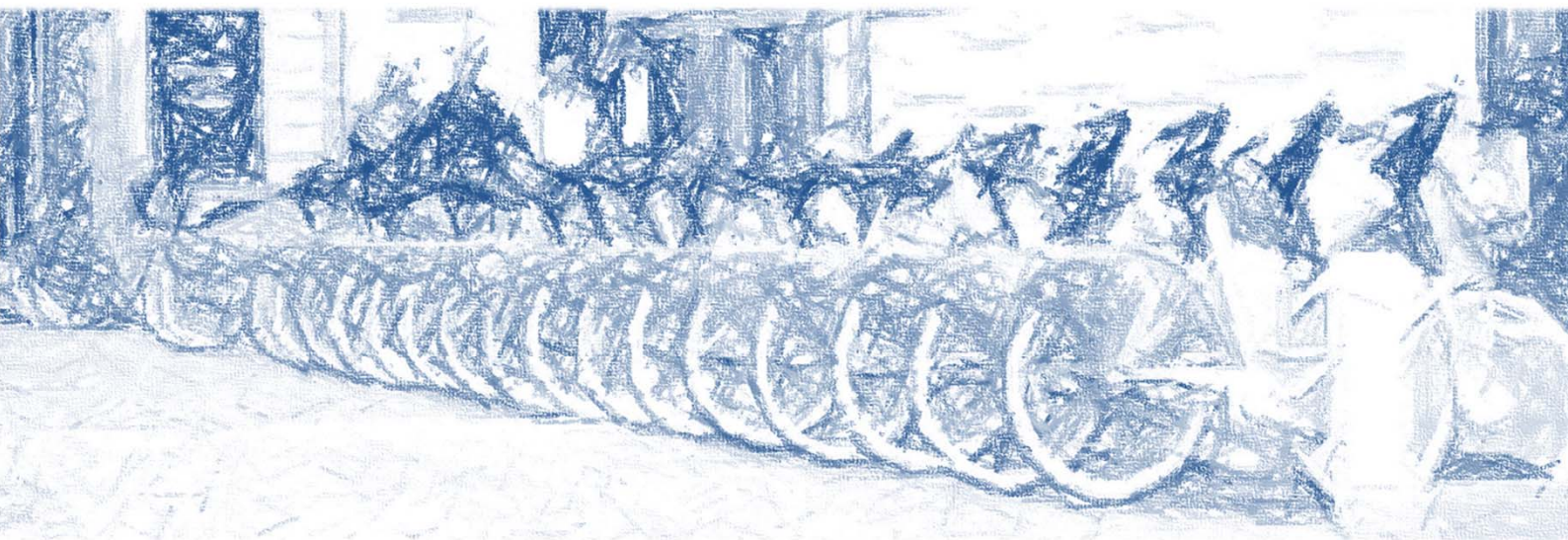


Localización óptima de bases de bicicletas públicas en Madrid mediante los Sistemas de Información Geográfica



Marta Latorre Sánchez
Tutor: Dr. Javier Gutiérrez Puebla

Trabajo de Fin de Máster
Febrero de 2012

Máster en Tecnologías de la Información Geográfica
Universidad Complutense de Madrid

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto “*Comportamiento y modelización de la demanda ciclista: transición hacia una ciudad ciclable*” con referencia TRA2010-17035, del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España dirigido por el Doctor Andrés Monzón de Cáceres.

Índice

I.	PRESENTACIÓN.....	1
I.1	INTERÉS DEL TEMA	1
I.2	OBJETIVOS.....	2
I.2.1	Objetivo General.....	2
I.2.2	Objetivos Específicos	2
I.3	ESTRUCTURA DEL TRABAJO	3
II.	ESTADO DEL ARTE	5
II.1	LOS SISTEMAS DE BICICLETAS PÚBLICAS	6
II.2	MODELOS DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE EQUIPAMIENTOS Y SERVICIOS EN EL ENTORNO DE LOS SIG	8
III.	DATOS Y METODOLOGÍA	11
III.1	LOS DATOS DE PARTIDA	11
III.2	LA RED.....	12
III.2.1	Modelo Digital de Elevaciones	12
III.2.2	Asignación de la pendiente a los arcos de la red	13
III.2.3	Valor del tiempo	14
III.2.4	Creación de la Red	14
III.3	ANÁLISIS DE LA DEMANDA POTENCIAL: PUNTOS DE DEMANDA	15
III.3.1	Demanda potencial: generación de viajes	15
III.3.2	Demanda potencial: atracción de viajes	18
III.3.3	Demanda total de viajes	19
III.4	BASES DE CARÁCTER OBLIGATORIO: BASES EN LA RED DE TRANSPORTE PÚBLICO	20
III.5	TRATAMIENTO DE LA LOCALIZACIÓN DE LOS CANDIDATOS	24
III.6	MODELOS DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA Y ESCENARIOS	25
III.7	CARACTERIZACIÓN DE LAS BASES PROPUESTAS.....	25
III.8	ANÁLISIS DE LA ACCESIBILIDAD DE LAS BASES PROPUESTAS	26
IV.	RESULTADOS	29
IV.1	LOCALIZACIÓN DE LAS BASES USANDO UN MODELO DE MÍNIMA IMPEDANCIA	29
IV.2	LOCALIZACIÓN DE LAS BASES USANDO UN MODELO DE MÁXIMA COBERTURA	35

IV.3	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE AMBOS MODELOS.....	42
IV.3.1	Distancias medias entre bases	42
IV.3.2	Demanda cubierta por las bases	43
IV.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS DE BASES PARA LOS MODELOS DE MÁXIMA COBERTURA: BASES ATRACTORAS, BASES GENERADORAS, BASES MIXTAS.	44
IV.5	ACCESIBILIDAD POTENCIAL DE LAS BASES	48
V.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	53
VI.	BIBLIOGRAFÍA	55

Índice de Tablas y Figuras

TABLAS

Tabla 1 Velocidades de circulación en bicicleta en función de la pendiente [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	14
Tabla 2 Estaciones de la red de Metro que albergarán bases de bicicletas.....	21
Tabla 3 Características de los Intercambiadores de Transporte.....	22
Tabla 4 Accesibilidad a las bases de bicicletas a través de la red: criterios de Mínima Impedancia:.....	35
Tabla 5 Accesibilidad a las bases de bicicletas a través de la red: criterios de Máxima Cobertura.	41
Tabla 6 Distancia media ponderada por la demanda entre bases de bicicletas [m].	42
Tabla 7 Demanda cubierta por las bases a 200 m.....	43
Tabla 8 Tipología de las bases	47
Tabla 9 Accesibilidad media a las bases	51

FIGURAS

Figura 1 Diseño estratégico de un sistema público de alquiler de bicicletas.....	7
Figura 2 Viajes generados ponderados por la población en el área de estudio [N° de viajes. m^{-2}]	17
Figura 3 Viajes atraídos en el área de estudio [N° de viajes. m^{-2}].....	19
Figura 4 Total de viajes en el área de estudio [N° de viajes. m^{-2}].....	20
Figura 5 Bases de la Red de Transporte público	23
Figura 6 Ejemplo de reducción del número de puntos candidatos a albergar las bases de bicicletas.....	24
Figura 7 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 100 bases.	29
Figura 8 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 200 bases	30
Figura 9 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 300 bases	30
Figura 10 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 400 bases	31
Figura 11 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 500 bases	31
Figura 12 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 100 bases ..	32
Figura 13 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 200 bases ..	33

Figura 14 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 300 bases ..	33
Figura 15 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 400 bases ..	34
Figura 16 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 500 bases ..	34
Figura 17 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 100 bases.	36
Figura 18 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 200 bases	36
Figura 19 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 300 bases	37
Figura 20 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 400 bases	37
Figura 21 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 500 bases	38
Figura 22 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 100 bases	39
Figura 23 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 200 bases	39
Figura 24 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 300 bases	40
Figura 25 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 400 bases	40
Figura 26 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 500 bases	41
Figura 27 Distancia media ponderada entre bases.....	42
Figura 28 Demanda cubierta por las bases a 200 m.	43
Figura 29 Tipología de las bases en el escenario de 100 bases.....	45
Figura 30 Tipología de las bases en el escenario de 200 bases.....	45
Figura 31 Tipología de las bases en el escenario de 300 bases.....	46
Figura 32 Tipología de las bases en el escenario de 400 bases.....	46
Figura 33 Tipología de las bases en el escenario de 500 bases.....	47
Figura 34 Clasificación tipológica de las bases [%].....	48
Figura 35 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 100 bases.	49
Figura 36 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 200 bases.	49
Figura 37 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 300 bases.	50
Figura 38 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 400 bases.	50
Figura 39 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 500 bases.	51

I. Presentación

La preocupación en los últimos años por una movilidad sostenible está fomentando la promoción de medios de transporte sostenibles y saludables (Comisión Europea, 2009). Por este motivo, desde la Comisión Europea se propone trabajar en la implantación de medios de transporte de escasas o nulas emisiones atmosféricas, y de marcado carácter ecológico. Es en este punto en el que entra en juego el uso urbano de la bicicleta como medio de transporte. Actualmente, numerosas ciudades han implementado políticas de fomento del uso de la bicicleta urbana como medio de transporte.

El Ayuntamiento de Madrid ha promovido en los últimos años diferentes proyectos para fomentar la movilidad ciclista, entre los que destacan el Plan Director de Movilidad Ciclista (Ayuntamiento de Madrid, 2008), el Anillo Verde Ciclista que circunvala Madrid, con una longitud de sesenta y cuatro kilómetros, con varias vías que penetran en la ciudad hasta zonas verdes como la Casa de Campo, el Parque del Retiro, el parque Madrid Río, o el Parque Juan Carlos I, la reserva de espacio para aparcamientos de bicicletas (aparca-bici), y la adaptación de diferentes vías a la circulación ciclista como es el caso de la Calle Serrano entre María de Molina y la Plaza de la Independencia. En el año 2009 el Ayuntamiento de Madrid presentó el proyecto MyBici, de alquiler de bicicletas públicas, cuya primera fase de implantación incluía ciento veinte estaciones en los distritos de Centro y parte de los de Retiro, Moncloa y Salamanca. Este nuevo sistema entraría en operación en primavera de 2011, pero debido a varios condicionante el plan se ha visto suspendido.

Actualmente no existe, por tanto, ningún servicio en funcionamiento de bicicletas públicas de alquiler, por lo que el municipio de Madrid resulta especialmente atractivo para llevar a cabo el análisis. El ámbito de estudio es la denominada "Almendra Central" de Madrid, la zona delimitada por la Calle 30. Se trata de una vía de gran capacidad, de circunda el centro de Madrid. El área interna de la Calle 30 tiene una gran diversidad de usos de suelo, así como una fuerte densidad, debido a la importante implantación de actividades, lo que le hace especialmente interesante como objeto de análisis para el presente estudio.

I.1 Interés del Tema

El desafío actual del transporte es la sostenibilidad, para ello se apuesta por reducir las distancias y favorecer desplazamientos sostenibles, ya sean a pie o en bicicleta. En una ciudad como Madrid este desafío pasa por el fomento de la intermodalidad y la complementariedad entre modos de transporte público y el incremento de los viajes a pie o en bicicleta (Martens, 2004). La elección modal de un usuario está basada en diferentes aspectos que varían en función de las necesidades y el medio elegido para el desplazamiento, estando la elección ciclista condicionada por un número mayor de factores (Ortúzar et Al. 1999).

Se plantea el uso de la bicicleta como modo óptimo de transporte urbano ya que pueden llegar a cubrir distancias normales de siete kilómetros, y al escaso espacio que ocupa su

infraestructura, ya sea en convivencia con medios motorizados o con los peatones. Por otra parte, la bicicleta es un medio de transporte autónomo, flexible, accesible y limpio, lo que le hace de este medio de transporte un medio adecuado para los desplazamientos cotidianos (PRESTO, 2010).

Entre las actuaciones más destacadas para la promoción de la bicicleta en la ciudad se encuentra la implantación de sistemas públicos de bicicletas, medio de transporte con una aceptación cada vez mayor, y más seguro, tanto desde el punto de vista del usuario, como de la infraestructura (IDAE, 2010).

La implantación de un sistema ciclista pasa por adecuar las vías a la nueva infraestructura vial, crear zonas de aparcamientos para bicicletas y localizar las bases de alquiler/préstamo de bicicletas públicas de manera óptima en el área de estudio. Una herramienta muy eficaz a la hora de elaborar análisis de carácter espacial (Rybarczyk, Wu. 2010) son los Sistemas de Información Geográfica. Concretamente permiten elaborar modelos de origen-destino, o localizaciones de nuevas infraestructuras ciclistas en el ámbito de estudio (Larsen, El-Geneidy. 2009).

I.2 Objetivos

Actualmente están teniendo lugar numerosas experiencias en torno a la promoción del transporte urbano en bicicleta mediante la mejora o ampliación de las infraestructuras dedicadas a la bicicleta (carriles, aparcamientos, etc.), la implantación de medidas para facilitar y aumentar la seguridad en sus desplazamientos (calmado de tráfico) o la participación directa de los ayuntamientos proponiendo sistemas públicos de alquiler. En el primer caso de promoción de la bicicleta, es necesario conocer las zonas de anclaje, mientras que en el caso de la promoción de sistemas de bicicleta públicas hay que localizar las bases, y definir el tipo de base, el número de anclajes y la utilidad de las mismas. En el presente estudio se va a elaborar una metodología para la localización óptima de las bases de bicicletas en un sistema de bicicletas público.

I.2.1 Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo es **proponer una metodología de análisis**, utilizando las herramientas de **análisis de redes** dentro de los **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**, que permita establecer los puntos de **localización óptima de una red de bases de alquiler de bicicletas públicas**. Esta metodología será testada en el centro de Madrid, dentro del espacio definido por la denominada “Almendra Central”.

I.2.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general es necesario cubrir una serie de objetivos específicos, que pueden agruparse en las siguientes cuestiones:

- ✓ Conocer los trabajos que se están realizando dentro de las políticas de promoción de la bicicleta en ámbito urbano, y las posibilidades de aplicación de los SIG en las mismas,
- ✓ Recopilar la información estadística y cartográfica necesaria para realizar una propuesta de localización óptima de bases de alquiler de bicicletas en la Almendra Central de Madrid,
- ✓ Definir una red de transportes en el entorno de un SIG,
- ✓ Identificación de los puntos potenciales de demanda:
 - Identificación de los principales puntos de usuarios potenciales,
 - Identificación de los principales puntos de demanda potencial,
- ✓ Aplicar modelos de localización óptima de servicios (*Location-Allocation*) integrados en los entornos SIG para la propuesta de distribución de las bases. Dentro de estos modelos se propone utilizar dos soluciones diferentes (Máxima cobertura y Mínima impedancia).
- ✓ Evaluar diferentes escenarios en función del número de bases incluidas en cada propuesta.
- ✓ Evaluar la demanda asignada a las estaciones en las soluciones alcanzadas para cada uno de los escenarios propuestos.
- ✓ Caracterizar las bases según se trate de espacios de generación o atracción de viajes, con el fin de determinar las necesidades de bicicletas a lo largo del día.
- ✓ Evaluar la utilidad de las estaciones mediante el análisis de la accesibilidad potencial de las estaciones en cada uno de los escenarios.

El resultado esperado de este trabajo es la identificación y localización de los puntos en los que establecer las bases públicas de alquiler.

I.3 Estructura del trabajo

Para la elaboración del trabajo se ha procedido a plantear los objetivos y el alcance del trabajo. Posteriormente, se realiza una revisión bibliográfica, analizando la obra científica de otros autores relativa a la temática en estudio. En un tercer capítulo se presentan los datos utilizados así como la metodología empleada, para presentar en un cuarto apartado los resultados obtenidos. En el capítulo final se extraerán las conclusiones del estudio, así como las posibles futuras líneas de trabajo.

II. Estado del Arte

En la actualidad se intenta dar respuesta a la inquietud por una movilidad cada vez más sostenible que puede complementar la red de transporte existente en el ámbito urbano (Bachand-Marleau *et Al.* 2011).

La movilidad ciclista ha sido objeto de estudio desde otros puntos de vista de corte más sociológico. Se pueden destacar aquellas investigaciones en las que se trata de conocer el tipo de usuario del transporte ciclista (Ortúzar *et Al.*, 1999; Barnes and Krizek, 2005). Este tipo de trabajos permiten conocer las características de los usuarios de la bicicleta y el tipo de desplazamientos que se realizan en ella, identificando la demanda potencial.

Otros autores han preferido analizar la demanda y el uso ciclista en relación a las infraestructuras existentes o necesarias para que su uso se extienda al conjunto de demanda potencial (Larsen y El-Geneidy, 2009). Para ello, se han realizado encuestas de Origen-Destino entre ciclistas y conductores, obteniendo como resultado que prácticamente la mitad de los viajes motorizados en ámbito urbano no superan los cinco kilómetros (PRESTO, 2010).

El Ayuntamiento de Sevilla ha realizado un estudio sobre la movilidad en bicicleta. De este se obtiene como conclusión que el impulso de políticas de fomento de la movilidad ciclista ha causado un cambio en el modo de transporte de los usuarios, ya sea de bicicletas públicas o privadas. Esto se debe a una ganancia en cuanto a ahorro económico y tiempo en el desplazamiento (Ayuntamiento de Sevilla, 2010). Estos mismos datos se desprenden de encuestas realizadas entre los usuarios de los sistemas públicos de alquiler de Lyon (Grand Lyon, 2007) y París (Mairie de Paris, 2008).

Existen numerosas experiencias que han nacido de investigaciones sobre las prácticas idóneas para la elaboración de planes ciclistas (Litman *et Al.*, 2006) en las que se plantean las recomendaciones óptimas para la implementación de un transporte ciclista de calidad y de gran calado en la población. Entre estas recomendaciones destacan las acciones de calmado de tráfico, programas de educación vial o el diseño de ciudades ciclables entre otras.

Las principales preocupaciones en las políticas de implantación de bicicletas de uso público son las decisiones a largo plazo de inversiones en instalaciones para las estaciones de bicicletas, el coste de preparación para la construcción de carriles específicos, los gastos de viaje para los usuarios de bicicleta entre otros (Lin y Yang, 2011). También se han implementado, aunque no siempre con mucho éxito modelos que pueden predecir niveles de uso futuro de la bicicleta teniendo en cuenta el uso actual de la infraestructura (Barnes y Krizek, 2005).

Los esfuerzos previos para desarrollar tales herramientas han tratado normalmente las estimaciones de demanda de descriptores básicos de la población, usos del suelo, y las instalaciones ciclistas de la zona de estudio.

Tal y como se ha comentado, entre las actuaciones de promoción de la bicicleta, los sistemas públicos cobran cada día un papel más significativo. El propósito de estos sistemas de

préstamo es que el usuario pueda coger una bicicleta en cualquier base y depositarla allí donde le resulte más cómodo en el lugar de destino (Lin y Yang, 2011).

II.1 Los sistemas de bicicletas públicas

Estos sistemas empezaron a implantarse en la década de 1960 a partir de bicicletas cedidas o donadas para su uso público. La primera experiencia, tuvo lugar en Ámsterdam (Países Bajos) en 1968, donde fueron puestas al servicio de la población bicicletas pintadas de blanco (“*White Bicycles*”) para su uso, sin ningún tipo de contrato ni supervisión por parte de la Administración. A esta iniciativa se sumaron ciudades como Madison (Wisconsin – Estados Unidos de América), Portland (Oregón – EE.UU.), Milán (Italia), entre otros. Esta primera generación de bicicletas estaba basada en la responsabilidad cívica y comunitaria, pero al carecer de sistemas de disuasión frente a robos, y sistemas de control, en la década de 1990 tuvo lugar la implantación de un sistema de segunda Generación. Este sistema fue inaugurado en 1995 en Copenhague (Dinamarca). Este sistema permite el préstamo de una bicicleta localizada en los puntos de anclaje mediante el depósito de una moneda. Este sistema tuvo problemas de robos de bicicletas, aunque supuso un fuerte impulso para la utilización de la bicicleta como medio urbano de transporte.

La tercera generación utiliza medios tecnológicos más complejos, permitiendo la identificación de los usuarios, así como de la bicicleta, creando un mayor control sobre las bicicletas dispuestas a tal efecto. Asimismo se permite el uso gratuito durante un tiempo limitado. Estos sistemas automáticos permiten que el sistema esté operativo durante veinticuatro horas mediante lectores de tarjetas (bancarias o específicas del sistema) o bien mediante la incorporación de las aplicaciones para telefonía móvil (Bonnette, 2007).

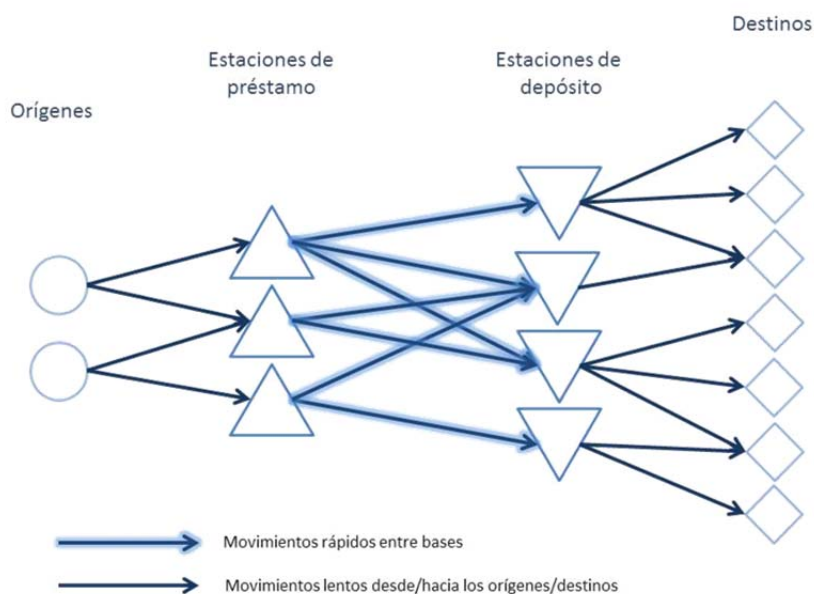
Desde el plan denominado “*White Bicycles*” de la década de 1960, se han promovido sistemas públicos en las diferentes ciudades como Barcelona, Berlín, Montreal, París, etcétera. El éxito de los sistemas de bicicletas públicas depende, en gran medida, de la red de carriles bici y la ubicación de las estaciones de préstamo de bicicletas. Sin embargo, hay relativamente pocos estudios en la literatura que se centran en el diseño estratégico de estos sistemas de bicicletas públicas (Lin y Yang, 2011).

El éxito de la implantación de este nuevo medio de transporte estriba en la localización de las bases, ya que para que tenga aceptación entre la población usuaria estas no deben estar a más de una determinada distancia del origen y el destino final del viaje, y de una determinada distancia entre ellas, siendo trescientos metros la distancia idónea entre bases, y quinientos metros la distancia máxima aceptable, aunque una sobre-cobertura puede ser perjudicial para el éxito del sistema (Shu *et Al.*, 2010), tal y como se muestra en la *Figura 1* Estas distancias entre bases se cumplen en ciudades que ya han implantado este servicio público de alquiler con importante éxito como Barcelona, Sevilla o París.

Por otra parte, el estudio de la implementación de un sistema de alquiler público de bicicletas requiere tener en cuenta unas distancias o tiempos máximos de desplazamiento, que según

autores se han estipulado entre dos kilómetros y medio y cinco kilómetros (Jensen *et Al.*, 2010) lo que equivaldría a unos quince minutos en bicicleta. No obstante las distancias que un usuario está dispuesto a recorrer en bicicleta varían en función del propósito del desplazamiento. Actividades como el trabajo o el estudio suelen implicar mayor distancia de desplazamiento, mientras que actividades de ocio suelen implicar un desplazamiento menor (Iacomo *et Al.*, 2008).

Figura 1 Diseño estratégico de un sistema público de alquiler de bicicletas.



JENN-RONG LIN; TA-HUI YANG. *Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints*. Transportation Research Part E, 47 (2011). 284-294

Fuente: Lin, Yang. 2011

La intermodalidad es un aspecto básico en el análisis de implantación de bases de bicicletas públicas (Martens, 2004 y 2007) debido a las grandes distancias que suelen recorrerse en las ciudades o las áreas metropolitanas para desplazarse al lugar de trabajo o de estudio. Es por este motivo que se potencian sistemas de *Bike-and-Ride* para hacer un uso más eficiente de las redes de transporte público, tanto de las existentes, como de la nueva red ciclista. De esta manera se pueden tener todas las ventajas de los distintos medios de transporte empleados, teniendo un efecto positivo en la movilidad (Bonnette, 2007).

La integración con otros sistemas de transporte público y un acceso ágil a los sistemas de bicicletas facilita un uso masivo que permitiría la reducción del uso del automóvil para viajes cortos dentro del área central, lo que aliviaría la congestión del tráfico y reduciría el ruido y contaminación del aire (Lin y Yang, 2011).

El éxito de un sistema público de bicicleta depende en gran medida de la satisfacción del usuario, por lo tanto es necesario conocer la distribución de los potenciales ciclistas. Para ello

es se realizan estudios de distribución espacial de esta potencial población que se encuentra en una “distancia razonable en bicicleta”, que varía en función del contexto. El Departamento de Planificación urbana de la Ciudad de Nueva York ha establecido cinco millas (*NYC Dept. City Planning*, 2009), mientras que otros autores han establecido un máximo de cinco kilómetros (Jensen *et Al*, 2010). Estas son las distancias que suelen recorrerse en transporte público o privado, por lo que la bicicleta puede abarcar este nicho de demanda de transporte urbano en trayectos cotidianos, en términos de duración y coste del viaje (*Quay Communications Inc*, 2008). Además de la localización de la población ciclista potencial es necesario considerar la distribución de los principales tipos de actividades (lugar de empleo, localización de servicios, ocio, etc.) para poder comunicar adecuadamente estas zonas.

Se han desarrollado diferentes modelos para predecir los viajes no motorizados (Schwartz, 1999; Turner, Hotternstein y Shunk, 1997; Turner, Texas et al., 1997, Rybarczyk y Wu, 2011). Estos métodos se han aplicado en los planes de movilidad ciclista en general. Landis (1996) propuso el *Latent Demand Score* (LDS) para estimar la demanda de viajes con los generadores y atractores de viaje en bicicleta, tales como empleos, centros comerciales, parques y escuelas, etc. En el caso concreto del sistema de préstamo de bicicletas de la ciudad de Nueva York, la memoria analiza la distribución de la demanda potencial de usuarios integrando variables de densidad de población, densidad de trabajadores, instalaciones de servicios, y la proximidad a actividades culturales, de ocio o comerciales (*NYC Dept. City Planning*, 2009).

Conocer la distribución de la demanda potencial, diferenciando espacios de generación y atracción de viajes, permite además anticiparse a las demandas de viajes asimétricas de la mayoría de las grandes ciudades. Esto es fundamental en la planificación de los sistemas de redistribución de bicicletas a lo largo del día, diferenciando horas punta y horas valle.

Finalmente, un elemento más, pero de menor importancia en la localización óptima de las bases de préstamo son los condicionantes físicos (anchura de las aceras, iluminación suficiente, etc.) y aquellos elementos de índole perceptual (seguridad, percepción de la distancia hacia el origen/destino del trayecto, etc.).

II.2 Modelos de localización óptima de equipamientos y servicios en el entorno de los SIG

En los estudios de carácter espacial, es necesario contar una herramienta de ayuda a la toma de decisiones que integre la componente geográfica. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten esta integración. Existen experiencias internacionales en las que mediante los SIG se realizan evaluaciones multicriterio para la planificación de infraestructura ciclista (Larsen y El-Geneidy, 2009; Rybarczyk y Wu; 2010). En los diferentes estudios se han tenido en cuenta factores favorables para la circulación en bicicleta (densidad de población, localización de actividades económicas, centros educativos, zonas de recreo) así como factores inhibidores (colisiones, ausencia de seguridad vial, vandalismo).

En esta misma línea, existe una preocupación por hallar localizaciones óptimas mediante herramientas de información geográfica. Entre estas preocupaciones destacan estos cuatro temas (Bosque y Moreno, 2004):

- ✓ Demanda: distribución espacial de la misma,
- ✓ Oferta: distribución espacial de los lugares donde se oferta el servicio o la localización de estaciones obligatorias,
- ✓ Lugares candidatos: en los cuales es posible situar los nuevos puestos de oferta,
- ✓ Red de comunicaciones: red con plena conectividad por la cual tendrán lugar los desplazamientos necesarios para poner en contacto la oferta y la demanda.

En los entornos SIG se han desarrollado herramientas de localización óptima de servicios que pueden ser de gran utilidad a la hora de localizar las estaciones de bicicletas en función de la distribución de la demanda. Cooper (1963) destaca la formalización de la noción de ubicación y distribución, donde varias instalaciones se localizan en el espacio y la demanda discreta es asignada a un centro. Este modelo consiste en encontrar, entre un conjunto de sitios, la ubicación de las instalaciones de un determinado tipo, así como su capacidad, con el fin de cumplir con un objetivo (u objetivos) predefinido, al tiempo que satisfacen la demanda de un determinado número de centros (Ribero, A. y Pais, A, 2002).

En función de los objetivos perseguidos, existen varias soluciones mediante los cuales resolver los problemas de localización (Bosque y Moreno, 2004):

- ✓ **Eficiencia:** se persigue una localización espacial de las bases óptima, de manera a que la relación demanda-localización sea adecuada, reduciendo al máximo los costes de desplazamientos desde los puntos de demanda hasta las soluciones halladas. Esto puede estudiarse sobre dos modelos: la minimización del desplazamiento total de los usuarios, y la maximización de la accesibilidad espacial de la población potencialmente usuaria hasta las bases de bicicletas.
- ✓ **Equidad espacial:** se busca homogeneizar la accesibilidad espacial de la demanda potencial a las bases de bicicletas. De esta manera se evita penalizar aquellos puntos de demanda, que por su aislamiento no tienen una buena conexión con la red.
- ✓ **Cobertura espacial:** se desea cubrir en un determinado radio de distancia o tiempo a la mayor población posible. Para ello se han desarrollado diferentes modelos, entre los que destaca el problema de cobertura máxima, que garantiza que el máximo número posible de potenciales usuarios se encuentren a una determinada distancia de la red de bases de bicicletas.

Una vez conocidos los antecedentes, se va a presentar la metodología empleada.

III. Datos y Metodología

El presente estudio se va a realizar en el espacio central del municipio de Madrid: la denominada Almendra Central. Esta zona, cuyos límites precisos son la vía de circunvalación Calle 30, tiene una gran diversidad de usos, así como una gran densidad en su uso, combinando uso residencial de diversas densidades con usos comerciales, recreativos, deportivos, culturales y económicos. De esta forma, como se ha recomendado en otros trabajos, se opta por implantar el sistema en la zona más densa y céntrica de la ciudad, para gradualmente llegar a las zonas periféricas (IDAE, 2007; NYC Dept. City Planning, 2009).

El Sistema de Información Geográfica usado en la elaboración del análisis es *ArcGIS Desktop 10*, y las diferentes extensiones de que dispone. En este trabajo se usan las extensiones de análisis espacial (*Spatial analyst*) y la análisis de redes (*Network Analyst*).

III.1 Los datos de partida

Para la elaboración del estudio es necesario contar con información cartográfica y estadística, proveniente de varias fuentes.

- ✓ **Mapa Topográfico de la Comunidad de Madrid:** mapa topográfico completo a escala 1: 10 000 a partir del cual se elaborará el Modelo Digital de Elevaciones.
- ✓ **Red viaria:** callejero digital del municipio de Madrid del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. Tiene plena conectividad, y permite generar una red SIG en la que simular la movilidad peatonal en este estudio.
- ✓ **Población:** datos del Instituto Nacional de Estadística: Censo de Población y Viviendas, y Padrón continuo de Habitantes del año 2010, consultados en Abril de 2011. La información se ha obtenido a nivel de sección censal y de distrito respectivamente.
- ✓ **Portales:** localización de los portales de Madrid obtenida a través del proyecto Cartociudad, del Instituto Geográfico Nacional. Información descargada en Abril de 2011. A partir de la población a nivel de microsecciones se han utilizado los portales para relocalizar la población a nivel de punto.
- ✓ **Usos del suelo:** información de usos obtenida a partir del microseccionado de Madrid facilitado por el Departamento de Geografía Humana de la Universidad Complutense de Madrid. Estos datos han sido utilizados para afinar la localización de la población de las secciones censales.
- ✓ Puntos principales de **actividad económica:** información relativa a la localización y volumen de empleados obtenida del Directorio de Actividades Económicas. Datos del año 2007.

- ✓ Encuesta Domiciliaria de Movilidad del año 2004, que contiene los **datos de viajes atraídos y generados** a nivel de Zona de Transporte. Consorcio Regional de Transportes de Madrid.
- ✓ **Red de Transporte público:**
 - ~ Red de Metro, Red de Cercanías: información facilitada por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, consultada en Junio de 2011.
 - ~ Intercambiadores de Transporte y polos de intercambio: información obtenida a partir del Consorcio Regional de Transportes de Madrid y del Ayuntamiento de Madrid. Consultas realizadas en Marzo de 2011.

El tratamiento de la información se ha hecho a partir de los Sistemas de Información Geográfica, hojas de cálculo y una búsqueda en las bases de datos de las diferentes administraciones.

III.2 La Red

La circulación en bicicleta se va a simular sobre el callejero del municipio de Madrid. Previamente a la creación de la red es necesario comprobar que el callejero no contiene errores de topología. Una vez comprobado que el callejero tiene plena conectividad, se establece que todas las calles son transitables tanto a pie como en bicicleta y se permite cualquier tipo de giro (“giros universales” y “giros en U”), lo que se corresponde con la realidad peatonal y ciclista del área de estudio.

La modelización de la red con el objeto de simular la movilidad peatonal y en bicicleta, pasa por conocer las pendientes de los diferentes arcos de la red para poder aplicar velocidades de circulación en bicicleta diferenciadas en función del tipo de pendiente. Es necesario, en primer lugar, obtener un Modelo Digital de Elevaciones, en adelante MDE, a partir del cual conocer las pendientes en cada arco.

A partir de esta información, se obtienen los tiempos de recorrido en cada arco en función del tipo de pendiente (ascendente o descendente), y del valor de misma, realizando una diferenciación por velocidades de circulación en bicicleta y a pie.

III.2.1 Modelo Digital de Elevaciones

En primer lugar se procede a elaborar el MDE, con una resolución de diez metros de lado, para conocer el valor de las pendientes, ya que Madrid es un municipio con fuertes pendientes debido a su compleja topografía. La presencia de estas pendientes implica, un sobreesfuerzo en subida, y un aumento de la velocidad en bajada a la hora de circular en bicicleta, por lo que es necesario diferenciar estos valores de velocidad en función de la pendiente en los arcos de la red.

La modelización del área de estudio se ha hecho a partir de la información topográfica del Mapa 1:10 000 de la Comunidad de Madrid. Para ello se utilizan las herramientas de Análisis Espacial de ArcGIS 10. Los posibles errores del MDE son corregidos con las herramientas de Hidrología dentro del módulo de Análisis Espacial.

El Mapa Digital de la Comunidad de Madrid contiene información altimétrica, tanto de curvas de nivel como de cotas, lo que facilita la creación de un MDE detallado debido a la importante cantidad de información topográfica y altimétrica que contiene.

Los valores de pendiente en porcentaje se obtienen a partir del algoritmo¹ de la versión 10 de ArcInfo. Una vez creada la capa con los valores de las pendientes, se añaden éstos a la red viaria, obteniendo de este modo unos valores de impedancia que serán utilizados en la localización de las diferentes bases de bicicletas.

III.2.2 Asignación de la pendiente a los arcos de la red

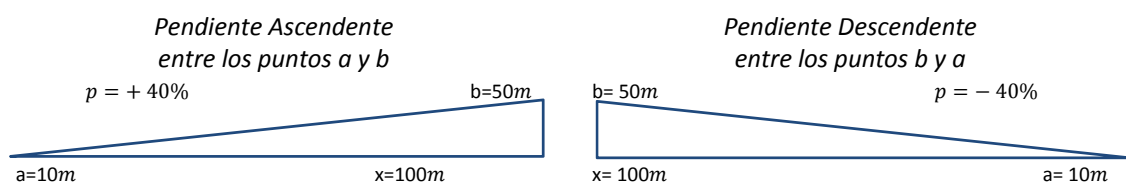
Para el correcto análisis de la red es necesario conocer el valor de la pendiente en cada arco, para ello, se va obtener el signo de la pendiente, lo que permite diferenciar las pendientes ascendentes de las pendientes descendentes, así como el valor de la misma en cada arco.

Los valores de pendiente se van a obtener a partir de la siguiente formulación, de manera a que pendientes ascendentes tengan signo positivo, mientras que pendientes descendentes tengan signo negativo, partiendo de los datos de altitud en cada nodo (Ribeiro, Gutiérrez y Remoaldo, 2011).

$$p[\%] = \frac{\Delta y[m]}{x[m]} * 100$$

Dónde:

- x es la distancia entre los nodos de los arcos medida en metros sobre el plano,
- Δy es la diferencia de cotas de los nodos medida en metros.



Una vez obtenidos los valores de pendiente, es necesario estimar la velocidad de circulación cada arco.

¹ Material de ayuda del Centro de Recursos de ArcGIS Desktop 10

III.2.3 Valor del tiempo

Una vez conocidas las pendientes de los arcos, es necesario estimar la velocidad de circulación en bicicleta en cada arco tanto en sentido subida como en sentido bajada para poder simular el desplazamiento ciclista real por las calles del área de estudio.

En el caso de una *pendiente llana* ($-3% < p < 3%$) se estima que la velocidad media de circulación es de $11,56 \text{ km. h}^{-1}$ (Compton, 2001).

Las *pendientes ascendentes* pueden clasificarse en dos tipos: aquellas superiores a 10%, en las que se desaconseja la circulación ciclista (DGT, 2000), por lo que la velocidad en este tipo de pendientes se asemeja a la velocidad de un viandante medio estimada en 4 km. h^{-1} . Y aquellas pendientes comprendidas entre 3% y 10%, en las que se estima que la velocidad de circulación disminuye $0,85 \text{ km. h}^{-1}$ por cada grado de pendiente hasta 10% (TRANSyT, 2008).

Por otra parte, la velocidad en las *pendientes descendentes* se asemeja a una función polinómica de orden 2 de la pendiente (Compton, 2001 y CERTU, 2006).

Tabla 1 Velocidades de circulación en bicicleta en función de la pendiente [km.h^{-1}]

Descendente	> 3 %	$v = (2,0288p^2 - 45,205p + 262,14)/36$
Llana	$-3% > p > 3%$	$v = 11,55$
Ascendente	$3% < p < 10%$	$v = 11,55 - (0,85p)$
	> 10%	$v = 4$

Fuente: Elaboración propia a partir de Compton, CERTU, TRANSyT y DGT.

Por otra parte, la velocidad de circulación peatonal se estima en una velocidad constante de 4 km. h^{-1} .

III.2.4 Creación de la Red

A partir de estas velocidades, se calculan los tiempos de recorrido en bicicleta en cada arco de la red en dos campos expresados en minutos, que conforman los atributos de la red.

Una vez obtenida la red, se identifican como atributos la distancia (longitud de cada arco, calculada en metros) de manera a analizar las distancias recorridas entre los puntos de demanda potencial de usuarios ciclistas y los puntos candidatos a albergar las bases de bicicletas, y el tiempo (tiempo calculado en minutos que se tarda en recorrer cada arco de la red en bicicleta).

III.3 Análisis de la demanda potencial: puntos de demanda

La localización de los diferentes puntos de demanda es fundamental para la localización óptima de las bases de bicicletas. Por tanto, es necesario conocer la localización de la población (generación de viajes) y de actividades (atracción de viajes) del área de estudio para poder establecer de manera óptima las bases de alquiler de bicicletas.

III.3.1 Demanda potencial: generación de viajes

Se consideran viajes generados aquellos producidos por la población residentes de los domicilios o áreas residenciales hacia los centros de atracción. La obtención del número de viajes generados en el área de estudio se va a realizar a partir de los datos oficiales de población del año 2010.

Es necesario desagregar los datos de población a nivel de sección entre los distintos portales de cada sección usando como referencia la capa de usos del suelo de Madrid (microseccionado), del Consorcio de Transportes de la Comunidad de Madrid. Para ello se van a utilizar los datos del Padrón continuo de habitantes del año 2010, publicado por el Instituto Nacional de Estadística, la cartografía de las secciones censales del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, y los portales georreferenciados del proyecto Cartociudad del Instituto Geográfico Nacional.

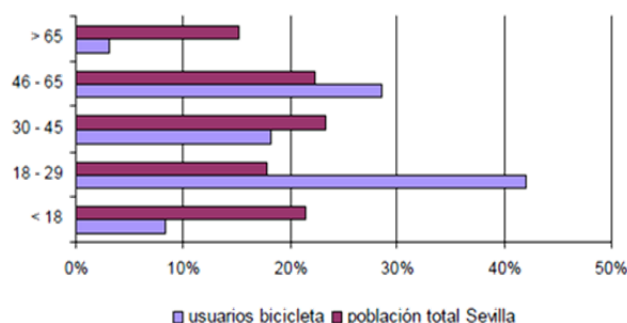
A continuación, se detalla el proceso:

- ✓ Identificación de los polígonos de uso residencial en la capa de usos del suelo, e identificación de los nuevos desarrollos urbanísticos,
- ✓ Reparto de la población residente en el año 2010 en cada sección entre los distintos polígonos de uso residencial que la componen, manteniendo el reparto proporcional de los datos (densidades) del año 2000; en los nuevos desarrollos urbanos (conversión de uso del suelo a uso urbano) la población asignada es la diferencia de población en el periodo considerado (años 2000-2010),
- ✓ Asignación de los portales pertenecientes a cada polígono de uso residencial,
- ✓ Recuento del número de portales en el interior de cada microsección de uso residencial,
- ✓ Reparto de la población residente en cada microsección residencial entre los distintos portales de la misma, de manera proporcional entre el número de portales,
- ✓ Comprobación final de que la suma de la población de los portales de cada sección censal se corresponde con la población de dicha sección según la información original del INE.

Posteriormente, para obtener el número de viajes generados por cada portal se realiza el siguiente procedimiento:

- ✓ Se realiza una agregación del número de habitantes por zona de transporte,
- ✓ Se obtiene el ratio de viajes generados /habitante a nivel de zona de transporte, proporcionados por el Consorcio Regional de Transportes de Madrid,
- ✓ Se multiplica el número de habitantes de cada portal por el ratio de viajes generados/habitante de su zona de transporte, resultando así el número de viajes generados por portal.

Dado que lo que se pretende es estimar la demanda ciclista desde los hogares, se calcula también un indicador de “viajes generados ponderados”, utilizando como factor de ponderación el mayor o menor uso de la bicicleta según grupos de población. Dado que en Madrid la demanda ciclista es todavía muy baja y no se dispone de datos desagregados fiables, se ha recurrido a la información de una ciudad con características más o menos similares, pero con mayor demanda ciclista, sobre la que existen datos fiables. En enero del año 2010 se realizó en Sevilla un estudio sobre el uso de la bicicleta, en el que se analizaron diferentes aspectos de la población ciclista. En él se observaron diferencias muy escasas según sexos, pero muy importantes según grupos de edad. Por ello se utilizó la estructura por edades de la población para simular la mayor o menor propensión a utilizar la bicicleta.



Fuente: Ayuntamiento de Sevilla, 2010

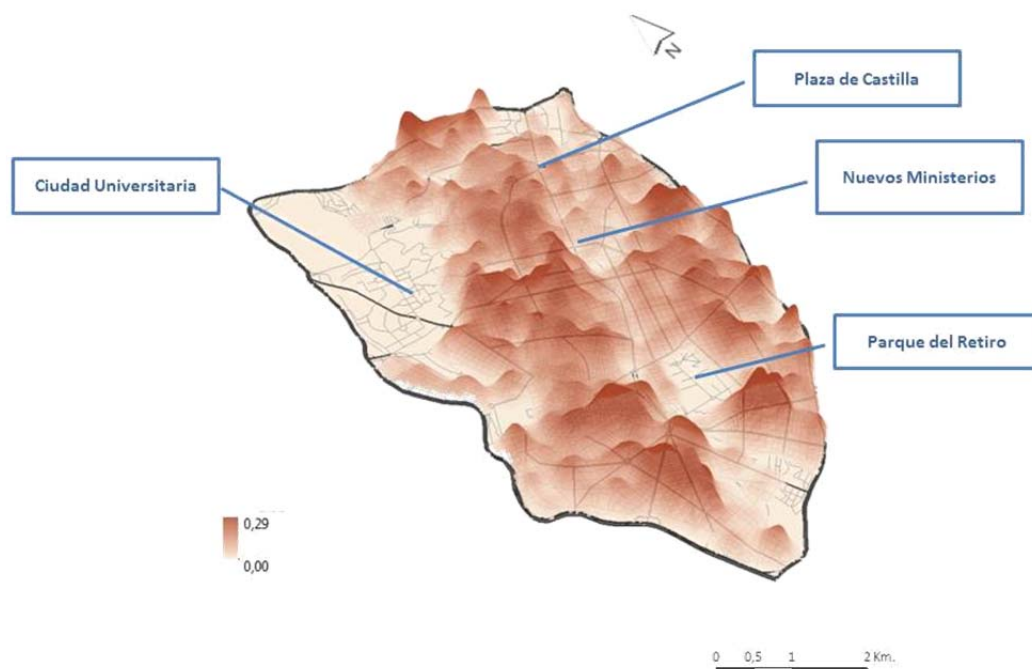
Relacionando la proporción de usuarios de la bicicleta en cada grupo de edad con la proporción de población en cada uno de esos grupos se obtuvieron los siguientes ratios:

Grupos de edad	>65	46-65	30-45	18-29	<18	Total
Usuarios de la bicicleta	3	28	18	43	8	100
Población	16	22	23	17	22	100
Ratios	0,19	1,27	0,78	2,53	0,36	

Fuente: Ayuntamiento de Sevilla, 2010

Estos ratios fueron utilizados como pesos para obtener un indicador de demanda ciclista desde los hogares. Para ello, se multiplicó el número de habitantes de cada portal en cada uno de los grupos de edad por su correspondiente ratio, y se sumaron los resultados de los distintos grupos, obteniéndose así un valor de población ponderada por cada portal. Una vez obtenido este valor se procedió como se indicó más arriba, a desagregar los viajes generados desde las zonas de transporte hasta los portales, pero resultando ahora un valor de viajes generados ponderados por cada portal que refleja más fielmente la demanda ciclista desde los hogares. En la *Figura 2* se muestran los valores y la distribución de los viajes generados, encontrándose valores elevados en la zona norte de Madrid: el Barrio del Pilar, así como en zonas tradicionalmente populosas como los distritos de Tetuán, Chamberí y Arganzuela, y los barrios de Prosperidad y Pacífico.

Figura 2 Viajes generados ponderados por la población en el área de estudio [Nº de viajes.m⁻²]



Fuente: Elaboración propia.

III.3.2 Demanda potencial: atracción de viajes

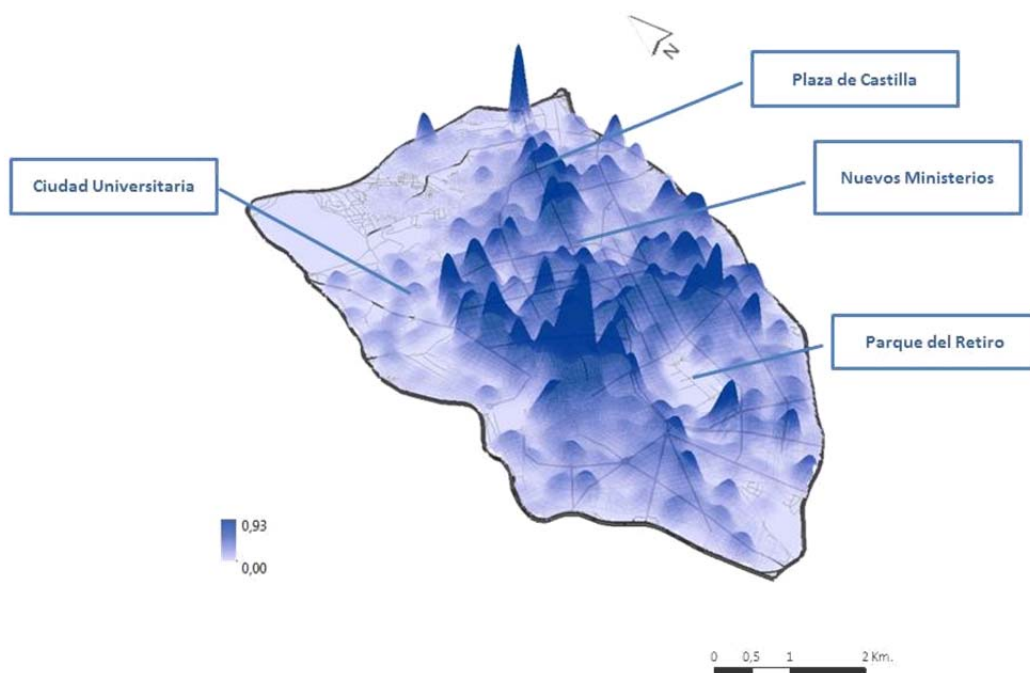
Los viajes atraídos son aquellos producidos por los desplazamientos hacia/desde los centros de actividad económica. Estos se identifican a partir de los datos de la Encuesta de Movilidad y del número de empleados en cada portal.

Se dispone de información del número de viajes atraídos por zona de transporte (EDM04) y del número de empleos por portal (DUAE). Para tener una mayor precisión en los análisis de demanda de futuras bases de bicicletas públicas se quiere obtener una estimación del número de viajes atraídos a nivel de portal. Para ello se sigue el siguiente procedimiento:

- Se realiza una agregación del número de empleos por zona de transporte,
- Se obtiene el ratio de viajes atraídos/empleo a nivel de zona de transporte. De esta forma es posible distinguir entre zonas especializadas en actividades que atraen muchos viajes (comerciales, escolares) y otras especializadas en actividades que atraen pocos viajes (empleos industriales o de oficinas),
- Se multiplica el número de empleos de cada portal por el ratio de viajes atraídos por empleo de su zona de transporte, resultando así el número de viajes atraídos por portal.

Se obtiene finalmente el número de viajes atraídos por metro cuadrado en el área de estudio mediante una interpolación areal del número de viajes atraídos por portal, tal y como se muestra en la *Figura 3*. Los valores más elevados de viajes atraídos se encuentran en entornos comerciales, empresariales o en nodos de transporte, como por ejemplo los entornos comerciales de La Vaguada, en el Barrio del Pilar, el entorno de Sol-Calle Preciados, y la zona comercial de Moncloa-Argüelles, mientras que otras zonas como el entorno de la Plaza de Castilla, el eje del Paseo de la Castellana, o los entornos de los grandes centros hospitalarios explican fuertes atracciones de viajes por la actividad administrativa o empresarial que generan.

Figura 3 Viajes atraídos en el área de estudio [Nº de viajes.m⁻²]



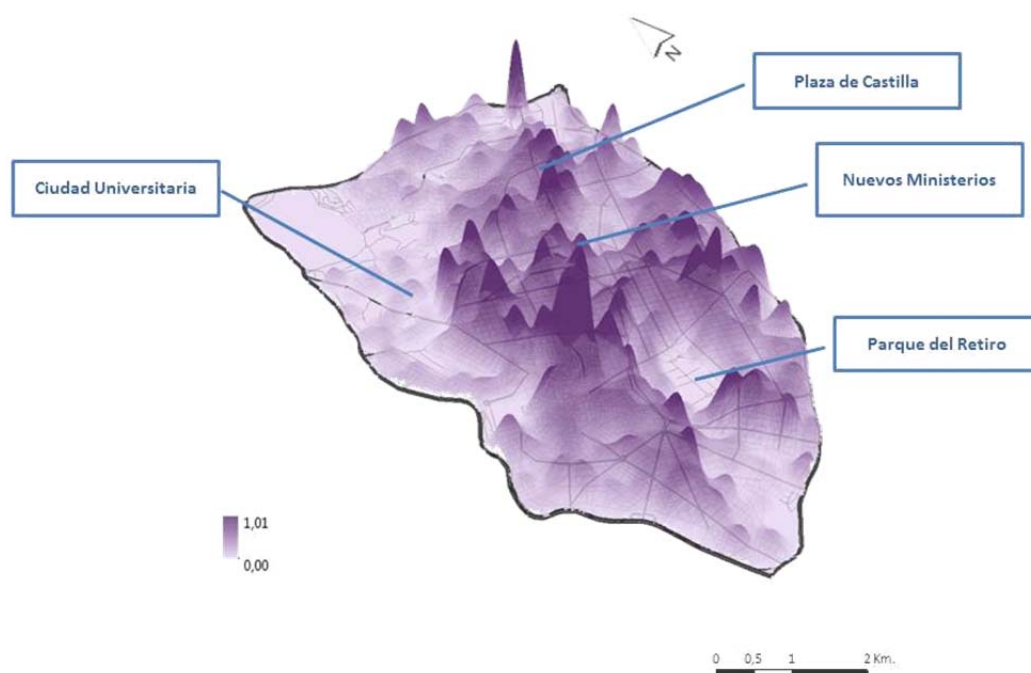
Fuente: Elaboración propia.

III.3.3 Demanda total de viajes

Sumando los datos de viajes generados y atraídos por metro cuadrado, en el área de estudio, es posible obtener puntos de elevada demanda potencial:
 $Total\ Viajes = Viajes\ Generados + Viajes\ Atraídos.$

La *Figura 4* muestra la distribución de dicha demanda potencial de viajes, en la que destacan los puntos anteriormente citados: las zonas de gran actividad económica así como las zonas más populosas del área de estudio.

Figura 4 Total de viajes en el área de estudio [Nº de viajes.m⁻²]



Fuente: Elaboración propia.

III.4 Bases de carácter obligatorio: bases en la red de Transporte Público

El sistema de alquiler de bicicletas públicas pretende ofrecer una mayor flexibilidad en la movilidad cotidiana de pasajeros. Se pretende, por tanto, estrechar los vínculos existentes entre los medios de transporte (Rondinella, 2010). El fomento de la intermodalidad pasa por favorecer la conectividad de los principales nodos de intercambio modal de pasajeros con la red de bases de alquiler de bicicletas en estudio.

La relevancia del uso del transporte público en Madrid, y su densa red intermodal compuesta por Metro, Autobuses urbanos e interurbanos y Cercanías, hace necesario establecer bases de alquiler de bicicletas en diferentes puntos de la Red de transporte público.

A partir de los datos de demanda de pasajeros en un día laborable medio, se van a seleccionar aquellas estaciones de Metro que superen una demanda diaria de 10 000 pasajeros. Además se van a considerar aquellas estaciones de Cercanías que no tengan conexión con la red de Metro.

La *Tabla 2* presenta las estaciones que albergaran las bases de bicicletas, y aquellas desestimadas por su escasa demanda diaria (en cursiva).

Tabla 2 Estaciones de la red de Metro que albergarán bases de bicicletas

Estación	Líneas	Total pasajeros por día	Estación	Líneas	Total pasajeros por día	Estación	Líneas	Total pasajeros por día
Moncloa	3, 6	70 023	Ópera	2, 5, R	14 860	Prosperidad	4	7 803
Sol	1, 2, 3	69 050	Núñez de Balboa	5, 9	14 596	Peñagrande	7	7 561
Nuevos Ministerios	6, 8, 10	60 794	Iglesia	1	13 415	Alvarado	1	7 225
Príncipe Pío	6, 10, R	49 203	Delicias	3	13 297	Alonso Cano	7	7 124
Avda. de América	4, 6, 7, 9	47 843	Barrio del Pilar	9	13 115	Puerta de Toledo	5	6 955
Plaza de Castilla	1, 10, 9	44 818	Cuzco	10	13 036	Pío XII	9	6 951
Atocha-Renfe	1	35 902	O'Donnell	6	12 615	Príncipe de Vergara	2, 9	6 848
Argüelles	3, 4, 6	32 606	Sáinz de Baranda	6, 9	12 398	Noviciado	2	6 482
Plaza de España	3, 10	28 073	Guzmán el Bueno	6, 7	12 278	Chueca	5	6 293
Méndez Álvaro	6	27 909	Alfonso XIII	4	12 093	Pirámides	5	5 950
Ciudad Universitaria	6	27 581	Tetuán	1	11 876	Cartagena	7	5 790
Diego de León	4, 5, 6	23 689	Banco de España	2	11 678	Lista	4	5 759
Callao	3, 5	23 508	Lavapiés	3	11 431	Ventura Rodríguez	3	5 736
Embajadores	3, 5	23 002	Canal	2, 7	11 395	Concha Espina	9	5 732
Legazpi	3, 6	22 438	Tirso de Molina	1	11 296	Ibiza	9	5 706
Chamartín	1, 10	22 354	Rubén Darío	5	10 964	Parque de las Avenidas	7	5 663
Cuatro Caminos	1, 2, 6	22 034	Franco Rodríguez	7	10 922	Colón	4	5 657
Goya	2, 4	21 723	Antón Martín	1	10 806	República Argentina	6	5 584
Alonso Martínez	4, 5, 10	21 521	Quevedo	2	10 119	Retiro	2	5 464
Gran Vía	1, 5	20 045	Ríos Rosas	1	9 964	Antonio Machado	7	5 183
Gregorio Marañón	7, 10	19 284	Valdeacederas	1	9 877	Sevilla	2	5 010
Bilbao	1, 4	19 220	Metropolitano	6	9 637	Cruz del Rayo	9	4 980
Conde de Casal	6	18 733	Palos de la Frontera	3	9 635	Acacias	3, 5	4 622
Estrecho	1	18 378	Serrano	4	9 495	Ventilla	9	4 398
Colombia	8, 9	17 120	San Bernardo	2, 4	9 460	Valdezarza	7	4 369
Pacífico	1, 6	16 642	Menéndez Pelayo	1	9 287	Arganzuela-Planetario	6	4 319
Islas Filipinas	7	15 562	Ventas	2, 5	9 150	Bambú	1	4 206
Manuel Becerra	2, 6	15 338	La Latina	5	9 119	Duque de Pastrana	9	2 441
Santiago Bernabéu	10	15 269	Atocha	1	8 628	Santo Domingo	2	2 215
Tribunal	1, 10	15 102	Velázquez	4	8 068			

Fuente: Elaboración propia a partir de Metro de Madrid y Consorcio Regional de Transportes de Madrid. Datos de pasajeros el día 26 de Noviembre de 2010.

La localización de las bases la red de transporte público incluye además de los intercambiadores de transporte definidos por las diferentes administraciones, aquellas estaciones de Cercanías que no tienen conexión directa con Metro, debido al importante número de pasajeros que utilizan diariamente el tren de Cercanías como medio de transporte. Los intercambiadores de transporte son puntos de confluencia de diferentes líneas o modos de transporte permitiendo el intercambio entre líneas interurbanas de autobús, red de Metro, red de autobuses de la EMT, y red de Cercanías.

La *Tabla 3* presenta las características de las estaciones de intercambio consideradas.

Tabla 3 Características de los Intercambiadores de Transporte

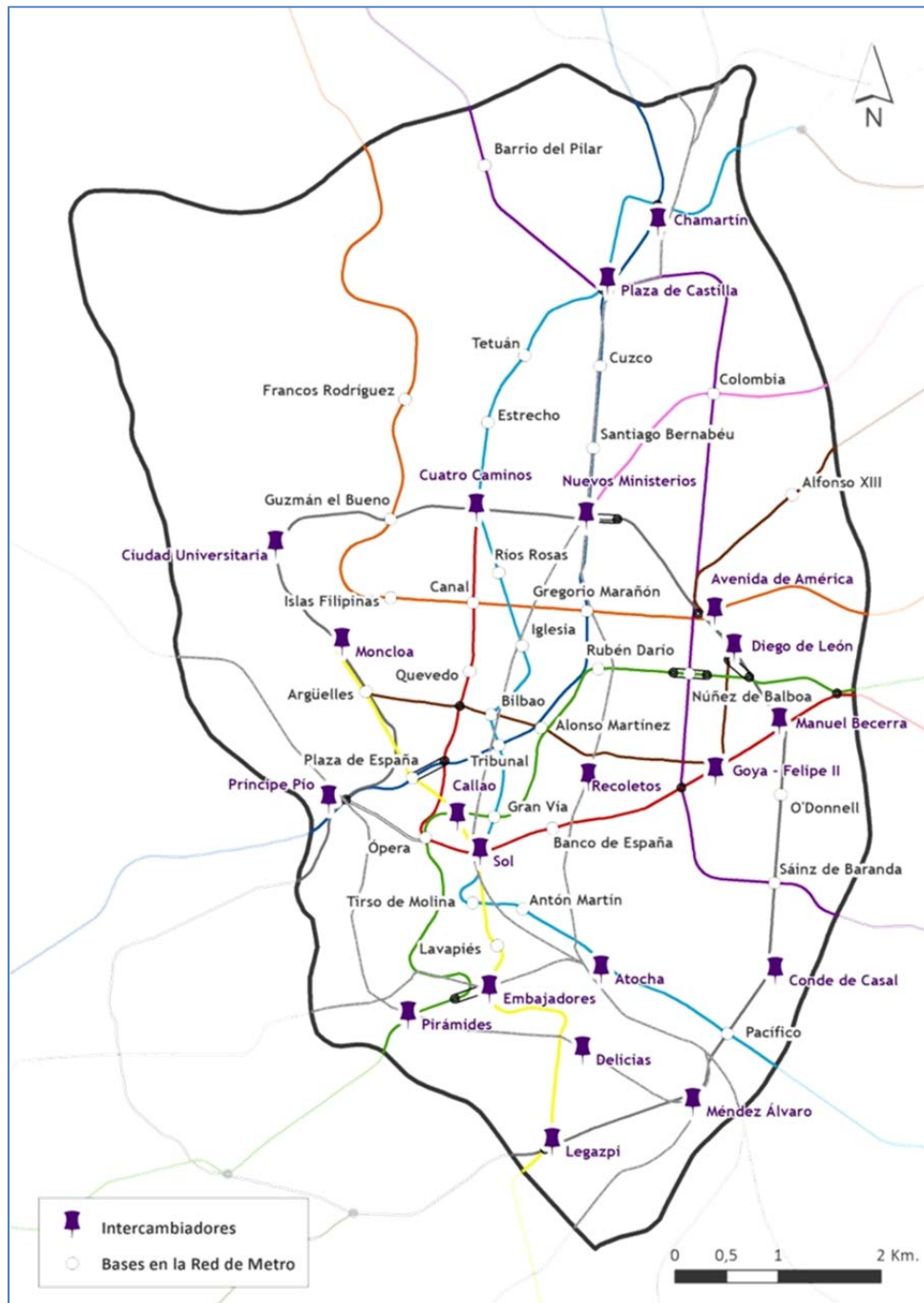
Nombre	EMT	Metro	Autobús Interurbano	Cercanías	Largo Recorrido
	Nº Líneas				
Atocha	27d/8n	1	4d/5n	7	✗
Avenida de América	11d/2n	4	13d/1n	✗	✓
Callao *	15d/5n	3	✗	✗	✗
Chamartín *	11d/1n	2	✗	5	✗
Ciudad Universitaria	5d	1	1d	✗	✓
Conde de Casal	7d/1n	1	16d/3n	✗	✗
Cuatro Caminos	12d/1n	3	✗	✗	✗
Delicias *	10d/1n	1	✗	2	✗
Diego de León	12d/1n	3	✗	✗	✗
Embajadores	14d/2n	3	✗	1	✗
Goya - Felipe II	14d/3n	2	✗	✗	✗
Legazpi	18d/3n	2	9d	✗	✗
Manuel Becerra	18d/2n	2	✗	✗	✗
Méndez Álvaro	5d/1n	1	7d	3	✓
Moncloa	16d/1n	2	49d/24n	✗	✓
Nuevos Ministerios	10d/2n	3	✗	5	✗
Pirámides	9d/3n	1	✗	2	✗
Plaza de Castilla	21d/2n	3	39d/21n	✗	✗
Príncipe Pío	11d/3n	3	25d/5n	2	✗
Recoletos	7d/5n	✗	✗	3	✗
Sol *	11d/3n	3	✗	2	✗

* Tiene en cuenta el entorno de la estación
d= Servicios diurnos, n= Servicios nocturnos

*Fuente: Elaboración propia a partir de EMT y Consorcio Regional de Transportes de Madrid.
[Consulta: Abril de 2011]*

En la elaboración del análisis se van a considerar los veintiún intercambiadores de transporte y las treinta y una estaciones localizadas en la red de metro, sumando un total de cincuenta y dos localizaciones obligatorias en las que instalar bases de bicicletas públicas. La *Figura 5* muestra la localización de estas bases.

Figura 5 Bases de la Red de Transporte público



Fuente: Elaboración propia a partir de Metro de Madrid,
e Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.
[Consulta: Junio de 2011]

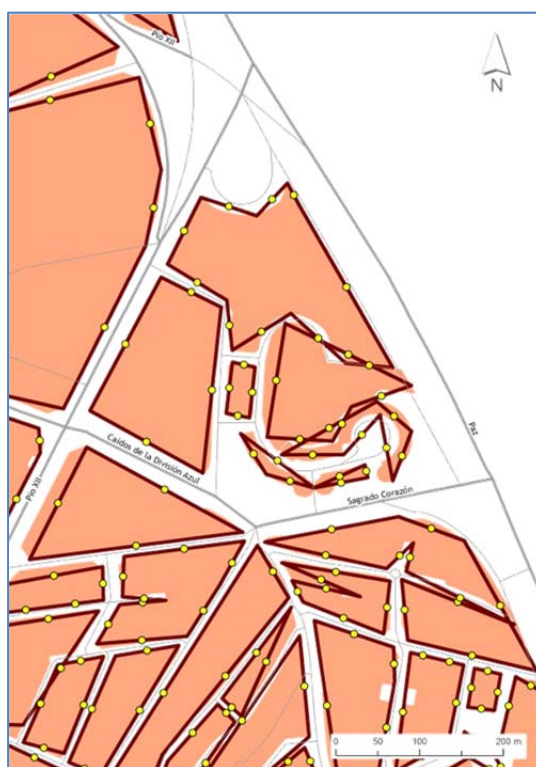
III.5 Tratamiento de la localización de los candidatos

La eficacia del sistema en estudio pasa por una localización adecuada de las bases en la ciudad, próximas a los centros de atracción y generación de viajes. Para ello es necesario localizar las bases de bicicletas que complementen la red en estudio.

En el área de estudio coexisten numerosos puntos de demanda dispar que deben ser cubiertos por la red de bicicletas públicas de manera óptima, y que inicialmente pueden considerarse como puntos candidatos a albergar una base de bicicleta pública, sin embargo el elevado número de portales (cerca de 90 000 portales), genera conflictos en el *software*, por lo que es necesario realizar una agregación de los mismos de manera a reducir el número de puntos candidatos. Esta agregación se realiza siguiendo criterios de proximidad, de manera a eliminar portales muy próximos entre sí.

La reducción del número de portales se realiza mediante los Sistemas de Información Geográfica, a partir de una simplificación morfológica de las manzanas del ámbito de estudio, de este modo se pueden obtener los puntos medios de los lados de las formas resultantes, tal y como muestra la *Figura 6*. Se ha obtenido por tanto un número más reducido de puntos candidatos a albergar las bases.

Figura 6 Ejemplo de reducción del número de puntos candidatos a albergar las bases de bicicletas.



Fuente: Elaboración propia

El número de puntos candidatos obtenidos ha pasado de casi 90 000 portales a algo más de 17 000 puntos candidatos.

III.6 Modelos de localización óptima y escenarios

Los modelos de localización óptima o de *Location-Allocation* (ubicación-asignación) permiten resolver un doble problema: se determina la localización óptima de las bases de bicicletas, al tiempo que se asigna la demanda de cada una de estas bases en función de los criterios seleccionados. Estos modelos ya se han detallado en el apartado II.2.

Para la localización óptima de las bases se han usado las herramientas de *Location-Allocation* dentro del módulo de Análisis de Redes de ArcGIS 10. Estos problemas pueden tratarse desde ópticas diferentes, en función del problema al que se quiera dar respuesta:

- ✓ **Minimizar la impedancia:** las instalaciones se ubican de modo a minimizar la suma de todos los costes ponderados entre los puntos de demanda y las instalaciones de la solución. Las bases se eligen de tal modo que se minimiza la suma de las impedancias ponderadas, es decir, la demanda asignada a una base multiplicada por la impedancia o el coste de desplazamiento en metros hasta la base.
- ✓ **Maximizar la cobertura:** las instalaciones se ubican de tal modo que el máximo número de puntos de demanda se asignen a instalaciones de la solución situadas dentro de la tolerancia de impedancia. Las bases se eligen de tal modo que la máxima demanda posible de viajes potenciales queda cubierta por la tolerancia de impedancia de las instalaciones (doscientos metros). En este método no se considera la demanda de las bases que queden fuera de la tolerancia de doscientos metros.

En el presente estudio, se van a analizar estos dos modelos que persiguen diferentes objetivos; por un lado se va a analizar la **eficiencia espacial** mediante el modelo de minimización de los costes de desplazamiento (minimización de la impedancia), y por otra parte se va a analizar la **cobertura espacial** a partir del modelo de máxima cobertura en un radio de doscientos metros.

Se van a plantear cinco escenarios distintos para cada uno de los modelos en estudio: escenarios con 100, 200, 300, 400 y 500 bases de las cuales 52 son de carácter obligatorio, las bases ubicadas en la red de transporte público citadas en el apartado III.4. Estos escenarios permiten analizar la variación los resultados en función del número de bases planteadas. De este modo se podrá conocer el impacto de las bases sobre la demanda cubierta, y se podrá analizar la eficacia del número de bases tanto en la cobertura de la demanda, como en la accesibilidad.

III.7 Caracterización de las bases propuestas

Las bases seleccionadas tienen diferente localización en función de los escenarios planteados. Esta localización atribuye a cada base características de atractoras, generadoras o mixtas en función de si la demanda potencial de cada una de ellas proviene de población residente, o bien de zonas de importante actividad económica o comercial. Esta caracterización permite conocer las características de las bases para así poder variar el número de bicicletas o puntos

de anclaje libres en cada una de ellas en función de si se trata de bases generadoras o atractoras. Esto es importante pues permite planificar los sistemas de redistribución de bicicletas, una de las claves en el éxito de estos programas.

A partir de los datos de demanda potencial se van a diferenciar cuatro tipos de bases:

- ✓ **Bases Generadoras:** aquellas cuyo ratio $\frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total Viajes}}$ es inferior a 40% lo que implica que la mayor parte de los viajes que tienen lugar en estas estaciones están generados por la población residente, por lo tanto las bases tienen que tener un elevado número de bicicletas en la hora punta de la mañana y un elevado número de puntos libres de anclaje en la hora punta de la tarde. Cabe esperar que estas bases se encuentren en zonas eminentemente residenciales.
- ✓ **Bases Mixtas:** aquellas cuyo ratio $\frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total Viajes}}$ se encuentra entre 40% y 60%. Estas bases se encuentran en zonas donde hay una fuerte diversidad de usos, por lo que la demanda potencial se debe tanto a viajes atraídos como a viajes generados. Las bases se retroalimentan de bicicletas a lo largo del día debido precisamente a esta diversidad de usos.
- ✓ **Bases Atractoras:** aquellas cuyo ratio $\frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total Viajes}}$ se encuentra entre 60% y 80%. Estas bases se encuentran en zonas comerciales o empresariales donde finalizan muchos viajes, de manera que en hora punta de la mañana tiene que haber más puntos de anclaje libres que ocupados, mientras que en hora punta de la tarde tiene que haber más puntos de anclaje ocupados que libres.
- ✓ **Bases Muy Atractoras:** aquellas cuyo ratio $\frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total Viajes}}$ supera 80%. Estas bases se encuentran en entornos empresariales o comerciales, por lo que sus características de ocupación son las mismas que las de las bases Atractoras.

III.8 Análisis de la accesibilidad de las bases propuestas

Existen numerosas definiciones de accesibilidad, aunque para el presente estudio se va a utilizar aquella que relaciona accesibilidad y distancia entre bases. El impacto territorial de las bases seleccionadas puede medirse a partir de la accesibilidad.

La utilidad de las estaciones se ha medido a partir del indicador de accesibilidad potencial, ampliamente utilizado en diferentes contextos espaciales (ver, por ejemplo, Bruinsma y Rietveld, 1998; Muhammad et al., 2008). Este indicador relaciona la accesibilidad de una localización directamente con el número de las oportunidades disponibles e inversamente con la distancia necesaria para alcanzar esas oportunidades. Su formulación es la siguiente:

$$P_i = \sum_{j=1}^n \frac{M_j}{d_{ij}^\alpha}$$

En nuestro caso, P_i es el potencial de mercado de la estación i , M_j las oportunidades disponibles (los viajes atraídos) en la estación de destino j , y d_{ij} la distancia entre el origen i y el destino j , medida en tiempo en bicicleta. Finalmente, α es el exponente que representa el efecto de la fricción de la distancia, que en nuestro caso es $\alpha = 2$, tratando de reflejar el incremento de la fricción de la distancia en el caso de los desplazamientos en bicicleta. En las estaciones de destino consideradas, se ha establecido un límite máximo de distancia de cinco kilómetros.

El análisis de accesibilidad se va a obtener para el modelo de Máxima Cobertura.

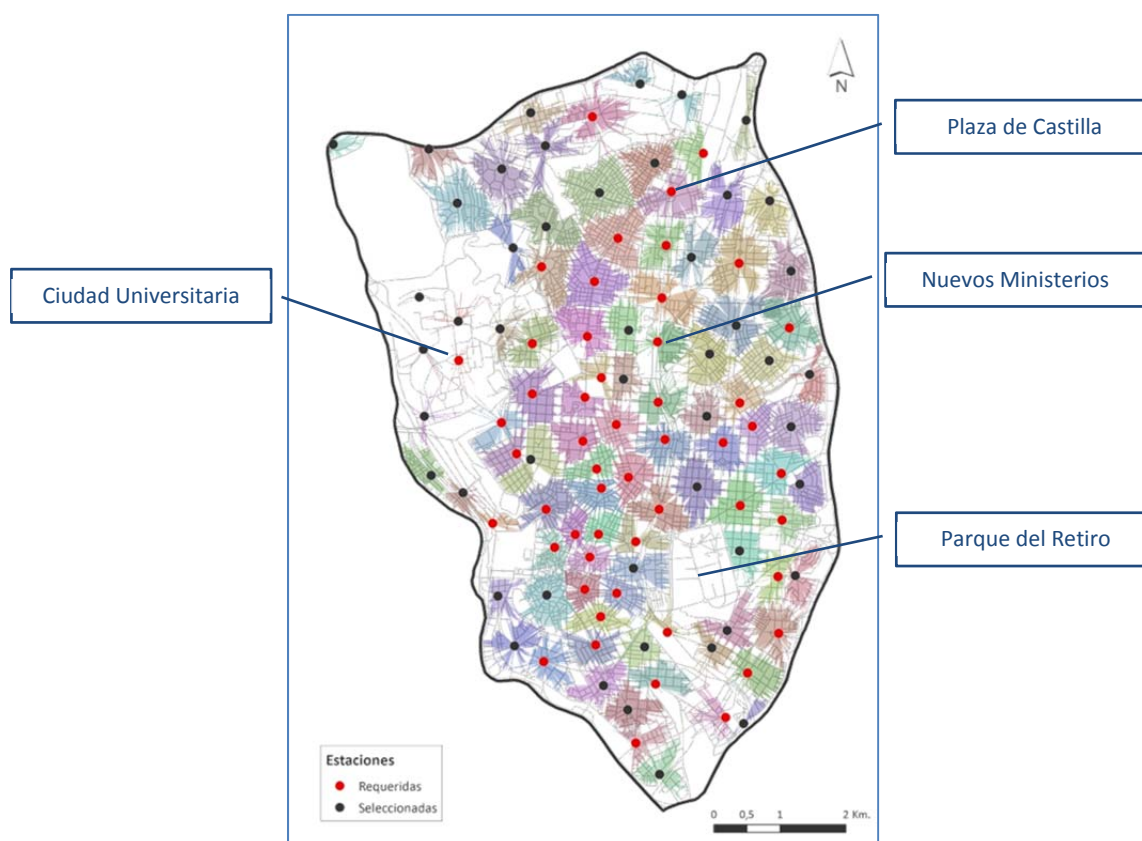
IV. Resultados

IV.1 Localización de las bases usando un modelo de mínima impedancia

El modelo de mínima impedancia localiza las bases de bicicletas en los cinco escenarios considerados: 100, 200, 300, 400 y 500 bases, minimizando la suma de las distancias ponderadas entre la demanda ciclista.

El modelo de Mínima Impedancia busca una solución de equidad, no habiendo puntos de oferta con distancias excesivamente elevadas hasta las bases. Eso hace que la distribución de las bases sea dispersa en el territorio (*Figura 7 a Figura 11*), cubriendo de una forma homogénea el conjunto del área de estudio. Con esta solución toda la demanda queda asignada en todos los casos a una base con una distancia inferior a ochocientos metros.

Figura 7 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 100 bases.



Fuente: Elaboración propia

Figura 8 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 200 bases

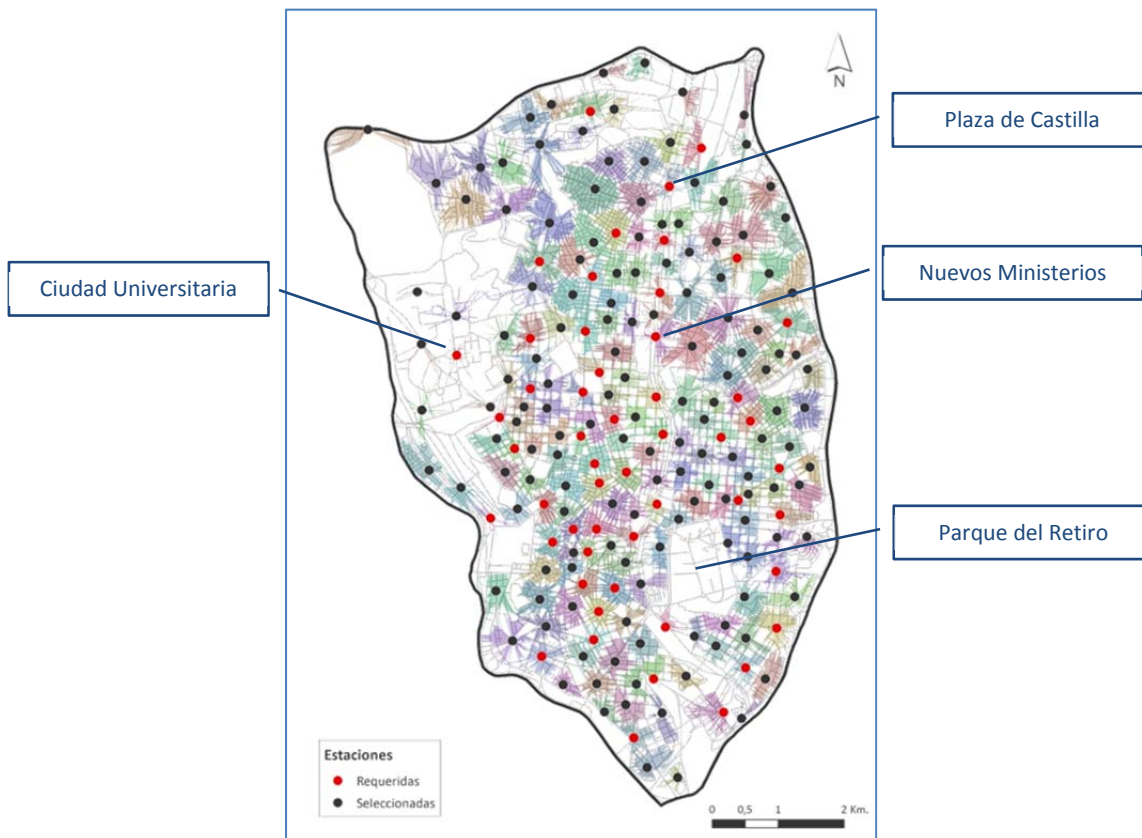
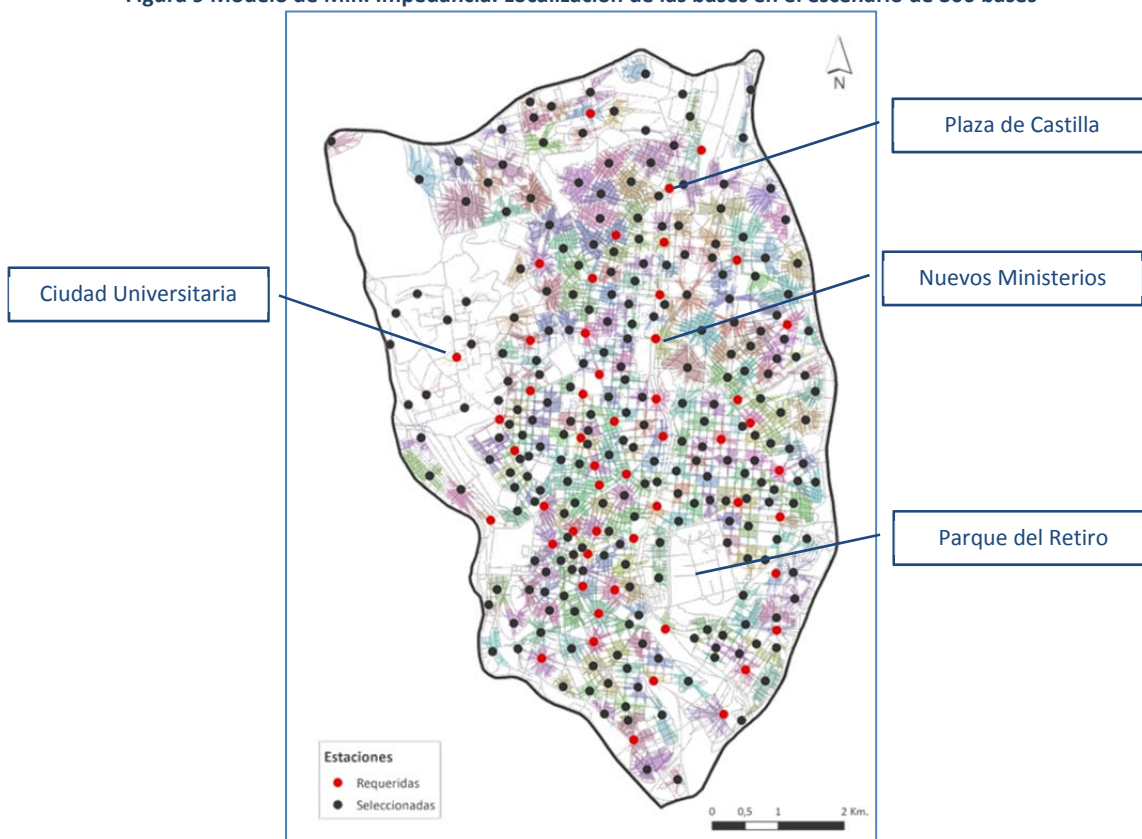


Figura 9 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 300 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 10 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 400 bases

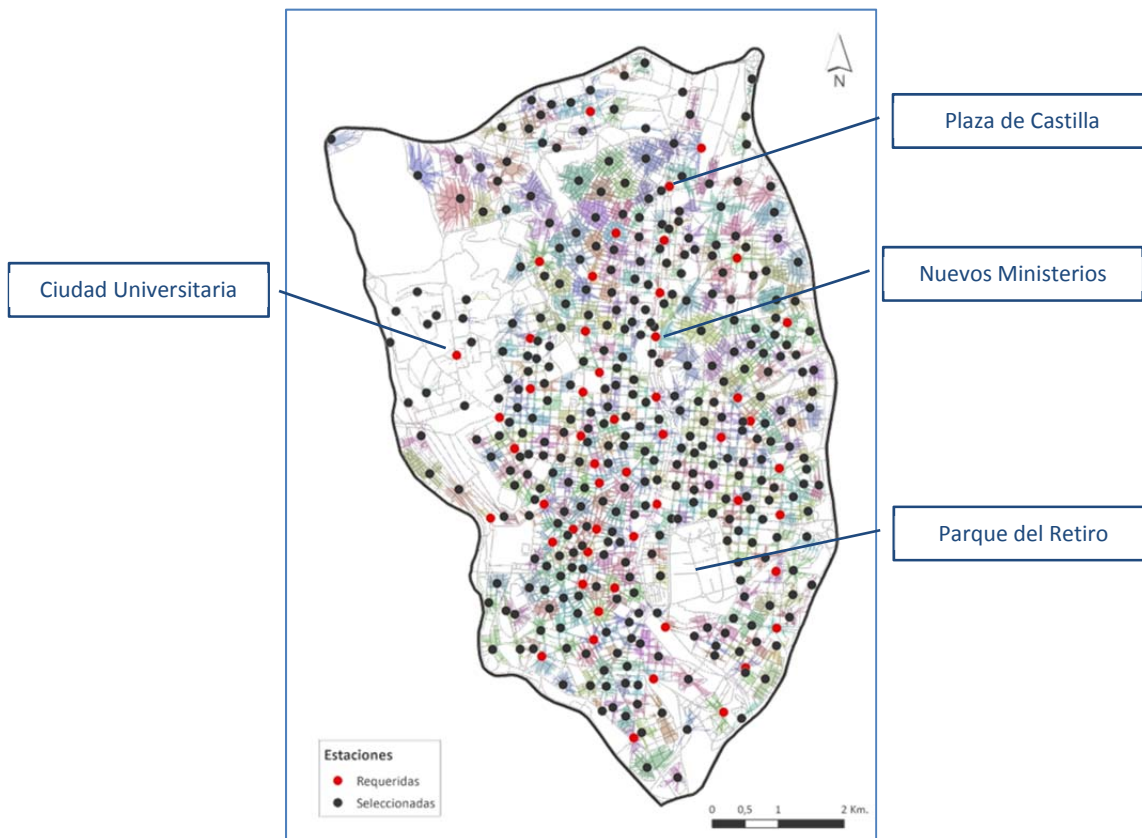
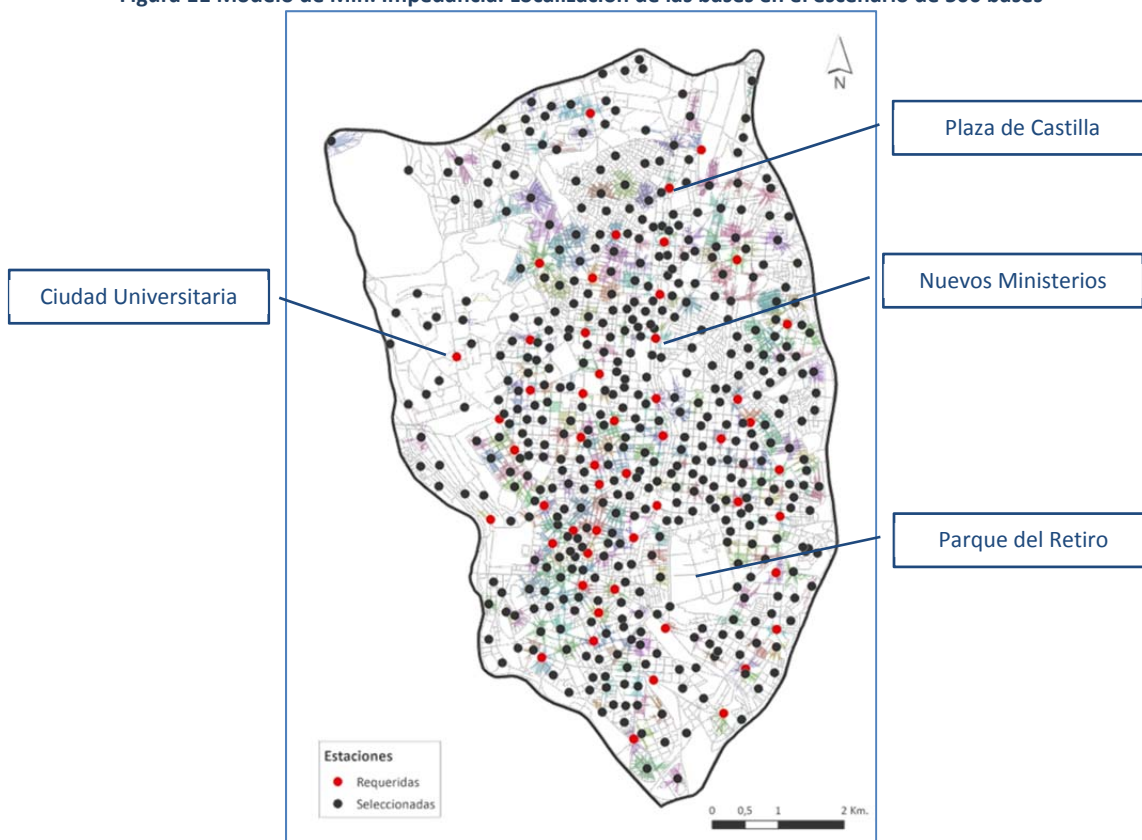


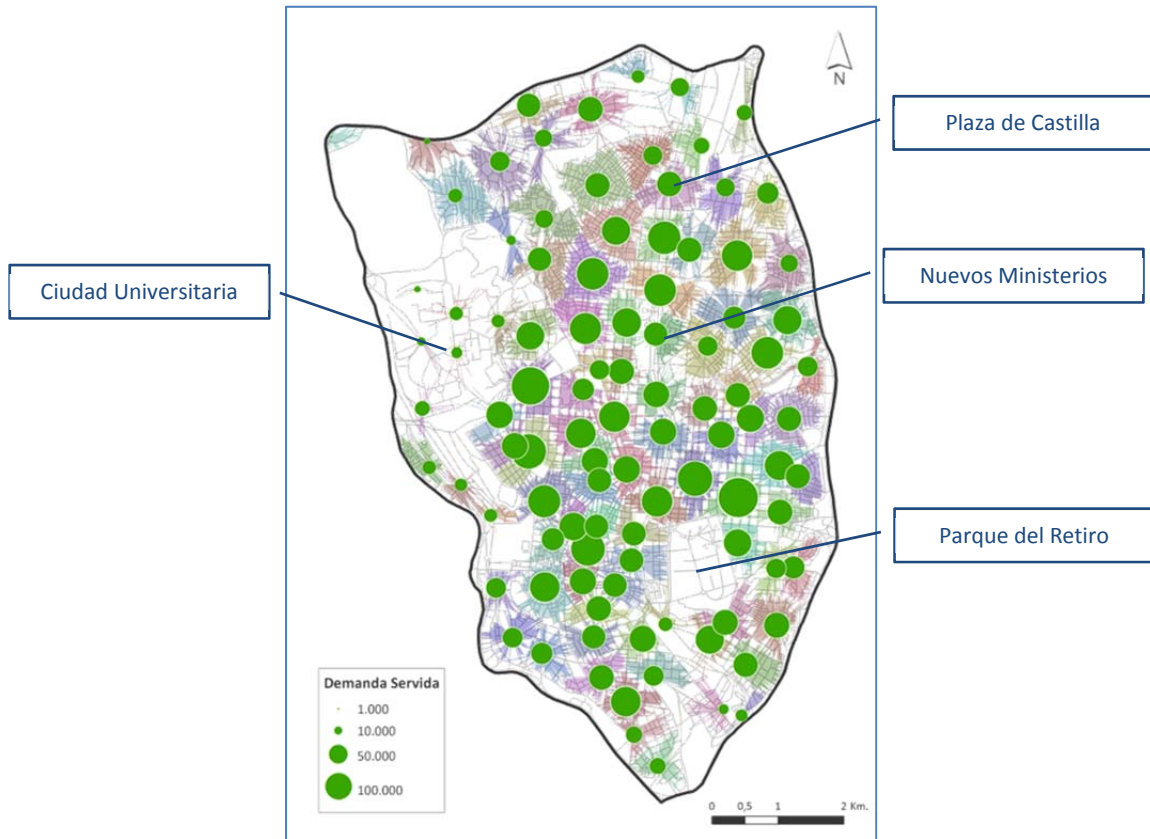
Figura 11 Modelo de Mín. Impedancia. Localización de las bases en el escenario de 500 bases



Fuente: Elaboración propia

En los siguientes mapas (Figura 12 a Figura 16) se muestra la demanda potencial asignada a las bases en los diferentes escenarios planteados. A medida que aumenta el número de bases, disminuye la demanda asignada, produciéndose un fenómeno de competencia entre estas.

Figura 12 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 100 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 13 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 200 bases

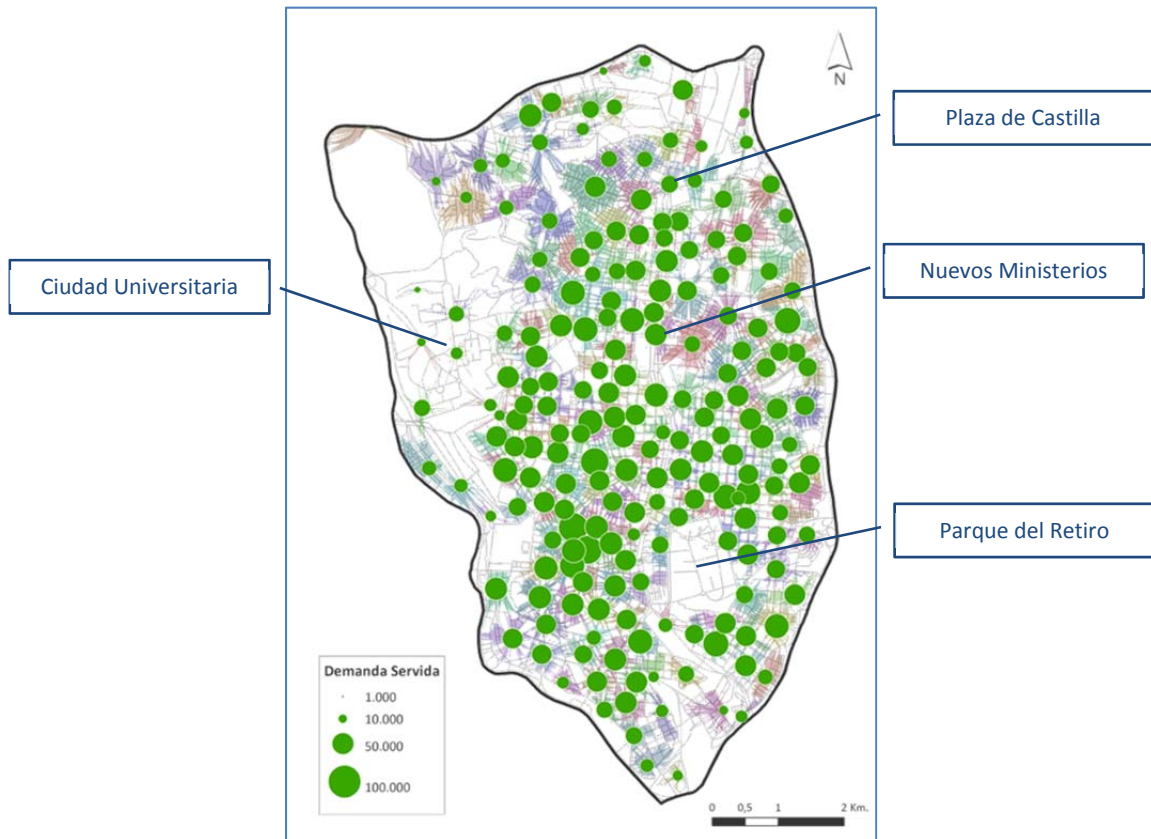
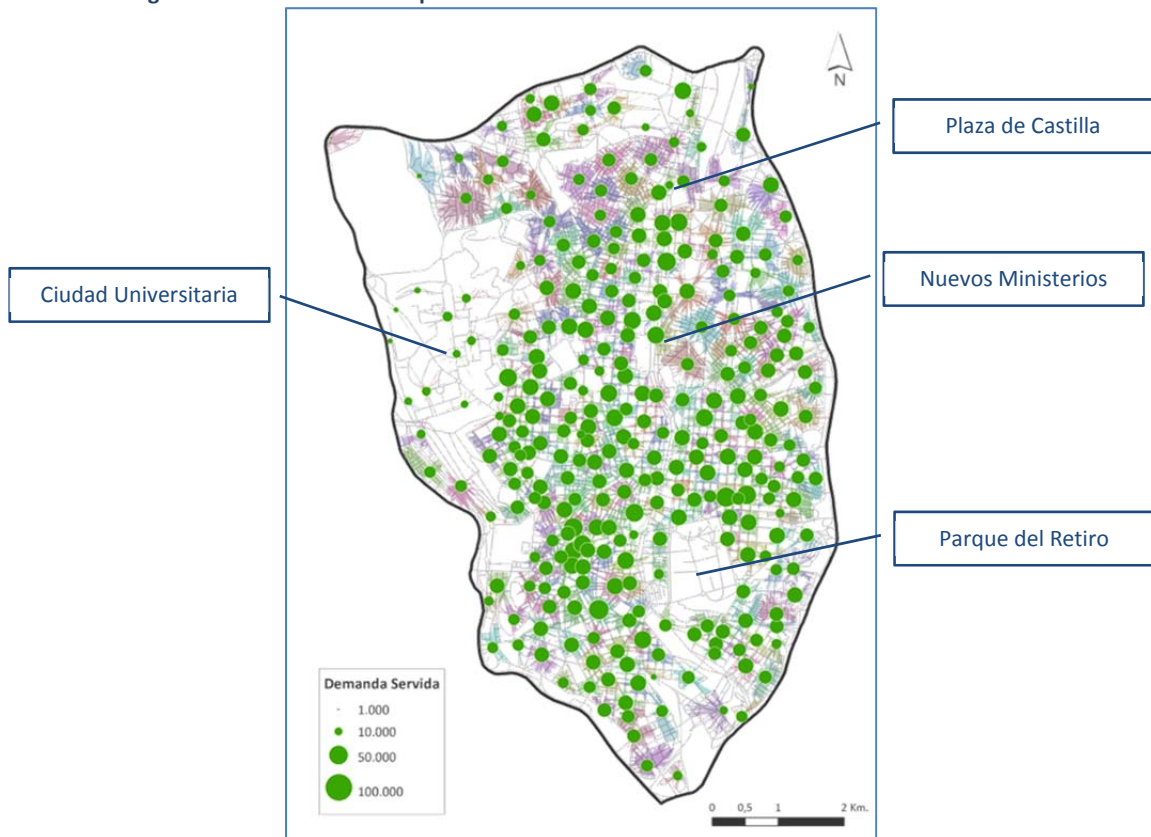


Figura 14 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 300 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 15 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 400 bases

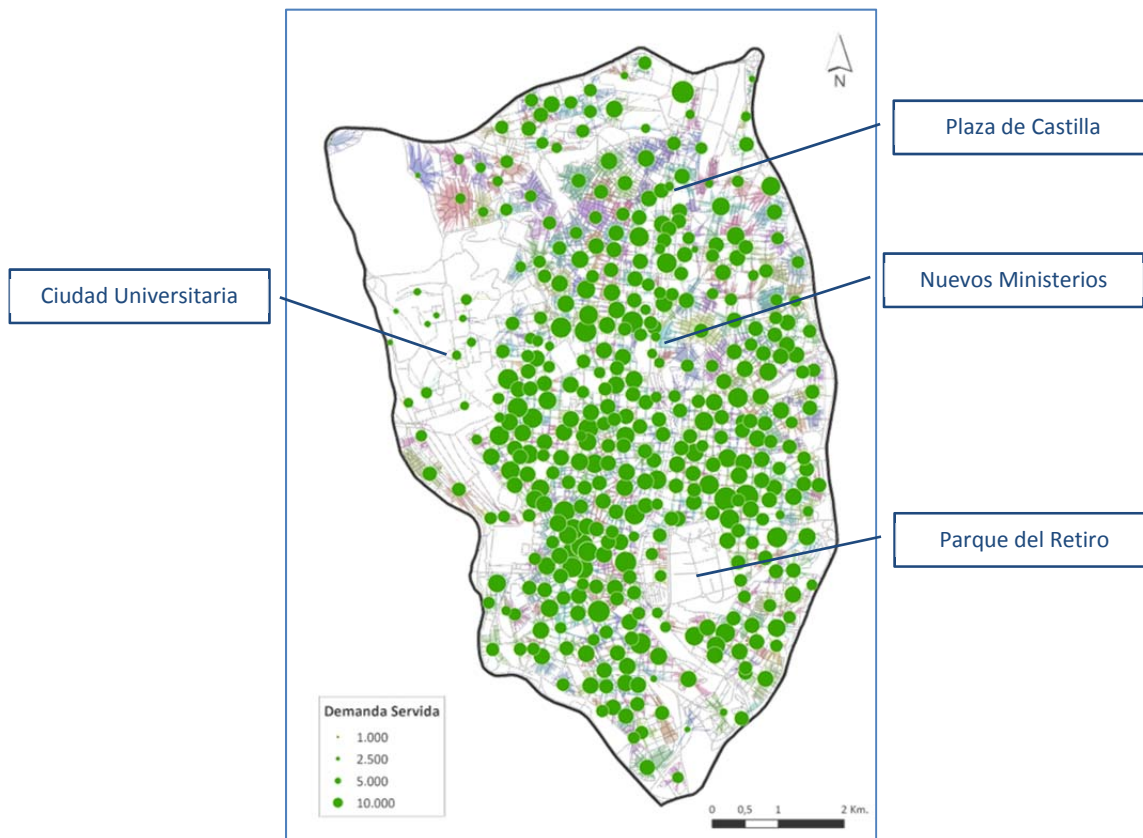
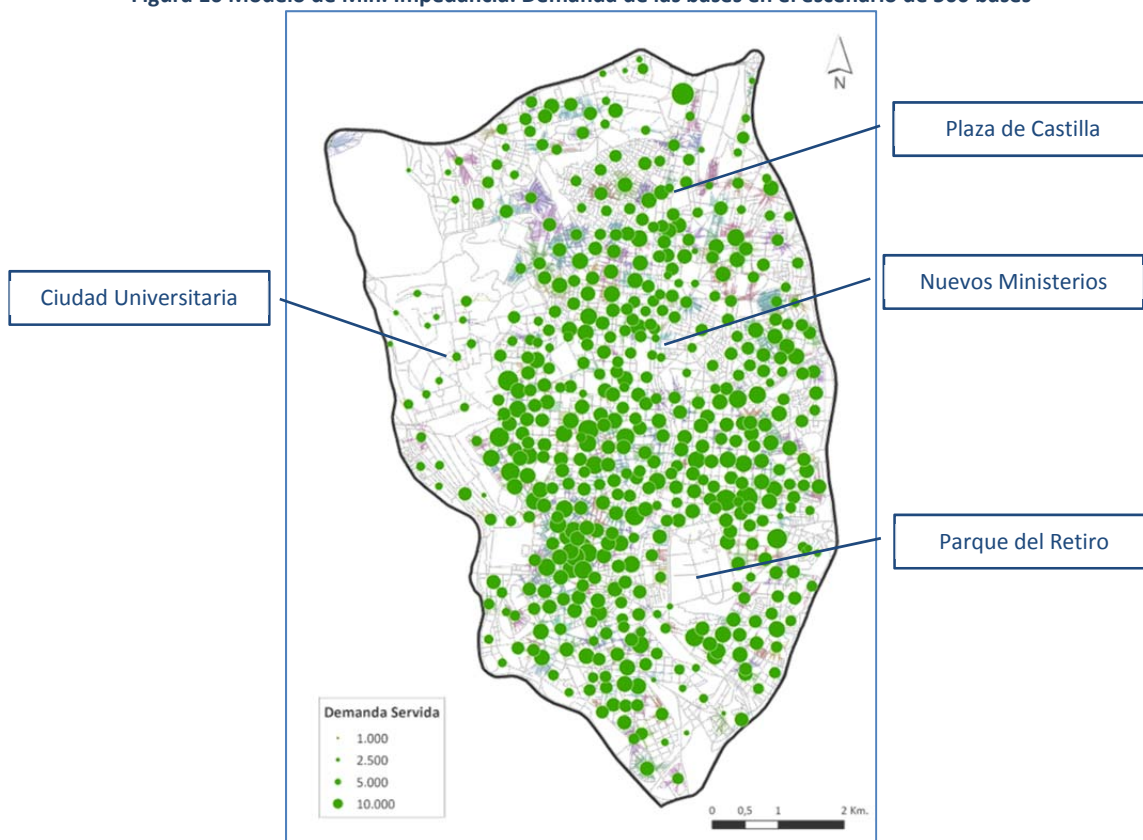


Figura 16 Modelo de Mín. Impedancia. Demanda de las bases en el escenario de 500 bases



Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 4* se muestra el resultado obtenido al incrementar el número de bases, lo que disminuye la distancia entre ellas y aumenta la población cubierta en una distancia de doscientos metros.

En los distintos escenarios tiene lugar una disminución sostenida de la distancia media entre bases, pasando de 366 metros en el escenario de 100 bases a 150 metros en el escenario de 500 bases. A medida que varían los escenarios, la demanda de cada base disminuye al tiempo que la demanda cubierta a 200 metros de cada base aumenta hasta cubrir el 83% del total de población del área de estudio en el escenario que contempla mayor número de bases.

Tabla 4 Accesibilidad a las bases de bicicletas a través de la red: criterios de Mínima Impedancia:

Nº de bases	Distancia ente bases [m]		Distancia media [m] ponderada demanda		Distancia máxima [m]	Demanda bases		Demanda Cubierta 200 m	
	\bar{x}	δ	\bar{x}	δ		\bar{x}	δ	Total	%
100	366,4	63,3	344,9	67,4	793,7	79 922,7	43 479,3	1 675 270,1	21,0
200	252,6	63,2	225,6	65,9	798,6	39 961,3	14 008,5	3 754 765,0	47,0
300	199,8	51,9	176,1	53,1	797,4	26 640,9	9 076,7	5 100 530,2	63,8
400	171,3	48,3	148,1	48,5	797,8	19 980,7	7 002,0	6 053 825,0	75,7
500	150,1	41,5	128,3	44,2	796,5	15 984,5	5 944,1	6 699 270,0	83,8

Fuente: Elaboración propia

IV.2 Localización de las bases usando un modelo de máxima cobertura

El modelo de máxima cobertura localiza las bases de bicicletas en los cinco escenarios considerados, 100, 200, 300, 400 y 500 bases, buscando una solución de eficiencia, de manera tal que la mayor cantidad de demanda quede dentro del umbral de distancia determinado, en este estudio, en doscientos metros. Aquellos puntos que se encuentran a distancias superiores a doscientos metros de la solución quedan sin asignar.

Los mapas muestran una centralización de las bases en las zonas de mayor densidad de demanda, frente al escenario planteado en el apartado anterior (IV.1), cubriendo los espacios centrales de la “Almendra” y dejando sin cobertura en las zonas periféricas.

El modelo de Máxima cobertura busca una solución de eficiencia, eso hace que la distribución de las bases esté concentrada en zonas concretas del área de estudio (Figura 17 a Figura 21). Con esta solución la mayor parte de la demanda queda asignada a una base con una distancia inferior a doscientos metros.

Figura 17 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 100 bases.

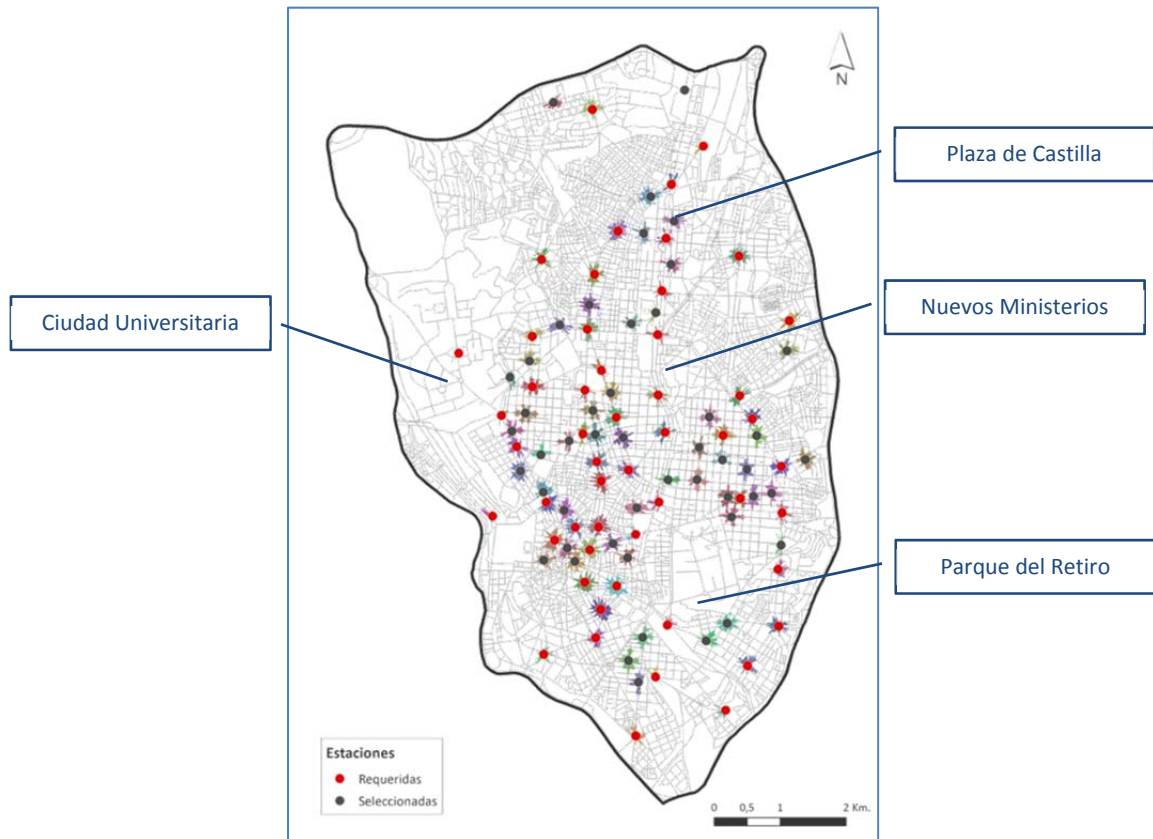
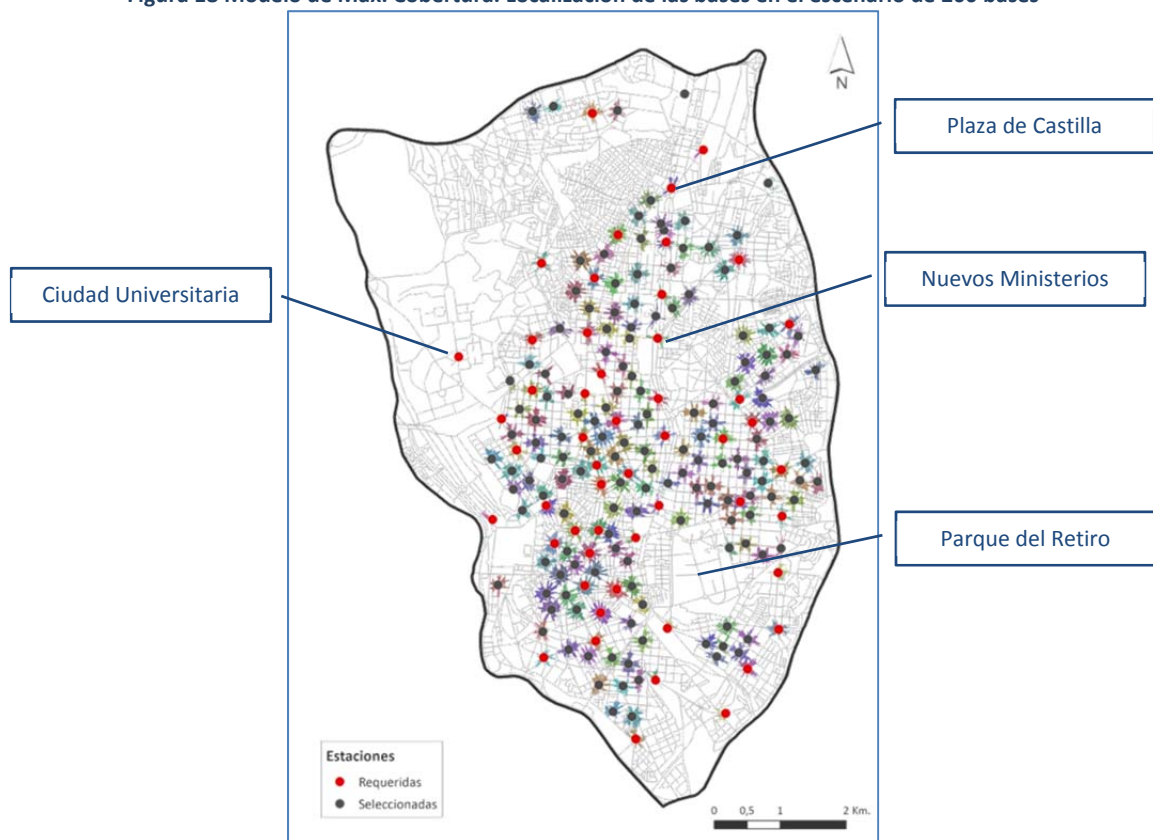


Figura 18 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 200 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 19 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 300 bases

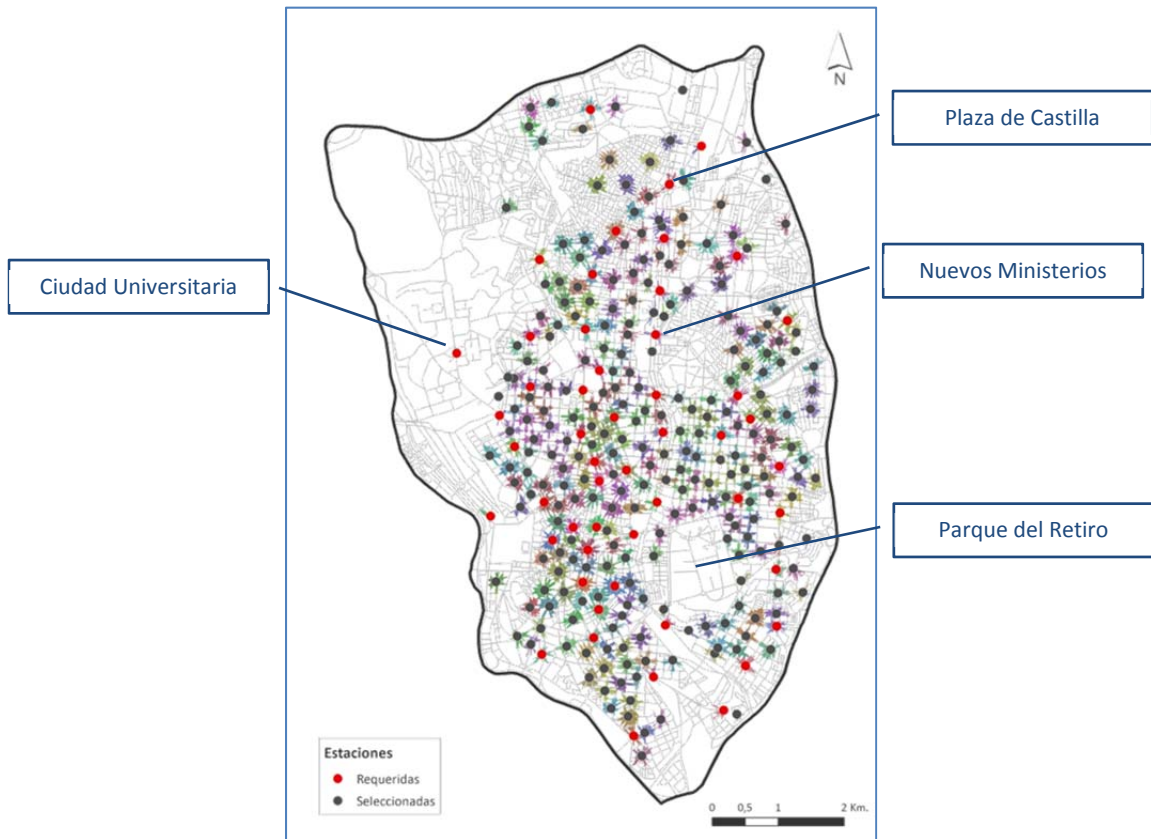
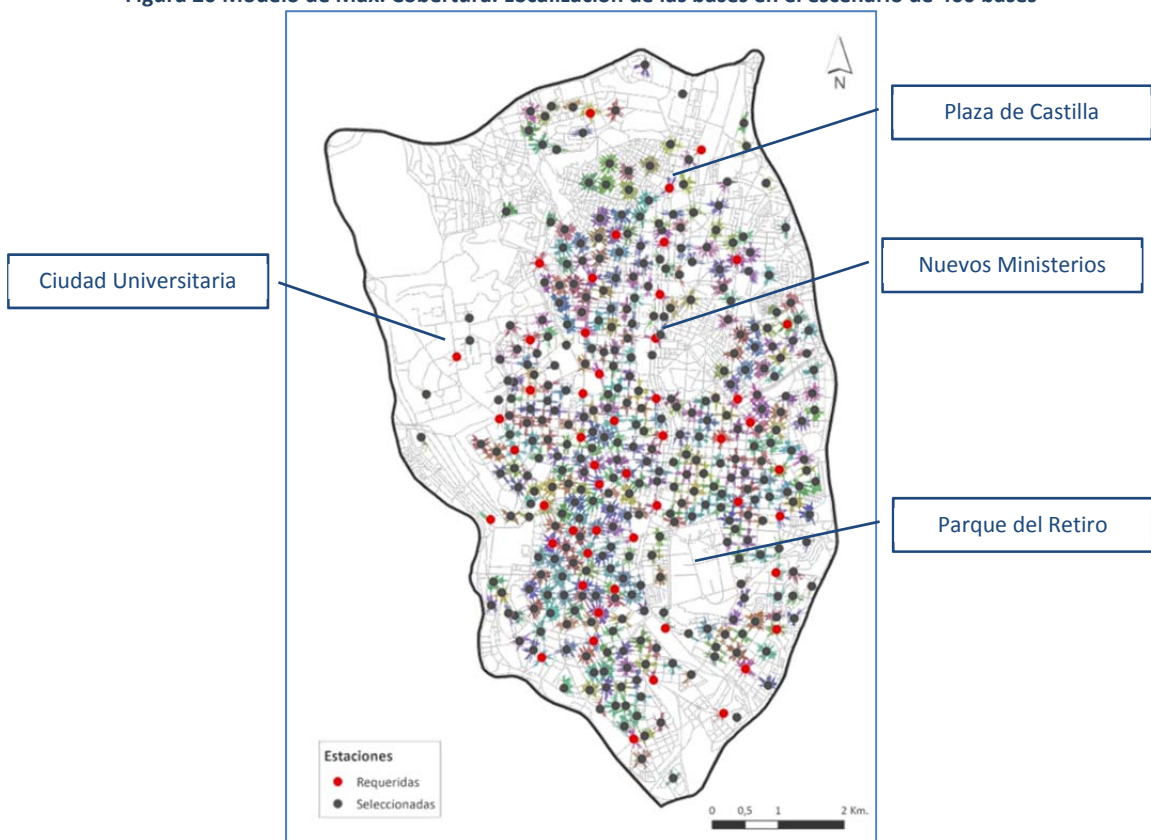
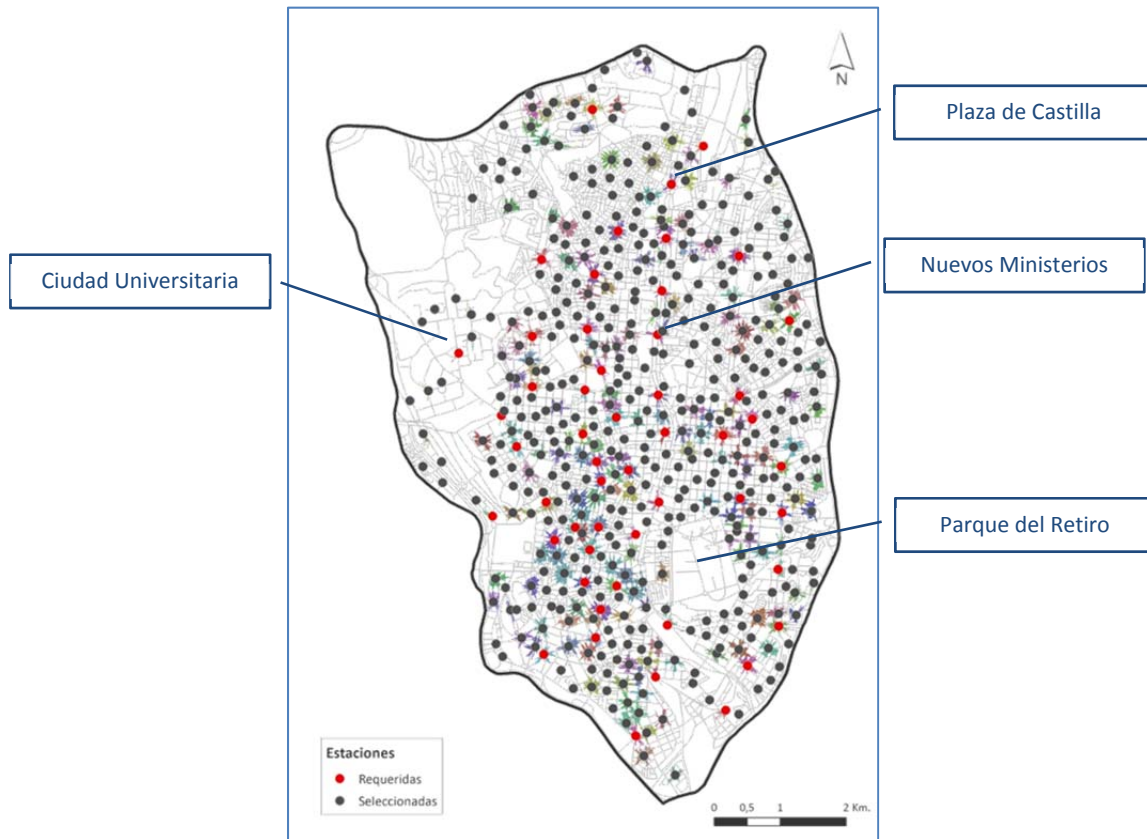


Figura 20 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 400 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 21 Modelo de Máx. Cobertura. Localización de las bases en el escenario de 500 bases



Fuente: Elaboración propia

En los sucesivos mapas, (Figura 22 a Figura 26) se muestra la demanda potencial asignada a las bases en los diferentes escenarios planteados. A medida que aumenta el número de bases, disminuye la demanda asignada, produciéndose un fenómeno de competencia entre estas, además hay que considerar respecto al escenario de Máxima cobertura que la demanda potencial cubierta por cada base es menor debido a la impedancia de doscientos metros a pie.

Figura 22 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 100 bases

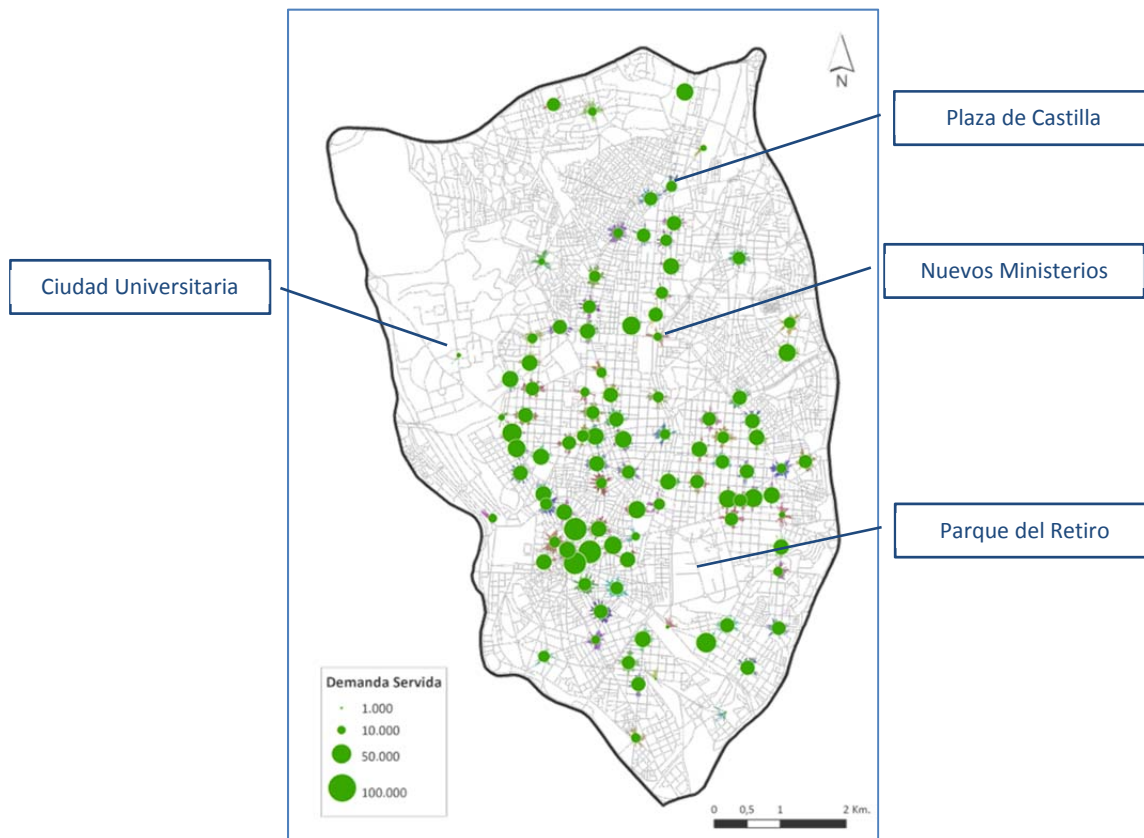
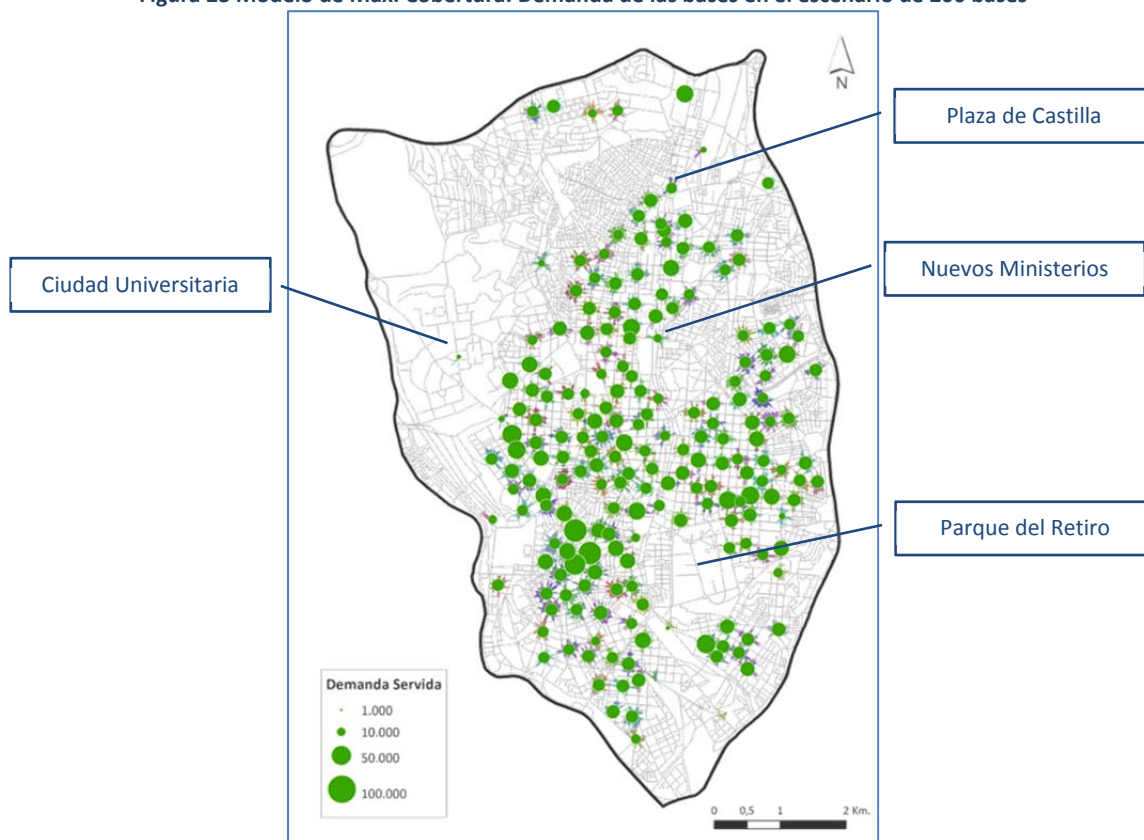


Figura 23 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 200 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 24 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 300 bases

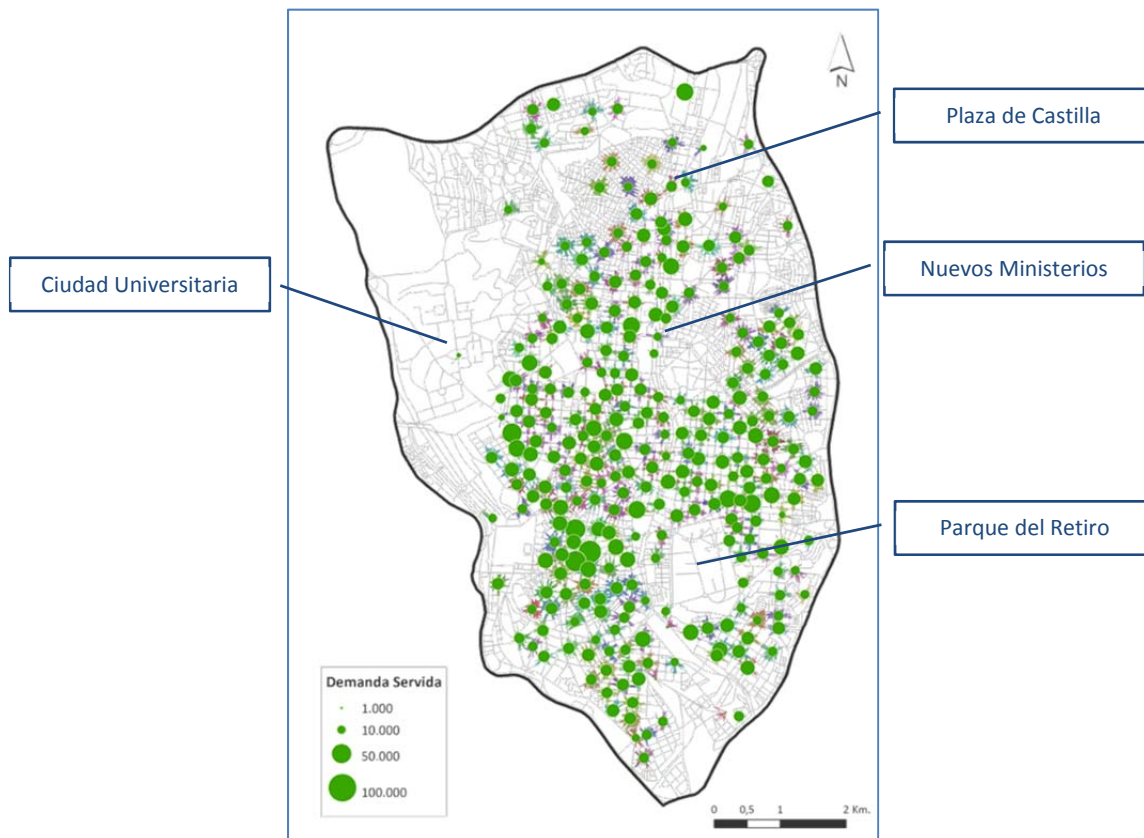
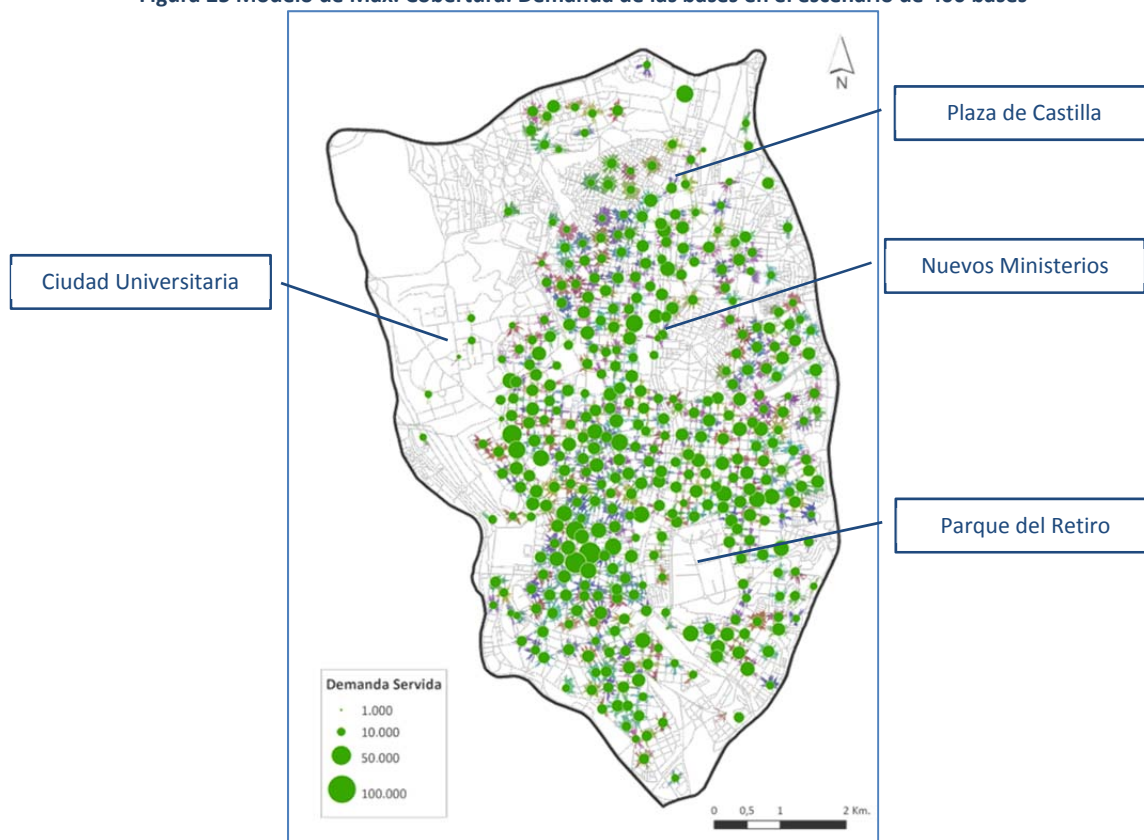
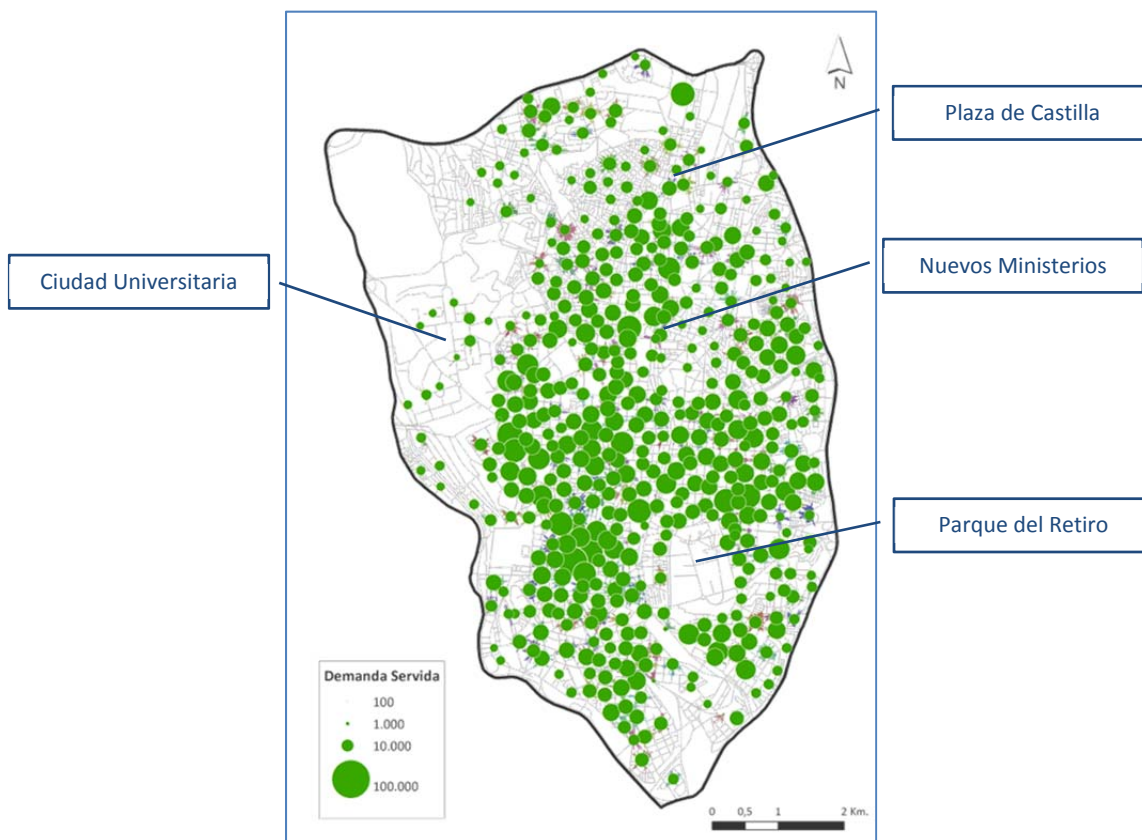


Figura 25 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 400 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 26 Modelo de Máx. Cobertura. Demanda de las bases en el escenario de 500 bases



Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 5* se muestran los resultados obtenidos en los distintos escenarios: se aprecia una variación en la distancia media entre bases, pasando de 130 metros en el escenario de 200 bases a 122 metros en el escenario de 500 bases. A medida que varían los escenarios, la demanda de cada base disminuye al tiempo que la demanda cubierta a 200 metros de cada base aumenta hasta cubrir el 90% del total de población del área de estudio en el escenario que contempla mayor número de bases.

La distancia media entre las bases es mucho más baja que en el escenario de Mínima Impedancia, aunque por las características del análisis, la población cubierta en un radio de doscientos metros es más elevada.

Tabla 5 Accesibilidad a las bases de bicicletas a través de la red: criterios de Máxima Cobertura.

Nº de bases	Distancia [m]		Distancia media [m] ponderada demanda		Distancia máxima [m]	Demanda bases		Demanda Cubierta 200 m	
	\bar{x}	δ	\bar{x}	δ		\bar{x}	δ	Total	%
100	133,5	13,8	132,0	21,2	200	25 758,3	13 042,9	2 575 827,8	32,2
200	130,7	11,8	131,9	17,4	200	22 518,1	9 255,3	4 503 626,4	56,3
300	127,7	13,1	129,7	17,6	200	19 306,2	7 978,8	5 791 870,2	72,5
400	123,8	13,5	124,9	18,2	200	16 544,0	7 364,2	6 617 586,6	82,8
500	122,3	13,9	124,3	19,6	200	14 389,5	7 732,8	7 194 754,5	90,0

Fuente: Elaboración propia

IV.3 Comparación de los resultados de ambos modelos

Una vez obtenidos los resultados para los diferentes escenarios, es posible comparar los modelos utilizados, aplicados al problema que nos ocupa: la localización óptima de bases de bicicletas públicas en la almendra central de Madrid. A partir de criterios como la distancia media entre bases y la demanda cubierta por cada una en los diferentes escenarios analizados, se puede identificar cuál es el mejor modelo para análisis y estudios posteriores.

IV.3.1 Distancias medias entre bases

Mediante este criterio se quiere conocer cuánto distan entre sí las bases los diferentes escenarios, ponderando la distancia por la demanda de cada una de las bases, de manera a considerar no sólo la distancia, sino a tener en cuenta la demanda de cada una de estas.

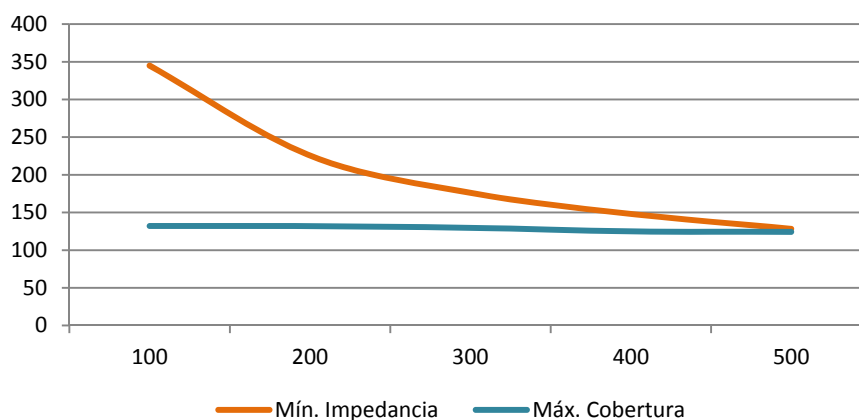
La *Figura 27* muestra la comparación entre las distancias medias ponderadas en cada escenario planteado. Resulta especialmente interesante conocer el número de bases a partir del cual el modelo de Mínima Impedancia deja de ser eficaz. A partir de 300 bases se considera que el modelo de Máxima Cobertura es más eficaz, por lo tanto es aquel en el que se van a seguir haciendo los análisis de caracterización.

Tabla 6 Distancia media entre bases de bicicletas [m].

Nº Bases	Min. Impedancia				Max. Cobertura			
	\bar{x}	Dist. Máx.	Dist. Mín.	δ	\bar{x}	Dist. Máx.	Dist. Mín.	δ
100	997,43	3 550,67	277,62	387,30	740,43	2 715,27	193,73	379,42
200	677,83	2 689,81	226,31	280,70	537,09	2 676,96	193,73	262,51
300	559,60	2 855,01	146,78	260,12	472,53	1 602,74	195,17	193,41
400	484,95	2 886,34	138,70	229,92	436,58	1 832,31	134,13	182,31
500	436,39	2 834,41	135,23	201,78	420,06	1 428,61	129,66	154,57

Fuente: Elaboración propia

Figura 27 Distancia media ponderada entre bases



Fuente: Elaboración propia

IV.3.2 Demanda cubierta por las bases

Se quiere comparar la demanda cubierta por las bases, para ello se va a considerar la demanda cubierta en cada escenario planteado en un radio de doscientos metros sobre la red. En la *Tabla 7* se presentan estos resultados, siendo el escenario de Máxima Cobertura el que más alcance tiene sobre la población.

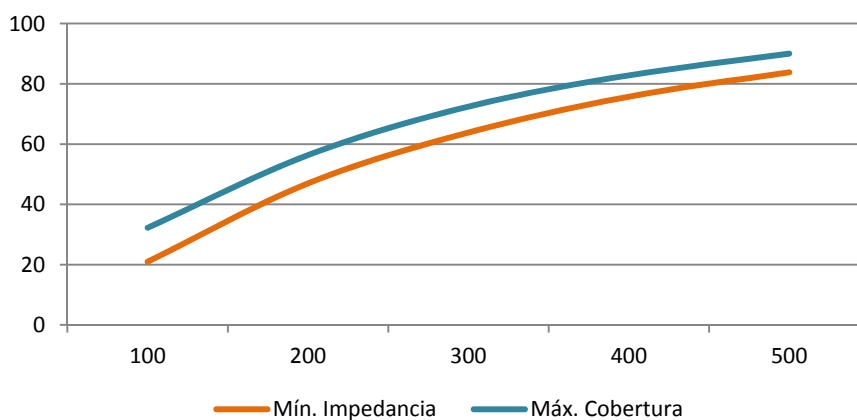
En la *Figura 28* se muestra la población cubierta en los escenarios planteados, a partir de un determinado número de bases, el incremento del número de bases supone un esfuerzo excesivo en relación a la ganancia en demanda: rendimiento decreciente.

Tabla 7 Demanda cubierta por las bases a 200 m.

Nº de bases	Mín. Impedancia	Máx. Cobertura
100	20,96	32,23
200	46,98	56,35
300	63,82	72,47
400	75,75	82,80
500	83,82	90,02

Fuente: Elaboración propia

Figura 28 Demanda cubierta por las bases a 200 m.



Fuente: Elaboración propia

A la vista de los resultados obtenidos el método de Máxima Cobertura, con una tolerancia de 200 metros es el modelo que mejor se ajusta a la demanda total potencial ciclista del área de estudio, y que más reduce la distancia entre bases en cada uno de los escenarios seleccionados, por lo que la caracterización general de las bases se va a hacer a partir de este método.

IV.4 Caracterización de los tipos de bases para los modelos de máxima cobertura: bases atractoras, bases generadoras, bases mixtas.

Las bases seleccionadas tienen diferente localización en función de los escenarios planteados, tal y como se ha analizado en el apartado IV.3. Esta localización atribuye a cada base diferentes características: Atractoras, Generadoras o Mixtas en función de su demanda potencial, tal y como se ha descrito en el apartado III.7. Esta caracterización permite conocer, por tanto, la tipología de las bases de manera a poder establecer el número de bicicletas o puntos de anclaje libres en cada una de ellas en función de si se trata de bases generadoras o atractoras en los escenarios de Máxima Cobertura.

A partir de los datos de demanda potencial obtenida, se van a diferenciar cuatro tipos de bases, y su tipología de ubicación (Figura 29 a Figura 33):

- ✓ **Bases Generadoras:** $\frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total Viajes}} < 40\%$. Estas bases se encuentran en zonas eminentemente residenciales, como por ejemplo la zona del Barrio del Pilar, en el Norte, la zona del Barrio de Delicias en el Sur o el Barrio de Imperial en el suroeste del área de estudio. Estas bases por tanto deben tener la práctica totalidad de sus puntos de anclaje ocupados a primera hora de la mañana, para permitir el uso por parte de la población residente.
- ✓ **Bases Mixtas:** $40\% < \frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total Viajes}} < 60\%$. Estas bases se encuentran en zonas donde hay una fuerte diversidad de usos, por lo que la demanda potencial se debe tanto a viajes atraídos como a viajes generados. Las bases se retroalimentan de bicicletas a lo largo del día debido precisamente a esta diversidad de usos. Las zonas en las que pueden encontrarse son el entorno de la Calle Bravo Murillo, eje Norte-Sur que discurre en paralelo al Paseo de la Castellana, el barrio de Prosperidad, o el Barrio de Fuente del Berro en el este del área de estudio.
- ✓ **Bases Atractoras:** $60\% < \frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total Viajes}} < 80\%$. Estas bases se encuentran en zonas comerciales o empresariales donde finalizan muchos viajes, de manera que en hora punta de la mañana tiene que haber más puntos libres de anclaje que ocupados, mientras que en hora punta de la tarde tiene que haber más puntos de anclaje ocupados que libres. Estas bases se encuentran en los barrios de Vallehermoso, próximo a Cuatro Caminos, y de Lista, próximo a la estación de Goya-Felipe II.
- ✓ **Bases Muy Atractoras:** $\frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total Viajes}} > 80\%$. Estas bases se encuentran en entornos empresariales o comerciales, por lo que sus características de ocupación son las mismas que las de las bases Atractoras. Estas se encuentran en el eje del Paseo de la Castellana-Paseo de Recoletos-Paseo del Prado, y el entorno de Sol, y de Nuevos Ministerios, así como de los principales Intercambiadores de Transporte.

Figura 29 Tipología de las bases en el escenario de 100 bases

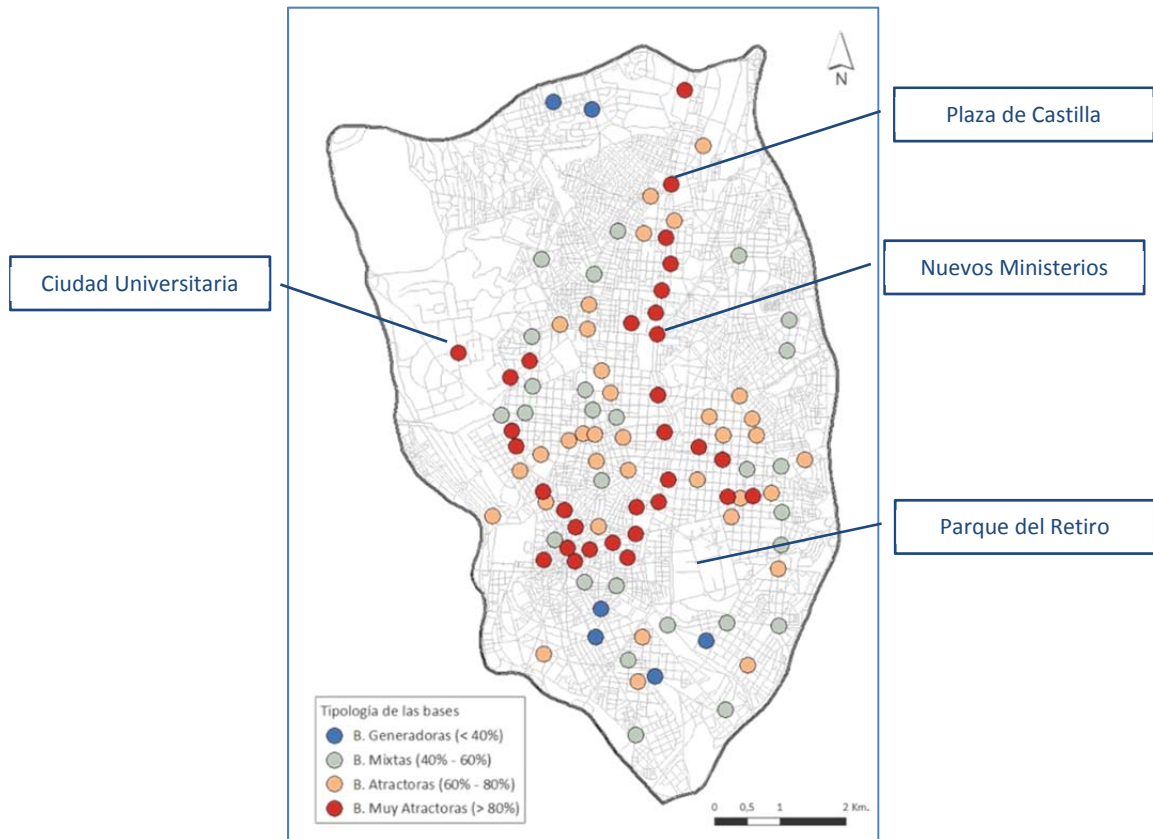
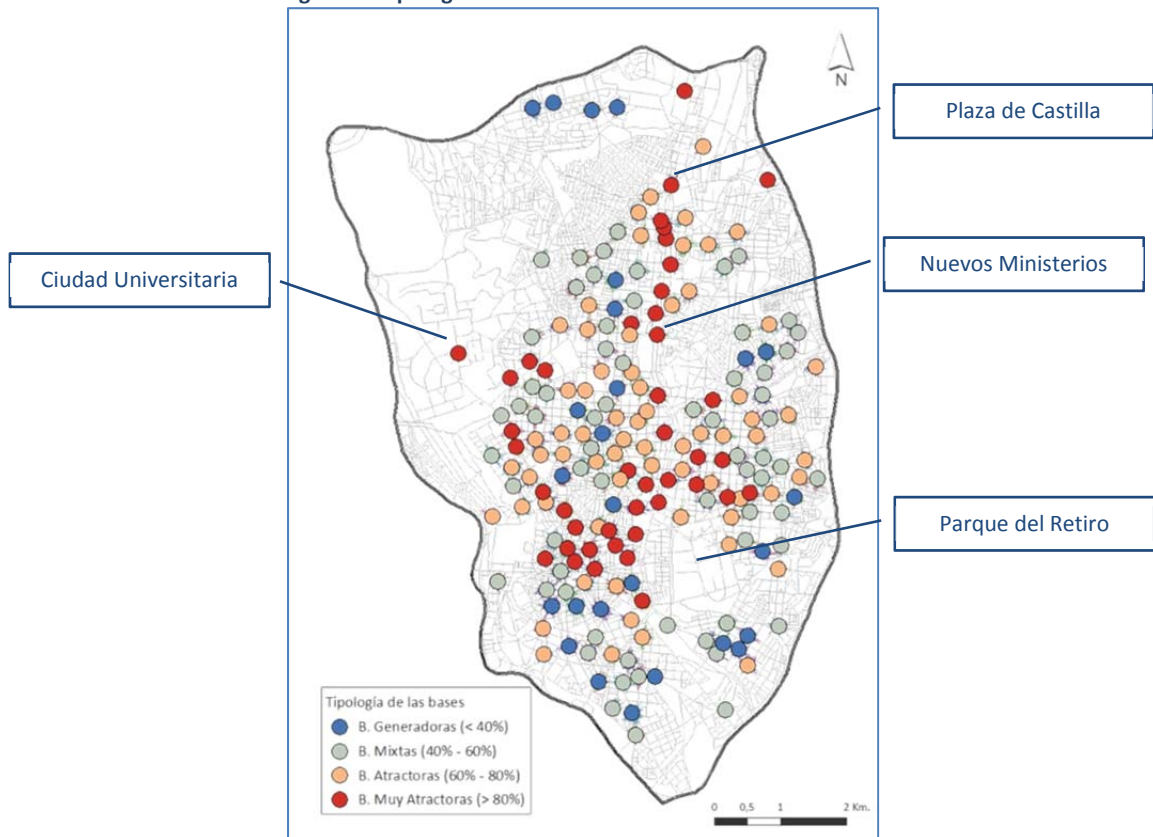


Figura 30 Tipología de las bases en el escenario de 200 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 31 Tipología de las bases en el escenario de 300 bases

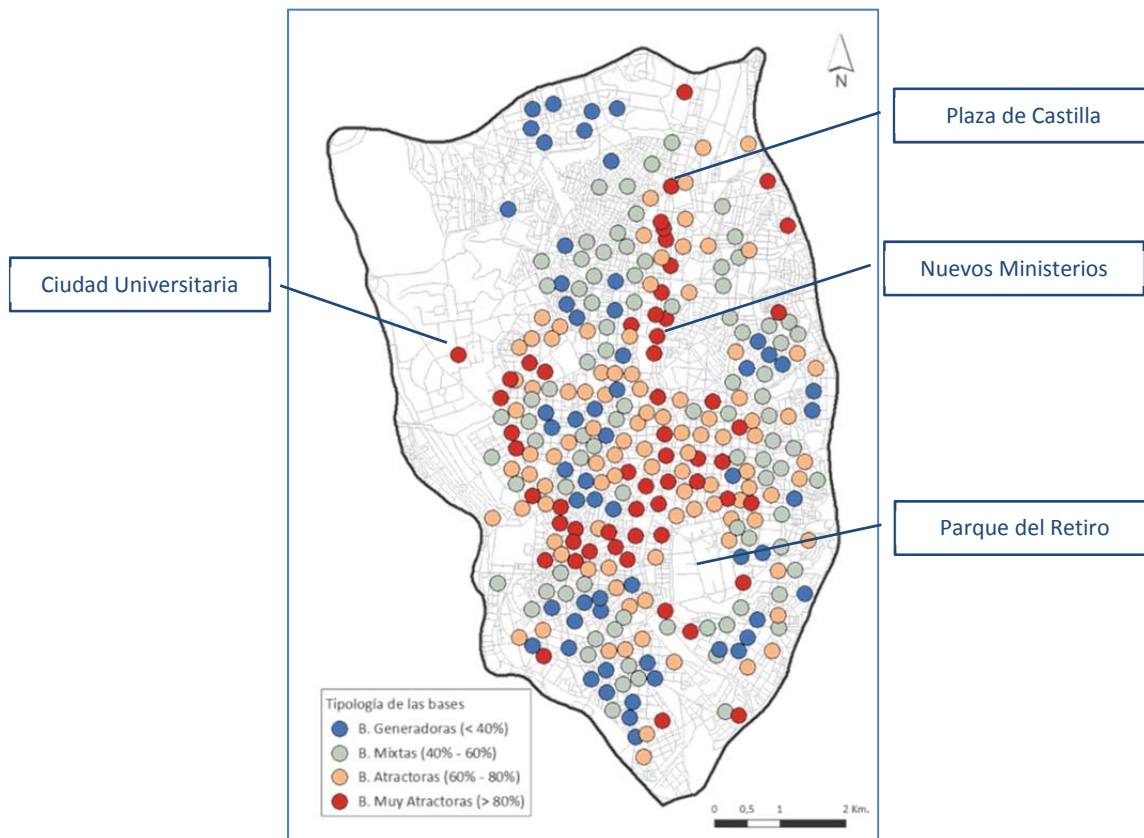
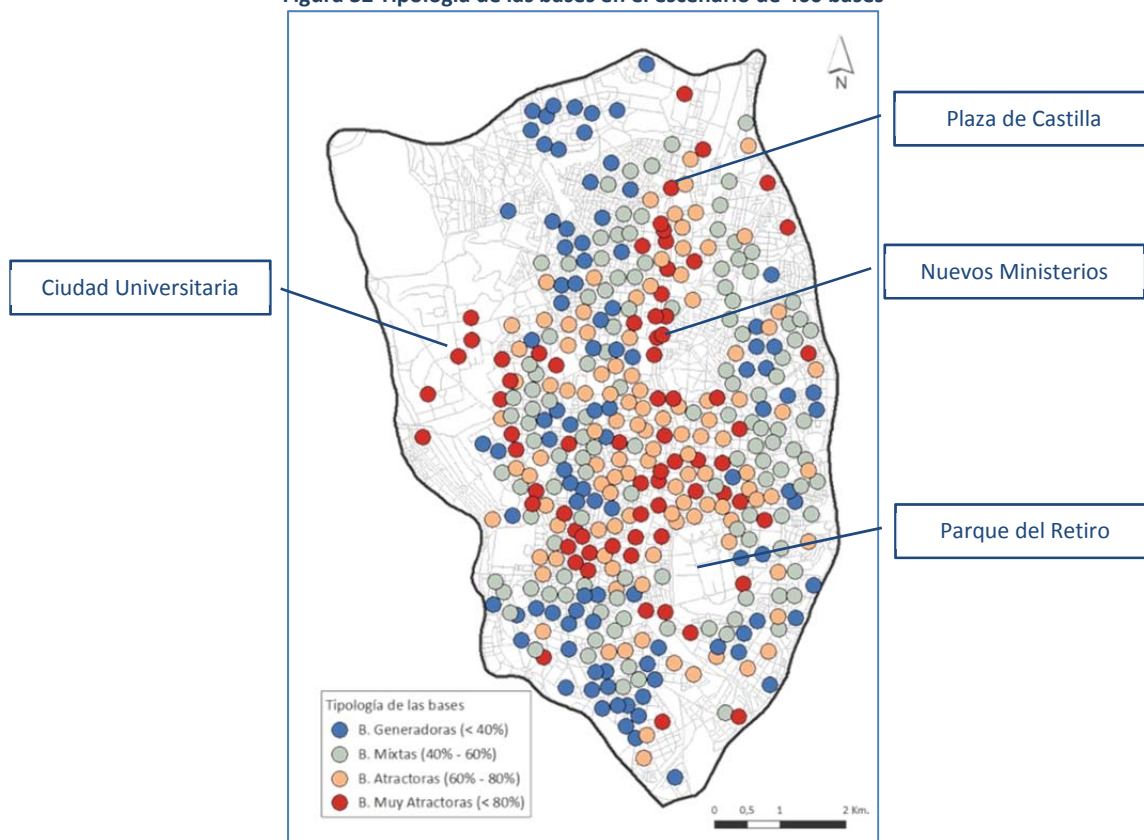
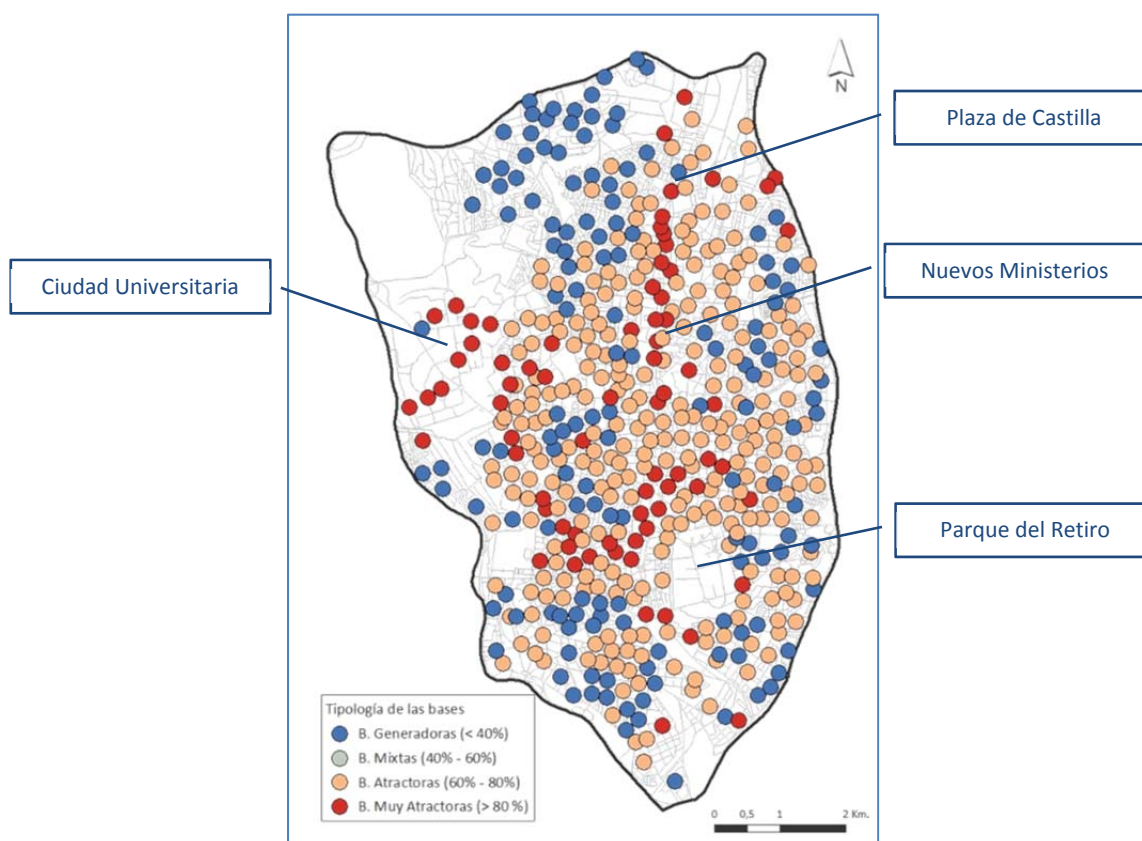


Figura 32 Tipología de las bases en el escenario de 400 bases



Fuente: Elaboración propia

Figura 33 Tipología de las bases en el escenario de 500 bases



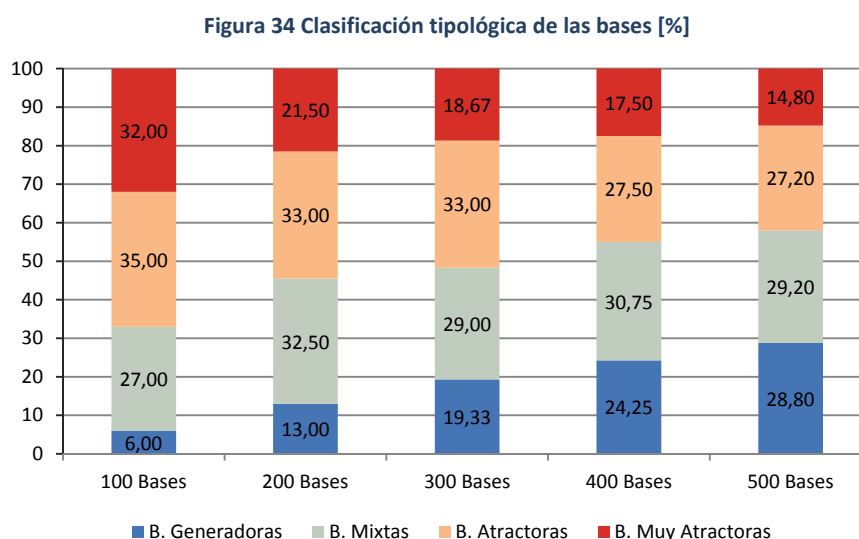
Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 8* se presentan las características de las bases. En el escenario de 100 bases, la mayoría se encuentran en el centro de la ciudad, donde la demanda potencial es más elevada en las zonas de atracción (zonas de empleo y zonas comerciales). A medida que aumenta el número de bases en los diferentes escenarios, aumenta el porcentaje de bases generadoras, que dan servicio a zonas eminentemente residenciales, normalmente zonas más periféricas, tal como se aprecia en la *Figura 34*. Sin embargo muchos de los potenciales usuarios llegan a la “Almendra” desde distritos periféricos u otros municipios mediante los canales de transporte público, por lo tanto su destino intermedio en el área de estudio son los intercambiadores o las principales estaciones.

Tabla 8 Tipología de las bases

Nº Bases	Bases Generadoras		Bases Mixtas		Bases Atractoras		Bases Muy Atractoras	
	Total	[%]	Total	[%]	Total	[%]	Total	[%]
100	6	6,00	27	27,00	35	35,00	32	32,00
200	26	13,00	65	32,50	66	33,00	43	21,50
300	58	19,33	87	29,00	99	33,00	56	18,67
400	97	24,25	123	30,75	110	27,50	70	17,50
500	144	28,80	146	29,20	136	27,20	74	14,80

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

IV.5 Accesibilidad potencial de las bases

La localización de las bases seleccionadas viene determinada por la demanda potencial asignada, en función de cada uno de los escenarios planteados. Esta localización determina la accesibilidad de cada una de las bases en los diferentes escenarios. A partir de los datos de demanda y viajes se ha procedido a caracterizar la accesibilidad potencial de cada una de las bases para poder comparar esta accesibilidad en los diferentes escenarios planteados.

La accesibilidad de cada una de las bases aumenta a medida que aumenta su número, se hace por tanto patente el “Efecto Red” (*Figura 35 a Figura 39*).

Figura 35 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 100 bases.

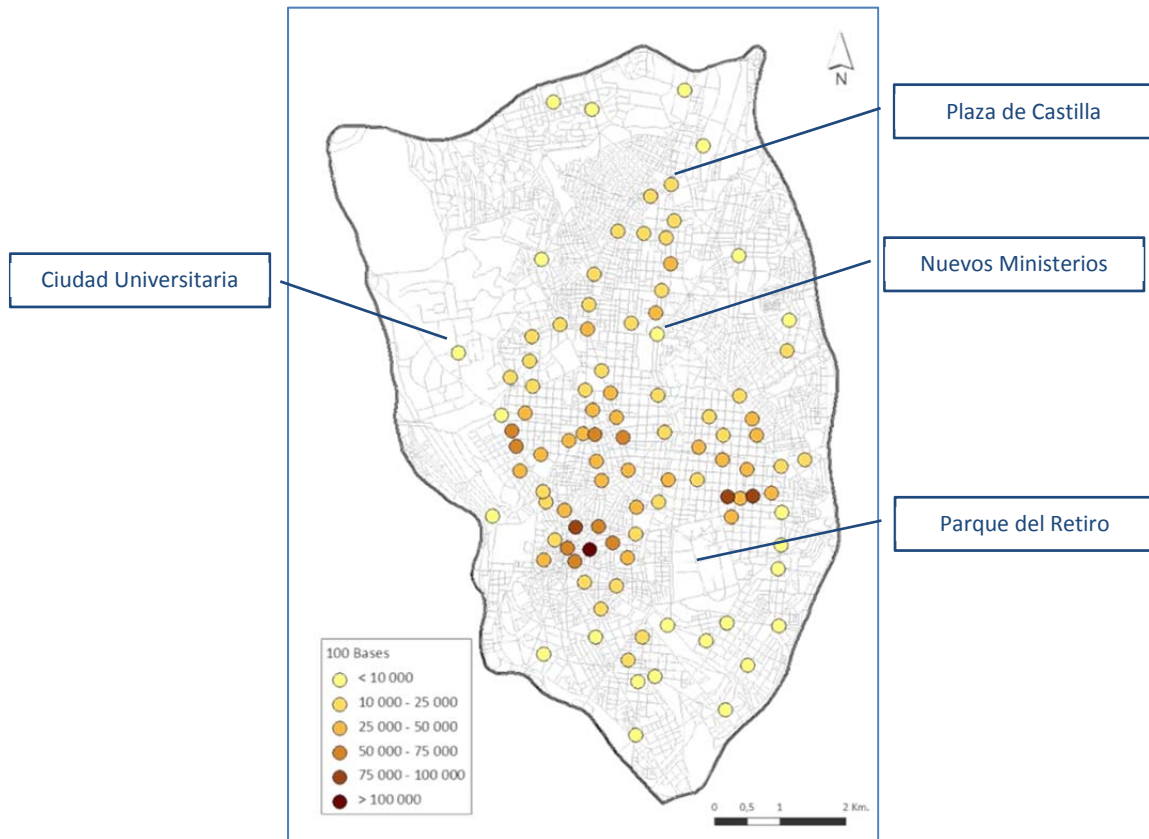
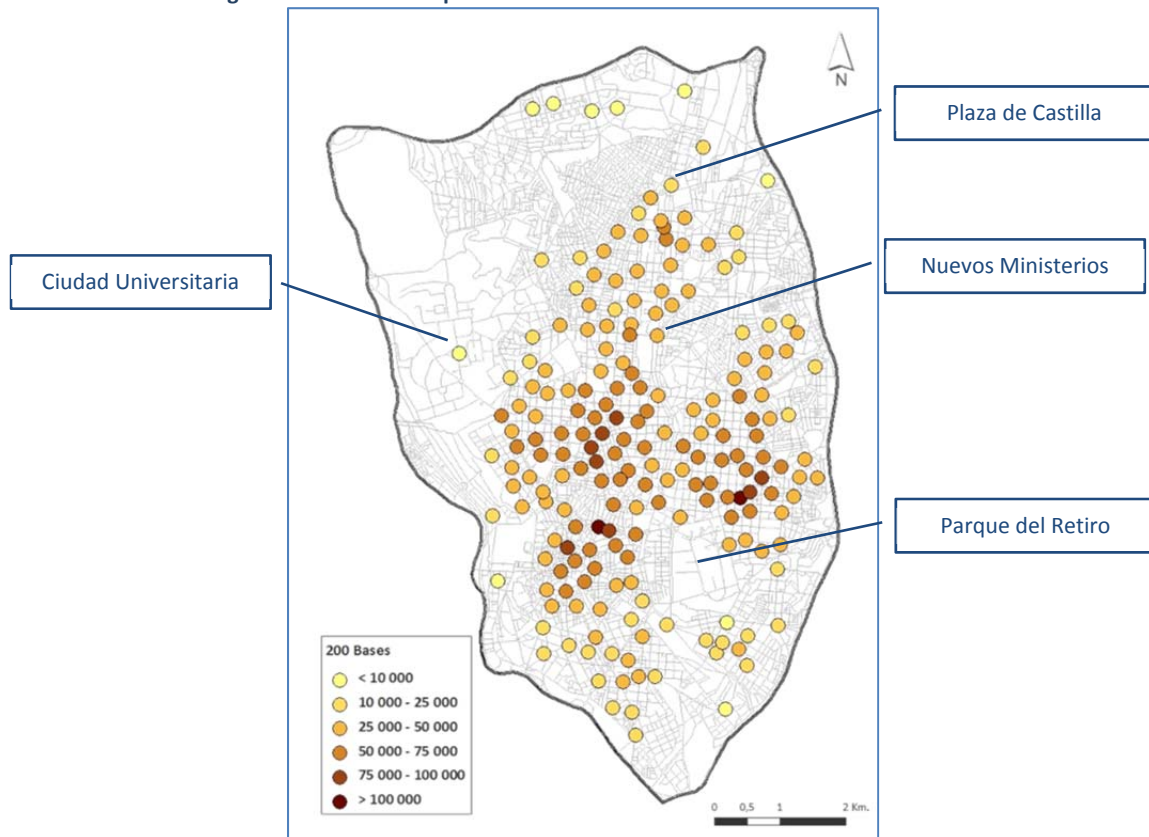


Figura 36 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 200 bases.



Fuente: Elaboración propia

Figura 37 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 300 bases.

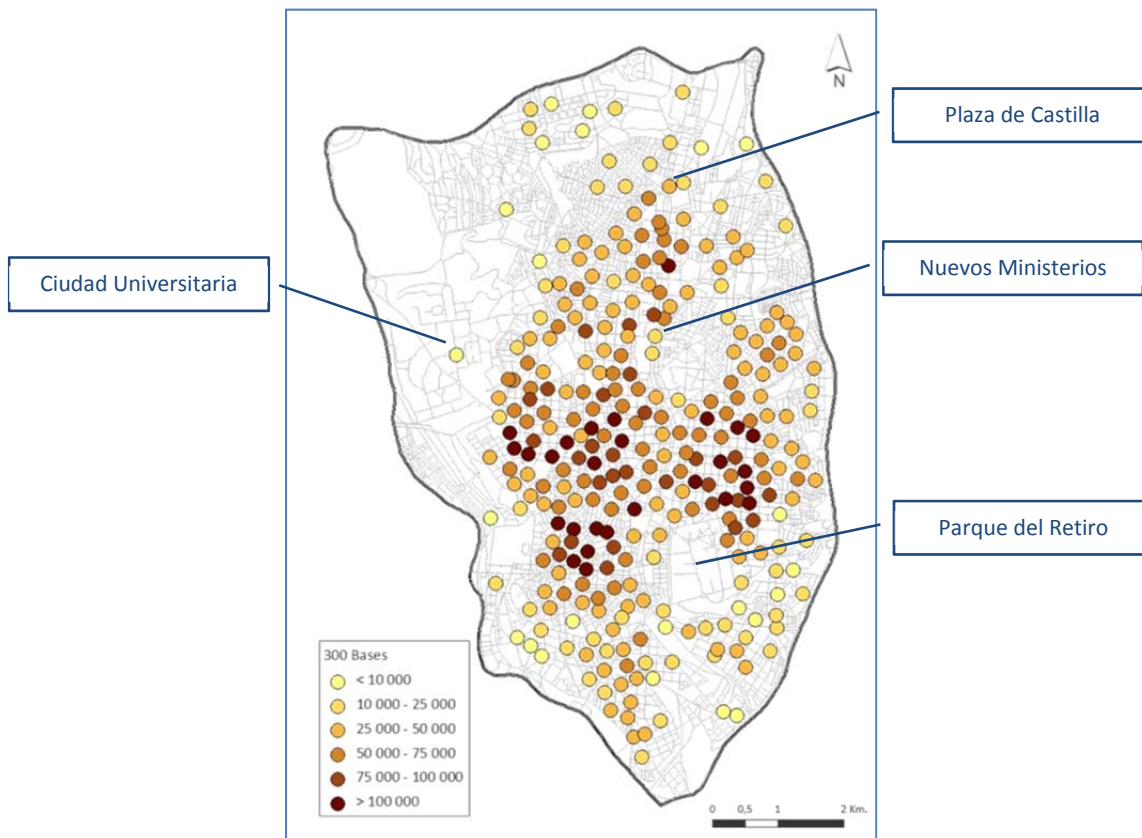
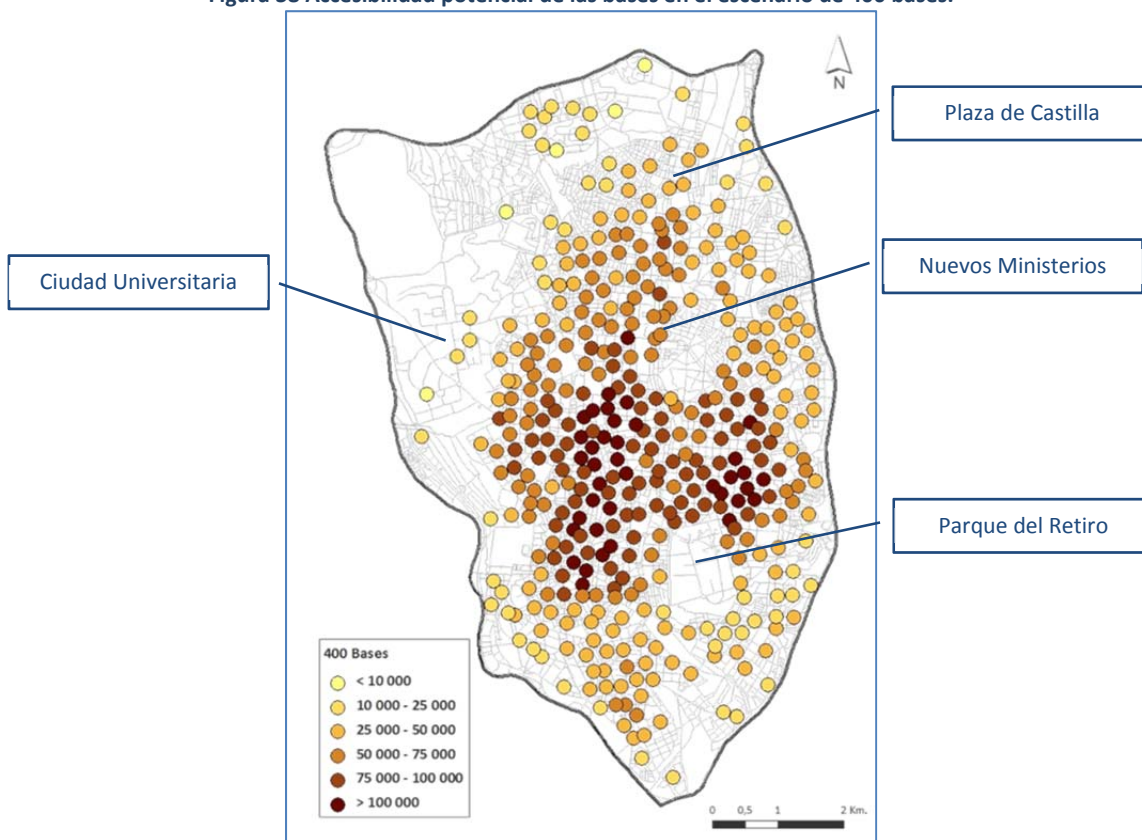
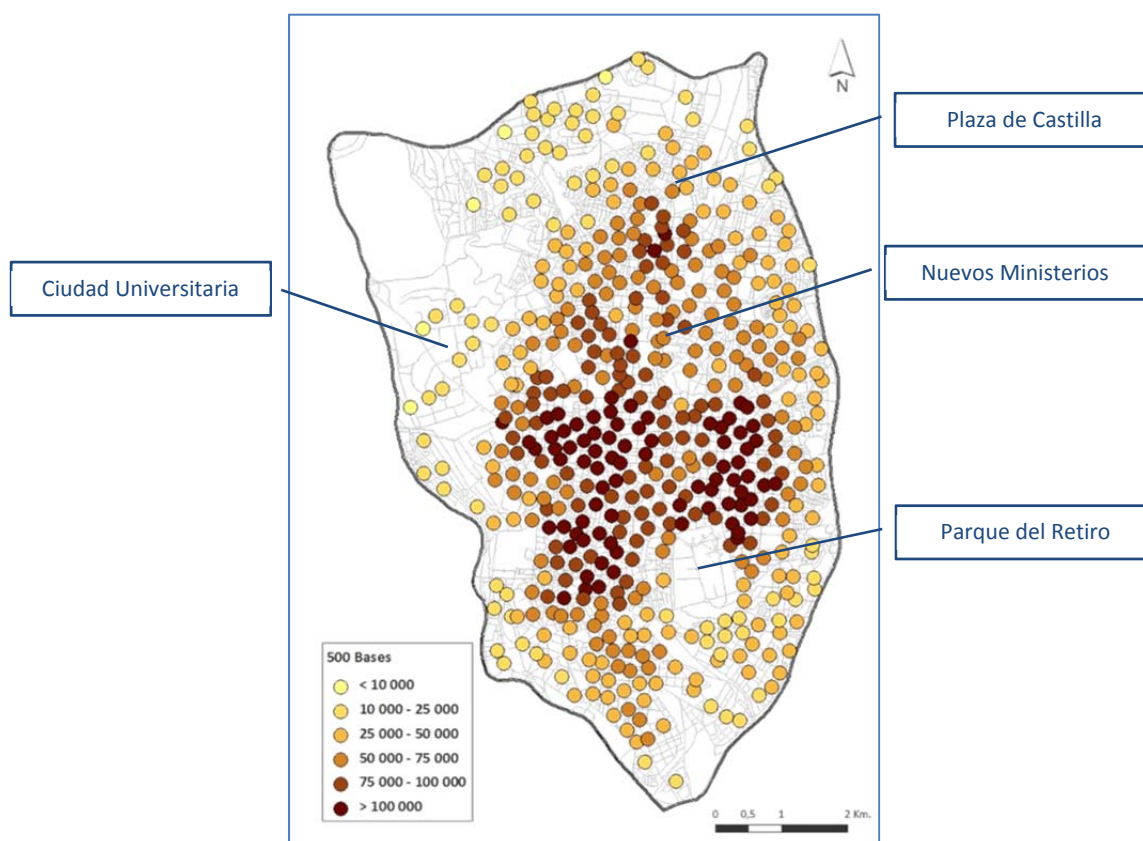


Figura 38 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 400 bases.



Fuente: Elaboración propia

Figura 39 Accesibilidad potencial de las bases en el escenario de 500 bases.



Fuente: Elaboración propia

La accesibilidad varía en los diferentes escenarios (Tabla 9), aumentando a medida que aumentan el número de bases propuestas. Las bases con mayor accesibilidad son aquellas que se encuentran en las áreas centrales, en las que confluye la demanda de transporte generada tanto por población residente como por población empleada, mientras que las bases periféricas tienen una menor accesibilidad.

Con el aumento progresivo del número de bases, aumenta la accesibilidad de cada una de ellas, ampliándose la posibilidad de elegir la bicicleta como medio de transporte en esa zona, por lo tanto se acrecienta el efecto red.

Tabla 9 Accesibilidad media a las bases

Nº Bases	Accesibilidad	
	\bar{x}	δ
100	25 689,06	21 523,86
200	41 054,42	20 304,90
300	50 339,57	36 869,03
400	58 508,17	29 950,60
500	62 154,60	33 875,44

Fuente: elaboración propia

V. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Mediante este trabajo se ha querido proponer una metodología de análisis para establecer los puntos de localización óptima de una red de bases de alquiler público de bicicletas con sistemas de información geográfica. Tras una revisión de los trabajos de investigación en curso, se ha hecho una recopilación de la información estadística y cartográfica necesaria para la puesta en marcha de la red de bases.

Para la elaboración del análisis se han utilizado dos modelos de localización, siendo el modelo de máxima cobertura en un radio de doscientos metros el que mejores resultados espaciales arroja, reduciendo la distancia entre bases en cada uno de los cinco escenarios planteados, pero también encontrando rendimientos decrecientes con el incremento del número de bases.

En cada uno de los escenarios se ha caracterizado tanto la tipología de la base como su accesibilidad, factores a tener en cuenta en la implantación de un sistema público de alquiler de bicicletas, además de la inversión inicial, los costes de mantenimiento y explotación.

Esta caracterización permite establecer los parámetros de uso de la bicicleta en función de la tipología de las bases (generadora, atractora o mixta). Gracias a esta cuantificación se pueden establecer pautas de reposición de bicicletas en las bases. Para ello es posible cuantificar el número de puntos de anclaje necesarios en cada base seleccionada a partir de los datos de demanda potencial, teniendo en cuenta que en proyectos similares planteados en un determinado área de Madrid, la relación es de veintiséis puntos de anclaje, y trece bicicletas en cada base (Proyecto Mybici, 2009).

Por otra parte, el análisis de la accesibilidad muestra la importancia del efecto red en la utilidad de las bases, de manera que a mayor número de bases más utilidad tiene cada una de ellas y más utilidad tiene el conjunto de la red.

A la vista de los resultados obtenidos se estima que un escenario inicial de trescientas bases es suficiente para cubrir la demanda potencial existente en el área de estudio, encontrándose a partir de este escenario rendimientos decrecientes en cuanto a cobertura de la demanda, mientras que a medida que aumenta el número de bases, mayor es la accesibilidad. No obstante es aconsejable realizar los análisis económico-financieros y de coste-beneficio correspondientes, para valorar la viabilidad económica del proyecto en estudio. Por otra parte, se recomienda hacer un estudio de detalle de cada una de las bases propuestas de manera a encontrar la mejor ubicación para no interferir con el mobiliario urbano existente, vados, rampas, portales, e incluso modificar su localización inicial para instalarlas en calles con aceras más anchas, siguiendo siempre los criterios de proximidad a la demanda.

VI. Bibliografía

- AYUNTAMIENTO DE MADRID. (2008). *Plan Director de Movilidad Ciclista de Madrid*.
- AYUNTAMIENTO DE MADRID. (2009). *Proyecto MyBici*.
- AYUNTAMIENTO DE SEVILLA. (2010). *Estudio sobre la movilidad en bicicleta en la ciudad de Sevilla*. Enero.
- BACHAND-MARLEAU, Julie; LARSEN, Jacob; EL-GENEIDY, Ahmed M. (2001). *The much anticipated marriage of cycling and transit: Bot how will it work?* Accepted for publication in *Transportation Research Record*. 22pp.
- BARNES, Gary; KRIZEK, Kevin. (2005). *Estimating bicycle demand*. 17 pp.
- BONNETTE, Brittany. (2007). *The Implementation of a Public-Use. Bicycle Program in Philadelphia*. Urban Studies Program. Senior Seminar Papers. Universidad de Pensilvania. 53pp.
- BOSQUE, Joaquín; MORENO, Antonio. (2004). *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*. Madrid. Ra-Ma. 353 pp.
- BRUINSMA, F.; RIETVELD. (1998). *The accessibility of European cities: theoretical framework and comparison of approaches*. Environment and Planning A 30: pág. 499-521.
- CERTU - *Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques*. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.
- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES. (2009). *Plan d'Action pour la mobilité urbaine*. Bruselas. 14pp.
- COMPTON, Tom. (2001). *Analytic Cycling* (www.analyticcycling.com/ForcesSpeed_Page.html).
- CONSORCIO REGIONAL DE TRANSPORTES DE MADRID. (2009). *Plan de Intercambiadores de Madrid*. Madrid. Comunidad de Madrid. 479pp.
- COOPER, L. (1963). *Location-Allocation Problems*. Operations Research, 11, pp. 331-343.
- DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO. MINISTERIO DEL INTERIOR. (2003). *Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento de Carril Bici*. Madrid. 250 pp.
- GRAND LYON. (2007). *Enquête utilisateurs Vélo'v*. Newsletter nº 17, Avril.

- IACOMO, Michael; KRIZEK, Kevin; EL-GENEIDY, Ahmed. (2008). *Access to Destinations: How close is close enough? Estimating accurate distance decay functions for multiple modes and different purposes*. Minnesota Department of Transportation. Research Services Section. 76 pp.
- JENSEN, Pablo; ROUQUIER, Jean-Baptiste; OVTRACHT, Nicolas; ROBARDET, Céline. (2010). *Characterizing the speed and paths of shared bicycles in Lyon*. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 15(8). Pág. 522 – 524.
- LANDIS, B. W. (1996). *Bicycle system performance measures*. ITE Journal, 66(2), 18-26.
- LARSEN, Jacob; EL-GENEIDY, Ahmed. (2009). *Build it, but where? The use of Geographic Information Systems in identifying optima location for new cycling infrastructure*. Transportation Research Board 89th Annual Meeting. 16pp.
- LIN, Jenn-Rong; YANG, Ta-Hui. (2011). *Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints*. Transportation research. Part D.
- LITMAN, Todd et Al. (2006, 2009, 2011). *Pedestrian and Bicycle Planning Guide to Best Practices*. Victoria Transport Policy Institute.
- MARTENS, Karel. (2004). *The bicycle as a feeding mode: experiences from three European countries*. Transportation research. Part D. Pág. 281-294.
- MARTENS, Karel. (2007). *Promoting bike-and-ride: the Dutch experience*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 41/4. Pág. 326-338.
- MUHAMMAD, et Al. (2008). *Job accessibility under the influence of information and communication technologies, in the Netherlands*. Journal of Transport Geography 16:203-216.
- NYC DEPT. CITY PLANNING. (2009) *Bike-share Opportunities in New York City*. 142pp.
- ORTÚZAR, Juan de Dios; IACOBELLI, Andrés; VALEZE, Claudio. (1999). *Estimating demand for a cycle-way network*. Transportation Research Part A. 21 pp.
- PRESTO. (2010). *Cycling policy guide. General Framework*. Project of the EU's Intelligent Energy – Europe Programme granted by the Executive Agency for Competitiveness and Innovation (EACI).PRESTO – “Promoting Cycling for Everyone as a Daily Transport Mode”. 15 pp.
- PROBICI. (2010). *Guía de la Movilidad Ciclista. Métodos y técnicas para el fomento de la bicicleta en áreas urbanas*. IDAE – Madrid. 146 pp.
- QUAY COMMUNICATIONS INC. (2008) *TransLink Public Bike System Feasibility Study*. Volume 3.48pp.

- RIBEIRO, Vítor; GUTIÉRREZ, Javier y REMOALDO, Paula. (2011). *Geographic Information Systems and Social Exclusion: Mapping transport disadvantages to health care*. Cercedilla, NECTAR Cluster 6 Meeting "Accessibility and Spatial Planning", October.
- RONDINELLA, Gianni. Dir. Andrés MONZÓN. (2010) "¿Cómo fomentar la bicicleta como modo de transporte urbano en las ciudades españolas? Compendio de los conocimientos desarrollados por la literatura internacional y su adaptación al contexto español". Departamento de Ingeniería Civil- Transportes. Universidad Politécnica de Madrid.
- RYBARCZYK, Greg; WU, Changshan. (2010). *Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis*. Applied Geography 30. Pág. 282-293.
- SCHWARTZ, W. L. (1999). *Guidebook on methods to estimate non-motorized travel: Supporting documentation*. US Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development, Turner-Fairbank Highway Research Center. Available to the public through the National Technical Information .Service.
- SHU, Jia; CHOU, Mabel; LIU, Qizhang; TEO, Chung-Piaw; WANG, I-Lin. (2010). *Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of re-distribution*. 33pp.
- TRANSYT – CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL TRANSPORTE. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. (2008). *Proyecto Unibici Madrid. Estudio previo para la implantación de un sistema de préstamo de bicicletas en la Ciudad Universitaria de Madrid*. Madrid. 157pp.
- TURNER, S., HOTTERNSTEIN, A., & SHUNK, G. (1997). *Bicycle and pedestrian travel demand forecasting: Literature review*.
- TURNER, S., TEXAS, et Al. (1997). *Bicycle and pedestrian travel demand forecasting: Literature review*. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System. Available through National Technical Information Service.
- VÉLIB', MAIRIE DE PARIS. (2009) *Deuxième baromètre de satisfaction des usagers du Vélib' 2009*. Newsletter Juin.

