

Modelos de optimización de la localización de bases de bicicletas públicas: un enfoque basado en Sistemas de Información Geográfica

Javier Gutiérrez Puebla

Catedrático, Universidad Complutense de Madrid, España

Juan Carlos García Palomares

Profesor Titular, Universidad Complutense de Madrid, España

RESUMEN

Un número creciente de ciudades están implementando programas de bicicletas públicas para incrementar el uso de la bicicleta. Uno de los factores clave en el éxito de estos programas es la localización de las bases en relación a la demanda potencial (población, actividades, estaciones de transporte público). En este trabajo se propone una metodología apoyada en un Sistema de Información Geográfica (GIS) para optimizar la localización de bases de bicicletas en función de la distribución espacial de la demanda potencial de viajes. Esta metodología utiliza modelos de localización óptima de servicios. Aquí se comparan los resultados obtenidos mediante dos de las soluciones más usadas, mínima impedancia y máxima cobertura, concluyendo que el segundo es más útil para el objetivo del trabajo. En ambos casos se observan rendimientos decrecientes: con el aumento del número de bases las mejoras en cantidad de población cubierta y accesibilidad son cada vez menores. A la vez, estos modelos permiten también determinar la capacidad necesaria en las bases y conocer las características de su demanda según la cual se puede clasificar a las bases diferenciando entre generadoras y atractoras de viajes. Dado que también la estructura espacial de la red propuesta juega un papel importante en el uso de las bases, adicionalmente se realiza un análisis de accesibilidad para calcular el volumen de actividad que al que tiene acceso cada una de las bases. Este análisis permite descartar bases relativamente aisladas y que por lo tanto tendrían poca utilidad para sus potenciales usuarios.

1. INTRODUCCION

En los últimos años las políticas de promoción del uso de la bicicleta han cobrado una atención especial entre los planificadores del transporte urbano, como uno de los modos alternativos al uso intensivo del coche. En el marco de la movilidad sostenible el uso de la bicicleta tiene numerosos beneficios para el conjunto de la sociedad (en lo referente a la sostenibilidad ambiental, económica o la propia equidad social) pero también a nivel individual. Moverse en bicicleta es saludable, es barato e, incluso, en el interior de los centros urbanos más congestionados, es un modo más eficiente, ya que al poder evitar los atascos es más rápida que el coche o el transporte público.

Por eso tanto desde la planificación como desde las investigaciones académicas hay un

creciente interés en el estudio de los factores que incrementan el uso de la bicicleta. Las propuestas son numerosas y afectan a campos muy diferentes. Los planificadores urbanos tratan de reconducir la distribución de los usos del suelo y la forma urbana hacia pautas más compactas y diversas, que faciliten desplazamientos más cortos. Los planificadores del transporte invierten en infraestructuras para la bicicleta (carriles bici, aparcamientos, etc.), dan prioridad al ciclista frente al coche o facilitan el uso conjunto de la bicicleta y el transporte público. Médicos y psicólogos tratan de entender el papel de aptitudes y comportamientos en el uso de la bici con el fin de poder influir sobre ellos (Dill and Voros, 2007).

Entre las actuaciones más destacadas para incrementar el uso de la bicicleta se encuentra la implantación de programas de préstamo de bicicletas públicas. El propósito de estos programas es que los usuarios puedan tomar prestada una bicicleta pública en cualquier base de préstamo distribuidas por la ciudad, realizar su desplazamiento y depositarla en otra base, próxima a su lugar de destino. Las primeras experiencias de bicicletas públicas surgieron en Europa, con el famoso sistema “*White Bicycles*” en Ámsterdam en 1968. Desde esta primera experiencia, los programas se han ido multiplicando y los modelos se han ido haciendo cada vez más complejos, mostrando distintas generaciones a partir de cambios en los componentes de los programas y sus características (DeMaio, 2003; Midgley, 2011). En la actualidad se estima que hay alrededor de 678 sistemas de préstamo de bicicletas repartidos por todo el mundo, con más de 700.000 bicicletas en esas ciudades (ver Bike-sharingWorldMap, <http://bike-sharing.blogspot.com>).

Una de las claves para el éxito de los programas de préstamo de bicicletas está en la localización óptima de las bases. El factor más relevante es la localización en relación con la demanda de viajes (Lin y Yang, 2011). Para que tenga aceptación entre los usuarios, la distancia entre las bases de préstamo y los orígenes y destinos de los viajes deben ser pequeñas, así como también las distancias entre las propias bases deben ajustarse a distancias asumibles por el propio desplazamiento en bicicleta (Shu et al, 2010).

Otros elementos importantes en la localización de las bases son la relación con la red de transporte público (Martens, 2007) y su integración también con el resto de infraestructuras para la bicicleta (Midgley, 2011). La bicicleta se convierte en un modo complementario dentro del propio sistema de transporte público, puesto que amplía el radio de influencia de las estaciones y paradas, tanto en los movimientos de acceso como de dispersión. Además, normalmente los programas de bicicletas públicas forman parte de proyectos de movilidad ciclistas que prevén la construcción o ampliación de las redes de carriles ciclistas, junto a otras medidas como la restricción del uso del coche o medidas de calzado del tráfico.

A pesar de la importancia de la localización de las bases para el éxito de estos programas, mientras se han estudiado en profundidad otros elementos importantes para el funcionamiento de los programas de préstamo de bicicletas (como el precio o la forma de

préstamo, niveles de servicio, tipos de instalaciones, etc.), los trabajos sobre la localización de las bases son escasos y tienden a dar recomendaciones generales. En España, la Guía de la Movilidad Ciclista (IDAE-TRANSyT, 2010) propone un modelo basado en matrices de movilidad y el comportamiento de los usuarios, cuya aplicación es testada en la ciudad de Santander. Este modelo es complejo y requiere de información detallada de movilidad, que en gran medida debe obtenerse de costosas encuestas. Sin embargo, en ninguno de los trabajos consultados han utilizado modelos de localización óptima de servicios (location-allocation analyst) apoyados en un Sistema de Información Geográfica (GIS), que permita optimizar la localización de las bases de bicicletas públicas.

Esta ponencia tiene como objetivo proponer una metodología basada en GIS para determinar la localización óptima de las bases de bicicletas e identificar sus características principales. Los GIS tienen un gran potencial en este campo, debido a su capacidad de análisis espacial. Así, ayudan a conocer y analizar la distribución de la demanda potencial de usuarios de bicicleta, los espacios de atracción de viajes o la ubicación de las estaciones de transporte público complementarios al sistema de bicicletas. Las herramientas para la localización óptima de servicios ayudan a modelizar la distribución de las bases a partir de la distribución de la demanda y los modos complementarios. Además, facilitan la caracterización posterior de las bases según las características de su entorno, o el análisis del nivel de servicio a través de indicadores de accesibilidad de la red propuesta.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

La propuesta metodológica se aplica en el centro de la ciudad de Madrid. El interés de los planificadores locales en Madrid para la promoción de la bicicleta es creciente en los últimos años. En 2009 el Ayuntamiento de Madrid presentó el proyecto MyBici, de alquiler de bicicletas públicas, dentro del Plan de Calidad del Aire 2011-2015 del Ayuntamiento de Madrid. El plan se espera que arranque en Mayo de 2014.

El centro de Madrid se caracteriza por ser un espacio de una gran diversidad de usos de suelo y alta densidad de población y empleo. Allí viven 1.100.000 habitantes y se localizan 930.000 puestos de trabajo. En la actualidad sólo el 0,1% de los viajes en el centro de Madrid se hacen en bicicleta. Sin embargo los datos de movilidad muestran un importante número de viajes que podrían ser realizados en bicicleta: un 54% de los desplazamientos motorizados cubren distancias de menos de 3 Km, y un 15% de viajes realizados en coches presentan todas las condiciones para ser realizados en bicicleta, bajo las mismas circunstancias de tiempo y sin modificar las características del viaje (Monzón et al, 2007).

Para la aplicación de la metodología propuesta se ha contado con la siguiente información cartográfica y estadística:

- *Callejero municipal* (del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid). Tiene plena conectividad y permite simular la movilidad peatonal y en bicicleta. Para calcular

los tiempos en bicicleta sobre la red se ha introducido información de las pendientes y las velocidades en cada arco.

- *Portales* (Cartociudad-Instituto Geográfico Nacional). A los portales se ha asociado la información sobre la población (a partir del Padrón) y el número de empleos (según el Directorio de Unidades de Actividad Económica, DUAE) de cada portal.
- *Datos de viajes atraídos y generados a nivel de zona de Transporte* (Encuesta domiciliaria de movilidad. 2004. Consorcio Regional de Transportes de Madrid.). Esta información se ha considerado para el cálculo de la demanda potencial de viajes en bicicleta.
- *Red de transporte público*: estaciones de la red de Metro y Cercanías (Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, 2011).

Para el tratamiento de la información y la aplicación de los modelos de localización óptima se ha usado ArcGIS-ArcINFO 10 y su módulo Network Analyst.

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la localización óptima de las bases en un sistema de bicicletas públicas tiene cuatro etapas. En primer lugar es necesario conocer la distribución de la demanda potencial de usuarios. Después se aplican modelos de localización óptima, definiendo las bases obligatorias, las localizaciones candidatas, el número de bases a localizar y el tipo de solución elegido. Una vez obtenida la localización de las bases, se caracterizan las bases y finalmente se analiza la utilidad de las bases en términos de accesibilidad a los destinos potenciales.

3.1 La distribución de la demanda potencial

La distribución espacial de la demanda es un elemento fundamental en los modelos de localización óptima. Para obtener la demanda potencial de las bases se parte de una capa de puntos que contiene la población y el empleo de cada portal y de una capa de polígonos que contiene el número de viajes generados y atraídos por cada zona de transporte. Multiplicado el número de habitantes de cada portal por el ratio de viajes generados por habitante de su zona de transporte se estima el número de viajes generados por cada portal. De la misma forma, multiplicando el número de empleos de cada portal por el ratio de viajes atraídos por empleo de su zona de transporte se obtiene el número de viajes atraídos por portal. Sumando los datos de viajes generados y atraídos en cada portal se ha calculado el total de viajes. Con estos datos se han calculado mapas de densidad kernel para presentar la distribución espacial de la demanda de las bases de bicis públicas.

3.2 Modelos de localización óptima

Los modelos de localización óptima se han calculado usando datos discretos, tanto en las localizaciones candidatas para la situar las bases como en los puntos de demanda. De las soluciones propuestas habitualmente (e implementadas en ArcGIS 10), se han aplicado las dos usadas con mayor frecuencia: la de mínima impedancia (P-Median) y la de máxima

cobertura. En la solución de mínima impedancia las bases se localizan de forma que se minimiza la suma de las distancias ponderadas entre los puntos de demanda y la localización de las bases. Mientras, con máxima cobertura las bases son localizadas de manera que se maximiza la demanda cubierta en un determinado umbral de distancia. En nuestro caso, el umbral de distancia considerado para el análisis de máxima cobertura fue de 200 metros, tratando de reflejar una distancia apropiada para el acceso peatonal a la bicicleta.

3.3 Escenarios

Se plantean cinco escenarios distintos en función del número total de bases de bicicletas a localizar: 100, 200, 300, 400 y 500 (Tabla 1). Otros trabajos, como el realizado en Nueva York, definen también diferentes escenarios en función del total de bases o según la extensión del área a cubrir por el sistema (ver NYC Dept. City Planning, 2009). Aquí proponemos mantener fija la extensión del área a cubrir por el programa, con el fin de testar las diferencias en la localización de las bases a medida que aumenta su número.

La mayor parte de los programas fijan un volumen de bicicletas en función del total de habitantes. La cobertura de los programas de bicicletas públicas es relativamente densa entre las ciudades francesas, como Paris (9,6 bicicletas por cada 1000 habitantes), Lyon (6,4/1000) o Rennes (4,8/1000) comparado con otras ciudades europeas como Copenhague y Estocolmo (ambas con 4,0/1000), Barcelona (3,7/1000), Bruselas o Frankfurt (1,1/1000), Oslo (0,5/1000) y Viena (0,4/1000) (Midgley, 2011). Los distintos programas establecen también la capacidad de las bases (número de bicis y anclajes), siendo normalmente doble el número de anclajes que el de bicicletas (Ayuntamiento de Madrid, 2009). De acuerdo los datos de los programas existentes en otras ciudades, el número de bicicletas y de anclajes por estación se sitúa en torno a 12 y 24, respectivamente (ver Midgley, 2011). Asumiendo ese valor medio para las futuras bases de Madrid, el número de bicicletas necesarias oscilaría entre 1200 (1,1 bicis por 1000 habitantes) en el primer escenario (con 100 bases) y 6000 en el quinto (5,5 bicis por 1000 habitante) (con 500 bases) (Tabla 1).

Escenarios (número de bases)	Bicis	Anclajes	Bicis/1000 habitantes
100	1200	2400	1,1
200	2400	4800	2,2
300	3600	7200	3,3
400	4800	9600	4,4
500	6000	12000	5,5

Tabla 1 – Número estimado de bicicletas y anclajes en los escenarios propuestos

Siguiendo las recomendaciones de experiencias ya implantadas, se ha decidido establecer bases obligatorias en todas las estaciones de trenes suburbanos y en las estaciones de Metro con más de 10000 viajeros día. En total suponen 52 bases obligatorias, que se mantienen fijas en todos los escenarios.

3.4 Capacidad de las bases

En la subsección anterior se asumió que el número medio de bicicletas y anclajes por estación será de 12 y 24, respectivamente. Pero la capacidad de las bases debe variar espacialmente, según las características del espacio que cubren. En espacios con alta demanda potencial el tamaño deberá ser mayor que en las zonas donde la demanda sea menor.

Los modelos de localización óptima proporcionan la cantidad de demanda potencial asignada a cada una de las futuras bases. La conversión del valor de demanda potencial de cada estación en número de anclajes es muy sencilla. Para ello basta con repartir el número total de anclajes de cada escenario entre las distintas bases de forma proporcional a la demanda asignada a cada una de ellas.

3.5 Caracterización de las bases

Es necesario conocer no sólo la capacidad de las bases (número de anclajes), también la distribución de bicicletas de cada una de ellas en función de la demanda asimétrica de los viajes a lo largo del día. En el GIS es posible relacionar la localización de cada estación con el tipo de demanda asignada. La localización atribuye a cada base características de generadoras o atractoras de viajes, en función de si su demanda potencial proviene de espacios residenciales (generadoras) o de zonas de actividad económica (atractoras). Esta caracterización permite variar el número de bicicletas o anclajes libres en las bases según el momento del día, mejorando de esta forma la eficiencia en los sistemas de redistribución de bicicletas. El número de bicicletas y anclajes libres al comienzo del día se obtiene repartiendo el número total de anclajes de forma proporcional al número de viajes generados y atraídos por cada estación. Así, por ejemplo, una estación de 12 anclajes, con un 75% de su demanda correspondiente a viajes generados y un 25% a viajes atraídos, requerirá al comienzo del día 9 bicicletas y 3 anclajes libres, ya que se trata de una estación situada en una zona predominantemente generadora de viajes.

Para mostrar la variación espacial de las características de las bases en función de los datos de demanda potencial se diferencian cuatro tipos de bases de bicicletas:

- **Generadoras:** ratio de viajes atraídos/total viajes inferior al 40%. La mayor parte de los viajes están generados por población residente en el entorno. Tienen que tener bicicletas en la mayor parte de sus anclajes en la hora punta de la mañana y un elevado número de anclajes libres en la tarde.
- **Mixtas:** ratio viajes atraídos/total viajes entre 40 y 60%. Zonas con diversidad de usos del suelo. Las bases se retroalimentan de bicicletas a lo largo del día.
- **Atractoras:** ratio viajes atraídos/total viajes entre 60 y 80%. Zonas comerciales o empresariales donde finalizan muchos viajes. En hora punta de la mañana tienen que tener más anclajes libres que ocupados, mientras que en la tarde tiene que haber más

anclajes ocupados que libres.

- Muy Atractoras: Ratio viajes atraídos/total viajes superior al 80%. Deben tener casi todos sus anclajes libres en hora punta de la mañana.

3.6 Accesibilidad desde las bases

La utilidad de las bases se ha medido a partir del indicador de accesibilidad de potencial, ampliamente utilizado en diferentes contextos espaciales. 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:

donde A es la accesibilidad potencial de la estación ; O son las oportunidades disponibles junto a la estación de destino (los viajes atraídos por el área asignada a esa estación); d toma el valor de 1 si la distancia entre O y A es menor de 5 km, y 0 en el caso contrario (ver Jensen et al, 2010), t es el tiempo de viaje en bicicleta entre la estación A y la estación de destino O , y α es un parámetro que refleja el incremento de la fricción de la distancia (*distance decay*), que aquí se considera igual a 2 (reflejando la elevada fricción de la distancia en el caso de los desplazamientos en bicicleta).

Este indicador debe interpretarse como el volumen de actividad al cual tiene acceso la estación. Por lo tanto hay que esperar que el uso de cada estación dependa no sólo de la cantidad de demanda asignada por los modelos de localización óptima, sino también de su accesibilidad en el conjunto de la red. De esta forma es posible priorizar bases dentro del programa de bicis públicas (descartando aquellas que tengan una muy baja accesibilidad), así como también identificar las bases que necesitarán una mayor atención desde el punto de vista de la gestión (aquellas que tengan una muy elevada accesibilidad).

4. RESULTADOS

4.1 Distribución de la demanda potencial

La Figura 1 muestra la densidad de viajes potenciales en bicicleta en el centro de la ciudad de Madrid, diferenciando entre viajes potenciales generados (Figura 1a) y atraídos (Figura 1b). Dadas las características del centro de la ciudad, con una gran cantidad de empleos, los viajes atraídos son más numerosos que los generados. La distribución de las densidades refleja las diferencias en la localización de la población (más homogénea) y las actividades (más concentradas). La suma de la demanda potencial de viajes generados y atraídos se corresponde a la demanda potencial total de viajes (figura 1c).

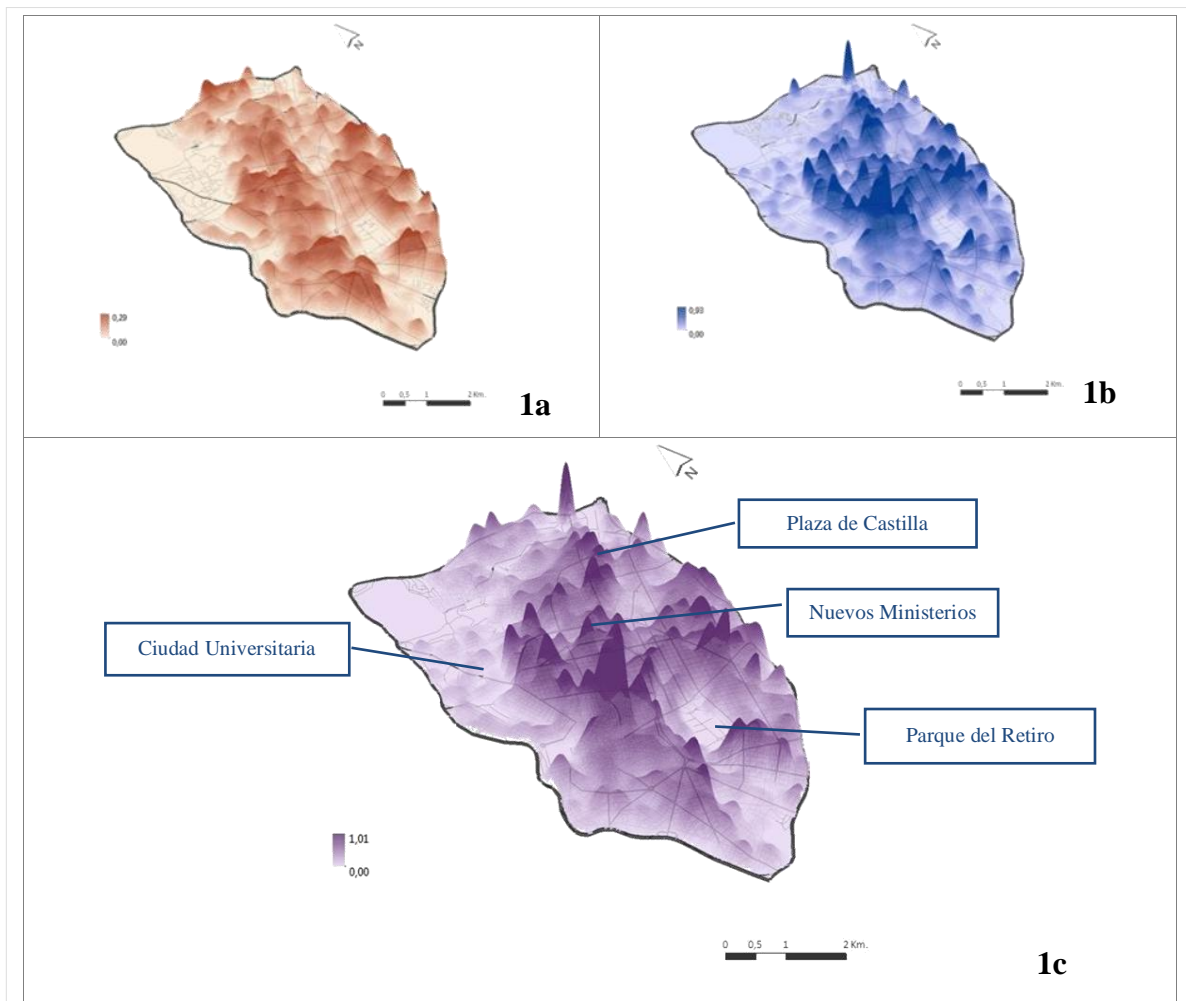


Figura 1 – Densidad de viajes generados (a), viajes atraídos (b) y total de viajes (demanda potencial) (c) en el área de estudio (viajes/m²).

4.2 Localización de las bases

La figura 2 muestra los resultados de los modelos de localización óptima. Las distribuciones son muy diferentes, tanto en función de la solución empleada como del número de bases considerado en cada escenario. Usando la solución de mínima impedancia, las bases se dispersan cubriendo todo el espacio, mientras con máxima cobertura las bases se concentran en las áreas más centrales (de mayor densidad de demanda).

Cuando se incrementa el número de bases la solución de mínima impedancia incrementa la densidad de bases de forma homogénea en todos los escenarios. Con máxima cobertura inicialmente se incrementa el número de bases en los espacios de mayor densidad de demanda (escenarios de 200, 300 bases), reforzando así la concentración. Solo cuando las zonas de alta densidad de demanda han sido cubiertas, las nuevas bases tienden a localizarse también en espacios más periféricos (escenarios con 500 bases). Así, los escenarios con 500 bases son relativamente similares en ambas soluciones.

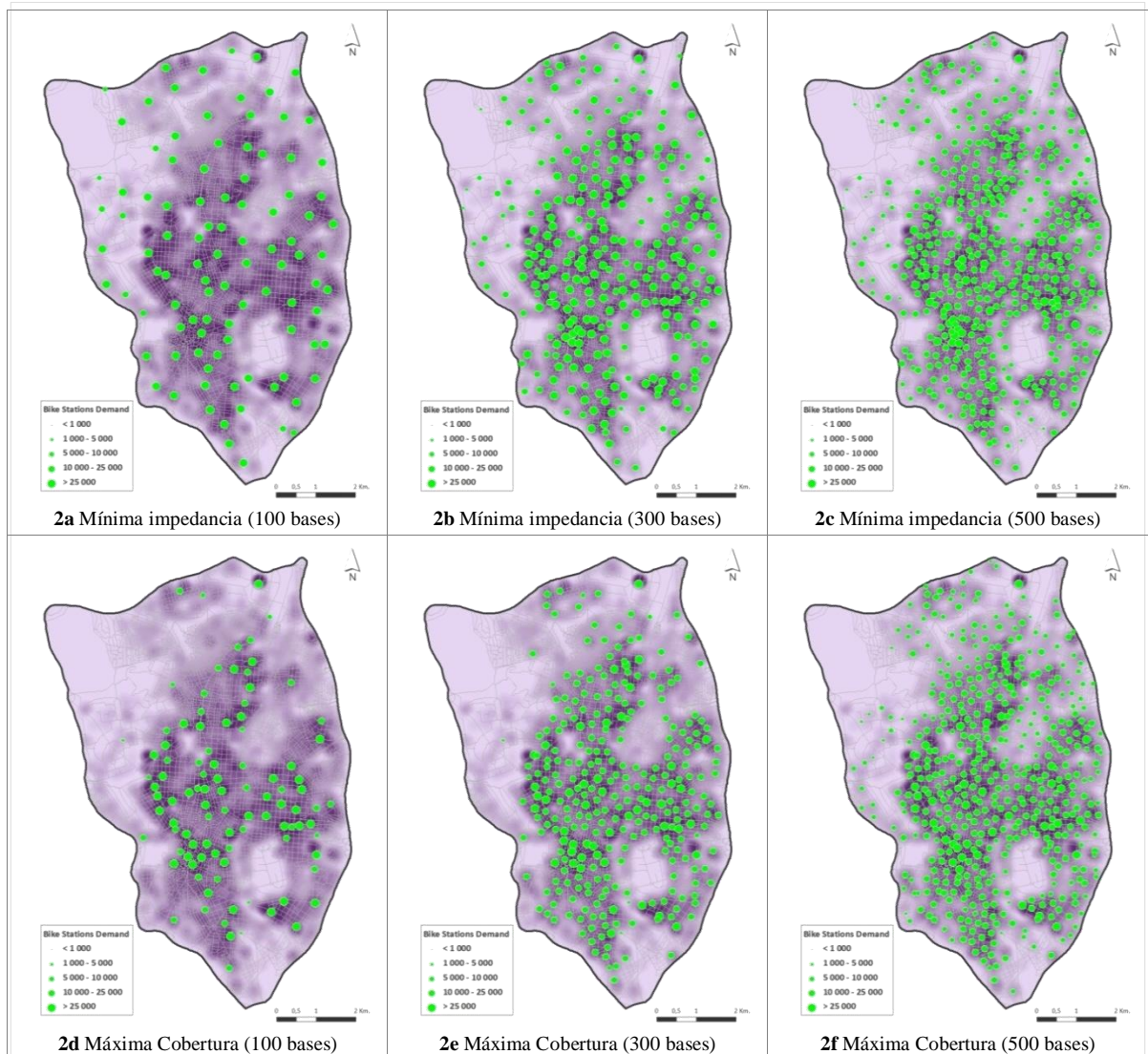


Figura 2 – Localización de las bases según escenarios, modelos y demandas asignadas.

La tabla 2 muestra las distancias máxima y media desde los puntos de demanda hasta las bases, ponderadas por la propia demanda. Con mínima impedancia toda la demanda es asignada a las bases. La distancia máxima en todos los escenarios es algo menos de 800 metros. Al incrementar el número de bases se produce una reducción notable en las distancias medias de la demanda, que pasan de 336 metros con 100 bases a 123 con 500. Con máxima cobertura la localización se hace tratando de maximizar la demanda cubierta en 200 metros (el umbral de corte considerado) y dejando fuera el resto de la demanda. Si asignamos el resto de la demanda a la estación más próxima, vemos como la distancia máxima se dispara (3700 metros en el escenario con 100 bases y 2800 con 500). Naturalmente las distancias medias son también superiores con la solución máxima cobertura, pero se reducen con más fuerza en los diferentes escenarios. En las dos soluciones aparecen rendimientos decrecientes, con una reducción fuerte de las distancias entre demanda y bases en los primeros escenarios y menor en los últimos.

Escenarios (número de bases)	Mínima impedancia (P-Median)			Máxima cobertura		
	Distancia media (m) ponderada demanda		Distancia máxima (m)	Distancia media (m) ponderada demanda		Distancia máxima (m)
	Media	Desv. Típ.		Media	Desv. Típ.	
100	336,8	156,7	794	455,2	327,2	3.728
200	214,0	118,0	799	274,9	264,0	3.415
300	169,1	98,8	797	208,2	195,7	3.124
400	142,4	88,6	798	170,4	147,9	3.018
500	123,7	80,4	796	145,0	96,0	2.816

Tabla 2 – Distancias desde los puntos de demanda a las bases.

La mayor cantidad de demanda cubierta a 200 metros de las bases se da con la solución de máxima cobertura (Tabla 3). Las diferencias son mayores en los escenarios con menor número de bases y se reducen en los escenarios de 400 y 500 bases. En las dos soluciones tienen rendimientos decrecientes con el incremento del número de bases. En los primeros escenarios, un incremento de 100 bases supone un aumento notable en la demanda cubierta (+26% y +24.1% respectivamente entre 100 y 200 bases). Sin embargo, los incrementos de demanda cubierta son menores a medida que aumenta el número de bases. Pasar de 400 a 500 bases supone incrementar la demanda cubierta en sólo un 8,1% y un 7,2%.

Escenarios (número de bases)	Mínima impedancia (P-Median)				Máxima cobertura			
	Demanda cubierta en 200 m				Demanda cubierta en 200 m			
	Total	%	Incremento	%	Total	%	Incremento	%
100	1.675.270	21,0	---	---	2.575.828	32,2	---	---
200	3.754.765	47,0	2.079.495	26,0	4.503.626	56,3	1.927.798	24,1
300	5.100.530	63,8	1.345.765	16,8	5.791.870	72,5	1.288.244	16,2
400	6.053.825	75,7	953.295	11,9	6.617.587	82,8	825.717	10,3
500	6.699.270	83,8	645.445	8,1	7.194.755	90,0	577.168	7,2

Tabla 3 – Demanda potencial cubierta a menos de 200 m de las bases

Para obtener una idea de la separación entre las bases, se calculó la distancia media de cada base a su más cercana y a las cinco bases más cercanas (Tabla 4). Las distancias son mayores en el modelo de mínima impedancia (tiende a dispersar las bases), frente al modelo de máxima cobertura (que las concentra). Sin embargo, en el modelo de máxima cobertura los escenarios de 100 y 200 bases tienen algunas en la periferia que están aisladas del resto de la red, reduciendo su utilidad. En los escenarios con un alto número de bases no sólo se reducen las distancias, también las distribuciones son más uniformes.

Escenarios (número de bases)	Mínima impedancia (P-Median)				Máxima cobertura			
	Distancia media a la estación más cercana	Std. Dev.	Distancia media a las 5 estaciones más cercanas	Std. Dev.	Distancia media a la estación más cercana	Std. Dev.	Distancia media a las 5 estaciones más cercanas	Std. Dev.
100	655,55	207,3	997,4	288,5	478,7	209,0	740,4	317,1
200	474,60	157,7	677,8	228,1	381,4	145,1	537,0	216,5
300	396,05	165,4	559,6	225,7	350,1	124,5	472,5	162,5
400	343,50	145,5	484,9	200,0	321,3	98,0	436,5	154,4
500	311,34	127,8	436,3	173,6	301,7	82,3	420,0	120,3

Tabla 4 – Distancia entre las bases (en metros)

4.3 Caracterización de las bases

La figura 3 muestra la distribución de las bases según se trate de bases generadoras, mixtas, atractoras o muy atractoras, sólo para el modelo máxima cobertura por razones de espacio. Dejando de lado las bases requeridas, en el escenario con 100 bases, la mayor parte de las bases (el 39%) son atractoras o muy atractoras, mientras apenas un 2% son generadoras (Tabla 5). Sin embargo, a medida que aumenta el número de bases se incrementa el porcentaje de bases generadoras. En el escenario con 300 bases, las bases generadoras representan el 18%, y con 500 bases, el 28%. El porcentaje de bases mixtas también aumenta, mientras disminuye el peso que tienen las localizadas en las zonas muy atractoras. Ello obedece a que el centro de Madrid atrae más viajes de los que genera, con lo que los lugares con mayor densidad de viajes potenciales tienen una componente claramente atractora (áreas de actividad). Sólo cuando aumenta el número de bases aparecen con más frecuencia las bases situadas en espacios generadores de viajes (áreas residenciales). Las bases generadoras deberían disponer de más bicicletas que anclajes libres a primera hora de la mañana, mientras que en el caso de las bases atractoras ocurriría exactamente lo contrario. El caso de las bases obligatorias o requeridas (localizadas junto estaciones de Metro y Cercanías) es especial, ya que la disponibilidad de bicicletas y anclajes libres depende no sólo de las características de las áreas asignadas, sino también del ritmo diario de entradas y salidas de viajeros en la estación.

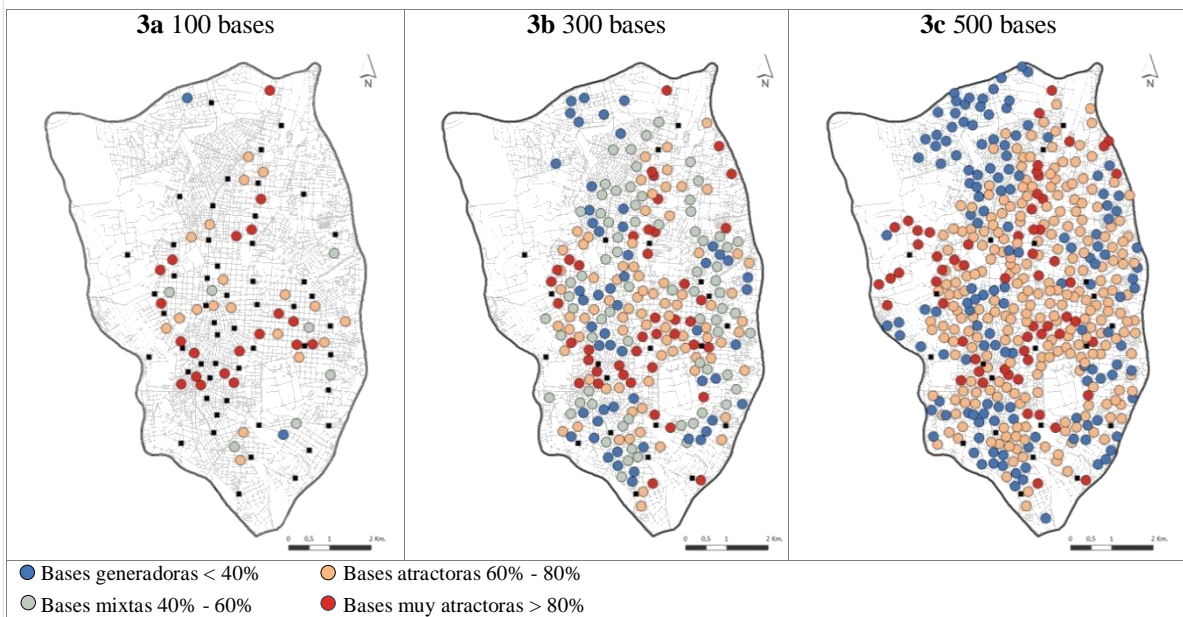


Figura 3 – Tipología de bases (con la solución de máxima cobertura).

Escenarios	Generadoras		Mixtas		Atractoras		Muy Atractoras		Requeridas	
	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
100	2	2,0	7	7,0	19	19,0	20	20,0	52	52,0
200	23	11,5	48	24,0	47	23,5	30	15,0	52	26,0
300	54	18,0	72	24,0	80	26,7	42	14,0	52	17,3
400	93	23,3	107	26,8	93	23,3	55	13,8	52	13,0
500	140	28,0	128	25,6	120	24,0	60	12,0	52	10,4

Tabla 5 – Número de bases según su tipología (Máxima cobertura)

4.4 Accesibilidad desde las bases

La Figura 4 muestra la accesibilidad de las bases a los destinos potenciales en el modelo de máxima cobertura. Las bases que proporcionan un mayor nivel de accesibilidad son las más centrales, próximas a zonas de actividades donde se localizan otras bases con alta atracción de viajes. Por el contrario, bases más periféricas, aisladas de la red, proporcionan una accesibilidad muy baja a sus usuarios, por lo que podrían ser descartadas.

Cuando aumenta el número de bases se producen incrementos generales en la accesibilidad y las bases con accesibilidad muy alta tienden a extenderse desde las zonas más centrales a las más periféricas. La accesibilidad de cada una de las bases se incrementa a medida que aumenta el número de bases en su entorno próximo, lo que aumenta la accesibilidad del conjunto de la red (Tabla 6). Este hecho es bien conocido en la literatura de transporte. A medida que la red se expande, las oportunidades disponibles en un mismo tiempo de viaje son mucho mayores (Laird et al, 2005). No obstante, los rendimientos son nuevamente decrecientes: la accesibilidad media de la red aumenta en un 59,8% entre los escenarios de 100 y 200 bases, pero sólo lo hace en un 6,2% entre los escenarios de 400 y 500 bases (Tabla 6).

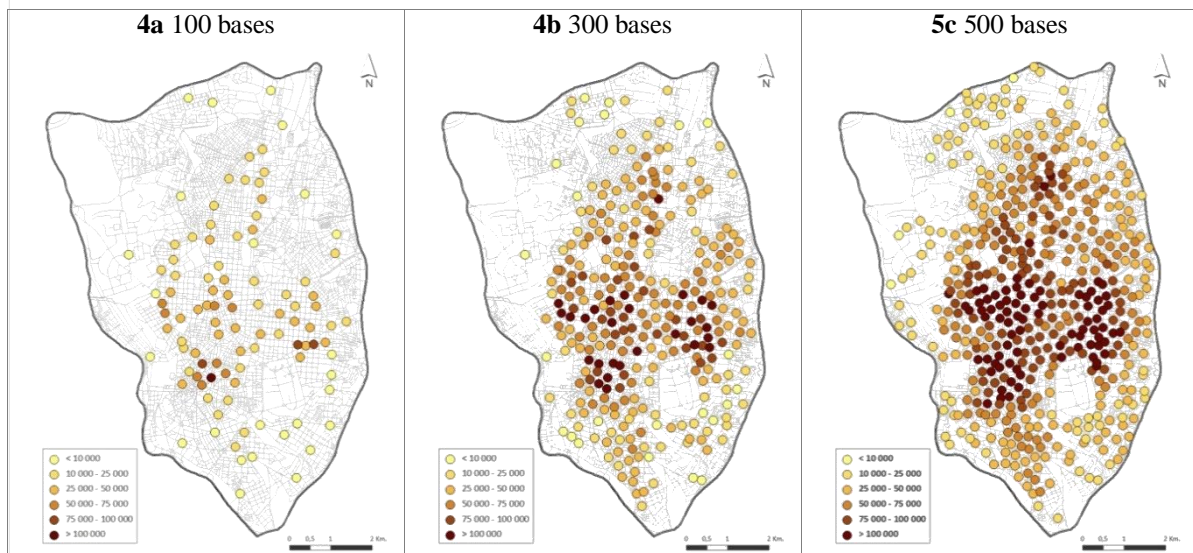


Figura 4 – Accesibilidad (potencial de las bases) desde las bases (solución con máxima cobertura).

Escenarios (número de bases)	Media	Incremento	Incremento %	Desv. Tip.
100	25.689,1	---	---	21.523,9
200	41.054,4	15.365	59,8	20.304,9
300	50.339,6	9.285	22,6	36.869,0
400	58.508,8	8.169	16,2	29.950,6
500	62.154,6	3.646	6,2	33.875,4

Tabla 6 – Accesibilidad media de las bases (en unidades de potencial)

5. CONCLUSIONES

Dada la importancia que están cobrando los programas de bicicletas públicas, muchos trabajos analizan las claves de su mayor o menor éxito, investigando en factores que van desde el precio al tipo de bicicleta, o elementos externos como la topografía o la meteorología (Curran, 2008). Una de esas claves para el éxito de estos programas es la distribución de las bases y su relación con la demanda. Sin embargo, no se han desarrollado en profundidad metodologías para localizar de forma óptima las bases de bicicletas (Larsen et al, 2013).

En esa tarea, los GIS y los modelos de localización óptima de servicios pueden ser una herramienta fundamental. Aquí hemos analizado estas posibilidades con el fin de realizar una propuesta de localización óptima de bases de bicicletas públicas en el centro de la ciudad de Madrid. Hemos usado modelos discretos de localización óptima. Para ello se ha localizado la demanda potencial de viajes en bicicleta a nivel de portal, diferenciando según se trate de viajes generados desde los hogares o viajes atraídos en los lugares de empleo. Este tratamiento de la demanda permite reflejar toda la demanda potencial de usuarios, pero además caracterizar después las bases en función de sus necesidades de bicicletas a lo largo del día. Este elemento es crucial en las tareas de redistribución de las bicicletas entre las bases, uno de los elementos más costosos en estos programas (Curran, 2008).

Una vez conocida la distribución de la demanda es posible aplicar distintas soluciones en los análisis de localización óptima de servicios. Aquí se han testado dos de las más frecuentes: mínima impedancia y máxima cobertura. La solución de máxima cobertura es la de mayor interés, en cuanto que maximiza la demanda potencial cubierta por las bases en una distancia adecuada al desplazamiento en bicicleta. Sin embargo, presenta algunos problemas, que tienen que ver con la aparición de espacios sin cubrir o con la presencia de bases aisladas del resto de la red.

La evaluación de distintos escenarios en función del número de bases ha permitido ver como el incremento del número de bases es fundamental tanto a la hora de incrementar la demanda cubierta como a la hora de producir distribuciones de bases eficientes entre los espacios generadores o atractores de viajes, así como para incrementar la propia utilidad de las bases a través de la accesibilidad potencial que se ofrece desde ellas, tanto de forma

individual como del conjunto de la red. Sin embargo, con el incremento en el número de bases es posible también caer en rendimientos decrecientes, tanto en lo referente a la población cubierta como en la accesibilidad proporcionada por el sistema. Como han planteado Shu et al. (2010) un número muy alto de bases puede incrementar en exceso los costes del sistema, sin proporcionar una mejora sustancial en el mismo.

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad (Proyecto TRANSBIC, TRA2010-17035). Una versión ampliada de este trabajo está publicada en la revista *Applied Geography* (Nº 35, 2012).

REFERENCIAS

DEMAIO, P. (2003). Smart bikes: Public transportation for the 21st century. *Transportation Quarterly* 57 (1), 9-11.

DILL, J. y VOROS, K. (2007). Factors Affecting Bicycling Demand: Initial Survey Findings from the Portland Region (Washington, DC: Transportation Research Board).

IDAE (2007). Guía metodológica para la implantación de sistemas de bicicletas públicas en España. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid.

LAIRD, J., NELLTHORP, J. y MACKIE, P. (2005). Network effects and total economic impact in transport appraisal. *Transport Policy* 12, 537-544.

LARSEN, J., PATTERSON, Z. y EL-GENEIDY, A. (2013). Build it. But where? The use of geographic information systems in identifying locations for new cycling infrastructure. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7(4), 299-317

LIN, J.R. y YANG, T.H. (2011). Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation Research E* 47, 284-294

MARTENS, K. (2007). Promoting Bike and Ride: The Dutch experience. *Transportation Research A* 41, 326-338.

MIDGLEY, P. (2011). Bicycle-Sharing schemes: Enhancing sustainable mobility in urban areas. Background Paper No. 8, CSD19/2011/BP8, Commission on Sustainable Development. UNITED NATIONS.

SHU, J., CHOU, M., LIU, Q., TEO, C.P. y WANG, I.L. (2010). Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of re-distribution. Singapore, National University of Singapore- NUS Business School.

<http://www.bschool.nus.edu.sg/Staff/bizteocp/BS2010.pdf>