

COMPACT, UN MODELO COMPUTACIONAL ECONOMICO PARA EL TRANSPORTE URBANO

RICARDO SALAS E. *
LUIS WILLUMSEN V. *

1. PRESENTACIÓN

Existe un buen número de sistemas computacionales destinados a la operación de los modelos matemáticos empleados en la planificación del transporte urbano. Estos consisten en conjuntos de programas individuales que normalmente requieren considerable especialización para su manejo. COMPACT es un programa único, perfeccionado por la Unidad de Asesoría Matemática del Departamento del Medio Ambiente de Gran Bretaña, a fin de llenar un vacío en la variedad de programas disponibles para este tipo de estudios [1]. Apunta fundamentalmente a evitar la necesidad de especialistas en computación para su manejo. Además, las técnicas de modelación matemática que emplea, aún siendo muy similares a las de los programas de gran escala, tienen tiempos de ejecución menores y funcionan económicamente gracias a algunas simplificaciones. El uso de COMPACT parece especialmente indicado tanto para fines pedagógicos como en situaciones en que se requiere probar un buen número de alternativas a un costo razonable. El Departamento de Transportes de la Universidad Católica ha implementado una versión para el computador B 3500 de esa casa de estudios. A pesar de que COMPACT está programado en lenguaje FORTRAN, esta tarea presentó algunas dificultades puesto que utiliza bastantes instrucciones específicas a cada computador en particular. Este trabajo pretende describir las principales características del programa, sus limitaciones y los tipos de problemas para los cuales sería más adecuado.

2. ESTRUCTURA GENERAL DE LOS MODELOS PARA LA PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE URBANO

Los modelos de transporte se emplean como herramientas de predicción de la demanda por desplazamiento y por lo tanto constituyen una ayuda en la evaluación de políticas e inversiones relacionadas con los sistemas de transporte de una ciudad. Requieren, para operar, de dos tipos de información:

a) *Parámetros de planificación.* Estos consisten en información acerca del futuro: uso del espacio urbano, población, empleos, comercio, ingreso, tasa de motorización y otras características socioeconómicas del área estudiada. Esta información se emplea en un modelo de Generación para estimar la cantidad total de viajes producidos y atraídos por cada una de las zonas del estudio.

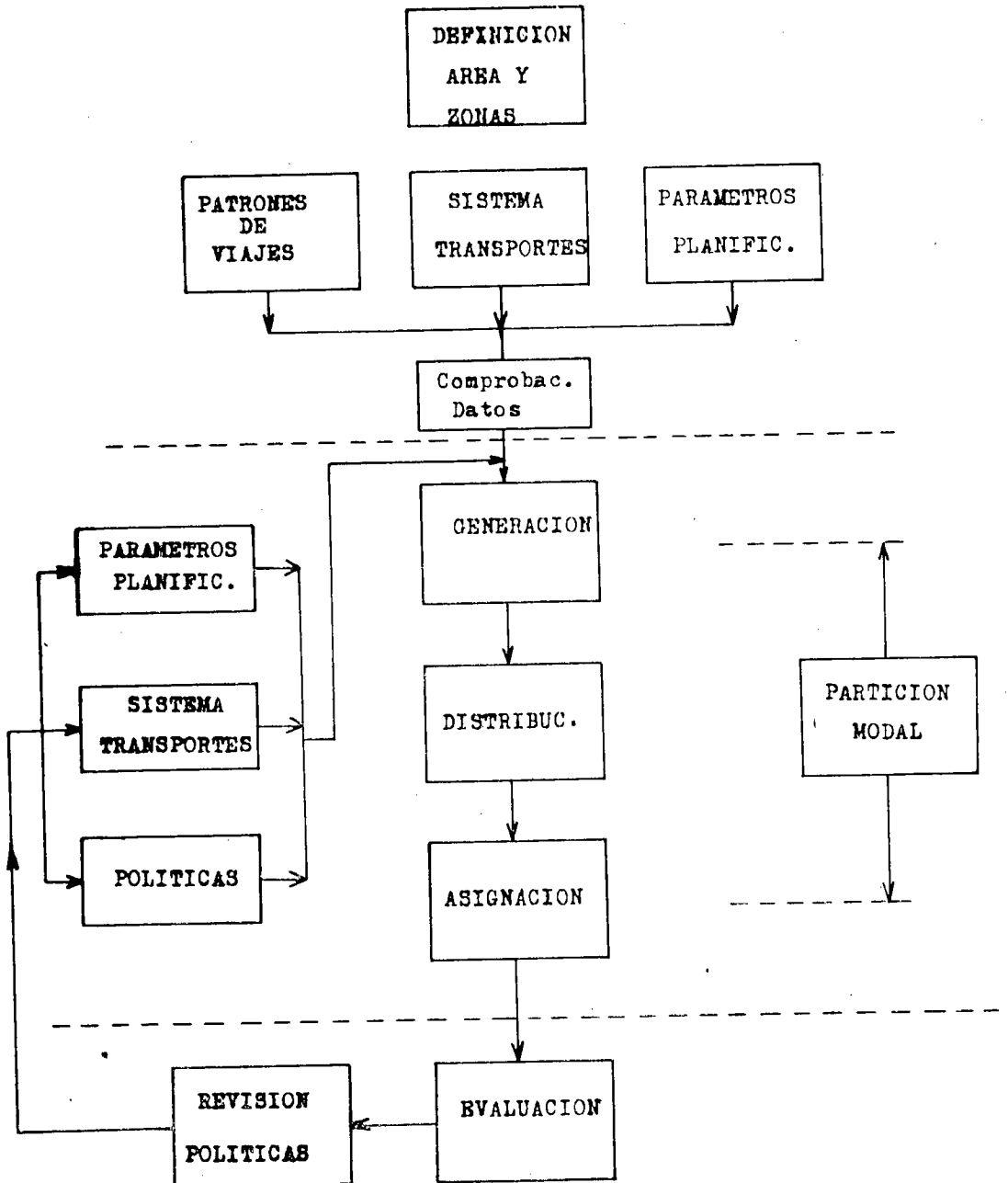
b) *Descripción de las redes de transporte.* Especifica las características de cada uno de los arcos de las redes de transporte privado y público, normalmente en términos de distancia, velocidad, tarifas, etc. Su finalidad es estimar la separación espacial entre las zonas de origen y destino para viajes realizados tanto en automóviles particulares como locomoción colectiva. Esta información se emplea en los modelos de Distribución, Partición Modal y Asignación de viajes a la red.

* Profesores investigadores del Departamento de Transporte, Universidad Católica de Chile.

El modelo de Distribución determina el número de viajes entre cada par de zonas en función de sus producciones y atracciones, y de una medida de la separación espacial entre ellas. Estos viajes se dividen entre los distintos modos disponibles, en el modelo de

Partición Modal de acuerdo con las características de cada medio. El modelo de Asignación atribuye estos viajes a las redes de transporte seleccionando para ello normalmente aquellas rutas que minimizan los costos de viaje entre cada par de zonas. La figura 1

FIGURA Nº 1
ESTRUCTURA ESTUDIOS DE TRANSPORTES



presenta un esquema correspondiente a la estructura de estos modelos para su uso en estudios de planificación del transporte urbano.

3. ESTRUCTURA DE COMPACT

COMPACT ha sido diseñado para llevar a cabo la construcción de la red de transporte y las fases de Distribución, Partición Modal y Asignación. En consecuencia, no ejecuta la fase de Generaciones de viajes, la que debe ser entregada externamente al modelo. La rapidez, y por ende el bajo costo de COMPACT, se obtiene a costo de simplificar la división zonal del área de estudio y la descripción de las redes. Como resultado, todas las matrices pueden almacenarse y operarse dentro de la memoria central del computador minimizando así la onerosa transferencia de información desde y hacia los archivos de respaldo. El modelo emplea inteligentes mecanismos de empaque y desempaque de datos a modo de reducir los requerimientos de memoria central para almacenar información.

El modelo COMPACT está basado directamente en el que se empleó para el estudio SELNEC en Gran Bretaña y que cuenta con un buen respaldo de investigación teórica y empírica [2]. Acepta dos medios de transporte, automóvil y locomoción colectiva, y dos tipos de viajeros, aquellos con y sin acceso a automóvil. En una pasada del programa puede procesarse hasta seis motivos de viaje. Existe la opción de escoger entre efectuar la Partición Modal en la fase de Generación o después de realizada la Distribución de viajes.

Las principales entradas que requiere el programa son las características de la red para ambos sistemas de transporte y el número de viajes producidos y atraídos por cada zona, por tipo de persona o por medio dependiendo de la Partición Modal escogida. Estas atracciones y producciones deben calcular externamente mediante los modelos usuales de Regresión Lineal Múltiple (p.e. GENER) [3] o Análisis de Categorías. Los parámetros de Distribución y Partición Modal deberán entregarse también externamente al programa. Estos pueden calcularse empleando los métodos tradicionales de calibración y el mismo COMPACT.

Los resultados que entrega COMPACT son:

- a) Rutas de costo mínimo y costos entre cada par de zonas.
- b) Matrices de viajes entre zonas por tipo de persona y por modo para cada motivo de viaje.
- c) Flujo de vehículos para cada arco de las redes de transporte público y privado.

Estos resultados se prestan para su empleo en la aplicación de técnicas usuales de evaluación económica para las distintas alternativas que analice un estudio. Las entradas y resultados del modelo se describen con mayor detalle más adelante.

4. CONSTRUCCIÓN DE LA RED

El área de estudio se divide normalmente en un conjunto de zonas cada una de las cuales cuenta con un centroide. Este concentra todos los viajes atraídos y generados por esa zona. Cualquier otro punto de la red está representado por un nodo (normalmente una intersección, un lugar de transferencia o una parada de locomoción colectiva). Las secciones de la red están representadas por arcos que conectan dos nodos o un nodo y un centroide. Las descripciones de los arcos aceptadas son distancia y velocidad o tiempo de viaje. Estas se emplean para combinarlas linealmente y obtener un costo generalizado de viajar a lo largo de cada arco [4]. Esta técnica cuenta con más aceptación en la actualidad que el recurrir sólo al costo directo o tiempo de viaje. La relación utilizada para obtener este costo generalizado es:

$$C_{ij}^k = a_{1ij} t_{ij}^k + a_{2ij} e_{ij}^k + a_{3ij} d_{ij}^k + P_j^k$$

donde:

$$C_{ij}^k = \text{costo generalizado de viaje entre zona } i \text{ y zona } j \text{ por nodo } k$$

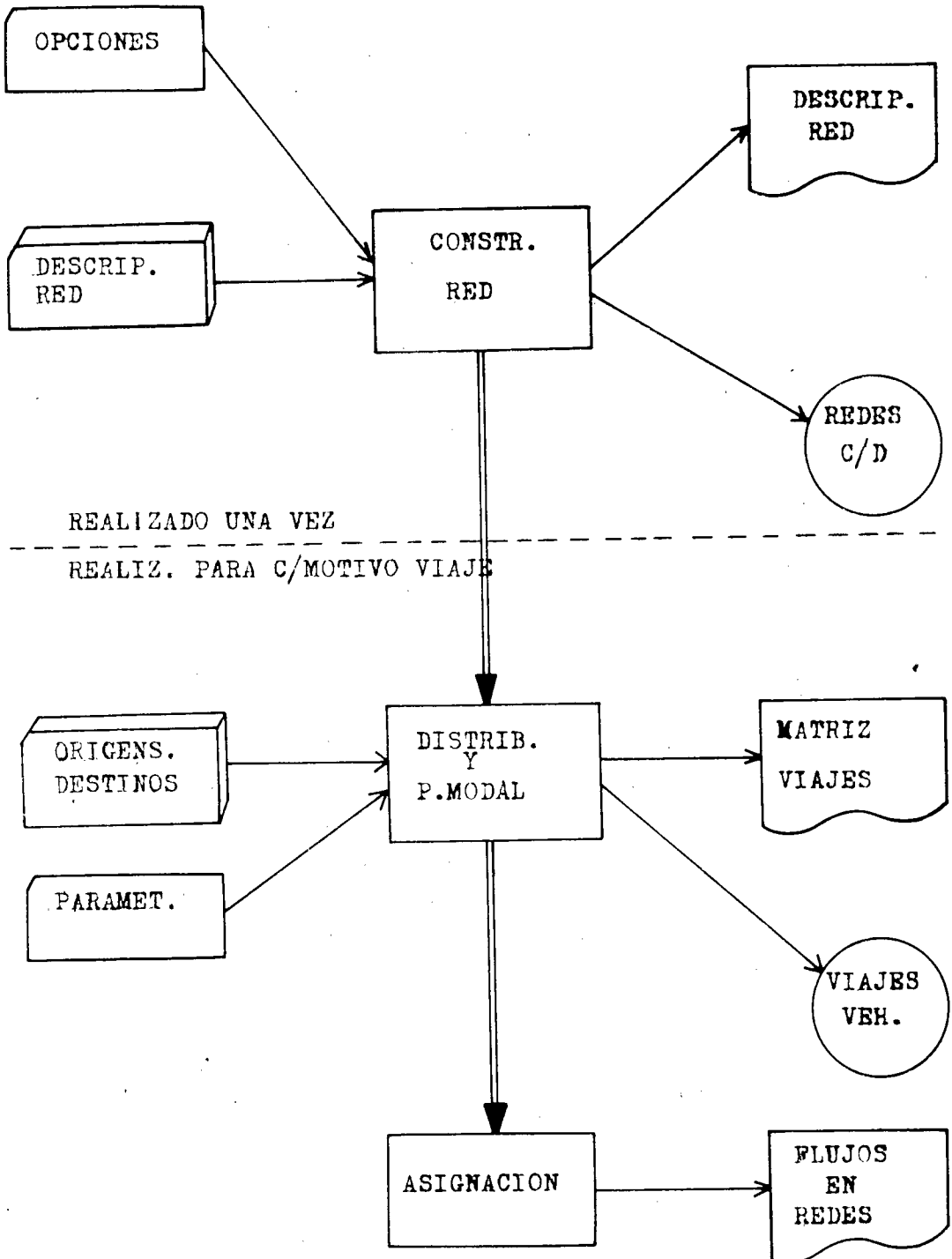
$$t_{ij}^k = \text{tiempo de viaje entre } i \text{ y } j \text{ por nodo } k$$

$$e_{ij}^k = \text{tiempo de exceso o espera}$$

$$d_{ij}^k = \text{distancia}$$

FIGURA Nº 2

ESTRUCTURA DE COMPACT



P_k^j = costos terminales, por ejemplo de estacionamiento

a_1, a_2 y a_3 son parámetros que representan el valor que los usuarios asocian a cada componente. a_3 , por ejemplo, puede representar la tarifa de transporte público por kilómetro.

Luego de calcular el costo generalizado de cada arco de la red, COMPACT determina las rutas y costos mínimos entre cada par de nodos usando un ágil algoritmo de Murchland [5].

5. DISTRIBUCIÓN

Para determinar el número de viajes entre cada par de zonas, COMPACT utiliza un modelo de distribución del tipo gravitacional. Esta cantidad de viajes depende del número de movimiento generados en la zona de origen, el número atraído por la zona de destino y de una función inversa (de decaimiento) del costo generalizado de viajar entre ellas. Esta función de decaimiento puede ser una exponencial negativa o la más tradicional función potencial. En general:

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j f(c_{ij})$$

donde:

T_{ij} = número de viajes entre zonas i y j

O_i = números de viajes producidos en zona i

D_j = número de viajes con destino zona j

C_{ij} = costos generalizado de viaje

A_i y B_j se definen de modo de satisfacer

$$\sum_j T_{ij} = O_i \text{ y } \sum_i T_{ij} = D_j$$

Existe la opción de hacer la distribución simple o doblemente acotadas. En una distribución simple se exige sólo que el número de viajes que parte de cada zona sea igual al número total de "producciones" de ella

$$(\sum_j T_{ij} = O_i \text{ y } \sum_i T_{ij} = D_j \text{ para todo } j).$$

En una distribución doblemente acotada, se exige además que el número que llega a cada zona coincida con las "atracciones" totales de ella (debe satisfacer $\sum_i T_{ij} = D_j$ también).

El primer tipo de distribución se emplea, por ejemplo, para viajes de compras donde no es posible establecer de antemano el número exacto de viajes atraídos por un destino sino sólo atracciones relativas. El segundo tipo se utiliza típicamente en viajes de trabajo donde los destinos deben coincidir con los empleos totales disponibles en cada zona. El algoritmo que usa COMPACT para una distribución doble fue desarrollado por Arrowsmith aunque existe una versión que emplea el conocido algoritmo de Wilson.

Tal como se mencionó más arriba, existe la opción de realizar la partición modal a dos niveles diferentes. Si ésta viene dada en la fase de Generación, la Distribución es realizada independientemente para cada modo y se basa solo en los costos de transportes del mismo. Si la partición modal es realizada posteriormente, la Distribución se realiza por tipo de persona (con y sin acceso a automóvil).

6. PARTICIÓN MODAL

Si se ha hecho una distribución por tipo de persona se puede efectuar la partición modal para aquellos viajeros que pueden elegir medio de transporte. La razón entre el número de viajes realizados por automóvil y los realizados por locomoción colectiva está dada por la razón entre los valores de las funciones de decaimiento correspondiente. En la práctica se emplean en esta fase funciones de decaimiento de la misma forma que en Distribución, pero sus parámetros pueden calibrarse independientemente. En general:

$$\frac{T_{ij}^1}{T_{ij}^2} = \frac{f(c_{ij}^1)}{f(c_{ij}^2 + \delta)}$$

El superíndice 1 ó 2 se refiere al modo de transporte y δ representa la desventaja o handicap del transporte público y sirve además

como estadígrafo calibrador. Constituye un costo adicional que representa los aspectos no incluidos en el costo generalizado (¿comodidad?) y que por lo tanto no afecta la distribución. Este tipo de partición modal ha sido justificado teóricamente por Wilson y empíricamente por Quarmby [6] y [7].

7. ASIGNACIÓN

Todos los viajes entre cada par de zonas y por cada modo que se asignan a la ruta de costo mínimo entre las posibles que conectan a ambos puntos (asignación del tipo "todo o nada"). De este modo, el flujo total a través de cada arco corresponde a la suma de los viajes que lo emplean como parte de su recorrido. En la actualidad COMPACT no impone limitaciones por capacidad a esos flujos. Por ello, si éstos resultan poco realistas por su magnitud, puede ser necesario correr de nuevo el programa modificando las velocidades de circulación supuestas para cada arco.

Esta limitación no resta demasiado valor al programa. En la práctica, buena parte de los programas de asignación disponibles emplean el mismo tipo de algoritmo. Para los objetivos de COMPACT, introducir restricciones de capacidad habría significado sacrificar demasiado en materia de costos. La fig. 2 muestra la estructura típica de COMPACT.

8. DATOS DE ENTRADA

Para su procesamiento COMPACT requiere los siguientes datos de entrada:

a) *Tarjetas de Control de opciones*: En ellas se especifica el título, número de zonas, nodos y propósitos de viajes; tipo de distribución y partición modal deseada, así como los resultados que se quiere obtener por impresora.

b) *Parámetro de costo*: En estas tarjetas se definen los parámetros a usarse en la función de costo generalizado para cada tipo de arco.

c) *Descripción de las redes*: Estas tarjetas especifican para cada arco:

i) Tipo de arco

ii) Nodos extremos del arco. Los arcos pueden ser de sentido único o dos sentidos.

iii) El largo del arco

iv) En tiempo o velocidad necesaria para recorrerlo.

d) *Costos intrazonales*: Consisten en una estimación de los costos de los movimientos internos en cada zona. Estos costos tienen alguna importancia en la medida que las zonas son grandes.

e) *Costos terminales*: Corresponden a una estimación del costo medio de acceder al centroide de cada zona. Es decir, se trata de representar los costos asociados a viajar desde puntos determinados dentro de una zona hasta su centroide. En el caso de los viajes que terminan en una zona, éstos pueden corresponder a costos de estacionamiento.

f) *Viajes producidos y atraídos por cada zona*: Se especifican aquí los viajes que se originan y terminan en cada zona subdivididos por tipo de persona o por nodo.

g) *Parámetros de Distribución y Partición Modal*: Estos valores determinan la forma específica de la función de decaimiento usada en las etapas de Distribución y Partición Modal.

9. RESULTADOS

COMPACT entrega por impresora:

a) Una copia de las tarjetas de control de opciones para verificaciones.

b) Parámetros de costo, número de arcos y una lista ordenada de éstos y sus características para cada red.

c) Matriz de "retronodos". Estos valores permiten reconstruir las rutas de costo mínimo de cada red.

d) Una copia de los costos intrazonales y terminales para comprobación.

e) Matrices de costos de viaje entre cada par de zonas. Estas se presentan en término de costos generalizados. (*)

* El costo generalizado se acostumbra a medir en unidades monetarias. COMPACT acepta también la medición en unidades de "tiempo" generalizado.

f) Una copia de los viajes generados y atraídos por cada zona para comprobaciones.

g) Matriz de viajes entre cada par de zonas por modo y/o por tipo de persona.

10. APLICACIONES

Teniendo en cuenta la simplicidad y rapidez de COMPACT, pero también sus limitaciones, se podría recomendar su uso en los siguientes casos:

a) *Estudios de ciudades pequeñas.* Es posible emplear COMPACT en ciudades cuyo tamaño permita usar un número relativamente bajo de zonas, nodos y arcos. El centro de estas ciudades debería estar suficientemente libre de congestión como para que no sea indispensable emplear una asignación con restricciones de capacidad.

b) *Planificación estructural.* Cuando se desea, por ejemplo, analizar los impactos sobre el sistema de transporte de diversas políticas de uso de la tierra. En estos casos puede bastar el análisis de los movimientos generados sobre los corredores principales de tráfico sin requerir mayores detalles sobre el flujo en arcos de menor importancia.

c) *Planificación estratégica de transportes.* En las etapas iniciales de un estudio de transporte de una ciudad grande es conveniente analizar numerosas estrategias globales con el objeto de elegir las más interesantes para un análisis detallado. En estos casos COMPACT, por su rapidez y economía, parece especialmente indicado.

d) *Como herramienta pedagógica y de entrenamiento,* para estudiantes de ingeniería de transporte, urbanistas y equipos interdisciplinarios. Es sencillo emplear a COMPACT como un taller donde probar diferentes alternativas y desarrollar una percepción de la sensibilidad de este tipo de estudios a diferentes políticas de tarificación, inversiones, etc.

11. LA VERSIÓN B 3500 UCT.

La versión adaptada por el Departamento de Ingeniería de Transporte de la Universidad Católica de Chile tiene las siguientes limitaciones:

Número máximo de zonas	44
Número máximo de nodos	60
Número máximo de arcos	240
Número máximo de propósitos de viaje	6

Es posible mejorar marginalmente estas limitaciones con el computador Burroughs B 3500. El Departamento trabaja también en una versión mayor que maneje más información en las memorias de respaldo y por ende más lenta. Esta podría llegar a emplear 180 zonas, 240 nodos, 1.200 arcos y 3 propósitos de viaje.

El Departamento ha implementado un problema de 9 zonas, 28 arcos y 18 nodos con fines pedagógicos. Su corrida toma aproximadamente un minuto en el B 3500 (aprox. US\$ 2.50). Se estima que para un problema que utilice su capacidad completa el tiempo de ejecución alcanzaría a 14 minutos. Se ha informado que la versión original (para un CDC 3300) toma cerca de 9 minutos para procesar un problema con 60 zonas, 100 nodos y 350 arcos.

12. AGRADECIMIENTOS

La adaptación hecha de COMPACT fue posible gracias a la colaboración prestada por J. H. Mackinder, uno de sus autores, quien proporcionó gentilmente los listados originales y documentación anexa. Debemos reconocer que si bien la versión B 3500 UCT está libre de errores conocidos es posible que involuntariamente queden problemas aún no detectados. El programa no se encuentra todavía totalmente documentado, pero se espera ponerlo a disposición de eventuales usuarios a fines del año 1974.

REFERENCIAS

- [1] Mackinder, I. H., J. Raftery, E. H. E. Singer y D. J. Wagon. "COMPACT II: A Simplified program for transportation Planning studies". MAU Note 201, D. E. Publicación interna, Dic. 70.
- [2] SELNEC TRANSPORTATION STUDY. Technical Working Papers N° 5: "The Mathematical Model", Town Hall, Manchester, julio 71.
- [3] GENER es el programa de computación adaptado por el Departamento de Ingeniería de

Transportes U. C. para esta fase empleando regresión lineal múltiple.

- [4] Mc Intosh, P. T. y D. A. Quarmby "Generalized cost, and the estimation of movement costs and benefits in transport planning". MAU Note 179, D. E. Publicación Interna, Dic. 70.
- [5] Murchland, J. D. "A new method for finding all elementary paths in a complete directed graph". London School of Economics, 1965.
- [6] Wilson, A. G. "The use of entropy maximising models in the theory of trip distribution, mode split and route split". Journal of Transport Economics and Policy, Vol. 3, N° 1, enero 1969.
- [7] Quarmby, D. A. "Choice of travel mode for the journey to work: some findings". Journal of Transport Economics and Policy, Vol. 1, N° 3, septiembre 1967.