

ANÁLISIS DE LA DEMANDA Y DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE PROMOCIÓN DEL USO DE LA BICICLETA EN SEVILLA

Alejandra García Sánchez

Grupo de Ing. e Infr. De los Transportes, Universidad de Sevilla, España

Luis Miguel Romero Pérez

Grupo de Ing. e Infr. De los Transportes, Universidad de Sevilla, España

RESUMEN

El Plan Director de la Bicicleta aprobado en 2007 para Sevilla, consiguió impulsar el uso de la misma hasta alcanzar un 6% de reparto modal. En el Programa de la Bicicleta Sevilla 2020 el Ayuntamiento se propuso como objetivo alcanzar al menos un 15% de reparto modal en 2020 en este modo. Para alcanzar esa cifra, es necesaria la promoción, con actuaciones no solo sobre la infraestructura, sino también con medidas de concienciación e información, con el fin de transmitir la idea de la bicicleta como un modelo eficiente y moderno, que puede mejorar la habitabilidad de la ciudad y la calidad de vida de sus ciudadanos. Este trabajo pretende aportar dicha visión por medio del mapa esquemático Metro-Bici, presentado en un formato similar al de un modelo de líneas del modo de transporte público (metro), con el fin de hacer más atractiva la idea de la bicicleta como modo de transporte.

Para su diseño, se han actualizado los datos de movilidad disponibles de tal forma que se consigan obtener volúmenes de demanda parecidos a los observados en las diferentes vías que conforman la infraestructura de la bicicleta, mediante un proceso de optimización y ajuste. A esto le ha seguido un posterior análisis de la demanda para concluir con un mapa esquemático de la red de bicicleta, en el que se define un conjunto de líneas, sintetizando las rutas principales obtenidas, presentando la bicicleta como un modo de transporte moderno y eficiente. Con la creación de estas líneas no solo se aspira atraer a la población hacia el modo de transporte en estudio, sino que también pretende identificar y jerarquizar corredores en función de su demanda con el fin de priorizar las posibles futuras actuaciones sobre la infraestructura.

1. INTRODUCCIÓN

Para conseguir mejorar el modo de transporte de la bicicleta es necesario analizar por un lado el comportamiento actual de sus usuarios y casi más importante, las causas que motivan el rechazo de los usuarios de los otros modos a usarla como modo de transporte para sus desplazamientos. Para ello, se han realizado una serie de encuestas que permiten identificar al tipo de usuario que hacen uso de esta infraestructura y a su vez, se decide encuestar a

peatones con el fin de determinar si éstos utilizan la bicicleta asiduamente, y en caso negativo conocer el motivo.

Las encuestas de las que se dispone han sido realizadas por varias promociones del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos al cursar la asignatura de Planificación del Transporte de la Universidad de Sevilla, siendo la distribución del número de encuestas la siguiente:

- 555 encuestas a usuarios de bicicleta realizadas en el curso 2016/17.
- 350 encuestas a usuarios de bicicleta realizadas en el curso 2018/19.
- 293 encuestas a peatones realizadas en el curso 2018/19.

El cuestionario de las encuestas dirigidas a los usuarios en bicicleta se basa en el modelo propio de encuestas de SIBUS, 2015, con el objeto de contrastar el perfil de los usuarios y validar las encuestas.

Las modificaciones realizadas sobre las encuestas originales buscan la eliminación de los posibles sesgos que pudieran darse, así como destacar información relevante como la duración de los viajes, los pares Origen-Destino, e incluso se incluye un apartado de mejora de la infraestructura asociada a la bicicleta en Sevilla.

En cuanto a la encuesta de peatones, se busca obtener la frecuencia de uso de bicicleta, así como los motivos de su no uso si corresponde.

En García Sánchez, 2019 se presentan los modelos de encuestas utilizados y los resultados pormenorizados del análisis de las encuestas, presentando aquí las conclusiones de dicho análisis:

- Del proceso de encuestación a peatones se extrae que el 10% de los encuestados afirma no saber utilizar la bicicleta existiendo una relación estadísticamente significativa con el sexo, pues casi el 75% de estos eran mujeres. Esto puede influir en el hecho de que en el proceso de encuestación a usuarios de bicicleta tan solo el 35% eran mujeres.
- La edad es otro factor importante a comparar con otras variables, como por ejemplo el tipo de bicicleta, las cuales presentan una relación estadísticamente significativa, por lo tanto, los grupos de edad más jóvenes presentan mayor proporción de uso de la bicicleta de alquiler. En el caso de analizar los tiempos de viajes en función de la edad, se obtiene una significación estadística, de tal forma que a medida que avanza la edad, los tiempos de viajes por lo general tienden a ser superiores.

- Siguiendo con la dinámica anterior, se analizan los tiempos de viajes donde se observa como los viajes realizados con bicicleta de alquiler son relativamente más cortos, obteniendo una asociación significativa entre el tipo de bicicleta empleada y el tiempo de trayecto.

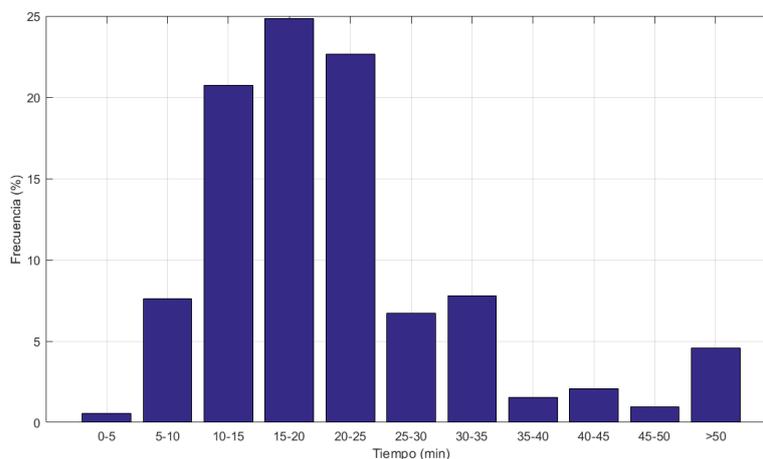


Figura 1. Histograma de viajes en distancia (km) extraído de encuestas

- De todo el proceso de encuestación cabe destacar la importancia, dada su implicación en el proceso de ajuste de la matriz, de:
 - Histograma unitario de viajes en distancias, mostrado en la Figura 1.
 - El motivo de viajes de los encuestados, donde el 75% de los viajes recogidos eran por movilidad obligada

2. PROPUESTA DE POLÍTICA DE PROMOCIÓN DE LA BICICLETA

Son de sobra conocidos algunos aspectos positivos del uso de la bicicleta, no solo para el usuario, sino también para la ciudad, así como ciertos inconvenientes que puedan derivar en rechazo a este modo de transporte, y, por tanto, los que habrá que trabajar para hacer más llamativa la bicicleta.

En cuanto al individuo, PROBICI,2010, el uso de la bicicleta aporta como ventajas:

- Autonomía, flexibilidad y accesibilidad: a diferencia del transporte público, la bicicleta está disponible en cualquier momento, ofrece un servicio puerta a puerta y no está sujeta a horarios ni rutas fijas. El individuo que la utilice goza de una libertad similar a la que ofrece el transporte privado.
- Fiabilidad y económica: dado que el sistema de transporte asociado a la bicicleta no está congestionado, los tiempos de viajes se mantienen y son fácilmente predecibles, a diferencia del transporte privado. Además, esta requiere una menor inversión no sólo inicial, sino también de mantenimiento frente al automóvil.

- Eficacia: en distancias cortas, la bicicleta es más competitiva que el transporte público o privado.
 - Para viajes menores de los 2 km la bicicleta presenta mayor competitividad que el automóvil, siendo un factor primordial el aparcamiento disponible. Para distancias menores que la presentada, los tiempos de viajes en ambos modos son parecidos, presentando la bicicleta mayor eficiencia a la hora de aparcar dada su ligereza y pequeñas dimensiones con respecto al automóvil.
 - Para viajes menores de los 5 km, la bicicleta es más competitiva que el transporte público, pues como se ha comentado esta presenta mayor autonomía y flexibilidad. Para distancias mayores, el transporte público presenta ventajas, siendo lo óptimo la intermodalidad (situación win-win o de ganancia mutua).

Analizando las encuestas realizadas, en particular el histograma en distancias mostrado en la Figura 1, aproximadamente el 25% de los viajes están por debajo de los 3 km y el 54% de los viajes menor de los 5 km de distancia, mostrando eficiencia hasta los 7km de distancia.

Conociendo que la mitad de los trayectos urbanos en vehículo privado en España están por debajo de los 5 km, se puede establecer la bicicleta como una buena opción para realizar estos trayectos.

A pesar de estas ventajas, también se encuentran inconvenientes que general rechazo al uso de la bicicleta. Teniendo en cuenta diferente bibliografía, PROBICI, 2010 Civinet, 2015 y las encuestas realizadas a peatones, las razones que llevan a un individuo a no optar por este modo son:

- Condiciones climáticas
- Pendientes pronunciadas en el trayecto
- Incomodidad a la hora del transporte de mercancía o niños
- Preocupación por el robo

La bicicleta, no solo presenta beneficios para el usuario que la utiliza, sino que también presenta ventajas para el resto de la población, y, por tanto, para la ciudad, si y solo si esta es capaz de aumentar su reparto modal atacando al de los vehículos motorizados, es decir, solo si se da una transferencia de demanda de vehículos privados a la bicicleta.

Estas son:

- Menor tasa de sedentarismo, lo que conlleva un aumento de la salud de la población.
- Menos contaminación (de agua, suelo y atmosférica) y ruido, lo que aumenta el bienestar social.

- Humanización, pues facilita el contacto interpersonal
- Mayor seguridad vial, pues se reduce el tráfico motorizado.
- Mayor disponibilidad de recursos al reducir el consumo de petróleo.
- Menor impacto sobre el territorio y mayor eficiencia, pues la bicicleta requiere menor ocupación del suelo urbano, además de menor mantenimiento, menor inversión inicial y apenas requiere gastos policiales, lo que conlleva a su vez un ahorro económico.

De aquí se extrae que la bicicleta es un modo de transporte bastante favorable y necesario teniendo en cuenta las situaciones desfavorables debido al tráfico motorizado que se están alcanzando en algunas ciudades españolas.

2.1 Promoción de la bicicleta: mapa esquemático

En esta comunicación se presenta una propuesta concreta para la promoción de la bicicleta, particularizada para la ciudad de Sevilla pero extensible para cualquier otra ciudad: la generación de un mapa esquemático de la red bici, con un diseño atrayente que presenta la bicicleta como un modo *moderno y eficiente*. Con este plano se pretende por un lado presentar una imagen del transporte en bicicleta como una opción moderna, de ahí su semejanza en el diseño a un plano de líneas de un sistema metro urbano. Por otro lado, se quiere mostrar que es un modo eficiente, que conecta los puntos más importantes de la ciudad en un tiempo competitivo con el de los otros modos.

Para la realización del plano, se contemplan las siguientes fases:

- *Determinación de puntos de interés*. Establecer puntos de interés en un mapa guía de líneas, ayuda a los usuarios a localizar rápidamente su destino. Estos puntos o lugares de interés se refieren a estaciones de metro, estación de autobuses y cercanías, los cuales permiten la intermodalidad, zonas de gran interés turístico y centros comerciales (para incentivar el uso de la bicicleta para viajes no obligados), siendo muy importante la localización del servicio de bicicleta pública más cercano a dichos puntos.
- *Elección de arcos principales*. En la realización del mapa esquemático es necesario estipular una serie de arcos principales, así como la localización de grandes centroides de atracción y generación.

Esta necesidad reside en el deber de establecer un conjunto de líneas del modo de transporte de la bicicleta con el fin de hacer atractivo el uso de la misma por medio de líneas simples y directas uniendo los principales orígenes destinos. Para conseguir esto, se seleccionan aquellos arcos que presenten mayor volumen de usuarios, el cual se ha obtenido gracias a la asignación realizada en el apartado 4.4, que serían aquellos arcos con un volumen mayor a 4900 usuarios. Estos arcos deben formar parte de las líneas principales a desarrollar en el siguiente apartado, ayudándose a su vez de otras líneas de menor volumen.

- *Elección de las líneas o rutas principales.* El proceso de creación de las líneas principales de desplazamiento en bicicleta se ha realizado por medio de un estudio simplificado de la demanda asociada a cada par. Para ello, ha sido necesario desarrollar la modelización completa de la demanda de los usuarios, así como el modelo de red de los carriles bici de la ciudad de Sevilla. En el apartado 3 se resume la macrosimulación desarrollada.

3. MACROSIMULACIÓN DEL MODO DE TRANSPORTE BICICLETA EN SEVILLA

Para poder realizar la macrosimulación del modo de transporte “bicicleta” en Sevilla, uno de los datos previos más importante es la matriz Origen-Destino, que muestra el volumen de usuarios que viajan entre cada par de Origen y Destino.

En este apartado, se presenta la matriz OD en la que se basa el presente trabajo y el proceso de ajuste de la misma con el fin de obtener resultados que muestren la realidad de la forma más fidedigna posible.

3.1 Matriz OD base

La matriz OD de la que se parte es la matriz de movilidad global de Sevilla (EDM07), la cual agrupa todos los viajes de los diferentes modos de transporte que se dan en la ciudad en un día medio, basado en la encuesta de movilidad llevada a cabo en 2007.

Dado que esta matriz recoge todos los modos es necesario extraer de la misma la correspondiente a las bicicletas. El reparto de bicicleta estimada en el 2010 es del 6%, Ayto. de Sevilla, 2010. A falta de información para una mejor distribución, puede suponerse como matriz OD de partida para el modo bicicleta la resultante de imponer un reparto modal uniforme en todas las zonas de transporte, obteniéndose:

$$T_{bici} = 0.06 \cdot T_{global} \quad (1)$$

Pero las hipótesis planteadas anteriormente presentan una deficiencia principal, aparte del desfase temporal de la misma, y es que la matriz global representa viajes realizados en otros modos como es el privado y el transporte público, que presentan características muy diferentes a los realizados en bicicleta. Un usuario que utiliza la bicicleta está condicionado por el tiempo de viaje, trayectos demasiado largos pierden interés, como se puede observar en el histograma de viajes en distancia extraído de las encuestas.

Esto significa que el reparto modal del modo en estudio no se produce de la misma forma que el transporte público o el privado.

La matriz global se estimó hace más de 10 años, y se ha observado como en general ha aumentado el número total de viajes en bicicleta desde el estudio de movilidad de 2010 que establece el reparto de la bicicleta en un 6%; por ello, se decide actualizar la matriz para que el número total de viajes sea representativo del actual.

3.2 Ajuste de la Matriz OD

3.2.1 Elección del criterio de ajuste de la matriz

Para modificar la matriz, se opta por implementar un método de ajuste de matriz, incluyendo información adicional de conteos de tráfico en arcos de la red y una serie de restricciones.

El objetivo de este proceso es disminuir la discrepancia con los volúmenes observados mientras se controla la distorsión de la matriz.

Como criterio de optimalidad en el proceso de ajuste de la matriz, se utiliza el de la máxima entropía o de mínima información, donde se busca extraer una matriz de viajes nueva a partir de una base. Bajo este criterio la función de distancia utilizada para medir la diferencia, tanto entre los aforos y los volúmenes modelados como entre la matriz resultante y la previa, es la función de entropía relativa, Van Zuylen y Willumsen, 1980 , Cascetta, 1980.

A lo largo del proceso de estimación de la demanda, se establece la hipótesis de que el mecanismo que utilizan los usuarios para escoger ruta es el minimizar su coste generalizado (que en el modo de transporte de la bicicleta básicamente se basa en la distancia de los recorridos). Esto es debido a que el fenómeno de la congestión todavía no es apreciable, y se supone que no tienen incidencia en la selección de ruta.

Por otro lado, la aplicación de máxima entropía tiene en cuenta una matriz de referencia, y el problema formulado tiene múltiples soluciones, siendo importante para el resultado final la solución inicial de partida. Se considera que los aforos no son fuentes de información creíble, puesto que se establece que estos no contienen suficiente información para la estimación, por ello, una buena decisión sería incluirlo en la función objetivo, puesto que los flujos en el modelo incluidos como restricción son de obligado cumplimiento:

$$\text{Minimizar } Z(\mathbf{g}, \mathbf{v}) = \gamma_1 \sum_{p \in \mathcal{P}} \left(g_p \left(\log \left(\frac{g_p}{\bar{g}_p} \right) - 1 \right) \right) + \gamma_2 \sum_{a \in \bar{\mathcal{A}}} \left(v_a \left(\log \left(\frac{v_a}{\bar{v}_a} \right) - 1 \right) \right) \quad (2)$$

siendo \mathbf{g} la matriz Origen-Destino con el flujo viajes para cada par origen-destino ordenada en formato vectorial, \mathbf{v} el vector de flujos o volúmenes en los arcos, \mathcal{P} y $\bar{\mathcal{A}}$ los conjuntos de pares Origen-Destino y de arcos aforados en la red, respectivamente.

A pesar de lo anterior, y dado el reducido número de puntos de aforo de los que se dispone, se deciden incluir como restricción por simplicidad.

$$\text{Minimizar}_{T,v} Z = \sum_{p \in \mathcal{P}} g_p \left(\log \left(\frac{g_p}{\bar{g}_p} \right) - 1 \right) \quad (3)$$

donde g_p es el flujo de viajes correspondiente al par p de los O/D

3.2.2 Restricciones del ajuste

Para realizar el ajuste de la matriz, se decide incluir una serie de restricciones que permitan obtener una mejor distribución de los viajes totales estimados en la matriz OD. Una posible alternativa es imponer un modelo físico, como el modelo gravitatorio o el de radiación, para explicar la demanda de este modo de transporte, infiriendo los parámetros del modelo de modo que se ajusten lo más posible a los datos de la realidad. Sin embargo, estos modelos se definen por semejanza a fenómenos físicos que poco tienen que ver con los mecanismos que tienen los viajeros para decidir si realizan determinados viajes y qué modo utilizarían para ello. En este trabajo se opta por imponer una serie de condiciones matemáticas que debería verificar una matriz de demanda, que resuman la información real conocida del modo de transporte, evitando así formular una serie de hipótesis sobre el comportamiento de los usuarios difíciles de validar. El concepto de restricción está asociado a una condición de obligado cumplimiento, es por ello, que se debe discutir la conveniencia de incluir o no cada posible restricción en el proceso final de ajuste. La información disponible para la definición de este conjunto de restricciones es la siguiente:

- Aforos.
- Histograma unitario de distancia del trayecto.
- Población.
- Usos del suelo (Catastro).
- Empresas de >50 empleados.
- Universidades

3.2.2.1 Aforos

Se dispone de la información de 10 Eco-contadores localizados a lo largo de la red ciclista de Sevilla. Estos dispositivos cuentan, almacenan y transfieren permanentemente el número de ciclistas que circulan sobre ellos. Esta información es controlada por la Gerencia de Urbanismo de Sevilla. Hay información disponible en datos diarios y también en tramos horarios. Esta información es relevante para completar el ajuste de la matriz, apareciendo los datos de flujo conocidos en arcos en la función objetivo.

Para el ajuste de la matriz se utilizarán los datos de los eco-contadores disponibles en la Gerencia de Urbanismo de Sevilla pertenecientes a un día que sea representativo y lo suficientemente próximo a la fecha actual, una vez eliminados los registros pertenecientes a

finde de semana y festivos, así como los pertenecientes a los meses de verano. se decide escoger la media de los valores como volumen aforado para cada uno de los eco-contadores de los que se dispone información. Dado que se buscan valores representativos, se deciden despreciar los días en los que se obtiene una bajada significativa de los volúmenes causados por ejemplo por la existencia de precipitaciones.

En cuanto a la formulación del ajuste de la matriz, la restricción asociada a los aforos será tal que relacione los pares origen-destino con el aforo, de tal forma que quede registrado todos los pares OD que transiten por cada uno de los aforos disponibles.

$$\mathbf{v} = \Gamma^T \cdot \mathbf{g} \quad \forall a \in \bar{\mathcal{A}} \quad (4)$$

Donde \mathbf{g} es la matriz de viajes ordenada en formato vectorial, \mathbf{v} es vector con los volúmenes de los aforados en los eco-contadores y Γ^T la matriz de incidencia que relaciona los Pares Origen-Destino con los arcos aforados, en la que el elemento Γ_p a es 1 si la ruta mínima del par p contiene el arco a , 0 en otro caso.

La asignación de rutas mínimas empleada conlleva una asignación de tráfico lineal, limitándose a un único cálculo de la matriz de incidencia Γ (aforos-pares OD, constante por no considerarse la congestión) y una multiplicación de matrices que equivale a la suma de los pares que utilizan un arco determinado.

3.2.2.2 Histograma de viajes

Con un número razonable de encuestas, sí puede extraerse información cualitativa y cuantitativa sobre la disponibilidad de los usuarios a realizar o no un determinado viaje atendiendo a una información transversal a todos los pares en función del coste generalizado, como puede ser la distancia o el tiempo de viaje, aunque no sean encuestas suficientes para estimar una matriz OD.

De la idea anterior se extrae el histograma distancia-frecuencia de viajes, el cual recoge el número de viajes realizados según el tiempo o distancia de viaje. Esta información es bastante valiosa, puesto que puede afectar al reparto modal de tal forma que, dependiendo de la distancia de viajes, ese par OD puede ser más o menos atractivo para ser realizado en bicicleta u otro medio de transporte.

El histograma de viajes que se ha obtenido de las encuestas es el mostrado en la Figura 1. Al definir los intervalos del histograma de viajes, se extrae de las encuestas la proporción de viajes observados pertenecientes a cada uno de estos intervalos; es decir, para cada intervalo b del conjunto de intervalos \mathcal{B} se obtiene una proporción P_b respecto al total de viajes realizados en bicicleta.

Por tanto se puede establecer una restricción en la que la suma de los viajes de aquellos pares incluidos en un intervalo dado, se corresponda al total de viajes correspondientes a dicho intervalo. Esta restricción se puede expresar de forma matricial sin más que definir la matriz de incidencia Δ histograma-pares Origen-Destino, Ortiz 2017, que relaciona los pares OD con su intervalo en el histograma.

$$\sum_{p \in P(b)} g_p = P_b \cdot T \quad \forall b \in \mathcal{B} \quad (5)$$

$$\Delta_b \cdot \mathbf{g} = P_b \cdot T \quad \forall b \in \mathcal{B} \quad (6)$$

Donde el subíndice en la matriz indica que se trata de la fila b . Esto significa que el modelo debe de cumplir que los viajes de la asignación para cada intervalo definido en el histograma deben coincidir con las proporciones obtenidas de las encuestas mostrada en el histograma, Figura 1.

3.2.2.3 Población

La población es un factor importante a la hora de generación de viajes, por ello, se decide introducir como restricción en el modelo de ajuste. Ante la ausencia de información para la obtención de modelo de Generación – Atracción, se decide asumir que los viajes generados por cada TAZ están proporcionalmente relacionados con su población.

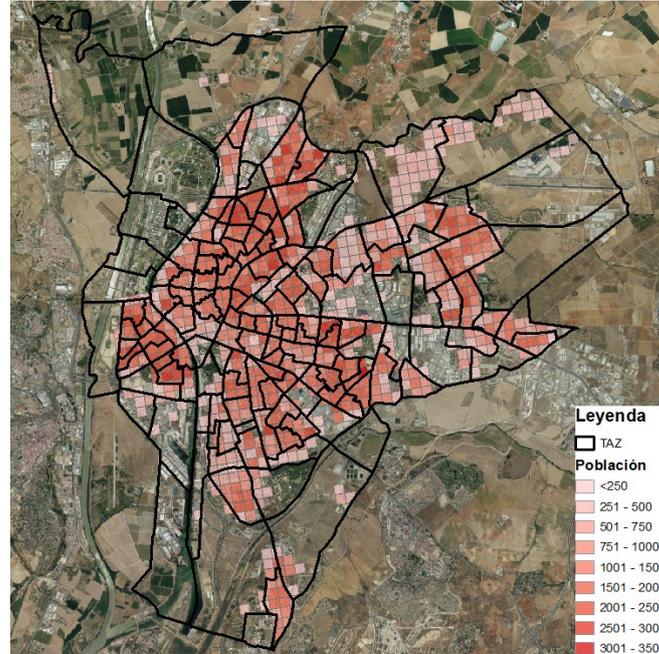


Figura 2. Distribución zonal de la Población 2017

Para imponer la restricción ha sido necesario contabilizar el total de la población y el % de población en cada una de las TAZs que intervienen en el modo de la bicicleta, X_{pob} . Se puede definir una matriz de incidencia Θ Orígenes - pares OD, que relaciona los pares OD con su origen, de tal forma:

$$\Theta \cdot g = X_{pob} \cdot T \quad (7)$$

3.2.2.4 Número de empresas >50 empleados y Universidades

De las encuestas realizadas, se observa como uno de los principales motivos del uso de la bicicleta es el desplazamiento al trabajo, por lo que se decide introducir una restricción relacionada con el número de empresas y los asalariados de las mismas asociadas a cada TAZ. Los apartados anteriores trataban de actuar sobre la generación de viajes, pero en este caso, afectará a la atracción de los mismos. Con el número de empresas con más de 50 asalariados se busca relacionar el uso de la bicicleta con factores socioeconómicos.

Esta restricción se impone según los establecimientos que se encuentran dentro de cada una de estas TAZs, y, más tarde, se ponderan sus valores de atracción teniendo en cuenta los asalariados, obteniendo finalmente una proporción para cada TAZ.

En el ajuste, se impone la restricción por columnas, de tal forma que la atracción de viajes de una zona j sea proporcional a los establecimientos y el total de asalariados de la zona $\left(P_{emp,j} = \frac{A_j}{\sum A_k}\right)$, siendo P_{emp} la proporción, A el número de asalariados (o coeficiente de diferenciación) y j la TAZ en estudio.

$$\sum_{p/D(p)=j} g_p = P_{emp,j} \cdot T \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (8)$$

Siendo \mathcal{D} el conjunto de destinos, que de nuevo coincide con \mathcal{Z} al considerar todas las zonas de transporte como posible Origen/Destino de viajes.

Para expresar esta restricción en formato matricial, se define la matriz de incidencia Φ Destinos - pares OD, que relaciona los pares OD con sus destinos, de tal forma:

$$\Phi \cdot g = P_{emp} \cdot T \quad (9)$$

Como en el caso anterior, otro de los motivos principales que llevan al usuario a utilizar la bicicleta es por necesidad de desplazamiento hacia el centro de estudio, por tanto, se decide afectar la atracción de viajes con la inclusión de las diferentes facultades y centros universitarios existentes en Sevilla. Se extraen las diferentes facultades existentes en Sevilla y se asocian a los centroides que definen el modelo. Dada su similitud con la restricción anterior, y a fin de simplificar el ajuste de la matriz, se decide introducir la información de las universidades en la restricción de atracción que versa sobre los asalariados de las empresas de más de 50 empleados.

3.2.3 Algoritmo de ajuste

El proceso de ajuste que finalmente se propone se define en la expresión (10). Consiste en un problema de optimización en el que se minimiza una función objetivo que mide la distancia con respecto a una matriz previa \bar{g} y las restricciones anteriormente comentadas.

La función de distancia finalmente adoptada para la función objetivo es la de la entropía relativa, que como puede verse sin más que desarrollar en serie en torno la matriz previa, es una función intermedia entre el error absoluto y el relativo. A este sistema es necesario incluir una última restricción en la cual se establece la obligatoriedad de que todos los volúmenes entre cada par OD sea positivo ($g \geq 0$), pues no tiene sentido físico un flujo de viajeros negativo. Con esta configuración, y dado que las restricciones impuestas son todas lineales, puede utilizarse como algoritmo de resolución el algoritmo de equilibrado iterativo, Bregman, 1967. Finalmente, se obtiene la siguiente formulación basada en la minimización de la función objetivo, sujeta a las restricciones anteriormente mencionadas:

$$\text{Minimizar}_{T,v} Z = \sum_{p \in \mathcal{P}} g_p \left(\log \left(\frac{g_p}{\bar{g}_p} \right) - 1 \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{s. a} \quad & \mathbf{v} = \mathbf{\Gamma}^T \cdot \mathbf{g} \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad \text{Restricción Aforos} \\ & \mathbf{\Delta}_b \cdot \mathbf{g} = P_b \cdot T \quad \text{Restricción Histograma} \\ & \mathbf{\Theta} \cdot \mathbf{g} = X_{pob} \cdot T \quad \text{Restricción Población} \\ & \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{g} = P_{emp} \cdot T \quad \text{Restricción Empresas} \\ & g_p \geq 0 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad \text{Volúmenes reales} \end{aligned}$$

En la Figura se muestra la diferencia entre la matriz ajustada y la matriz base. Se destacan los valores de máxima diferencia, los cuales llegan hasta los 630 usuarios en algunos pares.

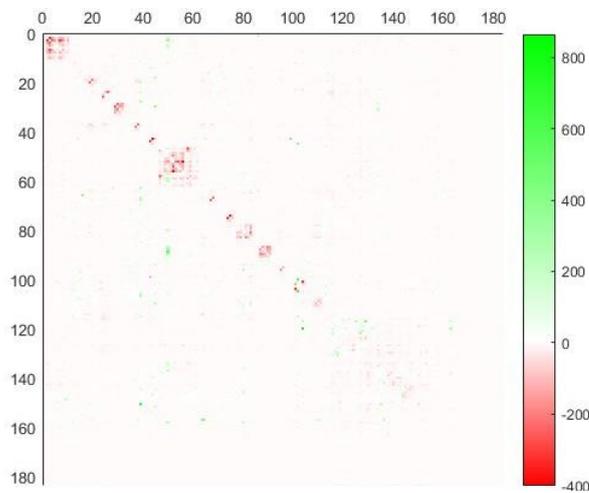


Figura 3. Diferencia entre matrices

En cuanto al histograma de viajes obtenidos, se aprecia como cumple perfectamente la restricción impuesta.

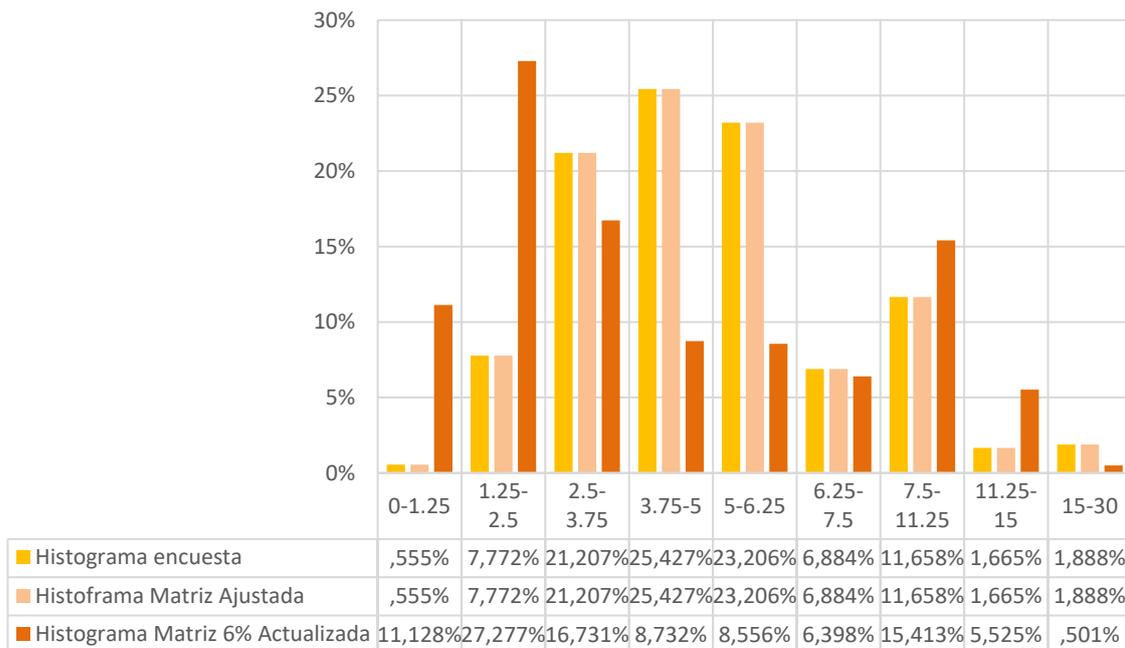


Figura 4. Histogramas extraídos de encuestas, de la matriz ajustada y la del 6% actualizada

4. DISEÑO DEL MAPA ESQUEMÁTICO.

Finalmente, esta tarea ha consistido en un proceso estético por el cual se busca llamar la atención de los potenciales usuarios de tal forma que vean la movilidad en bicicleta de una forma sencilla, con el fin de incitar al cambio de modo. Para conseguir esto se han llevado a cabo las siguientes acciones:

- Inclusión de los puntos de interés ya sea por medio de iconos o imágenes de sitios de interés turístico.
- Ubicación de estaciones Sevici cerca de los puntos de interés comentados.
- Identificación de las principales vías de tránsito, recogidas en la figura 5.
- Rectificación y esquematización del trazado.

AGRADECIMIENTOS

El autor L. M. Romero desea agradecer expresamente el esfuerzo y la entrega de todos los alumnos que participaron en el proceso de encuestación mientras cursaban la asignatura Planificación del Transporte del Master de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Sevilla.

REFERENCIAS

AYUNTAMIENTO DE SEVILLA, «Estudio sobre el uso de la bicicleta en la ciudad de Sevilla,» 2010

BREGMAN L. M., 1967 The relaxation method of finding the common points of convex sets and its application to the solution of problems in convex programming, USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, vol. 7, nº 3, pp. 200-217 .

CASCETTA E. (1984), Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: A generalized least squares estimator, Transportation Research, vol. 18B, pp. 289-299, 1984

CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, CONOCIMIENTO, EMPRESAS Y UNIVERSIDAD, Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, Junta de Andalucía, [En línea]. Available: <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/>.

GARCÍA SÁNCHEZ, A. (2019) Análisis de la demanda y diseño de estrategias de promoción del uso de la bicicleta en Sevilla, Trabajo Fin de Máster Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Sevilla

GERENCIA DE URBANISMO DE SEVILLA. Ayuntamiento de Sevilla., ide.SEVILLA, [En línea]. Available: <http://sig.urbanismosevilla.org/sevilla.art/datosabiertos/index.html>.

JUNTA DE ANDALUCÍA, Directorio de Establecimientos y Empresas con actividad económica en Andalucía, Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2017. [En línea]. Available: <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/>.

MARQUES, R. CALVO-SALAZAR, M.; HERNÁNDEZ-HERRADO, V (2015) Sistema Integral de la Bicicleta de la Universidad de Sevilla (SIBUS), Investigación sobre el uso de la bicicleta en la ciudad de Sevilla, Septiembre 2012 versión revisada 2015, Sevilla.

ORTIZ DE PINEDO REQUEREY, B. (2017). Análisis macroscópico de la movilidad en bicicleta en la ciudad de Sevilla. Trabajo Fin de Grado de Ingeniería Civil, Universidad de Sevilla.

PROBICI (2010) Guía de la Movilidad Ciclista, CEDEX - Ministerio de Fomento (Plan Nacional I+D+i 2004-2007).

RED CIVINET ESPAÑA Y PORTUGAL (2015), Las Ciudades y la Bicicleta.

VAN ZUYLEEN H. WILLUMSEN L. (1980), The most likely trip matrix estimated from traffic, Transportation Research, vol. 14B, pp. 281-293.