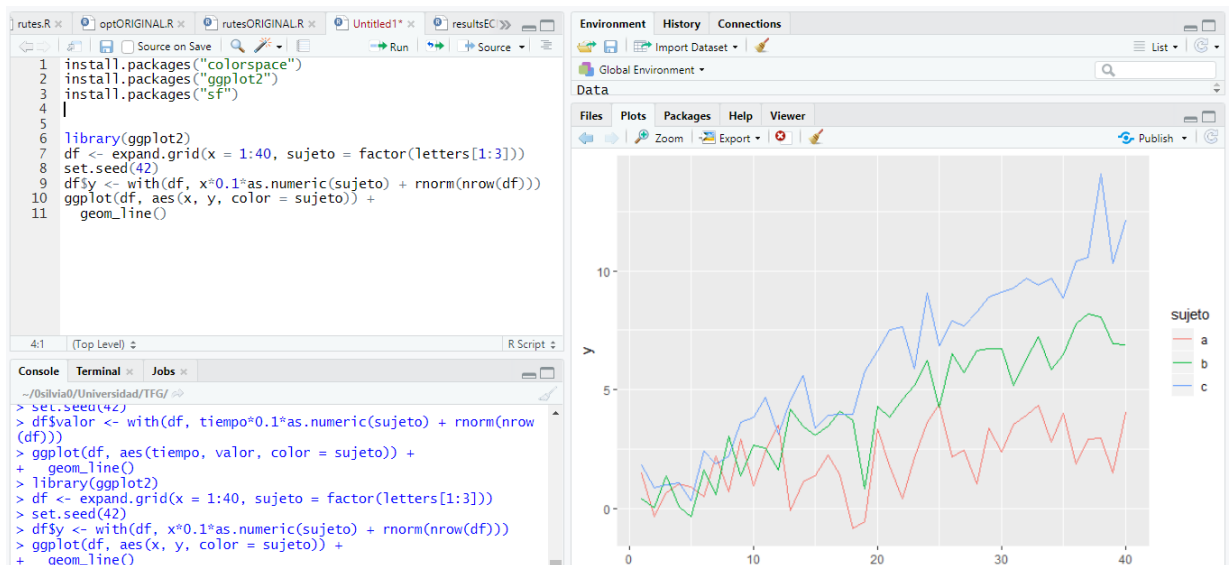


Figura 11: Ejemplo de gráfico con valores aleatorios.

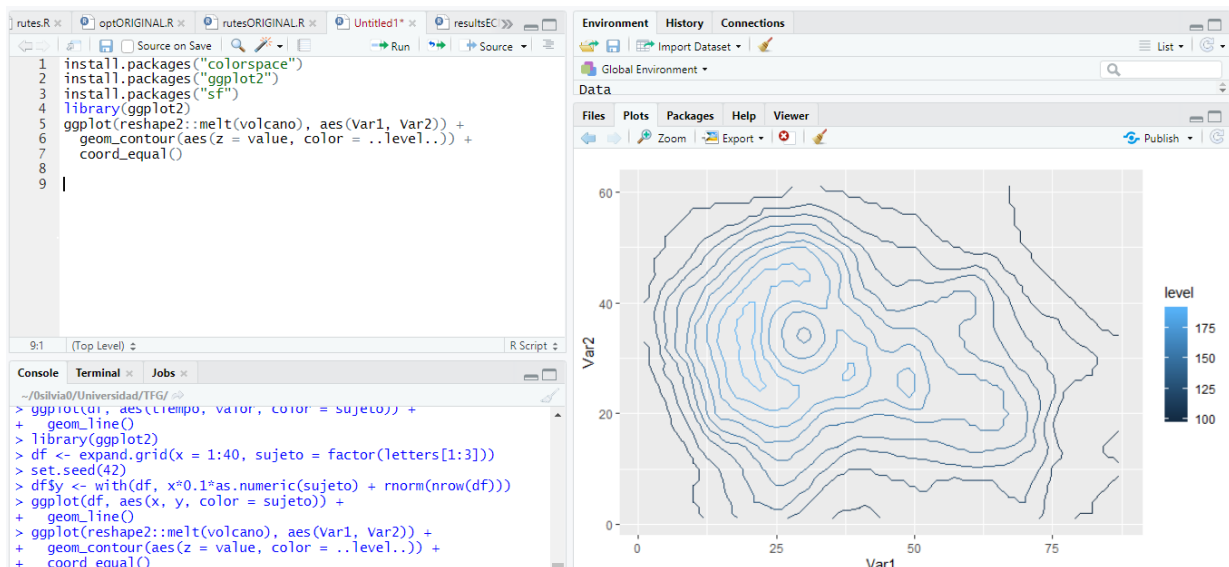


Figura 12: Ejemplo sacado de la web sobre la información topográfica de un volcán con resolución de 10m.

## Diseño de red de carril bici basado en el tráfico de bicicletas

Para finalizar podemos comentar como dato interesante que este lenguaje de programación es utilizado en diversos campos como Big Data, Inteligencia artificial, bioinformática, minería de datos, etc.

## 5. Recogida de datos

---

Para poder realizar nuestro trabajo se ha necesitado una serie de datos acerca del uso de las bicicletas en las distintas ciudades analizadas, a partir de los cuales poder sacar los resultados para cada ciudad y para cada método de optimización.

A finales de Septiembre de 2014 se comenzó a recopilar los datos de las diferentes estaciones de bicicletas de manera ininterrumpida hasta finales de abril de 2015, 7 meses en total.

Por otra parte, también recogemos información meteorológica. Esta información se recopila de cada ciudad con periodos de actualización de 15 minutos. Esta información será almacenada en base a su localización geográfica la cual se obtiene teniendo en cuenta la media de las longitudes y latitudes de las estaciones de la ciudad.

Existen, sin embargo, inexactitudes en los datos. Aunque se intenta que se acerquen lo máximo a la realidad existen algunos factores que producen que haya valores faltantes como denegaciones de servicio. Para ser exactos, falta un 0,7% de información acerca de las bicicletas y un 2% de información en relación al tiempo.

Otros problemas a la hora de estimar las bicis que se alquilan en cada estación son los siguientes:

- k bicicletas que se retiran.
- n bicicletas que se devuelven.
- Bicicletas que se reponen y se quitan por la empresa de bicicletas y que no se deberían de tener en cuenta.

**Bike Rental and Weather Data across Dozens of Cities**

#	city	country	# stations	#docks (percentiles)			%open	%filled	update frequency in minutes (percentiles)			% empty	%full
				10th	50th	90th			10th	50th	90th		
1	Bruxelles	BE	348	20	25	25	100%	45 %	6.4	8.8	9.7	3 %	2 %
2	Toulouse	FR	281	16	20	24	100%	45 %	4.8	7.2	9.4	4 %	4 %
3	Valence	ES	276	15	20	25	100%	41 %	4.6	6.4	8.3	7 %	4 %
4	Seville	ES	260	15	20	25	100%	42 %	5.3	7.1	9.3	6 %	5 %

Tabla 1: Resumen de 1165 estaciones de bicicleta en 4 ciudades de 3 países.

En la Tabla 1 se muestran los datos de todas las ciudades de las cuales hemos hecho uso (Bruselas, Toulouse, Valencia y Sevilla), las cuales tienen un número similar de datos (estaciones de bicicleta). Se han hecho uso solo de estas ciudades dado que se acoplaban de manera correcta a nuestro código ya diseñado para la ciudad de Valencia.

De la Tabla 1 destacamos los porcentajes de tiempo que se mantienen tanto llenas (%full) como vacías(%empty) las estaciones de bicicleta y también el hecho de que todas están abiertas y disponibles las 24h del día los 365 días del año(100%).

Si continuamos desglosando los datos interesantes de la tabla anterior, la estación de Bruselas es la que menos porcentaje de tiempo está llena y a su vez es la que menos tiempo está vacía con un 3%,seguida de la estación de Toulouse con un 4%. Estos datos son muy importantes ya que uno de los objetivos de las compañías de alquiler de bicicletas es intentar minimizar los tiempos en los que una estación esté llena (será imposible la devolución de una bicicleta) y esté vacía(no será posible alquilar ninguna bicicleta en esa estación).

El problema de que una estación no tenga bicicletas para alquilar (el índice de demanda se mantiene en cero) o esté llena, es que no tenemos ninguna forma de averiguar si algún cliente ha querido alquilar una bicicleta en esa estación o ha querido devolverla y eso en nuestros datos no se verá reflejado.

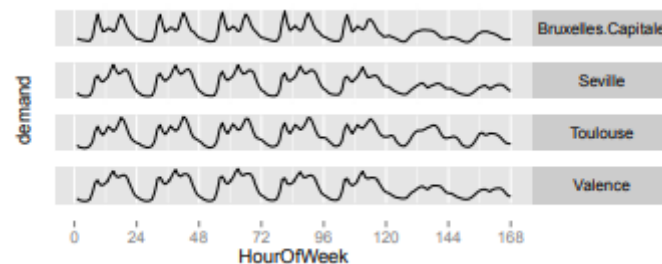


Figura 13: Media de demanda de bicicletas por hora cada día de la semana.

En la figura 13 podemos observar la demanda de bicicletas por cada hora de cada día de la semana en las cuatro ciudades que hemos estudiado. En la figura tenemos un vector de 168 elementos que hace referencia a la hora de la semana donde el elemento en la posición N hace referencia a la demanda media en la hora N de la semana,(de forma explicativa el Lunes de 0am-1am es el primero y el Domingo de 11pm-12pm es la hora 168 de la semana). Como conclusión y de manera lógica, sacamos que los días entre semana de lunes a viernes en horario lectivo o de trabajo son los que más uso de la bicicleta se hace.

Por último exponemos en la tabla a continuación diversos datos dados en base a aspectos climatológicos.

En primer lugar debemos tener en cuenta sobre todo la lluvia, la nieve y el viento, que son los factores que más afectan al uso de la bicicleta.

cities	av_T	av_W	av_R	cor_T	cor_TH	cor_W	cor_R
Bruxelles	280.54	3.61	0.18	0.11	0.08	-0.008	-0.03
Seville	288.73	2.89	0.10	0.23	0.11	0.043	-0.05
Toulouse	283.25	3.53	0.21	0.22	0.14	0.015	-0.07
Valence	286.35	3.79	0.07	0.28	0.14	0.035	-0.05

Tabla 2: correlaciones en base a aspectos meteorológicos

La Tabla 2 muestra los resultados de las dependencias de la demanda de bicicletas con el tiempo meteorológico.

Las tres primeras columnas hacen referencia a la media de las condiciones meteorológicas para cada ciudad. *av\_T* es la media de temperatura expresada en Kélvines ( $0^{\circ}\text{C}= 273\text{K}$ ), *av\_W* hace alusión a la media de viento en cada ciudad expresado en metros/s y *av\_R* es la media de lluvia simbolizada en mm de lluvia o nieve.

Podemos observar que la ciudad más cálida con una media de 15 grados anuales y con menos viento es Sevilla, seguida de Valencia que, aún siendo la segunda ciudad más cálida, se trata de la más ventosa y la menos lluviosa. Y por otro lado Toulouse es nuestra ciudad más lluviosa.

Las siguientes tres columnas tratan de analizar la relación que existe entre el tiempo y la demanda de bicicletas. *cor\_T* es la correlación del tiempo. Nos indica que la gente utiliza más el transporte en bici cuando el clima es más cálido, de todas formas éstas correlaciones también pueden estar haciendo referencia a que el uso de las bicicletas es mayor durante el día, cuando hay luz; Y es por ello que contamos con otro parámetro *cor\_TH* que mide también la temperatura pero por cada hora del día ( para así evitar el problema anterior). De esta manera tenemos 24 relaciones de las cuales se ha extraído una media por estación y ciudad. Con esto podemos observar que, efectivamente, está directamente relacionada la temperatura de una ciudad con el uso de la bicicleta ya que el promedio es mayor en Valencia, una de las ciudades más calurosas.

*cor\_W* relaciona el uso de la bicicleta con el nivel del viento. Cuando el valor es negativo quiere decir que cuanto más viento, se reduce la demanda de bicis. En el caso de nuestras ciudades Bruselas es la más afectada con este problema.

El último parámetro que se analiza es *cor\_R* que muestra la relación con la lluvia y la nieve. De manera que resulta obvia, todos nuestros valores son negativos ya que utilizar la bicicleta con lluvia no resulta agradable para nadie. Podemos destacar que en efecto Toulouse que es una de las ciudades más lluviosas es la que mayor correlación negativa tiene.

Como conclusión de la tabla anterior se puede obtener que los climas cálidos de Sevilla y Valencia tienen un mayor beneficio a la hora de la utilización de la bicicleta como medio de transporte.

Para aplicar todos los factores anteriormente nombrados a nuestras ciudades hemos hecho uso de los siguientes tipos de datos para cada estación:

- Datos estáticos: el id de la estación ,nombre, localización geográfica, ciudad, número de borlas.



- Datos dinámicos: últimas actualizaciones, número de bicicletas disponibles y de borlas vacías en un momento concreto.

En total han sido dos documentos los que se han utilizado en nuestro código.

El primer documento csv **Estaciones de Bicicletas** tiene cuatro valores que han sido medidos: Un id para identificar a cada estación; su localización dada por dos valores longitud y latitud; y por último el número de bicicletas que hay en cada estación.

```
"NUM_STATION", "LON", "LAT", "STANDS"
1, -5.9889059382, 37.4129235511, 20
2, -5.9652239664, 37.3815780453, 18
3, -5.9984882408, 37.4056415424, 40
4, -6.0057222688, 37.4101115576, 40
5, -6.0019592561, 37.4110435627, 40
6, -6.0029779476, 37.4066137898, 20
7, -6.0076033504, 37.4074694907, 20
8, -6.0093817354, 37.4009693829, 20
9, -6.0040202589, 37.4033245311, 20
10, -5.9907660087, 37.4093850256, 20
11, -5.9925902997, 37.4071428839, 20
12, -5.9949042272, 37.4038695366, 30
13, -5.9919182163, 37.4031335348, 15
14, -5.9891187391, 37.4064737058, 40
15, -5.9857337, 37.4060415718, 15
16, -5.9824305058, 37.4070507995, 20
17, -5.9788401728, 37.4071515556, 20
18, -5.9681211207, 37.3820754594, 20
19, -5.9890372063, 37.4033275366, 20
20, -5.9865371985, 37.4048695437, 15
21, -5.9815271812, 37.4054735479, 20
22, -5.9748311576, 37.405129549, 20
23, -5.9878792023, 37.403337537, 15
24, -5.9845921912, 37.404035541, 15
25, -5.9811091784, 37.4031325387, 20
```

Tabla 3: Parte de datos de Estaciones de Bicicletas de Sevilla

Para sacar estos valores se partía de un documento donde se encontraban estos datos para una gran cantidad de ciudades y para poder trabajar con cada ciudad por separado implementamos en Rstudio el siguiente código.

```
1
2 #codigo para dividir por ciudad las estaciones de bici
3
4 require(dplyr)
5 stations <- read.csv("stations.csv")
6
7 for(city in unique(stations$CITY)){
8   print(city)
9   write.csv(filter(stations, CITY == city), file = paste0(city, ".csv"))
10 }
```

Figura 14: Código en R para dividir los datos por ciudades

Como podemos observar en primer lugar se carga el documento con toda la información (stations.csv) y mediante un for, vamos recorriéndolo y guardando en nuestros documentos diferentes csv filtrando el nombre de cada ciudad para poder separarlos.

El segundo documento csv **Summary Bikes** cuenta con cinco valores de los cuales cuatro son importantes y comentaremos a continuación.

Cada estación de cada ciudad se identifica con un valor numérico entero; el día de la semana( entre 0 que corresponde al Domingo y 7 que corresponde al Sábado); la hora (entre 0 y 24); y la media de bicicletas que suele haber a cada hora cada día para cada estación.

```
"X", "wday", "hour", "mean.day", "station"  
1, "1", 0, 6.82771825396825, 1  
2, "1", 1, 7.35799062049062, 1  
3, "1", 2, 7.49702380952381, 1  
4, "1", 3, 8.05190476190476, 1  
5, "1", 4, 8.34734848484848, 1  
6, "1", 5, 8.54990079365079, 1  
7, "1", 6, 8.78845238095239, 1  
8, "1", 7, 9.24484126984127, 1  
9, "1", 8, 9.60628968253968, 1  
10, "1", 9, 9.74971389313301, 1  
11, "1", 10, 10.2097521046205, 1  
12, "1", 11, 10.9555868110648, 1  
13, "1", 12, 12.0209127637069, 1  
14, "1", 13, 11.8006027810582, 1  
15, "1", 14, 11.643783542846, 1  
16, "1", 15, 11.6539751699324, 1  
17, "1", 16, 11.352831508769, 1  
18, "1", 17, 10.48063671964, 1  
19, "1", 18, 9.29241871432661, 1  
20, "1", 19, 8.2838296368664, 1  
21, "1", 20, 8.08806130960543, 1  
22, "1", 21, 8.06417748917749, 1  
23, "1", 22, 8.33660714285714, 1  
24, "1", 23, 8.8777876984127, 1  
25, "5", 0, 6.04610119047619, 1
```

Tabla 4: Parte de datos de Summary Bikes para la ciudad de Sevilla

Para sacar estos valores se partía de varios documentos donde se encontraban estos datos para una gran cantidad de ciudades y para cada estación por separado; y para poder trabajar con los datos de manera correcta se realizó una agregación de los datos mediante este código implementado que se puede observar a continuación.



```

79 -----
80 #codigo para realizar una agregacion de cada estacion de bici del resto de ciudades
81
82 require(lubridate)
83
84 num_estaciones <- 102
85 Dublin_ <- list()
86 for (i in 1:num_estaciones){
87   ruta <- paste("bikes_agg_(summarybikesdata)/Dublin_",i,"/Dublin_",i,".csv", sep="")
88   print(ruta)
89   Dublin_[[i]]<-read.csv(ruta)
90
91
92   Dublin_[[i]]$date <- dmy(paste(Dublin_[[i]]$day,Dublin_[[i]]$month, Dublin_[[i]]$year, sep="-"))
93   Dublin_[[i]]$wday <- weekdays(Dublin_[[i]]$date)
94
95
96   t <- group_by(Dublin_[[i]], wday, hour)
97   Dublin_[[i]]<- summarise(t, mean.day = mean(meanbikes))
98   Dublin_[[i]]$station <- i
99
100 }
101 total_dataframes=do.call(rbind,Dublin_)
102
103
104
105 write.csv(total_dataframes,file="dublinpart2.csv",row.names = FALSE)
106

```

Figura 15: Código en R para realizar agregación de la ciudad de Dublín

En el código anterior se recorre cada documento csv y se van introduciendo en una lista. Primero cambiaremos el formato de la fecha reduciéndolo al día de la semana para después crear un nuevo csv con los valores wday, hour, mean.day que es la media de meanbikes del csv el cual estamos leyendo y por último el numero de estación que leemos. Por último lo guardamos todo en un nuevo documento csv con el nombre de la ciudad.

Para cada ciudad diferente se ha hecho uso de una cantidad de datos diferentes ya que cada una cuenta con un número determinado de estaciones de bicicleta dependiendo en gran medida de las dimensiones reales de cada metrópoli.

En el caso de Valencia se hizo uso de 276 estaciones de bicicleta; En la ciudad de Sevilla el número total de estaciones es 259; En tercer lugar para la ciudad de Toulouse se hace uso de un total de 280 estaciones; y por último en el caso de Bruselas el total de estaciones de bicicleta aumenta a 344.



## 6. Formulación del problema

---

En este apartado se van a detallar los procedimientos matemáticos utilizados en nuestro trabajo para la realización de éste y como han sido formulados en nuestro problema.

Partimos de un set  $V$  de estaciones de bicicleta  $\{v_i \mid i \in [1, N]\}$  donde  $N$  es el número de estaciones. En nuestro código  $N \leftarrow \text{nrow}(\text{estaciones})$

De aquí, sacamos una matriz  $N \times N$ . Esta matriz tendrá las distancias en kilómetros entre todas las estaciones en  $V$ . Conseguimos esta matriz utilizando tanto la localización geográfica como aplicando la fórmula Haversine.

Esta fórmula Haversine es utilizada para obtener la distancia mínima entre dos estaciones de bicicleta sobre la superficie terrestre partiendo de su radio (en kilómetros).

La fórmula está dada por:

$$\text{hav}\left(\frac{d}{r}\right) = \text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1) \times \cos(\varphi_2) \times \text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1)$$

Y para la implementación de esta fórmula en R utilizamos el paquete *geosphere*.

En nuestro código la implementación de la fórmula es la siguiente:

```
distHaversine(c(as.numeric(estaciones[i,"LON"]), as.numeric(estaciones[i,"LON"])),  
c(as.numeric(estaciones[i,"LON"]), as.numeric(estaciones[j,"LAT"])))
```

Como vemos utiliza la longitud y la latitud de las dos estaciones de bicicleta  $i$  y  $j$  de las cuales queremos sacar la distancia mínima.

Por otro lado definimos una solución  $S$  como una matriz Booleana de tamaño  $N \times N$ . Si tenemos un valor TRUE entre dos posiciones  $i, j$  esto quiere decir que la solución actual tiene una ruta directa en nuestra red de carril bici entre las estaciones que hacen referencia a las posiciones  $i, j$ .

Por lo tanto, dados  $V$  (set de estaciones de bicicleta) y  $S$  (matriz booleana), generamos un grafo donde haya una arista entre las estaciones  $i$  y  $j$  si el valor  $i, j$  es TRUE(1).

Partiendo de una solución  $S$ , definimos la longitud total de una solución de nuestra red de carril bici propuesta así:

$$L(S) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (S_{i,j} \times D_{R(i,j)}) .$$

Lmax es definido como la longitud máxima permitida de una solución de la red. En nuestro caso  $LIMRED < \text{sum}(dreal) / NETFACT$  donde NETFACT será un valor modificable (20, 30, 40, 50) según queramos ampliar o reducir nuestra red.

Existe una gran cantidad de soluciones posibles pero no todas son útiles. Para que una solución S sea válida, se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Todas las estaciones deben estar conectadas
2. La longitud máxima de la solución de nuestra red no puede ser nunca mayor que Lmax.

Por otro lado tenemos el array w de tamaño N, con valores entre 0 y 1 que representa el peso de cada estación de bicicletas. Los pesos se computan teniendo en cuenta la demanda histórica de cada estación de la red. Por otro lado definimos W, la cual será una matriz de tamaño N x N. Esta matriz representa cuán importante es la conexión entre cada par de estaciones posibles.

Para sacar estos pesos y la consecuente matriz, en nuestro código lo implementamos de la siguiente manera:

```

pesos<-estaciones$pondWeight
mpesos<-matrix(0,N,N) # indica la importancia entre par de estaciones
for (i in 1:N)
  for (j in 1:N) {
    mpesos[i,j]<-pesos[i]*pesos[j]
  }
mpesos<-lower.tri(mpesos)*mpesos
    
```

Adicionalmente definimos otra matriz también de tamaño N x N que contiene las distancias (en kilómetros) entre cada par de estaciones utilizando el camino más corto. Para sacar la distancia, es decir, el camino más corto entre estaciones, utilizamos el algoritmo Dijkstra.

Por último definimos el coste C de una solución como:

$$C(S) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (W_{i,j} \times D_{G(i,j)}(S))$$

Así que el coste será la suma de distancias de viajar para cualquier par de estaciones , midiendo también la importancia de cada una de éstas.

Y para finalizar tenemos que definir los pesos que caracterizan cada estación, lo que quiere decir que cuantos más puestos para dejar la bicicleta tenga, serán considerados más importantes.

Y por otro lado también caracterizamos la demanda media de cada estación como la suma ponderada de la media de demanda durante días de trabajo y la media de demanda durante los fines de semana.

## 7. Análisis del Problema

---

En este apartado, estudiaremos el problema o problemas a solucionar en nuestro proyecto. Para ello primero lo identificaremos y después analizaremos en profundidad las diversas posibles soluciones.

### 7.1 IDENTIFICACIÓN

Nuestro proyecto trata un tema muy importante de circulación con bicicletas. Partimos del objetivo de crear una red de carril bici de la cual el principal problema consiste en su optimización.

Para poder perfeccionar ésta al máximo se han tenido en cuenta diferentes métodos de optimización para conseguir tener la mejor red de carril bici en relación calidad/precio.

Estos métodos tienen que ver con los algoritmos de Montecarlo, Hillclimb, Annealing, Genetic y Tournament.

En el siguiente punto examinaremos estas posibles soluciones.

### 7.2 ANÁLISIS Y DESARROLLO DE SOLUCIONES POSIBLES

Nuestro proyecto consta de cinco métodos de optimización ya comentados en el subpunto anterior; El motivo principal de desarrollar varios métodos y no solo uno, es poder elegir aquel que sea más óptimo para el análisis de la red ciclista, y por ello mediante el desarrollo de estos cinco métodos podremos comparar sus costes y tiempos y tener así un resultado preciso.

Analizaremos por tanto a continuación cada método de forma general y explicando su origen y también en este punto vamos a explicar más detalladamente las diversas soluciones que tenemos para llevar a cabo el diseño de la red de carril bici tanto de Valencia como de Sevilla, Toulouse y Bruselas. Se van a desarrollar cada uno de éstos comentando los parámetros que se han utilizado en cada algoritmo y como funciona cada uno aplicado a nuestro problema específico.

## MONTECARLO

El método de Monte Carlo consiste en una serie de técnicas mediante las cuales podemos obtener soluciones a problemas tanto matemáticos como físicos mediante muestras estadísticas aleatorias. Se utiliza la aleatoriedad para solucionar problemas que si quisiéramos resolverlos de forma analítica entonces probablemente nos resultaría mucho más complicado.

Esta técnica, que hace referencia al casino Monte Carlo, tiene su origen en el año 1940 cuando los matemáticos Neuman y Ulam aplicaron este método de aleatoriedad a la experimentación de armas nucleares. Este hecho dejó patente que esta técnica no solo era aplicable a los juegos de azar, sino también a otras áreas del conocimiento.

En nuestro caso aplicamos el método a la creación de nuestra red de carril bici donde de forma aleatoria selecciona la mejor ruta con menor coste y con una longitud predeterminada que vamos a ir modificando.

Para el funcionamiento de este método hemos creado un valor  $pct=0,015$  que hace referencia al porcentaje de nodos que estarán directamente conectados y por lo tanto tendrán sus aristas con valor TRUE; Cuanto más bajo sea este valor (entre 0 y 1) , indicará menor presencia de aristas.

Este método está programado con 10 Steps, por lo que se repetirá el proceso este número de veces.

## HILLCLIMB

El segundo método utilizado es Hillclimb. Este método es también conocido como *Ascenso de colinas*, y pertenece a la familia de los algoritmos de búsqueda local. La búsqueda local busca la mejor solución de las posibles en un tiempo razonable (no el mejor ya que el tamaño del espacio de soluciones no lo permite).

En este caso, la técnica de optimización es un algoritmo iterativo el cual, para un problema determinado, comienza con la selección de una solución aleatoria( ésta la seleccionaremos mediante el anterior método creado de Montecarlo), y a partir de ésta se intenta buscar una solución mejor explorando soluciones vecinas, para ello se cambia de forma incremental un solo elemento de la solución anterior) . Este método finaliza cuando no hay mejoras, o si se alcanza el máximo de iteraciones predeterminadas.

Aplicándolo a nuestro código, nuestro segundo método Hillclimb parte de una solución válida que habremos sacado aleatoriamente mediante Montecarlo, a partir



de ahí creamos K soluciones vecinas. (Partimos de 1 solución vecina y en cada iteración con solución nueva añadimos una solución vecina más).

Cada nueva solución se crea añadiendo una nueva conexión para cada N filas de S. Damos por válida una nueva solución si se genera una solución mejor, esto quiere decir que tenga un coste mejor.

## ANNEALING

El siguiente método de optimización es Simulated Annealing (recocido simulado). El funcionamiento de este algoritmo está inspirado en procesos físicos del templado de cristales.

Simulated Annealing es un proceso de enfriamiento (templado) en el cual los metales se calientan y después se les permite enfriarse poco a poco. Los átomos son primero muy alterados y luego puestos de manera gradual en un estado bajo de energía. De esta manera los átomos son capaces de encontrar una configuración estable.

Este método combina nuestro anterior método de optimización HillClimbing, con el seguimiento de un camino aleatorio (como Monte Carlo) para así poder lograr ser tanto eficiente como más completo.

El funcionamiento de Annealing es, como se comenta en el párrafo anterior, parecido a Hillclimb, dado que también partimos de una solución aleatoria y a partir de ésta vamos modificando nuestra solución añadiendo o eliminando una conexión entre estaciones. La diferencia clave entre este algoritmo y el anterior reside en que nuestro nuevo método Annealing utiliza un parámetro llamado *Temperatura*, el cual se utiliza para calcular la probabilidad de que una solución vecina inferior sea aceptada, seleccionada en base a la probabilidad de *Temperatura* o descartada (aquí entra en juego el coste de cada solución)

Nuestro tercer método desarrollado tiene más complejidad y lo explicamos a continuación.

El método Annealing también se combina con Montecarlo, ya que nuestra solución inicial es generada de manera aleatoria. A partir de aquí, se diferencia de Hillclimb en diferentes aspectos.

La mayor diferencia como ya hemos comentado, tiene que ver con un parámetro llamado Temp en nuestro código; Este parámetro sirve para calcular el grado de aceptación de una solución. En nuestro caso el valor de Temp es de 100 y el porcentaje de enfriado ( el cual explicaremos a continuación ) es de 0,95.

Al final de cada iteración la temperatura decrecerá y para ello tenemos una constante de porcentaje de enfriado (cool) .  $Temp = Temp * cool$ .

El algoritmo funciona de la siguiente manera, si el coste de una solución candidata es menor que el coste de la solución actual, se sustituye nuestra solución actual por la candidata. En caso de que la solución candidata tenga un coste mayor, no se desechará esta solución de manera inmediata ya que en este caso tendremos en cuenta nuestro valor Temp. Cuanto más alto sea el valor de Temperatura, mayor será la probabilidad de que se acepte la solución. Para ello tenemos en cuenta la siguiente fórmula que determinará esta probabilidad:  $p < \exp(-(\text{eb} - \text{ea}) / \text{Temp})$ .

El algoritmo finaliza cuando el parámetro Temp alcanza un mínimo, en nuestro caso hasta que  $Temp > 0,6$ .

## GENETIC

En cuarto lugar se encuentra el método de Genetic Algorithm. Este tipo de técnicas se basan en la búsqueda heurística adaptativa basadas en las ideas y procesos de selección natural y evolución genética. Los algoritmos genéticos modifican de forma repetida un set de soluciones individuales utilizando las técnicas de evolución natural reproducción, selección, mutación, y cruce.

En el caso del funcionamiento de nuestro algoritmo, el método Genetic selecciona en cada paso un set de individuos formado por las mejores x soluciones de la población actual del cual nos quedaremos, tras diversas generaciones (pasos, iteraciones) , con la solución más óptima.

En este método también utilizaremos Montecarlo pero de una manera diferente. Para empezar en cada paso, nuestro algoritmo genético selecciona el set llamado *elite* de individuos, en nuestro caso este set elite estará formado por las 10 mejores soluciones de nuestra población actual (tampob=100). El set de elite estará ordenado de menor coste a mayor y al final nos quedaremos con aquel que ocupe la primera posición: elite[1].

Estas mejores soluciones se convierten en padres de las próximas generaciones de soluciones. Después de diversas iteraciones conseguiremos llegar a una solución óptima. Para ello en nuestro caso se han realizado 300 iteraciones.

## TOURNAMENT



Por último, con la intención de contar con un método más con el objetivo de conseguir una mayor mejora de nuestra red de carril bici se implementó un último método de optimización llamado Tournament Algorithm.

El método de selección por torneo es un método de búsqueda estocástico simple que cuenta solo con un parámetro el cual controla las propiedades global-local de búsqueda del algoritmo.

Se trata por lo tanto de un método de optimización para detectar una solución de una gran cantidad de soluciones de manera menos compleja. La funcionalidad de este algoritmo consiste en ejecutar diversos "torneos" entre algunos individuos(soluciones) elegidos de la población (vecinos de la solución actual) . El ganador de cada ronda será seleccionado como nueva solución. El método finaliza cuando se cumplan el número de iteraciones preestablecidas que tiene relación con la cantidad de individuos pertenecientes a la población.

En nuestro último método hemos partido como en nuestros métodos anteriores, de una solución aleatoria generada mediante el método Montecarlo.

Nuestro último procedimiento genera aleatoriamente  $K$  vecinos de la solución actual, en nuestro caso serán 10 vecinos y los guardaremos en una variable de manera ordenada, de manera que, tras celebrarse un "torneo" para seleccionar la mejor solución, ésta pasará a ser nuestra nueva solución en el caso de que el coste sea menor que el coste de la solución actual. Este proceso lo repetimos tantas veces como estaciones tenemos para poder recorrer los vecinos de todas las estaciones, una vez finalizado , terminará nuestro método.



## 8. Resultados

---

Estos cinco métodos de los que hemos hablado en el punto anterior han sido aplicados a cada ciudad. Para ello, haciendo uso de nuestro script en R `rutes.R` accedemos a los datos de cada ciudad. A continuación podemos ver en la siguiente Figura 19 un ejemplo para la ciudad de Sevilla; Cargamos los datos de cada ciudad en `estaciones` y `stationUse` desde las rutas que se observan resaltadas en azul y trabajamos con éstos.

```
estaciones<-read.csv("datos(Sevilla)/EstacionesBici_Sevilla.csv")
index <- with(estaciones, order(estaciones$NUM_STATION))
estaciones<-estaciones[index,]

N<-nrow(estaciones) #estaciones

#weights by use
stationUse <- tbl_df(read.csv("datos(Sevilla)/summaryBikes_Sevilla.csv"))
stationUse.station <- group_by(stationUse,station)
useByStation <- summarise(stationUse.station, use=mean(mean.day))
```

Figura 16: Parte de código de `rutes.R` para cargar los datos

En este apartado hablamos de los resultados que hemos obtenido a partir de cada método de optimización aplicado a las cuatro ciudades incluyendo Valencia.

### 8.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

#### Valencia

$\alpha$	Method	20			30			40			50		
		Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time
1	Montecarlo	65	1892	8	65	1892	8	65	1892	8	65	1892	8
2	HillClimb	32	5918	173	39	3947	83	46	2960	47	55	2368	34
3	Anneal	29	5921	663	32	3947	631	40	2960	540	46	2368	499
4	Genetic	25	5919	1139	29	3947	825	34	2960	460	38	2360	402
5	Tournament	32	5920	66	38	3947	37	44	2960	33	54	2368	35

Tabla 5: Resultados para la ciudad de Valencia. La tabla muestra el coste medio de la solución (Cost), la longitud media en kilómetros (Dist), y el tiempo medio requerido para conseguir la solución en segundos (Time).

Comenzamos con la ciudad de Valencia a obtener los resultados. En primer lugar observamos que tenemos diferentes costes, distancias y tiempos en base a un

valor diferente de  $\alpha = [20, 30, 40, 50]$ . Este valor  $\alpha$  hace referencia a la longitud máxima de red  $L_{max}$ , donde  $L_{max} = L_{total}/\alpha$ . Conforme más grande sea el valor de  $\alpha$ , más reducida será nuestra red.

En la tabla tenemos tres valores, el coste, la distancia en kilometros y el tiempo en segundos. El coste lo sacamos utilizando el método comentado anteriormente en el punto de formulación del problema.

En la tabla podemos ver, en general, que conforme vamos reduciendo el tamaño de nuestra red (aumentando el valor de  $\alpha$ ), aparte de ir reduciendo el tamaño de nuestra red, aumentamos el coste de ésta ya que estamos reduciendo el número de conexiones directas (aristas) entre estaciones.

Si comparamos los cinco métodos de optimización en relación al coste podemos observar como el peor de todos en cualquier caso, como era de esperar, es Montecarlo. Esto se debe a que se trata de un algoritmo basado en la aleatoriedad. Como se puede observar, dado que Montecarlo selecciona siempre soluciones costosas pero a la vez redes pequeñas, se obtiene siempre el mismo resultado para diferentes valores de alfa. En cuarto lugar tenemos el método Hillclimb; En tercer lugar y siguiéndole de cerca se encuentra el método Tournament; En segundo lugar con un coste un tanto mejor se halla Annealing; y de cerca, siendo el mejor método de optimización se encuentra Genetic con un coste conseguido entre 25 y 38 conforme vamos reduciendo el tamaño de nuestra red.

Si comparamos en este otro caso los cinco métodos de optimización en relación al tiempo se puede comprobar que el método con los mejores resultados es Montecarlo seguido de Tournament, y éste seguido de cerca por Hillclimb y que distan mucho de Annealing y de Genetic. Éste último llega en algún caso a tardar hasta 19 minutos para computar la solución óptima.

Uno de los aspectos más llamativas es el coste y tiempo empleado en obtener la solución por parte de Montecarlo, ya que en nuestro proyecto únicamente se necesitan 8 segundos para cualquier tamaño de alfa y el coste se reduce a 65. Esto se debe a que nuestro método es aleatorio y una vez ha conseguido una solución aleatoria va a utilizar ésta para cualquier valor de alfa y por lo tanto al tardar tan poco en conseguir la primera solución debido al mejor procesamiento por parte del ordenador utilizado, las diferencias de tiempo empleado son insignificantes y no podemos apreciarlas en nuestra tabla. El resto de datos tienen diferencias poco significantes en nuestro trabajo y no necesitan ser comentadas ya que no cambian el orden de eficacia de cada método de optimización.

A continuación analizamos en profundidad los resultados obtenidos para la ciudad de Bruselas.

## Bruselas

$\alpha$	Method	20			30			40			50		
		Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time
1	Montecarlo	117	4509	1	117	4509	1	117	4509	1	117	4509	0
2	HillClimb	60	14352	569	71	9570	278	82	7176	147	94	5738	91
3	Anneal	61	14062	693	71	9570	501	81	7175	446	92	5739	457
4	Genetic	49	14344	2073	55	9562	1310	62	7176	961	71	5740	1005
5	Tournament	61	14353	70	71	9568	61	80	7177	60	92	5742	61

Tabla 6: Resultados para la ciudad de Bruselas. La tabla muestra el coste medio de la solución (Cost), la longitud media en kilómetros (Dist), y el tiempo medio requerido para conseguir la solución en segundos (Time).

Antes que nada podemos observar que tenemos diferentes costes, distancias y tiempos en base a un valor diferente de  $\alpha$ . Este valor  $\alpha$  hace referencia a la longitud máxima de red  $L_{max}$ , donde  $L_{max} = L_{total}/\alpha$ . Conforme más grande sea el valor de  $\alpha$ , más reducida será nuestra red.

En la tabla superior vamos a analizar tres valores: El coste, la distancia en kilómetros y el tiempo en segundos. El coste, como ya hemos comentado anteriormente, será la suma de distancias de viajar para cualquier par de estaciones, midiendo también la importancia de cada una de éstas. La distancia está directamente relacionada con el párrafo anterior ya que por cada valor de alfa aumentamos o reducimos ésta y como se puede observar, es prácticamente la misma para cada método de cada valor de alfa respectivamente y sin tener en cuenta a Montecarlo ya que se trata de un método aleatorio.

Al igual que para los resultados de la ciudad de Valencia, en la tabla con los resultados para Bruselas podemos ver, en general, que conforme vamos reduciendo el tamaño de nuestra red, es decir, aumentando el valor de  $\alpha$ , aparte de ir reduciendo el tamaño de ésta, ya que estamos reduciendo el número de conexiones directas/aristas entre estaciones, aumentamos el coste de la red.

En este caso, si comparamos los cinco métodos de optimización teniendo en cuenta el coste, Montecarlo va a ser en cualquiera de los casos siempre el peor método, esto se debe a que se basa en la aleatoriedad, en el caso de Bruselas el coste de Montecarlo asciende a 117 para una distancia de 4509 km. En el resto de casos la distancia irá aumentando en cada uno de los métodos según reduzcamos alfa de forma que encontramos longitudes de 5740 hasta unos 14353. En cuarta, tercera y segunda posición tenemos muy igualados en coste tanto a Hillclimb, como a Annealing y Tournament ya que con distancias de red mayores Tournament y Annealing comienzan siendo ligeramente mejores aunque al reducir alfa al valor de 30 estos 3 costes de los respectivos tres métodos se igualan a 71 y por último cuando alfa se termina de reducir a 20 Hillclimb termina siendo un poco mejor en coste que sus otros dos competidores; Por último, y al igual que para Valencia, se

puede comprobar que Genetic continúa siendo el mejor método con una diferencia considerable con los otros métodos.

De todas formas si volvemos a tener en cuenta el tiempo, nuestras conclusiones son diferentes ya que el método más rápido y con diferencia sigue siendo Montecarlo, cabe destacar aquí que al redondear el tiempo a segundos, el resultado obtenido por Montecarlo cuando el tamaño de red utiliza alfa 50, parece que sea de 0 segundos pero en realidad éste tarda milésimas de segundo; En segundo lugar, siendo también bastante rápido tenemos el método Tournament; Los otros tres métodos son mucho más lentos en comparación, aún así Hillclimb es el que menos tiempo requiere de los tres, seguido de Annealing y por último, al igual que para la ciudad de Valencia, el método más lento es Genetic llegando a tardar entre 961 y 2073 segundos, lo que equivale a entre 16 y 34 minutos

Teniendo en cuenta por ahora únicamente la ciudad de Valencia y la ciudad de Bruselas podemos establecer que en ambos casos el mejor método es Genetic y el más rápido Montecarlo.

La única diferencia es que para Valencia los costes son inferiores pero ya no solo en relación al método Genetic, sino también para el resto de casos. Esto se debe exclusivamente a que el número tanto de bicicletas como de estaciones de bicicleta de Bruselas es bastante superior al que existe en Valencia y es por ello que tanto el coste como la distancia a la que se aplica este coste es superior en Bruselas.

A continuación, seguimos analizando los resultados obtenidos para todas las ciudades, en este caso Sevilla.

## Sevilla

$\alpha$	Method	20			30			40			50		
		Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time
1	Montecarlo	68	1846	1	68	1846	1	68	1846	1	68	1846	1
2	HillClimb	32	5688	162	39	3791	84	46	2843	41	54	2275	24
3	Anneal	32	5689	340	40	3792	250	46	2844	222	53	2275	209
4	Genetic	24	5678	1206	27	3789	894	32	2844	738	36	2269	656
5	Tournament	32	5687	30	38	3792	27	46	2844	25	54	2274	25

Tabla 7: Resultados para la ciudad de Sevilla. La tabla muestra el coste medio de la solución (Cost), la longitud media en kilómetros (Dist), y el tiempo medio requerido para conseguir la solución en segundos (Time).

Al igual que en nuestros dos anteriores tablas, observamos que tenemos diferentes costes, distancias en base a un valor diferente de alfa y tiempos. Este valor  $\alpha$  tiene

que ver con la longitud máxima de red  $L_{max}$ , donde se establece que  $L_{max} = L_{total}/\alpha$ . Cuanto más aumente el valor de  $\alpha$ , más se reducirá nuestra red.

En la tabla, como ya hemos comentado para nuestras dos ciudades anteriores, tenemos tres valores: El coste, la distancia en kilómetros y el tiempo en segundos. El coste lo sacamos utilizando el método comentado anteriormente en el punto de formulación del problema, la distancia irá variando conforme aumentemos o reduzcamos nuestro valor alfa como hemos comentando en el párrafo anterior y el tiempo irá cambiando en relación a la complejidad del método seleccionado y en relación a la potencia que tenga nuestro computador.

En nuestra tabla podemos ver, en general, que conforme vamos reduciendo el tamaño de nuestra red (aumentando el valor de  $\alpha$ ), aparte de ir reduciendo el tamaño de nuestra red, también vamos aumentando el coste de ésta ya que estamos reduciendo el número de conexiones directas (aristas) entre estaciones.

Podemos comparar los cinco métodos de optimización en relación tanto al coste como al tiempo, no lo haremos en relación a la distancia ya que como hemos establecido en el párrafo anterior, ésta irá variando en función de alfa.

En relación al coste podemos observar como el peor de todos sigue siendo en cualquier caso y como también era de esperar, Montecarlo. Al igual que en las dos anteriores ciudades, Valencia y Bruselas el método aleatorio de Montecarlo no es la mejor opción y la solución es la misma para todos los valores de alfa con, aparte de un coste elevado, un tamaño de red pequeño, en este caso de 1846 km.

En cuarto, tercer y segundo lugar volvemos a tener un ligero empate entre métodos de optimización ya que estos son si no iguales, prácticamente iguales. En cuarto lugar podemos establecer a Hillclimb, en tercer lugar Annealing dado que tiene un pequeño mejor coste con  $\alpha=50$  y en segundo lugar el método Tournament ya que tiene un ligero coste mejor conforme aumentamos el tamaño de nuestra red con  $\alpha=20$  y eso lo convierte en más eficiente.

Para terminar y exactamente de la misma manera que nuestras ciudades anteriores Valencia y Bruselas el mejor método de optimización sigue siendo Genetic para la ciudad de Sevilla.

En cuanto al tiempo, volvemos a encontrarnos con soluciones similares a Bruselas y Sevilla. Una vez más Montecarlo vuelve a ser el método más rápido, seguido de Tournament que sigue demostrando ser uno de los más rápidos; El tercer lugar lo ocupa Hillclimb que para grandes valores de alfa, es decir tamaños pequeños de red, es muy rápido, tanto como Tournament, pero que para valores más pequeños de alfa tarda hasta 2 minutos y medio en computar una solución. De todas formas estos son tiempos mínimos si hablamos de Annealing o de Genetic, en cuarto y quinto puesto respectivamente, dado que Annealing llega a tardar hasta el doble de tiempo que Hillclimb, es decir unos 6 minutos; y Genetic puede tardar en realizarse hasta en 20 minutos para el tamaño de red más grande.

Junto a Valencia Y Sevilla ya contamos con una ciudad más que finaliza con las mismas conclusiones. Para las tres ciudades es Genetic el método que menor coste genera y en el caso de Sevilla al tener unas 20 estaciones de bicicleta menos que Valencia se convierte en la ciudad en la cual más eficiente sería la construcción de red de carril bici.

Para concluir con los resultados obtenidos para cada ciudad contamos con una última ciudad a estudiar, esta es Toulouse.

## Toulouse

$\alpha$	Method	20			30			40			50		
		Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time	Cost	Dist	Time
1	Montecarlo	49	2091	1	49	2091	1	49	2091	1	49	2091	1
2	HillClimb	24	6330	188	30	4222	98	35	3164	45	42	2533	24
3	Anneal	25	6333	346	30	4222	299	37	3167	265	44	2529	250
4	Genetic	20	6332	1319	22	4211	740	26	3164	648	28	2530	627
5	Tournament	24	6333	34	30	4222	31	35	3166	29	40	2533	29

Tabla 8: Resultados para la ciudad de Toulouse. La tabla muestra el coste medio de la solución (Cost), la longitud media en kilómetros (Dist), y el tiempo medio requerido para conseguir la solución en segundos (Time).

En último lugar tratamos los resultados para Toulouse, arriba podemos observar la tabla con los resultados donde observamos los diferentes costes, distancias y tiempos en base a un valor diferente de  $\alpha$  (20, 30, 40, 50). Este valor  $\alpha$ , al igual que en ocasiones anteriores de nuestro trabajo, hace referencia a la longitud máxima de red  $L_{max}$ , donde  $L_{max} = L_{total}/\alpha$ . Cuanto más grande sea el valor de  $\alpha$ , más reducida será nuestra red.

En esta tabla al contar con los mismos elementos a analizar, tenemos también los tres mismos valores; el coste, la distancia en kilometros y el tiempo en segundos.

El coste es la suma de distancias de realizar un viaje entre cualquier par de estaciones, midiendo también la importancia de cada una de éstas. En relación a la distancia en la tabla podemos observar, que conforme vamos reduciendo el tamaño de nuestra red, es decir aumentando el valor de  $\alpha$ , conforme reducimos el tamaño de nuestra red, aumentamos el coste de ésta ya que estamos disminuyendo el número de conexiones directas/aristas entre estaciones.

Por otro lado vamos a comparar los cinco métodos de optimización en relación al coste y al tiempo.

En primer lugar nos centramos en el coste; De éstos podemos observar como el peor de todos sigue siendo Montecarlo, al igual que para Valencia, Sevilla y

Toulouse. Esto se debe a que se trata, como se ha comentado con anterioridad, de un algoritmo aleatorio. Como podemos percibir, Montecarlo selecciona siempre soluciones costosas pero a la vez redes pequeñas y se obtiene siempre el mismo resultado para diferentes valores de alfa. Como hemos estudiado y corroborado, Montecarlo no es un método fiable a la hora de realizar una buena estimación del coste de nuestra red. En cuarto lugar se encuentra Annealing; En tercer y segundo lugar tenemos a Hillclimb y Tournament Search. Podríamos catalogarlos a los dos en la misma posición con la única diferencia de que Tournament tiene un coste ligeramente inferior de 40 para un valor de alfa 50 , es decir 2533 kms. En primera posición sin ningún cambio ni sorpresa ha sido también el método de optimización de Genetic con un coste entre 20 y 28.

En el caso del tiempo empleado para conseguir los resultados, el método de Montecarlo es también para Toulouse el más rápido. El segundo método más rápido sigue siendo, al igual que para el resto de ciudades, Tournament con unos tiempos entre 29 y 34 segundos; En tercer y cuarto lugar respectivamente tenemos Hillclimb y Annealing. Hillclimb es un método veloz para tamaños más reducidos de redes pero conforme aumentamos la red, es decir disminuimos alfa, el tiempo aumenta considerablemente hasta tardar hasta 3 minutos; Por otro lado Annealing es más lento aún para cualquier distancia(valor de alfa) con valores entre 250 y 348 segundos, lo que equivale a entre 4 y casi 6 minutos. En última posición, al igual que para el resto de ciudades se haya el método de optimización Genetic que llega a tardar hasta 1319 segundos de máximo, 22 minutos.

Como hemos ido realizando con las anteriores ciudades, ahora añadimos nuestra cuarta y última ciudad analizada y podemos concluir que para las cuatro ciudades el método de optimización con menor coste generalizado es Genetic y en especial para la ciudad de Toulouse que, aun teniendo más estaciones de bicicleta y más distancia que las ciudades de Valencia y Sevilla, es aquella que menor coste tiene (20 con 6332 kms).

## 8.2 MEJOR SOLUCIÓN

Una vez evaluados los resultados con cada método de optimización para cada ciudad diferente y analizado los resultados de manera individual para cada ciudad, vamos a valorar cual es la mejor solución general para nuestras cuatro ciudades.

### EN RELACIÓN AL COSTE

Si tenemos en cuenta únicamente el coste, hemos llegado a la conclusión tanto en la ciudad de Valencia con coste mínimo de 25 y coste máximo de 38, para la ciudad de Bruselas con coste mínimo de 49 y coste máximo de 71, la ciudad de Sevilla con coste mínimo de 24 y coste máximo de 36 y para la ciudad de Toulouse



con coste mínimo de 20 y coste máximo de 28, de que el mejor método de optimización es Genetic.

Su forma de selección de la mejor solución, aunque se trate de un método complejo y difícil de implementar, es el que mejor resultados conlleva.

De todas formas se trata de un método que consume mucho tiempo a la hora de computar cada solución; Es por eso que si quisiéramos tener en cuenta la velocidad de nuestro algoritmo a la hora de resolver el problema del diseño de nuestra red de carril ciclista, Genetic no sería el más apropiado.

### EN RELACIÓN AL TIEMPO

Como hemos comentado en el párrafo anterior, a la hora de seleccionar un método útil a veces necesitamos tener en cuenta el tiempo de ejecución. Es por eso que si seleccionáramos un método de optimización basándonos en exclusiva en el tiempo, Montecarlo sería el ganador ya que es aquel que necesita menos tiempo para cualquier ciudad y para cualquier tamaño de nuestra red, llegando a tardar tan solo 8 segundos de máxima para la ciudad de Valencia y 1 segundo en el resto de ciudades

### EN RELACIÓN AL COSTE/TIEMPO

Pero si realmente lo que queremos conseguir es un método útil, no podemos tener únicamente como referencia el tiempo. Es por eso que en este apartado consideramos tanto el coste como el tiempo.

Teniendo en cuenta estos dos factores, descartamos tanto Montecarlo, al tratarse del método con peor coste de todos, como Genetic, al tratarse del método más lento de todos.

Por último, basándonos en los resultados analizados de cada ciudad concluimos que el método de optimización más útil en relación coste/ tiempo es Tournament.

Tournament, con un coste similar, a veces prácticamente igual, que Hillclimb y Annealing se diferencia de éstos en que utiliza tiempos muy bajos para obtener la solución óptima llegando a tardar un máximo de 70 segundos para Bruselas y un mínimo de 25 segundos para Sevilla.



## EN RELACIÓN A TAMAÑO DE RED/COSTE

En este apartado hablamos de la rentabilidad de aplicar a cada ciudad el diseño de nuestro carril bici pero teniendo en cuenta el tamaño de nuestra red y también el coste.

Es por eso que para la ciudad de Valencia lo más óptimo sería aplicar una distancia de 5919 kms con un coste de 25.

Para la ciudad de Bruselas, lo más efectivo sería diseñar una red de 14344 kms con un coste de 49.

Teniendo en cuenta la ciudad de Sevilla, una distancia de 5678 kms con un coste de 24 sería la mejor solución.

En último lugar la ciudad de Toulouse maximizaría su rendimiento si utilizara una red de 6332 kms con un coste de 20.

Todos estos datos superiores los tendríamos en cuenta a la hora de maximizar el presupuesto para nuestra red pero también tenemos que tener en cuenta que a más kms de carril bici el precio de éste aumenta así que se tomaría una decisión u otra en función del presupuesto final de cada ciudad.

## CIUDAD EN LA CUAL SERÍA MEJOR APLICARLO

Ahora vamos a ponernos en la situación de que nuestro proyecto solo pudiéramos aplicarlo a una ciudad y no a todas como hemos estado realizando en apartados anteriores.

Para elegir cuál sería la ciudad a la que aplicar nuestra red de carril bici vamos a partir de los datos anteriores donde establecíamos nuestra red de carril bici más óptimo partiendo de la máxima distancia y el coste.

Para ello hemos realizado un cálculo sencillo para determinar un factor de importancia de cada ciudad en relación a la máxima distancia/ coste y de aquí hemos obtenido los resultados consecuentes.

- Valencia:  $5919/25 = 236,76$
- Bruselas:  $14344/49 = 292,73$
- Sevilla :  $5678/24 = 236,58$
- Toulouse:  $6332/20 = 316,6$

Teniendo en cuenta los resultados anteriores donde:

- $316,6 > 292,73 > 236,76 > 236,58$

## Diseño de red de carril bici basado en el tráfico de bicicletas

Podemos establecer que la mejor ciudad a la que aplicar la red de carril bici sería Toulouse, seguida de Bruselas, Valencia y por último Sevilla.

Ya a simple vista se podía observar como Toulouse aún siendo la segunda ciudad que más kilómetros utiliza, es la que menor coste tiene.

## 9. Implantación

---

La implantación de los diversos carriles bicis en las cuatro ciudades con las que hemos trabajado tendría un gran y buen impacto en diversos ámbitos. En este punto, a continuación, vamos a comentar cada ciudad por separado.

### VALENCIA



Figura 17: Plano actual de carril bici de la ciudad de Valencia

Valencia es una ciudad que a lo largo de los años ha ido convirtiéndose en una ciudad más sostenible y europea; En los últimos años se ha acentuado aún más con la implantación de sus estaciones de bicicleta Valenbisi en el año 2010 y con la creciente ampliación y reparación de carril bici de la ciudad.



Figura 18: Estación de Valenbisi

Hoy en día la ciudad funciona de manera correcta tras nueve años desde su implantación y favorece a crear una ciudad saludable y ecológica. En los últimos años se ha ido aumentando el número de ciclistas en Valencia hasta llegar a un 30% más, se han llegado a registrar hasta 4152 ciclistas diarios en calles principales como Colón y esto es gracias al creciente carril bici. Valencia es actualmente la tercera ciudad por detrás de Sevilla y de Barcelona más *bike friendly* de España.

Una mayor ampliación de carril bici en Valencia no haría más que seguir favoreciendo este crecimiento hacia una ciudad más verde y sana ya que hoy en día Valencia dispone de más de 156 kilómetros de red de carril bici distribuido por toda la ciudad y esto podría aumentar con el tiempo.

Además, como se ha comentado en el punto de recogida de datos, existen diversos factores relacionados con el clima Valenciano que favorecen la utilización de la bicicleta como transporte. Y es que, Valencia cuenta con un índice de lluvia anual muy bajo y una temperatura media envidiable para otras ciudades europeas.

## BRUSELAS



Figura 19: Carril bici de la ciudad de Bruselas actual y ampliación para 2020.

A continuación comentamos cual sería el impacto de aplicar nuestra red de carril bici a la ciudad de Bruselas.

Bruselas es una ciudad que lleva años de ventaja a otras ciudades europeas en lo que al transporte en bicicleta se refiere, entre ellas Valencia.

Los ciudadanos de Bruselas de media disfrutan de un total de 2,3 horas en bicicleta a la semana y realizan de media 6,9 viajes a la semana.

Hoy en día entre un 7% y un 8% de los viajes en la ciudad, según datos oficiales, se realizan en bicicleta. El gobierno belga desea que estos datos vayan incrementando con el tiempo y lleguen a alcanzar un 20%.

Este sería un objetivo realista en un futuro próximo teniendo en cuenta la mejora de las infraestructuras que se realizan en nuestro proyecto dado que acabaría de dar el pequeño empujón que la población de Bruselas necesita.

Aquí en la figura 9 se puede observar el impacto real que genera que una calle tenga carril bici.



Figura 20: Antes y después avenida del canal Charleroi -nueva infraestructura ciclista

## SEVILLA

En tercer lugar volvemos a tener una ciudad española como lo es Sevilla. Como ya sabemos, los europeos nos llevan años de ventaja en el transporte en bicicleta y es por eso que hace ya unos años decidimos imitarlos sobre todo por los efectos positivos que genera en nuestras vidas y en el medio ambiente.

Un ejemplo de metrópoli que ha ido creciendo con el paso del tiempo es Sevilla. A continuación en la figura 10 podemos ver como ha ido ampliándose la red de carril bici de la ciudad. Se pasó de realizarse unos 6605 viajes diarios, a realizarse unos

72000 en 2011, datos que evidencian que la ampliación de la red mueve a más personas a transportarse utilizando la bicicleta como medio de transporte.

Este carril bici, que actualmente cuenta con unos 156 kilómetros de red de carril bici, se vería beneficiado y ampliado tras la mejora de la infraestructura de red realizado en nuestro trabajo.

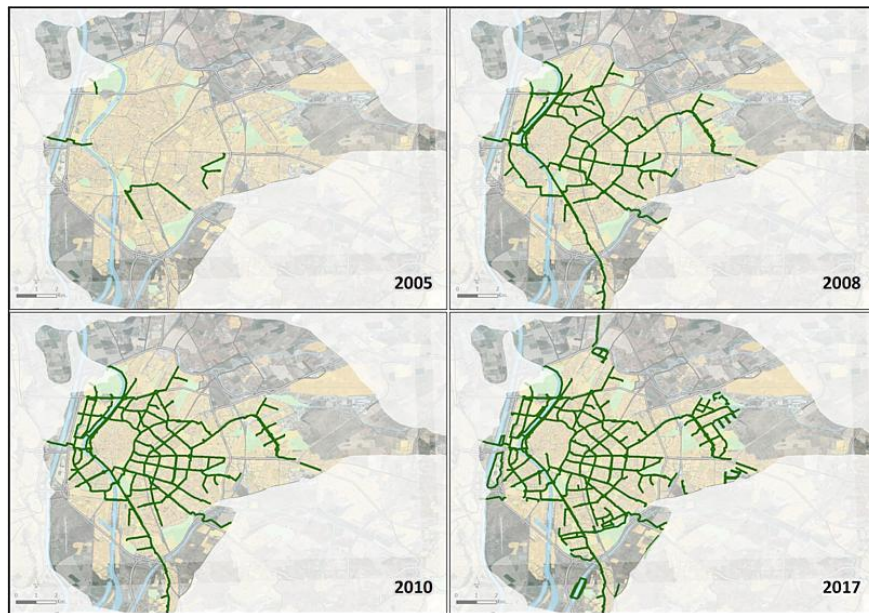


Figura 21: Desarrollo carril bici Sevilla a lo largo de los años

Teniendo en cuenta la figura anterior podemos entender que tenga tanto impacto el uso de la bicicleta hoy en día. Sin duda el año 2008 fue el paso agigantado que precedió al diseño de red que existe en la ciudad hoy en día. Sin embargo en 2011 un cambio de gobierno de la ciudad provocó que este crecimiento se ralentizara, es por ello que apenas podemos observar cambios significativos en la figura anterior entre la red de carril bici en 2008 y en 2010.

Es a partir del 2015 cuando se vuelve a impulsar más su uso, y lo que se pretende hoy en día es que los datos de ciudadanos que utilizan la bicicleta como transporte continúe aumentando.

Además dados los datos climatológicos de la ciudad de Sevilla, ya comentados en el punto anterior de nuestro trabajo llamado recogida de datos, Sevilla cuenta con un clima excepcional y una temperatura media envidiable que incita más que disuade al uso de la bicicleta para moverse por la ciudad.

De hecho ha sido en diversas ocasiones declarada por la prestigiosa página web *copenhagenize.eula*, la cuarta mejor ciudad del mundo para circular en bicicleta. Los tres primeros puestos los ocuparían Ámsterdam, Copenhague y Utrecht.

## TOULOUSE

Por último hablaremos de nuestra última ciudad, Toulouse.

Toulouse es una ciudad pensada para recorrerla tanto andando como en bicicleta más que utilizando el coche, ya que existen una gran cantidad de calles peatonalizadas. En 2013 una revista realizó un ranking de las mejores ciudades francesas para circular en bicicleta, y Toulouse ocupó el tercer puesto tras Estrasburgo y Burdeos.

De todas formas siempre se puede mejorar y para poder alcanzar el primer puesto hace falta una ampliación y una mejora en la calidad de la red de carril bici.



*Figura 22: Red de carril bici de la ciudad de Toulouse*

En la figura anterior podemos observar la red de carril bici actual en la ciudad de Toulouse. Ésta cuenta con una longitud de red de carril bici de 490km y un 15% de las calles diseñadas para las bicicletas. Datos que podrían ampliarse y mejorarse con los resultados que hemos recogido para nuestro diseño de red de carril bici .

## IMPLANTACIÓN GENERAL

Una vez expuestas las cuatro ciudades con las que hemos trabajado se ha llegado a la conclusión de que el hecho de ampliar y mejorar la red de carril bici de la ciudad implica en algunos casos disminuir un carril para el tránsito de coches,

motos, buses con el consecuente enfado de conductores que se oponen a la creciente ampliación del carril bici.

La intención de fomentar el uso de transporte público y la bicicleta lleva implícito el deseo de reducir el número de vehículos privados con el fin de hacer más verdes las ciudades. Es por ello que no se busca que existan más atascos o retenciones si no que esto sirve para concienciar a la población y reduzcan el uso del coche a no ser que sea estrictamente necesario su utilización.

Podemos concluir resumiendo que, en general, el diseño de red de carril bici realizado en nuestro trabajo empleando los diversos métodos de optimización garantizaría que la ampliación real de la red de carril bici de estas ciudades, y basándonos en los datos históricos que respaldan nuestra opinión fundada, fomentara aún más el uso de la bicicleta y ayudara a convertir las ciudades en lugares más respetuosos con el medio ambiente.



# 10. Encuesta Movilidad

---

Para acercarnos más a la opinión ciudadana sobre el transporte en bicicleta y conocer el impacto real que la red de carril bici tiene en la población hemos realizado una encuesta a través de Google y las redes sociales teniendo en cuenta diversos factores.

Los factores tenidos en cuenta para todos los encuestados son los siguientes:

- El Sexo de los encuestados.
- El rango de edad de las personas que han realizado la encuesta. Desde menores de 18 años, entre 18 y 25 años, entre 26 y 40 años y mayores de 40 años.
- La frecuencia de uso de la bicicleta. Desde ciudadanos que la utilizan siempre que pueden hasta quien no la usa nunca.
- Forma de transporte más utilizado. (Coche, moto, bicicleta, Bus/Metro/Tranvía, A pie)
- En que grado influencia la infraestructura de carril bici el uso de ésta.

Los factores tenidos en cuenta en caso de NO utilizar la bicicleta de manera frecuente:

- Motivo principal (Seguridad, comodidad, cansancio, otra)

Los factores tenidos en cuenta en caso de SÍ utilizar la bicicleta de manera habitual:

- Motivo principal (Cómoda, Rápida, Económica, Saludable, Ecológica)
- Como fomentar un mayor uso de la bicicleta. Desde aumentar el carril bici o mejorarlo, hasta realizar más publicidad de los beneficios del uso de la bicicleta.

A continuación detallaremos los resultados de la encuesta y sacaremos diversas conclusiones a partir de éstas.

Han sido encuestadas 149 personas de las cuales podemos concluir:

En primer lugar hablamos de que la mayoría de las personas encuestadas son de sexo femenino llegando, como podemos ver en el gráfico, a alcanzar un 75,8% que representa a 113 de los 148 encuestados, mientras que los encuestados de sexo masculino representan tan solo un 24,2% de los encuestados.

## Sexo

149 respuestas

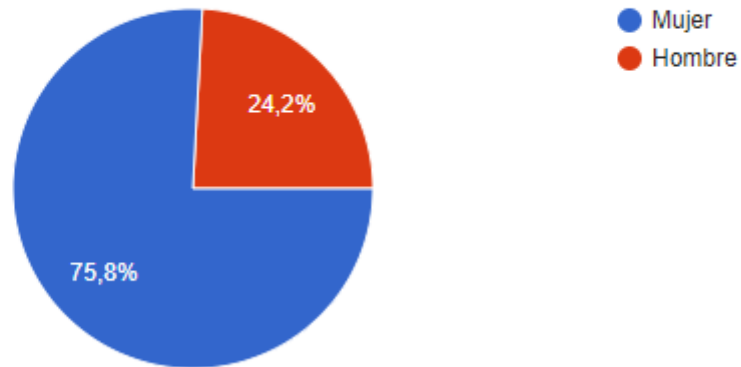


Figura 23: Gráfico Sexo encuestados

A continuación podemos observar el gráfico relacionado con la edad de los encuestados donde se aprecia una mayoría de encuestados mayores de 40 años con un 49,7% , prácticamente la mitad de éstos, 74, seguido de entre 18 y 25 años con un 38,3% que representa a 57 encuestados.

## Rango de edad

149 respuestas

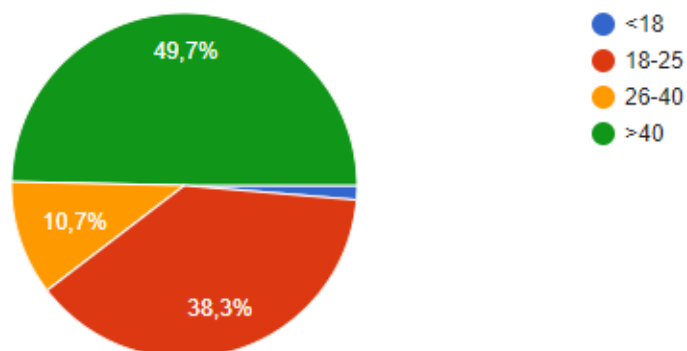


Figura 24: Gráfico Rango de edad encuestados

Si continuamos analizando el gráfico por consecuente se puede visualizar en que medida utiliza la población el transporte en bicicleta. Más de la mitad de los encuestados no utilizan nunca o rara vez la bicicleta, ese porcentaje exacto es de 66,45% de los encuestados, mientras que el resto pertenecen al restante 33,55% que la utilizan siempre que pueden o varias veces.

### ¿Utilizas la bicicleta?

149 respuestas

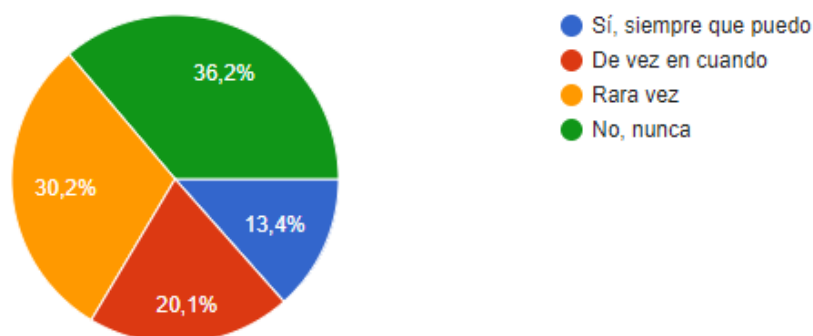


Figura 25: Gráfico uso de la bicicleta

En relación con el anterior gráfico, exponemos en nuestra siguiente figura la forma de transporte más común entre los encuestados. Un dato importante a destacar es el hecho de que tan solo un 6% utiliza la bicicleta como medio de transporte habitual, 9 encuestados, lo mismo ocurre con la moto con un 7.4% y la mayoría suele optar por el coche, un 45,6% que representa a 68 encuestados o, en menor medida, el transporte en bus/metro/tranvía o a pie.

### Forma de transporte utilizada con más frecuencia

149 respuestas

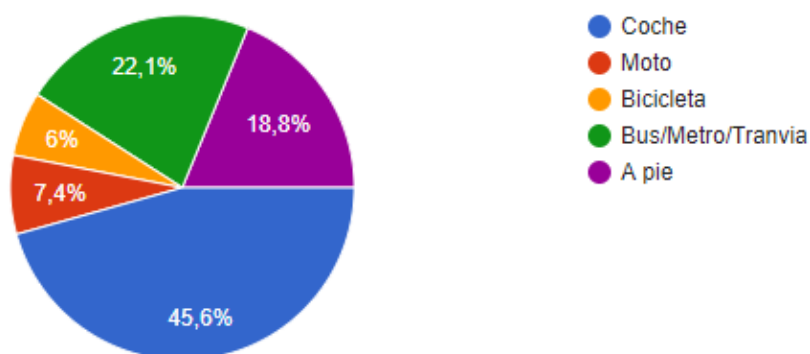


Figura 26: Gráfico forma de transporte

En la siguiente sección de nuestra encuesta decidimos separar a aquellos ciudadanos que utilizaban la bicicleta de manera habitual, dato que representa a 99 personas encuestadas, de aquellas personas que nunca o a penas hacen uso de ésta, dato que representa a las 50 restantes.

Por un lado aquellas personas que hacen uso de la bicicleta de manera habitual respondieron a la pregunta de por que motivo principal decidían hacerlo. La encuesta muestra una gran diversidad de opiniones pero sobretodo destacan aquellos que utilizan la bicicleta porque la consideran saludable con un 40% de los encuestados, 20 de los 50 y aquellos que consideran la bicicleta un medio de transporte rápido con un 30% de los encuestados, 15 de los 50. Destaca también el pequeño porcentaje que utiliza la bicicleta teniendo en cuenta como prioridad que su uso es ecológico, tan solo un 10%.

### Que aspecto te anima más a tí a utilizar la bicicleta:

50 respuestas

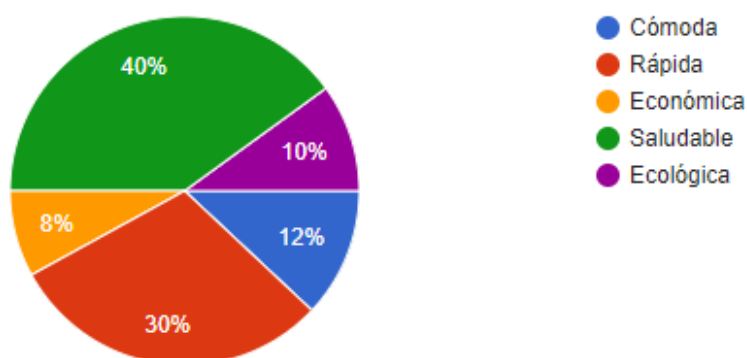


Figura 27: Gráfico motivos de utilizar la bicicleta

Por consecuente se les preguntó a los encuestados como creían que se podría fomentar un mayor uso de la bicicleta. El punto más repetido fue sin duda el Aumento de la red de carril bici con un 58%, seguido de que este carril de bici fuese más seguro, opinión que respalda un 44% de los encuestados. Otras propuestas personales de algunos de los encuestados incluyeron la posibilidad de diseñar bicicletas menos pesadas que no cuesten de transportar o la creación de más puestos de parking seguros.

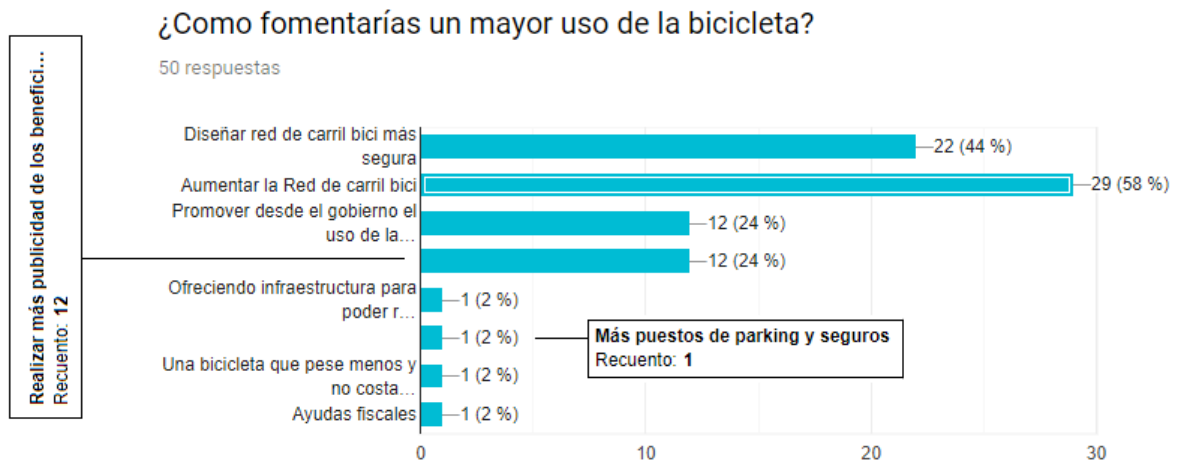


Figura 28: Gráfico opciones para fomentar el uso de la bicicleta

Por otro lado aquellas personas que no hacen uso de la bicicleta de manera habitual respondieron a la pregunta del motivo por el cual no lo hacían. Las opciones preestablecidas eran tres, la falta de seguridad, falta de comodidad y el cansancio que genera ir en bici. De estas tres opciones la mayoría de los encuestados coincide en que no utilizan la bicicleta porque no la consideran segura para circular por la ciudad, siendo estos un 38,4%. Sin embargo un gran porcentaje de encuestados tiene su propia opinión sobre no utilizar la bicicleta, en concreto un 36,3%. Para ser más exactos, algunos de estos motivos van desde quien opina que la infraestructura es nula o inexistente para realizar los recorridos que realiza, quien no tiene bicicleta o la tiene rota, a quien no le sirve para ir a trabajar por tener que transportar diversos bultos, o incluso quien no la utiliza por el clima de la ciudad en la que vive. A continuación en el gráfico podemos observar todas las respuestas diferentes dadas por los encuestados.

### ¿Por qué no utilizas con frecuencia la bicicleta?

99 respuestas

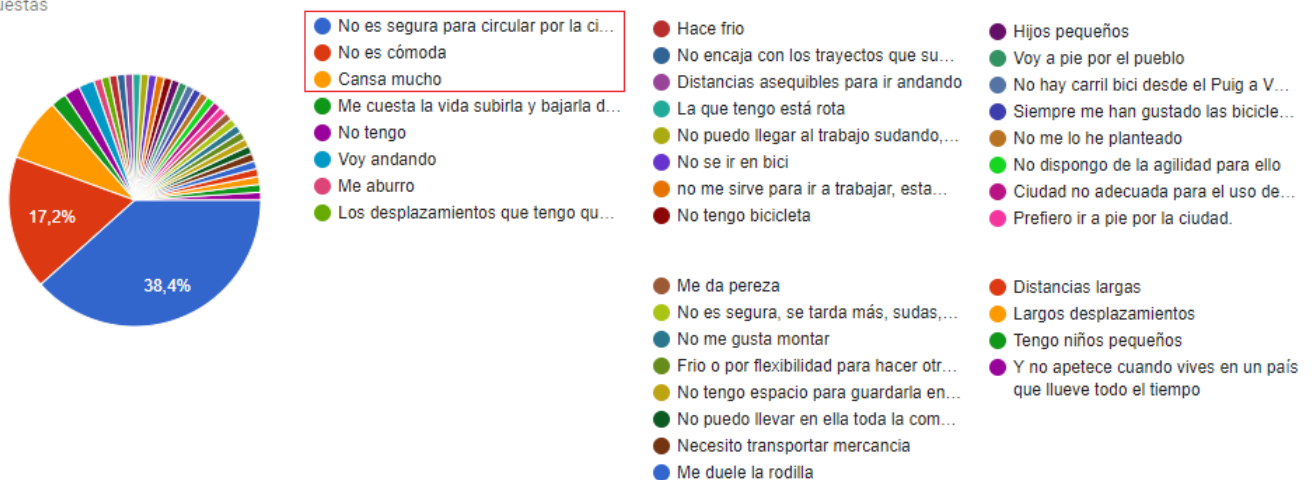


Figura 29: Gráfico motivos de no utilizar la bicicleta

Por último se ha preguntado a todos los encuestados si, de existir una mejor infraestructura de carril bici utilizarían más la bicicleta. Los resultados son variados para aquellos que en un principio no suelen utilizar la bicicleta y aquellos que sí que lo hacen. De todas formas, como se puede observar a continuación la gran mayoría está de acuerdo en que sí que circularían más en bicicleta o por lo menos se lo plantearían, en caso de una ampliación y mejora de la red de carril bici segura.

En primer lugar tenemos el gráfico de aquellos que no utilizan la bicicleta comúnmente.

### ¿Utilizarías más la bicicleta en caso de existir una mejor y más segura infraestructura de carril bici?

99 respuestas

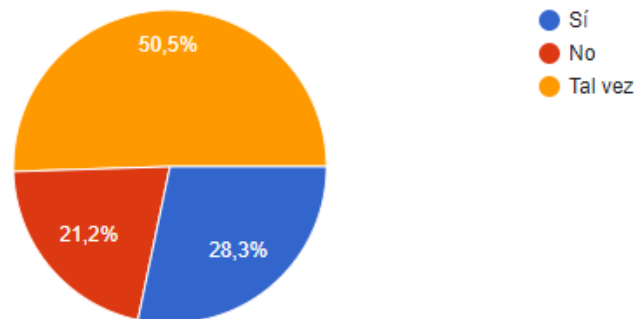


Figura 30: Gráfico mejora de infraestructura para NO usuarios

Y a continuación tenemos el gráfico de aquellos que sí que utilizan la bicicleta de manera habitual.

### ¿Utilizarías más aún la bicicleta en caso de existir una mejor y más segura infraestructura de carril bici?

50 respuestas

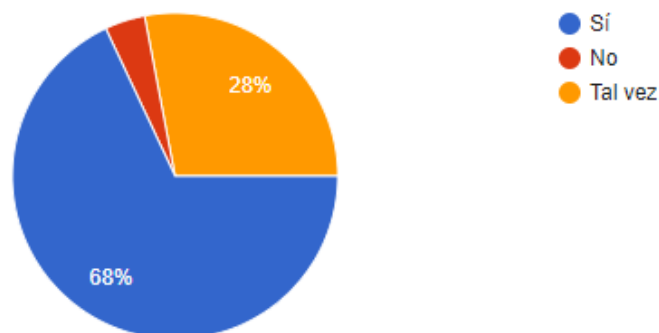


Figura 31: Gráfico mejora de infraestructura para usuarios

Como conclusión general de la encuesta realizada podemos decir que la mayoría de la población todavía considera que las infraestructuras de carril bici existentes están lejos de ser las esperadas y necesitan ser mejoradas y ampliadas para satisfacer así las peticiones de los ciudadanos y conseguir así que el porcentaje de gente que utilice la bici como principal medio de transporte aumente considerablemente.

A través de esta encuesta que hemos realizado, se puede observar la utilidad de nuestro proyecto y la relación que ésta tiene con él, ya que los ciudadanos consideran muy importante una red óptima de carril bici por la que poder circular de forma segura y rápida, por lo que la optimización del diseño de red de carril bici que proponemos en nuestro TFG serviría para impulsar más el transporte en bicicleta .

# 11. Conclusiones

---

En el presente punto vamos a hablar de las conclusiones a las que hemos llegado tras finalizar la realización y redacción del trabajo final de grado.

En primer lugar y haciendo referencia a los resultados del trabajo podemos concluir, como hemos redactado en el punto anterior, que el método Genetic es sin duda el más efectivo a la hora de medir el coste de diseño de nuestro carril bici; y en términos de tiempo empleado y teniendo en cuenta el coste, Tournament es considerado el método más eficiente.

Para llevar a cabo mi proyecto en primer lugar se requirió un pequeño trabajo de investigación sobre las Smart cities, el diseño de red de carril bici y los diversos métodos de optimización. Como segundo paso y antes de adentrarnos de lleno en el trabajo hube de aprender R. A continuación, una vez realizados los pasos previos nos dedicamos a extraer de nuestra "base de datos", donde se puede encontrar información para una gran cantidad de ciudades, los datos y archivos csv necesarios para la realización de nuestro proyecto y así aplicarlos a nuestro código. Una vez obtenidos los resultados para los cinco métodos de optimización, estos fueron comparados tanto entre ellos como entre las ciudades y se sacaron diversas conclusiones acerca de éstos.

## 11.1 EXPERIENCIA PERSONAL

Por consecuente hablamos del trabajo y el tiempo que he empleado en la realización de mi trabajo de fin de grado. Este TFG me ha llevado más tiempo del que inicialmente esperaba ya que me han ido surgiendo diversas dudas y problemas que añadidos a los iniciales hicieron que tuviera que retrasar la presentación de mi trabajo.

Uno de mis grandes retos ha sido aprender el lenguaje de programación R; Lo que en un primer momento pensé que sería mucho más rápido y sencillo, acabó retrasándome mucho a la hora de entender los métodos y programar.

Con todo esto, he conseguido solucionar los diversos problemas y cumplir los retos que el trabajo me ha propuesto con la ayuda y gracias a mi tutor Cesar Ferri Ramírez y a mi cotutor Fernando Martinez Plumed que han estado atentos en todo momento solucionándome cualquier duda con la cual me he atascado durante mucho tiempo y sobretodo animándome a valerme por mi misma y solucionarlas yo.



## 11.2 RELACIÓN DEL TRABAJO CON ESTUDIOS CURSADOS

Como he explicado en el punto anterior, he trabajado en mi proyecto utilizando el lenguaje de programación R, lenguaje que nunca había utilizado y que no es estudiado en mi rama de especialización.

Habiendo cursado ingeniería informática, me he especializado en el grado en la rama de tecnologías de la información. En mi rama nos centramos en el apartado de las bases de datos, seguridad informática, diseño web, administración de sistemas y redes y demás temas relacionados. Dado que mi trabajo final de grado se centra más en la inteligencia artificial y por tanto se encuadra dentro de la rama especializada de computación, el tema elegido tiene poco que ver con lo cursado en mi especialización y es por ello que me ha requerido más trabajo llevarlo a cabo.

Aún así es sencillo de entender el funcionamiento del diseño de red de carril bici ya que hemos tratado cada estación de bicicleta como si de un nodo se tratase; Y las conexiones entre estos nodos (aristas) que son los carriles de bicicleta que unen las estaciones, conforman grafos.

Si planteamos nuestro problema partiendo del punto de los grafos podemos relacionar nuestro trabajo con algunas asignaturas cursadas a lo largo de la carrera como por ejemplo Matemática discreta en primer curso que cuenta con un apartado completo dedicado a los Grafos.

Por lo tanto en nuestro proyecto hemos trabajado con el lenguaje de programación R, aplicado la teoría de grafos, y analizado en profundidad cinco métodos de optimización para lo cual he investigado el funcionamiento de cada uno de estos cinco algoritmos para luego saber aplicarlos a nuestro código en R.



## 12. Referencias

---

### FIGURAS Y TABLAS:

1. <https://www.e-zigurat.com/blog/en/smart-cities-urbanization-challenges/>
2. <https://cocinarrecetasdepostres.net/sevici-de-sevilla-como-alquilar-una-bicicleta-en-sevilla/>
3. <https://nacto.org/wp-content/uploads/2012/07/ColumbusBMPFinalApril2008.pdf>

Referencia en pág. 90.

Data source: City of Columbus, Franklin County, Mid-Ohio Regional Planning Commission U.S Census. Map created by Alta Planning+Design. January 2008.

4. [http://www.civil.ist.utl.pt/~martinez/PDF/FICO/compendium\\_109.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~martinez/PDF/FICO/compendium_109.pdf) pág. 10.
5. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089571779190014X> pág. 7
6. <https://rstudio.com/>
- 12 y 13. Código ejemplo de esta página web. <https://eliocamp.github.io/codigo-r/2018/01/buen-ejemplo-reproducible-en-r/>
14. <https://pdfs.semanticscholar.org/88cc/1d6de232f88a887133c384bff637edd72ec9.pdf> pág. 5 fig3

20. <https://comarcalcv.com/ayuntamiento-actualiza-plano-del-carril-bici-la-ciudad-valencia/>

21. <http://www.valencia-cityguide.com/es/transporte/bicicletas-urbanas.html>

22. <https://www.thebulletin.be/map-brussels-new-regional-cycle-network-revealed>

23. <https://www.uci.org/news/2019/brussels—a-shift-to-a-cycling-city>

24. <https://www.euronews.com/2018/10/12/seville-how-a-small-spanish-city-became-a-cycling-hub-for-all-view>

25. <http://www.velo.toulouse.fr/Magazine/Les-dossiers/La-carte-des-itineraires-cyclables-de-Toulouse-edition-2015-2016>

Tabla 1.

<https://pdfs.semanticscholar.org/88cc/1d6de232f88a887133c384bff637edd72ec9.pdf> pág. 4 tabla1

Tabla 2.

<https://pdfs.semanticscholar.org/88cc/1d6de232f88a887133c384bff637edd72ec9.pdf> pág. 7 tabla4

### DATOS BIBLIOGRÁFICOS:

1. Rstudio (Punto 4 Herramientas)

<https://www.rstudio.com/products/rstudio/features/>

2. Cycling Network Projects: A Decision-Making Aid Approach ( Base de nuestro proyecto) [http://ceur-ws.org/Vol-1831/paper\\_8.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-1831/paper_8.pdf)

3. Raw Data (Datos de nuestro proyecto para Bruselas, Valencia, Sevilla y Toulouse) <http://dmip.webs.upv.es/BikeSharingDemand/>

4. Paquetes optimización R (Punto 4.2 Funciones)

<https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/vignettes/dplyr.html>

5.R ( Punto 4 Herramientas) <https://www.genbeta.com/desarrollo/r-un-lenguaje-y-entorno-de-programacion-para-analisis-estadistico>  
<https://www.socialnautas.es/r-frente-a-excel/>

6.Tournament Search Algorithm (Punto 6 Análisis del Problema)  
[https://gdudek.el.pcz.pl/files/Tournament\\_Searching10.pdf](https://gdudek.el.pcz.pl/files/Tournament_Searching10.pdf)  
<https://www.geeksforgeeks.org/tournament-selection-ga/>

7.Tesis doctoral Carril bici Málaga (Punto 3. Estado del Arte)  
<https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13745/2016000001472.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

8.Estado del arte NDP (Punto 3. Estado del Arte)  
[https://www.researchgate.net/publication/41111573\\_Rules\\_for\\_Biologically\\_Inspired\\_Adaptive\\_Network\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/41111573_Rules_for_Biologically_Inspired_Adaptive_Network_Design)

9.Optimización combinatoria(Punto 3. Estado del Arte)  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/09/10/optimizacion-combinatoria/>

10.Estado del arte Columbus(Punto 3. Estado del Arte)  
<https://nacto.org/wp-content/uploads/2012/07/ColumbusBMPFinalApril2008.pdf>

11.Estado del arte Milan(Punto 3. Estado del Arte)  
<ftp://ftp.repec.org/opt/ReDIF/RePEc/bcu/papers/iefewp68.pdf>

12.Estado del arte Lisboa(Punto 3. Estado del Arte)  
[http://www.civil.ist.utl.pt/~martinez/PDF/FICO/compendium\\_109.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~martinez/PDF/FICO/compendium_109.pdf)

13.MILP(Punto 3. Estado del Arte)  
[https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSSA5P\\_12.9.0/ilog.odms.ide.help/OPL\\_Studio/opllanguser/topics/opl\\_languser\\_app\\_areas\\_MILP\\_what.html](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSSA5P_12.9.0/ilog.odms.ide.help/OPL_Studio/opllanguser/topics/opl_languser_app_areas_MILP_what.html)

14.Estado del arte Railway(Punto 3. Estado del Arte)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089571779190014X>

15.Ampliación carril bici Valencia (Punto 9 Implantación)  
<https://magnet.xataka.com/en-diez-minutos/valencia-ha-logrado-multiplicar-su-numero-ciclistas-su-receta-simple-poner-carriles-bici>

16.Montecarlo (Punto 6 Análisis del Problema)  
<https://www.cerem.es/blog/cuanto-vale-el-riesgo-el-metodo-monte-carlo>

17.Hillclimb (Punto 6 Análisis del Problema)  
[https://www.cs.upc.edu/~bejar/ia/transpas/teoria/2-BH3-Busqueda\\_local.pdf](https://www.cs.upc.edu/~bejar/ia/transpas/teoria/2-BH3-Busqueda_local.pdf)

18.Annealing (Punto 6 Análisis del Problema)  
<https://www.cs.upc.edu/~mabad/IA/SIMULATED%20ANNEALING.pdf>

19.Bruselas infraestructuras (Punto 9 Implantación)  
<https://www.uci.org/news/2019/brussels--a-shift-to-a-cycling-city>  
<https://www.bikecitizens.net/cities/brussels/>

20.Smart Cities (Punto 2 Smart City)  
[https://marquesme.com/ciudad-inteligente-smart-city/?gclid=CjwKCAjw9L\\_tBRBXEiwAOWVVcb7YTz5fX7RRswbm7wHXCQNYgQsNDxNRf4D0CqwKVI-RC1NI\\_qI\\_axoCQzcQAvD\\_BwE](https://marquesme.com/ciudad-inteligente-smart-city/?gclid=CjwKCAjw9L_tBRBXEiwAOWVVcb7YTz5fX7RRswbm7wHXCQNYgQsNDxNRf4D0CqwKVI-RC1NI_qI_axoCQzcQAvD_BwE)  
<http://www.smartcities.es/>  
<https://ovacen.com/wp-content/uploads/2013/09/que-son-las-smart-cities.png>

21. Sevilla (Punto 9 Implantación)

[https://www.diariodesevilla.es/sevilla/uso-bicicleta-Sevilla-multiplicanos\\_0\\_724427570.html](https://www.diariodesevilla.es/sevilla/uso-bicicleta-Sevilla-multiplicanos_0_724427570.html)

<https://www.euronews.com/2018/10/12/seville-how-a-small-spanish-city-became-a-cycling-hub-for-all-view>

22. Toulouse (Punto 9 Implantación)

<http://www.velo.toulouse.fr/Magazine/Les-dossiers/La-carte-des-itineraires-cyclables-de-Toulouse-edition-2015-2016>

<https://gboost.bike/palmares-des-villes-francaises-ou-il-fait-bon-pedaler/>

<https://pdfs.semanticscholar.org/88cc/1d6de232f88a887133c384bff637edd72ec9.pdf>

23. Bike Rental and Weather Data across Dozens of Cities (Punto 5 Recogida de datos)

<https://pdfs.semanticscholar.org/88cc/1d6de232f88a887133c384bff637edd72ec9.pdf>

24. Shortest Path Algorithm

<https://brilliant.org/wiki/shortest-path-algorithms/>

25. Algoritmo de Floyd-Warshall

<https://estructurasite.wordpress.com/algortimo-de-floyd-warshall/>

26. Algoritmo de Bellman-Ford

[https://arodrigu.webs.upv.es/grafos/doku.php?id=algoritmo\\_bellman\\_ford](https://arodrigu.webs.upv.es/grafos/doku.php?id=algoritmo_bellman_ford)

27. Algoritmo de Dijkstra

<https://www.codingame.com/playgrounds/7656/los-caminos-mas-cortos-con-el-algoritmo-de-dijkstra/el-algoritmo-de-dijkstra>

28. Algoritmo A\*

<http://idelab.uva.es/algoritmo>

29. Bicis y el medio ambiente( 1.Introducción)

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23000780>

# 13. ANEXOS

---

La figura 26 muestra el código del método de optimización Tournament, el cual ya ha sido explicado detalladamente en los puntos anteriores 6 y 7 de nuestro proyecto.

```
Tournament<- function(dreal,LIMRED,mpesos,pct=0.015)
{
  initso1<-montecarlo(1000,dreal,LIMRED,mpesos)
  costini<-costso1(initso1$msol,LIMRED,dreal,mpesos)

  tamneighparent<-10

  bestso1<-initso1
  bestcost<-costini

  n<-ncol(bestso1$msol)
  for(i in 1:n)
  {
    listneigh<-getlistneigh(bestso1$msol)#lista de vecinos de la sol actual(al principio la inicial)
    neighparent<-listneigh[sample(1:n,10)] #dividimos en sets de 10 que se enfrentarán en un torneo
    newso1<-getbestso1(neighparent,dreal,LIMRED,mpesos)#elegimos la mejor solución del set de 10
    if(newso1$costso1<=bestso1$costso1){
      bestso1<-newso1
      costnew<-costso1(bestso1$msol,LIMRED,dreal,mpesos)
    }
  }
  Tournament<-list("msol"=bestso1$msol,"costso1"=costnew$cost,"igr"=costnew$gr,"distred"=costnew$distred)
}
```

Figura 32: Método Tournament del código opt.R

A continuación, la figura 27 muestra el método para conseguir la mejor solución de una lista de vecinos de una solución específica. Para ello, como se puede observar, el código recorre esta lista de vecinos y va comparando sus costes de forma iterativa. Al final la solución con menor coste se almacenará como el mejor vecino de la solución.

```

getbestsol<-function(listneigh,dreal,LIMRED,mpesos)
{
  mincost<-Inf
  iters<-length(listneigh)
  for (i in 1:iters)
  {
    dob<-costsol(listneigh[[i]],LIMRED,dreal,mpesos)
    if (mincost>dob$cost)
    {
      mincost<-dob$cost
      igb<-dob$gr
      distredmin<-dob$distred
      msol<-listneigh[[i]]
    }
  }
  if (mincost==Inf) getbestsol<-list("msol"=NULL,"costsol"=Inf,"igr"=NULL,"distred"=NULL)
  else getbestsol<-list("msol"=msol,"costsol"=mincost,"igr"=igr,"distred"=distredmin)
}

```

Figura 33: Método getbestsol del código opt.R

La figura 28 mostrada abajo hace referencia al método para averiguar el coste de una solución. Para ello antes de nada comprobamos que nuestra red no sea infinita y, una vez establecido, creamos un grafo indirecto a partir del cual vamos a analizar las soluciones; En caso de ser un grafo válido, primero se calcula las distancias más óptimas entre todas las estaciones, se minimizan y se suman, dando así el coste total de una solución.

```

costsol <- function(sol,LIMRED,dreal,mpesos)
{
  distred<-sum(dreal*sol)## distancia de la red, debemos comprobar que sea menor que LIMRED para que sea válida
  if (distred>LIMRED)
  {
    print("solucion larga")
    costsol<-list("cost"= Inf,"gr"=NULL)
  }
  else
  {
    ig <- graph.adjacency(dreal*sol, mode="undirected", weighted=TRUE)
    # plot(ig, edge.label=round(E(ig)$weight, 3)) #para mostrar la red
    cl<-clusters(ig)

    if (cl$no>1)
    {
      print("solucion no valida")
      #numero de clusters. Debe ser 1, si es mayor indica que las estaciones no están comunicadas
      costsol<-list("cost"= Inf,"gr"=NULL)
    }
    else
    {
      distancia_sol <-shortest.paths(ig, mode="out")##calcula distancias optimas entre todas las estaciones de la red
      objetivo<-distancia_sol*mpesos## objetivo a minimizar
      print(objetivo)
      dob<-sum(objetivo)
      costsol<-list("cost"= dob,"gr"=ig,"distred"=distred)
    }
  }
}

```

Figura 34: Método costsol del código opt.R

Por último el método que observamos en la figura 29 sirve exclusivamente para averiguar una lista de vecinos aleatoria de una solución.

```
getlistneigh<-function(msol)
{
  ### We simply add a TRUE for row
  lsol<-list()
  iters<-ncol(msol)
  for (i in 1:iters)
  {
    newsol<-msol
    if(sum(newsol[,i]==FALSE)>0) msol[which(newsol[,i]==FALSE)[sample(1:sum(newsol[,i]==FALSE),1)],i]<-TRUE
    # we convert randomly one FALSE in TRUE
    #newsol<-lower.tri(newsol)*newsol
    lsol[[i]] <-newsol
  }
  getlistneigh<-lsol
}
```

Figura 35: Método `getlistneigh` del código `opt.R`

## 13.2 LIBRERÍAS Y FUNCIONES DE R

En este punto se van a explicar las principales librerías y funciones utilizadas en R y Rstudio que hemos utilizado en nuestro código para poder desarrollar tanto los métodos de optimización como el resto de funciones.

### ***Require(dplyr)***

Require se utiliza para instalar y cargar diversos paquetes en R; En especial Dplyr nos permite utilizar funciones como `filter()`, `arrange()`, `select()`, `summarise()`.

### ***Require(lubridate)***

Este paquete sirve en especial para las fechas. Nos permite usar funciones como `dmy()` o `weekdays()` que nos transforma una fecha de tipo `xx-xx-xxxx` a día de la semana.

### ***source("nombredearchivo.R")***

Source nos sirve para cargar/ejecutar un archivo R.

### ***read.csv("nombredearchivo.csv")***

Sirve para leer archivos que se encuentren dentro del mismo directorio en el que estemos trabajando y cargarlos a nuestro programa.

***write.csv(archivoaguardar, file="nombredearchivo.csv", row.names= FALSE)***

Su función consiste en guardar el fichero con el que estemos trabajando (archivoaguardar) en la carpeta nombredearchivo.csv.

El último parámetro nos indica que al guardar el archivo no queremos que las filas estén numeradas .

***rbind(archivo1,archivo2,archivo3)***

Función que sirve para unir dos o más archivos en uno solo.

***max(variable) y min(variable)***

Estas funciones se utilizan para sacar el máximo y el mínimo. Este valor puede corresponder por ejemplo a una lista de valores de un vector o como en el caso del proyecto, un valor específico de una columna de un csv.

***matrix(0,N,N)***

Creación de una matriz de NxN vacía (todos sus valores son 0).

***lower.tri(matriz)***

Teniendo en cuenta la función anterior, ésta está directamente relacionada ya que nos sirve para triangular inferiormente una matriz.

***print(variable)***

Como bien indica su nombre, la función sirve para imprimir en pantalla aquello que deseemos, ya sea el resultado de una operación o un mensaje (el cual deberá ir entrecomillado".

***sapply(variable1, class)***

En el caso del proyecto se ha utilizado esta función para comparar los tipos de datos(boolean, integer, double...) de cada columna de los csv y que a la hora de trabajar con ellos no hubiera errores.