

PLANEAMIENTO DE LA RED DEL METRO DE SEVILLA (*)

Por JOSE MARIA APONTE
FERNANDO BERNALDO DE QUIROS
Dres. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

La necesidad de fomentar el establecimiento de sistemas de transporte colectivo, que contribuyan a reducir el consumo innecesario y la deterioración del medio, así como la congestión del tráfico urbano, determinan la implantación de metropolitano. El artículo expone la sistemática del planeamiento de la red del Metro de Sevilla, recientemente realizado.

1. INTRODUCCION

Durante las últimas décadas de este siglo, se ha concedido singular importancia, en casi todos los países, a los problemas que plantea la planificación adecuada del transporte urbano. El crecimiento de las ciudades, tanto en extensión como en población, incontrolado en muchas ocasiones; el incremento del nivel de renta y de la tasa de motorización, así como la elevada densidad de algunas zonas en las grandes ciudades, son factores, entre otros, que generan un aumento de la demanda de viajes al centro urbano. La congestión del centro ocasiona pérdidas de tiempo y deteriora el ambiente (ruido, contaminación atmosférica, etc.).

La incapacidad del transporte privado (incluso en ciudades cuya planificación ha tenido en cuenta estos problemas) para atender adecuadamente a este incremento de la demanda, conduce a la necesidad de concebir un plan de transportes colectivos que pueda proporcionar un servicio seguro, rápido, eficaz y cómodo que atraiga incluso a los habituales usuarios del automóvil.

Las especiales características de los ferrocarriles metropolitano, dotados de infraestructuras independientes, permiten establecer un servicio de transporte regular de viajeros de gran capacidad y con velocidades medias superiores a las del transporte urbano de superficie.

Los elevados costes de inversión que comporta la puesta en servicio de un ferrocarril metropolitano obliga a considerar la demanda potencial de usuarios, que se relaciona, ineludiblemente, con el tamaño de las aglomeraciones de población. El crecimiento de la demanda de transporte ha desplazado los límites, que generalmente se fijaban en un millón de habitantes, hacia cotas inferiores. Actualmente, en ciudades con una población inferior a esta cifra se planea la construcción de un Metro.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1974.

En el caso concreto de la ciudad de Sevilla se registra una fuerte expansión demográfica, debida, en parte, a la tasa de crecimiento migratorio (una de las más elevadas de España), que se une al incremento del índice de motorización y de su creciente transformación en capital de servicios. Por otra parte, la problemática del transporte urbano se ve afectada por la existencia de una red viaria inadecuada, fundamentalmente en el casco antiguo, conjunto de calles estrechas y sinuosas, donde se concentra además la mayor parte de las oficinas, comercios y locales de espectáculos de la ciudad, características que justifican la puesta en servicio de un ferrocarril metropolitano, independientemente de su número de habitantes.

2. METODOLOGIA

La fuerte inversión necesaria para la construcción de un Metro, la gran duración de las infraestructuras y su irreversibilidad exigen realizar un estudio de la demanda actual y su distribución entre los distintos modos, así como su proyección a medio y largo plazo. En el planeamiento de la red del Metro de Sevilla se realizó un estudio integral de transporte, cuya estructura general se refleja en el organigrama que aparece en la figura 1, y cuyas actividades pueden agruparse en los bloques siguientes:

- a) Recogida de información (demografía, puestos de empleo por sectores de actividad, etc.) y toma directa de datos de la demanda de viajes, por medio de encuestas.
- b) Análisis del volumen de la demanda de viajes y su definición en función de variables explicativas socioeconómicas, cuya evolución puede preverse para realizar proyecciones a medio y largo plazo.
- c) Distribución de los viajes entre las distintas zonas consideradas. Para los propietarios de coches, distribución de los viajes según el modo de transporte (coche y transporte público).
- d) Prognosis de la demanda y distribución de la misma para los años horizonte considerados. Este bloque comprende:

- La definición y evaluación de las distintas alternativas.
- La determinación de los años óptimos para la realización de las inversiones.

3. APLICACION DE LA METODOLOGIA AL PLANEAMIENTO DE LA RED DEL FERROCARRIL METROPOLITANO DE SEVILLA

3.1. *Recogida de información y toma directa de datos.*

La información básica utilizada ha sido la siguiente:

- Número de habitantes (a nivel de sección censal).
- Información urbanística y planes parciales vigentes.
- Parque de vehículos y su distribución por zonas.
- Puestos de empleo y su distribución por zonas.

ESTRUCTURA GENERAL DEL ESTUDIO DE TRANSPORTE PARA EL METRO DE SEVILLA

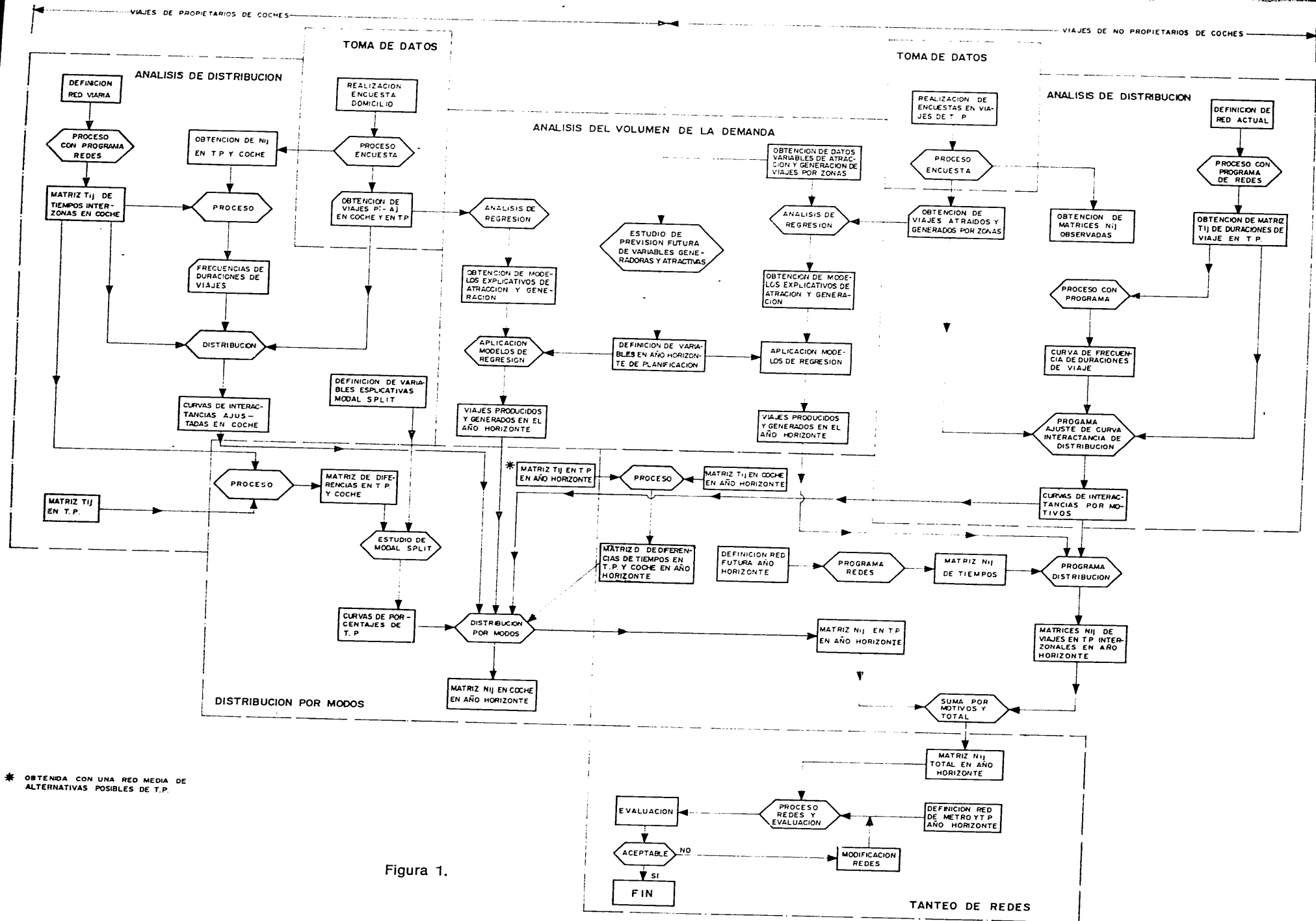


Figura 1.

El área física del estudio se ha dividido en las zonas siguientes: 176 correspondientes al municipio de Sevilla, obtenidas mediante agregación de zonas censales; 27 correspondientes a los municipios incluidos en el alfoz, de acuerdo con el Plan Comarcal de Ordenación Urbana; por último, se han considerado tres zonas de cierre: resto de la provincia, resto de España y extranjero.

En la fase de toma directa de datos se han realizado las encuestas siguientes:

- Encuesta a usuarios de transporte público urbano e interurbano. Después de un conteo de viajeros por parada, que sirvió de base para el diseño de la muestra y su expansión posterior, se realizaron 170.000 entrevistas, obteniéndose información sobre origen y destino de los viajes, hora, motivo y niveles de motorización de los usuarios.
- Encuesta a los miembros de 2.000 familias en la que se recogía análoga información a la de la encuesta de usuarios.

El procesamiento de los datos obtenidos en la encuesta permite conocer el total de viajes generados y atraídos por cada zona.

3.2. *Análisis del volumen de la demanda y definición de la misma en función de variables explicativas.*

Aplicando el análisis de regresión múltiple a los viajes generados y atraídos, y adoptando la hipótesis de que éstos dependen de las características socioeconómicas de cada zona (población total, población activa, puestos de empleo, tasa de motorización, etc.), se obtiene un modelo final que explica satisfactoriamente la generación y atracción de viajes.

Los modelos utilizados para la atracción tenían la forma general:

$$y - \bar{y} = a_1 (x - \bar{x}_1) + a_2 (x - \bar{x}_2) + \dots + a_n (x - \bar{x}_n)$$

siendo y la variable a explicar (viajes atraídos por zonas para cada motivo), x_i las variables explicativas para cada modelo e $\bar{y}$, $\bar{x}_1$, ..., $\bar{x}_n$ los valores medios observados en cada variable.

Las variables explicativas del modelo final, obtenidas para cada motivo, fueron:

Viajes basados en el domicilio:

- Motivo trabajo: Puestos de empleo totales y puestos de empleo en comercio y servicios.
- Motivo estudios y otros: Población y puestos de empleo totales.
- Motivo compras: Población y puestos de empleo en comercio y servicios.

Viajes no basados en el domicilio: Población y puestos de empleo en comercio y servicios.

Los modelos utilizados para la generación de viajes tenían la forma general siguiente:

Viajes basados en el domicilio:

$$e^y = a x^b; \quad y = \ln a + b \ln x$$

Viajes no basados en el domicilio:

$$y = a x + b$$

siendo x el índice de motorización e y el número de viajes generados por persona para cada motivo.

3.3. Distribución zonal de la demanda.

Para analizar la distribución zonal de la demanda se utilizó un modelo gravitacional, con función de interactancia ajustada para cada motivo, suponiendo para cada modo de transporte que el total de viajes generados por la zona i se reparte, en el resto de las zonas, proporcionalmente a un índice de atracción de cada una de ellas. Este índice se obtiene mediante el producto del índice absoluto de atracción A_j (ya definido por los modelos expuestos en el apartado anterior) y otro índice F_{ij} que expresa la atracción relativa de la zona i a la zona j . Es decir:

$$N_{ij} = G_i \frac{A_j \cdot F_{ij}}{\sum F_{ij} \cdot A_j}$$

en donde N_{ij} son los viajes generados por la zona i y atraídos por la zona j ; G_i los viajes generados en la zona i ; A_j los viajes atraídos por la zona j , y $F_{ij} = f(t_{ij})$ el coeficiente que atribuye la función f a la duración del viaje entre i y j .

Los coeficientes $F_{ij} = f(t_{ij})$ se obtienen mediante un proceso iterativo, definiendo *a priori* una curva $f(t_{ij})$ y comparando las frecuencias de duraciones de viajes con la curva de frecuencias observadas hasta conseguir un ajuste aceptable.

La forma general de la curva ajustada es la siguiente:

$$f(t) = \sum_{i=1}^4 a_i (\log t)^i$$

Las figuras 2 y 3 corresponden a curvas f para transporte público y viajes en coche. En la figura 4 pueden observarse unos ejemplos de ajuste a las curvas de frecuencia.

Las matrices de viajes origen-destino en transporte público y privado, asignadas a la red correspondiente, se han comparado con los datos del conteo de usuarios y con los aforos de tráfico realizados en 16 puntos del anillo de circunvalación de la ciudad.

Para el caso de propietarios de coche, se completó el análisis con el estudio de la distribución de la demanda por medios de transporte. A partir de los datos obtenidos en la encuesta domiciliaria, se estudia la relación porcentual de viajes en transporte público sobre el total, ajustando una serie de curvas que definan esta relación en función de determinadas variables explicativas. Las variables utilizadas han sido:

FUNCIONES "F" VIAJES EN COCHE

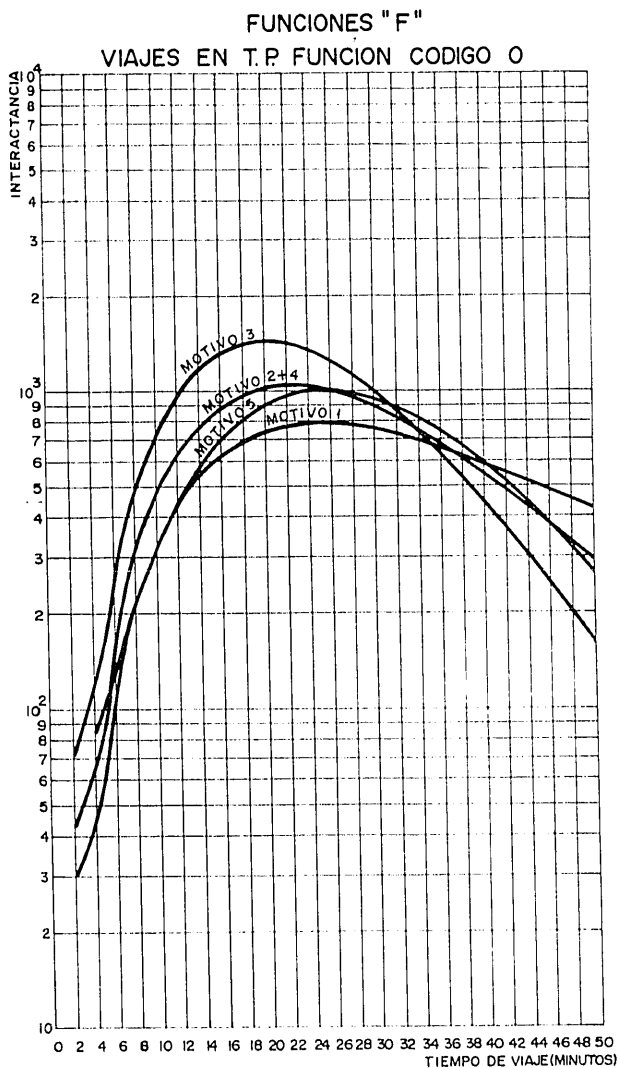


Figura 2.

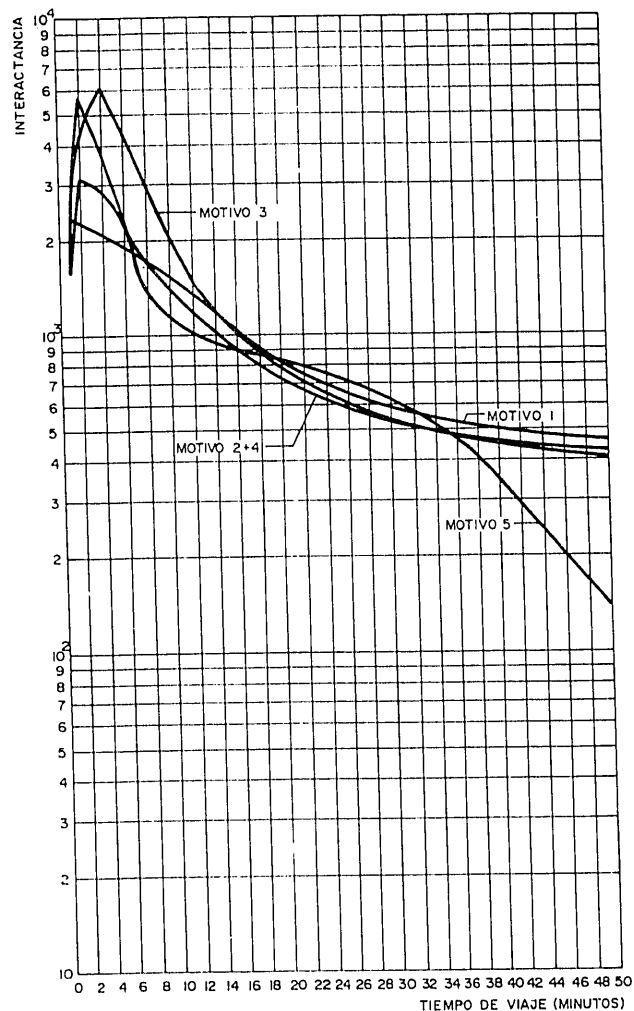


Figura 3.

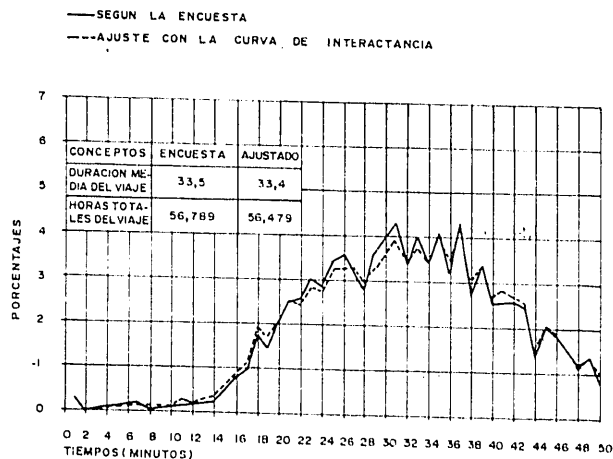
- Las diferencias de tiempos de viaje en coche y en transporte público.
- Duración del viaje en coche.
- Destino del viaje, distinguiendo entre zonas del centro y la periferia.

3.4. *Prognosis de la demanda y su distribución para los años horizonte.*

Los parámetros obtenidos en la fase de análisis del volumen de la demanda se ha estimado que permanecen a lo largo del tiempo. Por lo tanto, mediante extrapolación de las variables explicativas consideradas (apartado 3.2) se han obtenido, para los años 1975, 1985 y 2000, los viajes generados (G_i) y atraídos (A_j) correspondientes a cada zona.

AJUSTE A LAS CURVAS DE FRECUENCIAS DE DURACIONES DE VIAJE EN T.P. FUNCION CODIGO O.

MOTIVO 1.



AJUSTE A LAS CURVAS DE DURACIONES DE VIAJE EN COCHE

MOTIVO 1.

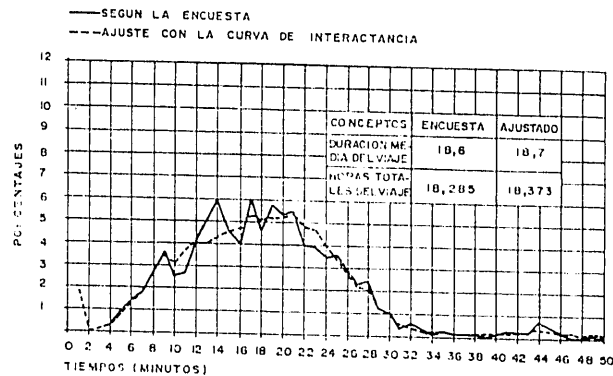


Figura 4.

Para realizar la distribución, por motivos de la demanda, se han considerado, separadamente, los propietarios de coche y los no propietarios.

En el caso de los no propietarios, se ha supuesto que deberían utilizar el transporte público, obteniéndose la matriz origen-destino a partir de los viajes generados y atraídos y las curvas de interactancia para cada motivo. Una vez definida una hipótesis de red de transporte público, completada la red actual con la alternativa a evaluar, se ha calculado una matriz de tiempos t_{ij} entre zonas y seguidamente los viajes generados por la zona i y atraídos por la zona j utilizando la fórmula que figura en el apartado 3.3, es decir:

$$NNP_{ij} = G_i \frac{A_j \cdot F_{ij}}{\sum F_{ij} \cdot A_j}$$

En el caso de los propietarios, que tienen la posibilidad de elegir entre el coche y el transporte público, se sigue el proceso que se detalla a continuación:

Se han tomado como base los datos siguientes:

- Los viajes generados y atraídos de los propietarios de coche, por zonas.
- Las curvas de interactancia $f(t_{ij})$.
- La matriz S_{ij} , cuyos elementos corresponden al reparto en tanto por uno de los viajes en transporte público entre cada par de zonas (esta matriz se obtiene a partir de la diferencia D_{ij} de tiempos de viaje en transporte público y de las curvas de distribución de viajes por modos de transporte).
- Las matrices t^{TP}_{ij} (tiempo en transporte público) y t^C_{ij} (tiempo en coche) obtenidas a partir de hipótesis sobre la red de transporte público y red viaria del año en estudio.

Admitida la hipótesis de que el índice de distribución $I D_{ij}$ para la zona i y la zona j es una media de los índices de distribución para cada modo en particular (${}_1I_{ij}$ coche y ${}_2I_{ij}$ transporte público) ponderada con S_{ij} y $(1 - S_{ij})$, es decir:

$$K^I_{ij} = \frac{A_{j, \kappa} F_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_{j, \kappa} F_{ij}} \text{ y } I D_{ij} = (1 - S_{ij}) \cdot {}_1I_{ij} + S_{ij} \cdot {}_2I_{ij}$$

la matriz total de viajes interzonales se obtiene a partir de:

$$N^P_{ij} = G_i \frac{I D_{ij}}{\sum_1^n I D_{ij}}$$

y, por lo tanto, para cada modo:

- Matriz de viajes en coche:

$${}_1N^P_{ij} = (1 - S_{ij}) N_{ij}$$

- Matriz de viajes en transporte público:

$${}_2N^P_{ij} = S_{ij} N_{ij}$$

siendo la matriz total de viajes en transporte público la suma de las matrices de viajes para no propietarios (N^{NP}_{ij}) y para propietarios (${}_2N^P_{ij}$).

Con esta metodología se llegó a los siguientes resultados globales:

NUMERO DE VIAJES ACTUALES Y EN LOS AÑOS HORIZONTE (DURANTE UN DIA MEDIO)

Viajes en	1970	1975	1985	2000
1. Transporte público				
1.1. Personas sin vehículo	222.036	211.147	126.946	77.477
1.2. Personas con vehículo	71.916	114.793	245.030	392.623
Total 1	294.002	325.940	371.976	470.100
2. Vehículo privado	133.672	261.858	491.435	756.705
3. Transporte público y vehículo privado	427.674	587.798	863.411	1.226.805

DISTRIBUCION DE LOS VIAJES/DIA, SEGUN EL MEDIO DE TRANSPORTE

Viajes en	1970	1975	1985	2000
1. Transporte público				
1.1. Personas sin vehículo	0,40	0,34	0,17	0,07
1.2. Personas con vehículo	0,13	0,18	0,33	0,39
Total 1	0,53	0,52	0,50	0,47
2. Vehículo privado	0,24	0,43	0,66	0,75
3. Transporte público y vehículo privado	0,77	0,95	1,16	1,22

EVOLUCION DEL NUMERO DE VIAJES POR MOTIVOS

Motivos	1970	1975	1985	2000
1. Viajes basados en el domicilio	377.628	502.045	725.047	1.029.047
1.1. Trabajo	183.518	240.107	327.026	453.612
1.2. Estudios y otros	155.744	205.392	296.289	416.544
1.3. Compras	38.366	56.546	101.732	158.891
3. Viajes no basados en el domicilio	50.046	85.753	138.364	197.758
Total	427.674	587.798	863.411	1.226.805

3.5. Definición y evaluación de las distintas alternativas.

El objetivo de esta fase del estudio es determinar la red que sirva, en condiciones óptimas, la demanda de transporte que se obtiene de la matriz N^{TP}_{ij} de viajes en transporte público, de acuerdo con un criterio de evaluación dado.

El método generalmente empleado consiste en definir, inicialmente, una red de transporte público, realizar una asignación y, después de analizar los resultados obtenidos, decidir un conjunto de modificaciones que mejoren su comportamiento. A continuación, realizar una nueva asignación y un nuevo análisis, y así sucesivamente hasta lograr una red que se considere satisfactoria.

Este método presenta como principal inconveniente la necesidad de utilizar criterios subjetivos para la definición del primer trazado y de las modificaciones que después se introduzcan.

Con objeto de obviar este problema, se introduce en el proceso un escalón de análisis matemático previo que defina, aunque solamente sea de modo aproximado, la red *cuasi*-óptima que satisfaga a una determinada demanda.

El método que se ha utilizado en el estudio comprende dos fases: en la primera de ellas se consideró que la línea I debería atender la demanda de transporte existente en la actualidad. Por lo tanto, en el proceso inicial de selección y evaluación se utilizó la matriz de viajes obtenida a través de los datos de la encuesta. En la segunda fase el objetivo fue la definición de una red que, incluyendo la línea I de la primera fase, sirviese adecuadamente a la demanda de transporte prevista para el año 2000.

El escalón matemático que modifica el proceso clásico se desarrolla mediante

el programa GREYS, especialmente concebido para este estudio, el cual genera una red en forma de grafo que sirve óptimamente, de acuerdo con unos criterios prefijados, una matriz de demanda de transporte N_{ij} entre estaciones de la red estudiada.

Para ello se definen un conjunto de estaciones cuya construcción es viable y un conjunto de interconexiones entre ellas, aceptables en cuanto a longitud y posibilidad de construcción. A partir de ahí, el problema que se plantea es definir un subgrafo parcial que sirva óptimamente la demanda N_{ij} . Dicho subgrafo se determina en un proceso que alcanza un óptimo siguiendo las etapas siguientes:

1.º Definición del grafo inicial. Para cada arco se define el coste de construcción, la longitud y el tiempo de recorrido.

2.º A partir de la matriz origen-destino entre estaciones, se realiza una asignación "todo o nada" al grafo inicial, obteniéndose el número de viajeros por arco.

3.º A partir de la asignación, se define, para cada arco, un índice de calidad (CV), como cociente entre el número de viajes por arco y la anualidad del coste de construcción.

4.º Mediante el algoritmo de Kruskal se obtiene el árbol, subconjunto del grafo total, que pasa por todas las estaciones, siendo mínimo $\geq$ CV.

A partir de dicho árbol mínimo, el proceso se completa con las fases de inclusión de arcos, de forma que se generen ciclos, beneficiando el coste total con el ahorro de tiempo de viaje y de supresión de aquellos arcos para los que, a causa del escaso número de viajeros que transportan, resulta interesante aceptar la penalización por inasistencia, para lo cual se introduce como dato la matriz de tiempos de viaje en transporte público sin Metro.

A partir del subgrafo obtenido con el programa GREYS, se han definido siete alternativas de la línea I y cuatro alternativas de red que incluyen todas ellas la línea I ya elegida.

El proceso de selección y evaluación final de las alternativas estudiadas se realizó mediante los programas REDES y ASIGNACION.

El programa REDES, a partir de una red definida a través de los arcos que la forman (nudo origen, nudo final y tiempo de recorrido), construye, desde cada centroide, el árbol de caminos mínimos a los demás centroides. (Se define como centroide al centro de gravedad de la población que reside en cada zona.)

El programa ASIGNACION, utilizando la matriz de árboles mínimos obtenida mediante el programa anterior y la matriz origen-destino, obtiene la asignación de viajes a cada arco.

El procedimiento de asignación empleado es el de "todo o nada", con una corrección aleatoria en los tiempos de recorrido de los arcos de la forma siguiente:

Se supone que el tiempo de recorrido de un arco es aleatorio, con valor medio μ dado, y una distribución normal alrededor del mismo, con una desviación típica $\sigma = 0,18 \mu$. Cada vez que se elige un camino mínimo desde un centroide, se sortea el tiempo de recorrido de cada arco, con lo que se suaviza la rigidez del método "todo o nada", representando este procedimiento el hecho de que un viajero, al elegir el camino mínimo, escoge éste como un criterio subjetivo, que se re-

fleja representando el tiempo de recorrido de un arco como un valor aleatorio próximo a un valor medio prefijado.

Como criterio de selección de alternativas se adoptó el de mínimo coste social generalizado, que se define como la suma de las anualidades de los costes de construcción y explotación de cada alternativa y el coste de tiempo empleado en los viajes por los usuarios de la red de transporte público. Es decir:

$$C_s = A C_c + A C_e + C_{t_v}$$

donde C_s es el coste social generalizado, $A C_c$ la anualidad del coste de construcción, $A C_e$ la anualidad del coste de explotación y C_{t_v} el coste anual del tiempo empleado en el viaje, obtenido mediante el producto del número de horas viajando (H_v), el coste de la hora (48 pesetas en el año 1975) y un número de días medios al año (trescientos catorce).

ALTERNATIVA A
VIAJEROS TRANSPORTADOS
300.542

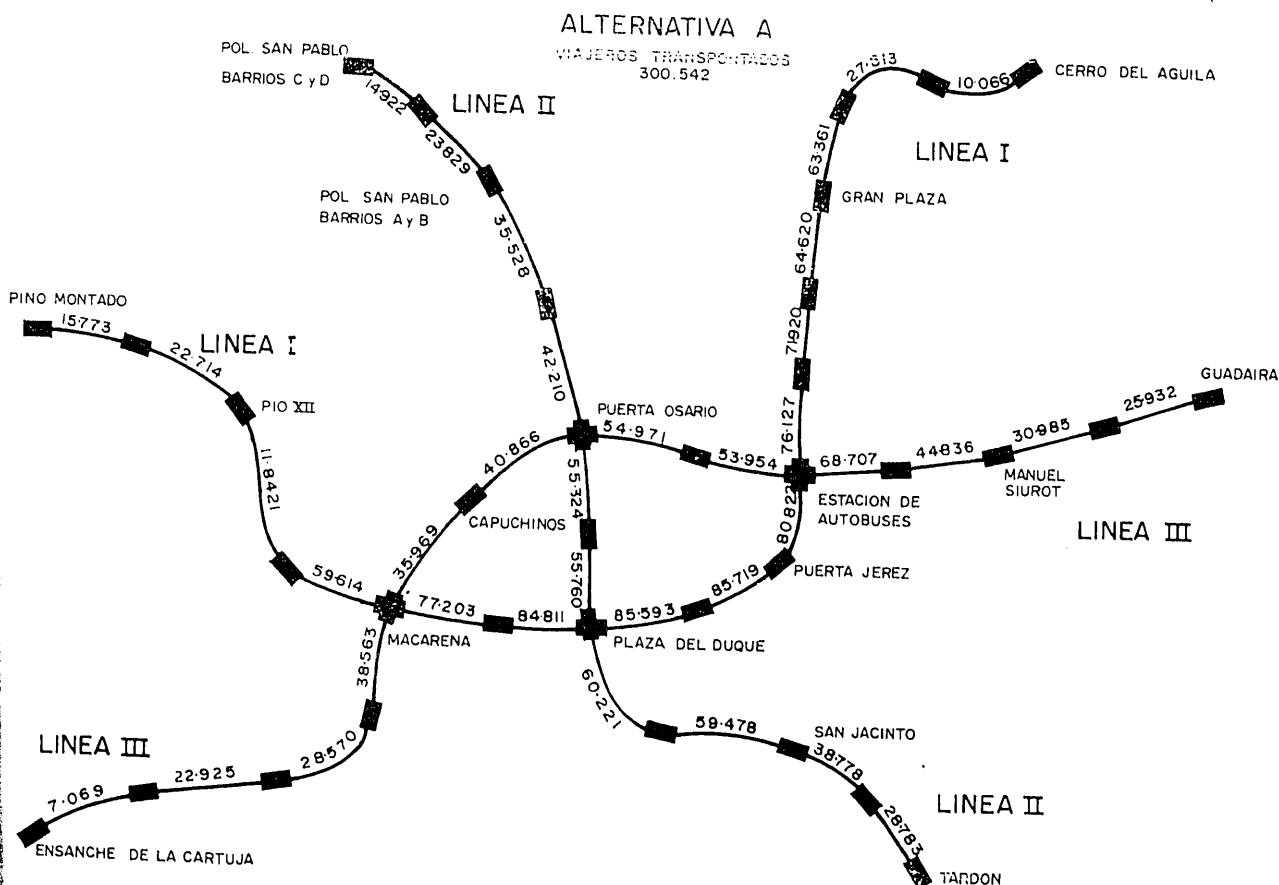


Figura 5.

La red óptima seleccionada para el año 2000, obtenida como resultado de este proceso, puede observarse en la figura 5.

3.6. Determinación de los años óptimos para la realización de las inversiones.

Una vez seleccionada la red óptima para el año 2000, compuesta de tres líneas, se ha completado el análisis estudiando el orden de prioridad de construcción de las líneas II y III y el año óptimo de entrada en servicio de cada línea.

Se ha tenido en cuenta, en esta fase del estudio, que cada alternativa comporta realizar una inversión y produce una corriente de beneficios que se definen como el ahorro de costes de funcionamiento del sistema obtenidos con la inversión realizada, es decir, la suma de los costes de explotación de la red de autobuses y del ferrocarril metropolitano y los costes del tiempo viajando.

Para la determinación del año óptimo se utilizó, en principio, un criterio básico de decisión en virtud del cual se adopta la hipótesis según la cual: siendo j el año de entrada en servicio, sería conveniente retrasar un año la inversión si los beneficios actualizados perdidos en dicho año, b_j , son inferiores a los beneficios actualizados que se obtienen al retrasarla, correspondientes al año $N + j$, siendo N el periodo de vida útil del proyecto.

Con este criterio se estimaría que conviene retrasar la inversión cuando:

$$b_j > \frac{b_{N+j}}{(1+i)^N} + iI$$

y adelantarla en el caso de que:

$$b_j < \frac{b_{N+j}}{(1+i)^N} + iI$$

siendo i el 8 por 100 (tasa de actualización) e I la inversión prevista.

Una vez determinado el año óptimo en virtud de este método, se calculó la tasa de rentabilidad interna, con objeto de comprobar si esta tasa era o no superior a la mínima admitida para las inversiones en obras públicas. De este modo conviene adelantar o retrasar la inversión hasta alcanzar dicha tasa límite, que fue fijada en un 10 por 100.

En definitiva, adoptando este último criterio, se determinó que el año óptimo de entrada en servicio, para la línea I, era el de 1978.

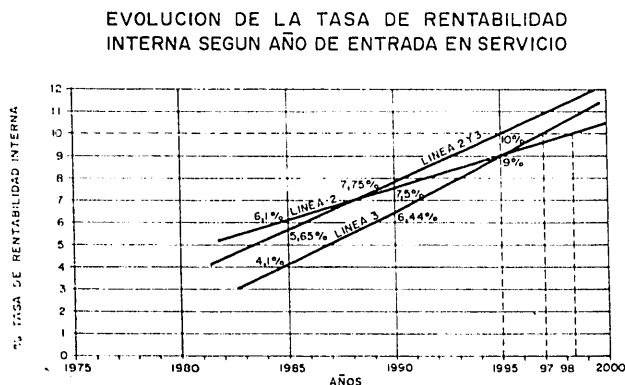


Figura 6.

La prioridad de las líneas II y III se ha estudiado realizando un análisis comparativo de la evolución de los beneficios sociales, considerando ya construida la línea I.

Del análisis realizado se obtiene que, debido al "efecto red", es conveniente construir simultáneamente las líneas II y III. Una vez estudiada esta hipótesis, se pone de manifiesto la complementariedad de la red y se obtiene como fecha óptima para la puesta en servicio del resto de las líneas el año 1995.

En el gráfico de la figura 6 puede observarse la evolución de la tasa de rentabilidad interna, según el año de entrada en servicio y las distintas hipótesis de prioridad.

3.7. Conclusión.

La red óptima prevista consta de tres líneas, con una longitud de 27,1 Km y 39 estaciones, siendo la inversión total de 10.725,3 millones de pesetas.

La línea I, con el trazado Cerro del Aguila-Estación de Cádiz-Plaza del Duque-barrio de la Macarena-Pío XII, tendrá una longitud de 9,15 Km y 14 estaciones y supondrá una inversión de 3.899,6 millones de pesetas. El año previsto para la entrada en servicio es el de 1978, con un volumen de viajeros transportados en dicho año de 113.400 viajeros por día.

El resto de la red debería entrar en servicio en 1995, siendo la inversión de 6.825,7 millones de pesetas. Esta inversión incluye la ampliación de la línea I hasta Pino Montano, con una longitud de 1,306 Km y dos nuevas estaciones, la construcción de la línea II (polígono de San Pablo-Recaredo-Plaza del Duque-Tardón, con 11 estaciones y 7,194 Km) y de la línea III (Heliópolis-Estación de Cádiz-Recaredo-Ensanche de la Cartuja, con 12 estaciones y 9,460 Km de longitud).

La red dispondrá de las siguientes estaciones de correspondencia:

- Estación de Cádiz (líneas I y III).
- Plaza del Duque (líneas I y II).
- Recaredo (líneas II y III).
- Barrio de la Macarena (líneas I y III).

Se prevé que en el año 2000 el número de viajeros por día transportados será del orden de 300.000, lo que equivaldría al 60 por 100 del total de viajes en transporte público.