

USO DE INFORMACION DE BAJO COSTO Y TECNICAS DE MODELACION AVANZADAS EN PLANIFICACION CONTINUA DE TRANSPORTE

Juan de Dios Ortúzar S.
Pontificia Universidad Católica de Chile
Casilla 6177, Cod. 105, Santiago 22, Chile

Luis G. Willumsen V.
Steer Davies and Gleave Ltd.
54-56 Stanhope Street, London NW1 3EX, Inglaterra

RESUMEN

El uso de modelos flexibles permite realizar un seguimiento de planes de largo plazo, verificando su comportamiento de corto plazo en forma regular y dando la posibilidad de implementar cambios al mismo si se estima necesario. En este trabajo se discute este enfoque de planificación, y se describe una nueva metodología cuyo objetivo es hacer uso de información de bajo costo y de datos limitados o agregados sobre partición modal, para transferir o re-estimar modelos de elección de destino y medio de transporte. Se formulan problemas de optimización equivalentes, para diferentes situaciones dependientes del tipo y calidad de la información que se suponga disponible. Finalmente se señalan las principales limitaciones estadísticas y computacionales del método.

1. INTRODUCCION

Aun cuando las técnicas de planificación de transporte experimentaron una fuerte evolución en la década de los ochenta, los problemas de transporte urbano a nivel mundial no han variado gran cosa en los últimos 25 años: congestión, contaminación, accidentes, déficit financieros, etc. No obstante, ha sido posible aprender bastante de un va largo período de escasa planificación, limitada inversión, énfasis en el corto plazo y, en general, falta de confianza en la modelación y toma de decisiones estratégica en los países industrializados. Hemos aprendido, por ejemplo, que los problemas básicos no desaparecen con la aplicación de mejores técnicas de gestión de tráfico; de hecho, estos problemas fundamentales tienden a reaparecer con mayor vigor, difundiéndose en áreas más amplias y tomando formas nuevas que resultan más difíciles de manejar.

Una dimensión adicional de lo anterior, es el hecho de que la mayoría de los países en desarrollo también sufren hoy serios problemas de transporte. Estos ya no son solamente la falta de caminos para conectar áreas rurales distantes con mercados, sino que además nuevos problemas muy similares a los prevalecientes en el mundo industrializado: congestión, polución, etc; sin embargo, ellos tienen una serie de características distintivas que demandan un tratamiento específico: bajos ingresos, rápida urbanización y cambio, fuerte demanda por servicios de transporte público, y escasez de recursos incluyendo inversión y divisas, datos de buena calidad y personal calificado.

En estos momentos el mundo desarrollado está pasando por una fase de mayor confianza en las soluciones técnicas que en las dos décadas anteriores. No es una confianza ciega en la tecnología, como proveedora de soluciones mágicas para los problemas sociales y económicos, ya que también hemos aprendido que éste es un espejismo. Sin embargo, la computación y la electrónica han avanzado tanto que es posible pensar seriamente en nuevas concepciones de infraestructura de transporte (ej. sistemas guiados automáticos) y sistemas de movimiento (ej. sistemas de navegación vial, trenes completamente automatizados). En particular, el advenimiento de los computadores de gran capacidad y bajo costo, ha prácticamente eliminado el procesamiento de datos como cuello de botella en la planificación de transporte. De hecho, las principales limitaciones van ahora por el lado humano y técnico: la planificación de transporte contemporánea requiere profesionales muy bien preparados y técnicas de modelación teóricamente sólidas, con implementaciones computacionales competentes.

A fin de diseñar una metodología de planificación de largo plazo adecuada para estos tiempos, es importante tratar de contestar las siguientes preguntas:

- Cómo aprovechar la experiencia de la década que termina para evitar los escollos de estudios anteriores y al mismo tiempo tomar una perspectiva de largo plazo en el análisis de problemas ?
- Qué nuevo tipo de herramienta de modelación se requiere para apoyar un estilo de planificación flexible y con alta capacidad de respuesta ?

Este problema es de particular interés para los países en desarrollo, dadas sus mayores necesidades de infraestructura (de alto costo), sus elevadas tasas de crecimiento, y su escasez generalizada de recursos.

2. UN ENFOQUE DE PLANIFICACION CONTINUA DE TRANSPORTE

Los modelos de transporte no resuelven problemas por si solos. Para ser útiles, deben ser ocupados dentro del marco de un proceso de decisión adaptado a un determinado estilo de toma de decisiones. El enfoque clásico de planificación de transporte urbano fue desarrollado originalmente en el contexto de un estilo de toma de decisiones normativo, que considera los siguientes pasos:

- Formulación del problema, previamente definido como una contradicción entre expectativas y realidad percibida, haciendo referencia a objetivos, estándares y restricciones.
- Recolección de información acerca del estado actual del sistema, con el fin de apoyar el desarrollo del modelo analítico.
- Especificación, estimación y validación de un modelo analítico del sistema a estudiar.
- Generación de soluciones a ser probadas con el modelo.
- Predicción de valores futuros para las variables de entrada del modelo, lo que requiere de la preparación de escenarios de planificación consistentes, normalmente ocupando predicciones para otros sectores de la economía.
- Verificación de la razonabilidad predictiva del modelo para distintos escenarios, y uso de éste para simular el impacto de diferentes soluciones en términos de un conjunto de indicadores consistentes con los objetivos del estudio y definición del problema.
- Evaluación de soluciones y recomendación de una política, estrategia o plan.
- Implementación práctica del plan escogido.

Este marco puede ser utilizado tanto para formular un Plan Maestro, como para apoyar el proceso de negociación inherente a un estilo de decisión adaptivo. Sin embargo, es importante destacar que éste asume en forma implícita no sólo que el problema puede ser completamente especificado, sino que las restricciones y el espacio de decisiones pueden ser definidos, y que la función objetivo puede ser identificada (aun cuando no necesariamente cuantificada en su totalidad).

Un problema del enfoque es que los sistemas de transporte reales no se comportan bien en este sentido; por ejemplo, las funciones objetivo y restricciones son a menudo difíciles de definir. Es más, muchas veces a través de reducir un problema de transporte, podemos llegar a creer que hemos sido capaces de resolverlo; sin embargo, los problemas suelen reaparecer en partes diferentes y bajo distintas formas. A medida que progresá nuestro entendimiento del sistema, se les añaden nuevas aristas y aparecen nuevas perspectivas; cambios inesperados e imprevisibles de los factores externos, o variables de entrada, pueden descarrilar al plan más detallado. Un marco de decisión normativo fuerte pero fijo, puede

ser adecuado para problemas simples, bien definidos y con restricciones claras, pero es de escasa utilidad en el tratamiento de cuestiones tan ricas, complejas y multifacéticas como son los problemas de transporte.

A fin de mejorar este enfoque, potenciándolo para lidiar con un mundo en constante cambio, parece esencial reconocer que el futuro es mucho más tenue de lo que nuestros modelos de predicción nos puedan llevar a creer. Si este es el caso, los Planes Maestros deben revisarse a intervalos regulares y otras estrategias de toma de decisiones deben ser apoyadas con la inclusión de información fresca, recolectada en forma periódica a fin de verificar el progreso y corregir el curso cuando sea necesario. En este sentido, parece que estilos de decisión adaptivos o mixtos, más flexibles, pueden ser más apropiados para las características de problemas de transporte. Estos reconocen la necesidad de redefinir en forma continua los problemas, arenas de negociación y objetivos, a medida que los entendemos en mejor forma; lo anterior lleva a su vez a identificar nuevas estrategias de solución, responder creativamente a cambios políticos y tecnológicos, y a mejorar nuestras capacidades de modelación a través del entrenamiento y la experiencia.

La introducción de una función de seguimiento es una importante adición al esquema de planificación clásico. Un sistema de seguimiento no está restringido a sólo una recolección periódica de información; también debiera facilitar otras etapas del marco de toma de decisiones, como se sugiere en la Figura 1. Hay dos roles clave de un sistema de seguimiento. En primer lugar debiera proveer de información que permita identificar desvíos del comportamiento esperado del sistema de transporte y/o de variables exógenas importantes, tales como la población o el crecimiento económico. En segundo lugar, los datos recolectados debieran ser de utilidad en la revalidación y mejoramiento del modelo utilizado para evaluar los planes. En este trabajo nos ocuparemos de métodos para apoyar este segundo rol.

Un buen sistema de seguimiento debiera facilitar también un proceso de aprendizaje del equipo planificador, generando ideas sobre como mejorar y modificar los modelos. En este sentido, perturbaciones importantes al sistema de transporte (tales como las que se producen en un paro de locomoción colectiva o cuando hay trabajos de reparación de vías de gran magnitud), que puedan temporalmente cambiar la estructura de la red de transporte y sus características, debieran proveer una importante fuente de información acerca del comportamiento respecto a viajes, a ser contrastada con las predicciones del modelo. Experimentos no planificados como éstos, debieran permitir al analista validar y mejorar sus modelos; por lo tanto si no existe un sistema de seguimiento, éste debiera establecerse como parte de cualquier estudio de transporte.

El seguimiento de planes, y en general del comportamiento de un sistema de transporte, es una función tan importante que merita influir en la elección de modelos para apoyar la planificación y toma de decisiones. El uso de modelos que pueden ser re-corridos y actualizados, usando datos fáciles de recolectar y de bajo costo, parece particularmente apropiado para esta labor. Obviamente, modelos de esta naturaleza no pretenden proveer toda la riqueza de comportamiento de otros enfoques más detallados. Sin embargo, existe un campo de acción para combinar ambas técnicas, consistente en aplicar la herramienta de mejor resolución a las partes críticas del problema, para luego usar herramientas más gruesas, pero más simples de actualizar, para monitorear progreso e identificar cuando se requiere un nuevo esfuerzo de modelación detallado.

La adopción de una función de seguimiento permite la implementación de un proceso de planificación continua. Esto es en contraste con el esquema convencional, que comienza por gastar una suma considerable de recursos en un corto período (uno o dos años), a fin de realizar un estudio de transporte de gran escala. Este frenesí de actividad puede ser seguido por un período, mucho más largo, de esfuerzo limitado en términos de planificación o revisión de planes. Pronto los informes y el Plan Maestro se hacen obsoletos, o simplemente son olvidados, y nadie capaz de correr los modelos permanece en la unidad de planificación. Algunos años más tarde se realiza un nuevo gran esfuerzo de modelación y planificación, y el ciclo repite. Este estilo, a 'saltos y brincos', desperdicia recursos, no incentiva el aprendizaje y la adaptación como habilidades de planificación, y aliena a los analistas de los problemas reales. El enfoque es particularmente doloroso en países en desarrollo, ya que éstos no tienen recursos para malgastar y sus rápidos procesos de cambio apuran la obsolescencia de planes y datos.

Cualquier esquema de seguimiento requiere de métodos para actualizar y/o transferir modelos desde un contexto (época y/o lugar) a otro, que aseguren su adecuación a las nuevas condiciones y ambiente político. En el resto del trabajo nos concentraremos en esta tarea, basándonos en experiencia práctica chilena y británica, y en investigaciones diseñadas para apoyar este tipo de enfoque. En este último aspecto, estamos considerando una mezcla de dos mejoras a la modelación que parecen particularmente relevantes. La primera es el desarrollo de modelos avanzados de elección discreta, que ha sido aumentado por el uso de técnicas de preferencias declaradas (SP) en particular para la modelación de opciones totalmente nuevas (Bradley, 1988). El segundo es el desarrollo de técnicas para estimar y actualizar matrices de viaje y modelos de distribución, a partir de conteos de tráfico (ver Willumsen, 1981; De Cea y Cruz, 1986; Cascetta y Nguyen, 1988; Tamin y Willumsen, 1988). Eventuales mejoras a estos enfoques, probablemente darán como resultado métodos más apropiados para actualizar y transferir modelos.

3. ACTUALIZACION DE UN MODELO DE ELECCION DE DESTINO Y MODO

3.1 Introducción

En lo que sigue consideraremos un modelo simplemente acotado de elección de destino y medio de transporte, con la siguiente forma logit múltiple:

$$T_{ij} = O_i \frac{S_j \sum_k \exp(\sum_p \theta_p X_{ijk}^p)}{\sum_k S_k \sum_p \exp(\sum_p \theta_p X_{ijk}^p)} \quad (1)$$

donde la componenente del elección modal del modelo está dada por:

$$P_{ij}^k = \frac{\exp(\sum_p \theta_p X_{ijk}^p)}{\sum_m \exp(\sum_p \theta_p X_{ijm}^p)} \quad (2)$$

T_{ij} son viajes entre las zonas i y j , O_i es el total de viajes generados en la zona i , S_j es una medida de atractividad de la zona j , P_{ik}^t es la proporción de viajes en el medio k entre las zonas i y j , X_{ijk}^p es la p -ésima variable explicativa para el modo k (por ejemplo, tiempo de viaje) y los θ son parámetros del modelo.

Aunque las derivaciones que presentaremos a continuación son para el caso logit múltiple, pueden extenderse fácilmente para considerar la estimación simultánea de formas logit jerárquicas más generales.

Consideremos primero un caso unimodal con un único parámetro de escala μ , a ser estimado, multiplicando una variable tipo *costo generalizado* X_{ij} . En este caso sencillo (1) se reduce a:

$$T_{ij} = O_i \frac{S_j \exp(\mu X_{ij})}{\sum_d S_d \exp(\mu X_{id})} \quad (3)$$

Supongamos ahora que se poseen observaciones para un conjunto de flujos en arcos a de la red, F_a^* , y también que conocemos - de algún modelo de asignación - las proporciones de viajes entre pares de zonas (i,j) que eligen el arco a , p_{ij}^* , para todos los enlaces con flujos observados. En este caso se puede postular que los flujos modelados F_a vienen dados por:

$$F_a = \sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^*, \quad 0 \leq p_{ij}^* \leq 1 \quad (4)$$

y para estimar el valor de μ podemos, por ejemplo, minimizar la siguiente función no-lineal de mínimos cuadrados normalizada:

$$S = \sum_a [(F_a^* - F_a)/F_a]^2 \quad (5)$$

A fin de utilizar un método como Newton-Raphson para encontrar el mínimo, se necesita conocer las primeras y segundas derivadas de S con respecto a μ . Estas se presentan en Ortúzar (1989); desgraciadamente, aún para este caso sencillo parecen bastante intratables, por lo que una solución única al problema puede ser difícil de establecer.

3.2 Actualización Mediante Proporciones de Mercado Agregadas

Consideremos la transferencia del modelo (1)-(2) con parámetros θ estimados en otro contexto; ignoraremos las constantes modales originales, ya que sólo aseguran la reproducción de las proporciones de mercado agregadas en aquel contexto.

Podemos definir una función de utilidad a transferir como:

$$V_{ik} = \mu(\sum_p \theta_p X_{ip}^p) + M_k \quad (6)$$

en que los X_{ip}^p son valores zonales de las variables socio-económicas y de servicio en el nuevo contexto, y M es un conjunto de ($K-1$) constantes modales específicas a ser estimadas; K es el número total de modos.

Existen dos casos interesantes, cuyas ecuaciones se presentan en Ortúzar (1989):

- i) Información respecto a proporciones modales P_{ik}^* en cada origen (en que se requiere que $\sum_k P_{ik}^* = 1$); en este caso se pueden encontrar estimadores para μ y M por máxima verosimilitud, y es posible demostrar que existe un óptimo único para el caso de estimar solamente las constantes modales (esto es para μ fijo).
- ii) Un caso más realista es cuando se tiene información acerca de proporciones de mercado agregadas P_i^* para toda el área (en cuyo caso requerimos que $\sum_i P_i^* = 1$); en este caso tambien se pueden encontrar estimadores mediante el método de máxima verosimilitud, y sólo es posible demostrar la existencia de un óptimo único para μ fijo (ver Ortúzar, 1989).

3.3 Actualización Mediante Conteos de Tráfico

Los problemas principales en este caso surgen si estamos interesados en combinaciones multimodales, pero sólo poseemos conteos para los modos puros. Por ejemplo, consideremos el caso de elección entre Auto, Bus, Metro y combinaciones (típicamente de los dos primeros con el último); es obvio de que aun cuando tengamos conteos separados para cada modo puro, éstos incluyen conteos correspondientes a viajes combinados. Por lo tanto, tenemos una situación que puede formularse como sigue:

- a) Sean los medios Auto (1), Bus (2), Metro (3), Auto-Metro (4) y Bus-Metro (5). Poseemos conteos (linealmente dependientes) de pasajeros de Auto (y Auto-Metro) y Bus (que incluyen conteos en Bus-Metro), y conteos independientes de pasajeros en el Metro (que obviamente incluyen pasajeros con los tres 'medios de acceso' al sistema: a pie, en Auto y en Bus). Suponiendo que no conocemos las proporciones de cada modo puro en los conteos, tenemos que:

- Conteos de autos: $V_{a1}^* = (F_{a1}^* + F_{a4}^*)$

Red de superficie

- Conteos de buses: $V_{a2}^* = (F_{a2}^* + F_{a5}^*)$

Red subterránea

- Conteos de Metro: $V_{a3}^* = (F_{a3}^* + F_{a4}^* + F_{a5}^*)$

b) Se dispone de modelos de asignación de transporte público y privado, que entregan proporciones de viajes p_{ijk}^* , entre zonas (i,j) para cada medio k, usando el arco a. De esta forma, los conteos modelados están dados por:

$$V_{a1} = F_{a1} + F_{a2} = \sum_{ij} (T_{ij1} + T_{ij1}^{-1}) p_{ij1}^*$$

$$V_{a2} = F_{a2} + F_{a3} = \sum_{ij} (T_{ij2} + T_{ij2}^{-1}) p_{ij2}^*$$

$$V_{a3} = F_{a3} + F_{a4} + F_{a5} = \sum_{ij} (T_{ij3} + T_{ij3}^{-2} + T_{ij3}^{-1}) p_{ij3}^*$$

donde T_{ijk}^* representa la n-ava etapa de un viaje combinado.

c) Claramente no podemos estimar las constantes modales específicas M de cada medio en este caso; sin embargo, ciertamente es posible estimar el parámetro de escala μ y las constantes de los tres modos puros (entendiendo, eso sí, que ahora se trata de modos 'compuestos'). Para hacer esto, podríamos querer minimizar:

$$S = \sum_a [f_1(V_{a1}^* - V_{a1})^2 + f_2(V_{a2}^* - V_{a2})^2] + f_3 \sum_b (V_{b3}^* - V_{b3})^2 \quad (7)$$

donde: $f_1 = (\sigma_2^2 + \sigma_3^2)/\sigma^2 V_{a1}^2$

$$f_2 = (\sigma_1^2 + \sigma_3^2)/\sigma^2 V_{a2}^2$$

$$f_3 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)/\sigma^2 V_{b3}^2$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2$$

y σ_i^2 son las varianzas de los distintos conteos; vale decir, aquí no sólo estamos normalizando, al dividir por los valores de los conteos observados, sino que incorporando la posibilidad de que cada conteo tenga un distinto nivel de precisión. Una técnica similar a esta se postula para el caso de combinar información de distinta naturaleza, que se discute a continuación.

3.4 Actualización Mediante Información Combinada

Supongamos que queremos actualizar μ y M_k de (6), y que para ello disponemos no sólo de información sobre proporciones de mercado agregadas P_k ; sino que dos conjuntos de conteos observados de pasajeros, F_{a1}^* y F_{a2}^* , sobre arcos a de la red.

a) Enfoque de máxima verosimilitud. En este caso se obtienen diferentes funciones a maximizar, y por lo tanto diferentes condiciones de primer orden y valores óptimos, dependiendo de las suposiciones que se hagan respecto a la distribución de los errores de los conteos. Las hipótesis preferidas en la literatura han sido Multinomial, Poisson independiente y Normal independiente (ver por ejemplo, Gunn et al, 1985; Tamin y Willumsen, 1988). Como la información sobre conteos es independiente de los datos sobre proporciones agregadas de mercado, las funciones de verosimilitud a maximizar son separables. Si se supone que los conteos no tienen error, el problema se reduce a maximizar la verosimilitud de las proporciones agregadas de mercado sujeto al cumplimiento de la ecuación (4). Expresiones para todos los casos anteriores se presentan en Ortúzar (1989); sin embargo, ninguna conduce garantizadamente a un óptimo único.

b) Enfoque de mínimos cuadrados generalizados. Este procedimiento tiene dos ventajas; en primer lugar, no se requieren hipótesis distribucionales para los datos. En segundo término, es posible incorporar explícitamente las diferencias en la precisión de cada ítem de datos previo a la estimación. Es importante normalizar en este caso, ya que las diferencias entre variables observadas y modeladas en ambos conjuntos de datos pueden ser de distinto orden de magnitud. Por ejemplo, la máxima diferencia en el caso de las proporciones agregadas es 1; sin embargo, las diferencias entre conteos observados y modelados pueden ser fácilmente cifras del orden de los cientos o miles. Dado todo lo anterior, es posible postular que la función a minimizar toma la siguiente forma en este caso:

$$S = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_c^2 + \sigma_p^2} \sum_k \delta_{kk} [(F_{kk}^* - F_{kk})/F_{kk}^*]^2 + \frac{\sigma_c^2}{\sigma_c^2 + \sigma_p^2} \sum_k [(P_k^* - P_k)/P_k^*]^2 \quad (8)$$

donde δ_{kk} toma el valor 1 si el medio k utiliza el enlace a y 0 en otros casos, y σ_a^2 son las varianzas de los datos sobre conteos y proporcionales modales respectivamente. Para estimar estos valores se requiere información extra, o se pueden asumir en base a experiencia previa, conocido el tamaño muestral. Las condiciones de primer orden para (8) se presentan en Ortúzar (1989).

4. CONCLUSIONES

a) Si sólo se dispone de información sobre proporciones modales agregadas, el método de estimación más adecuado es el de máxima verosimilitud. El problema general, consistente en actualizar el parámetro de escala y las constantes específicas no tiene una solución única garantizada; no obstante, si sólo se desea actualizar las constantes modales, existe una solución única que se puede obtener adaptando software normalmente disponible.

b) Si sólo se dispone de información acerca de conteos de pasajeros, el problema de actualización es conceptualmente sencillo pero sumamente difícil de resolver en la práctica debido a la relativa intratabilidad del problema de optimización asociado. Además, en muchas situaciones prácticas, tal como en áreas con un número no despreciable de viajes combinados, no será posible estimar un conjunto completo de constantes modales específicas debido a problemas con los datos.

c) Si se dispone de datos sobre conteos y proporciones modales agregadas, existe un rango de metodologías posibles, pero sus méritos relativos en la práctica no pueden ser evaluados sino en forma experimental; éstos incluyen enfoques de máxima verosimilitud (cuatro versiones) y de mínimos cuadrados generalizados.

AGRADECIMIENTOS

La investigación en que se basa este trabajo fue realizada durante una estadía sabática del primer autor en Gran Bretaña, financiada parcialmente por un Visiting Fellowship Grant otorgado por el Science and Engineering Research Council del gobierno británico. Los autores desean agradecer también a The Royal Society, Fundación Andes, The British Council y The Chartered Institute of Transport por su valioso apoyo financiero.

REFERENCIAS

BRADLEY, M. (1988) Realism and adaptation in designing hypothetical travel choice concepts. Journal of Transport Economics and Policy, Vol. XXII, N°1, 121-137.

CASCETTA, E. y NGUYEN, S. (1988) A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. Transportation Research, Vol. 22B, N°6, 437-455.

DE CEA, J. y CRUZ, G. (1986) ESMATUC: un modelo de estimación de matrices de viajes en transporte urbano colectivo. Apuntes de Ingeniería N°24, 109-125.

GUNN, H.F., BEN AKIVA, M.E. y BRADLEY, M.A. (1985) Tests of the scaling approach to transferring disaggregate travel demand models. Transportation Research Record 1037, 21-30.

ORTUZAR, J. de D. (1989) Estimation of trip matrices and mode choice models integrating flow information and other data types. Technical Note, Transport Studies Group, University College London, Inglaterra.

TAMIN, O.Z. y WILLUMSEN, L.G. (1988) Freight demand model estimation from traffic counts. 16th PTRC Summer Annual Meeting, University of Bath, 12-16 Septiembre 1988, Inglaterra.

WILLUMSEN, L.G. (1981) Simplified transport demand models based on traffic counts. Transportation, Vol. 10, N°3, 257-278.

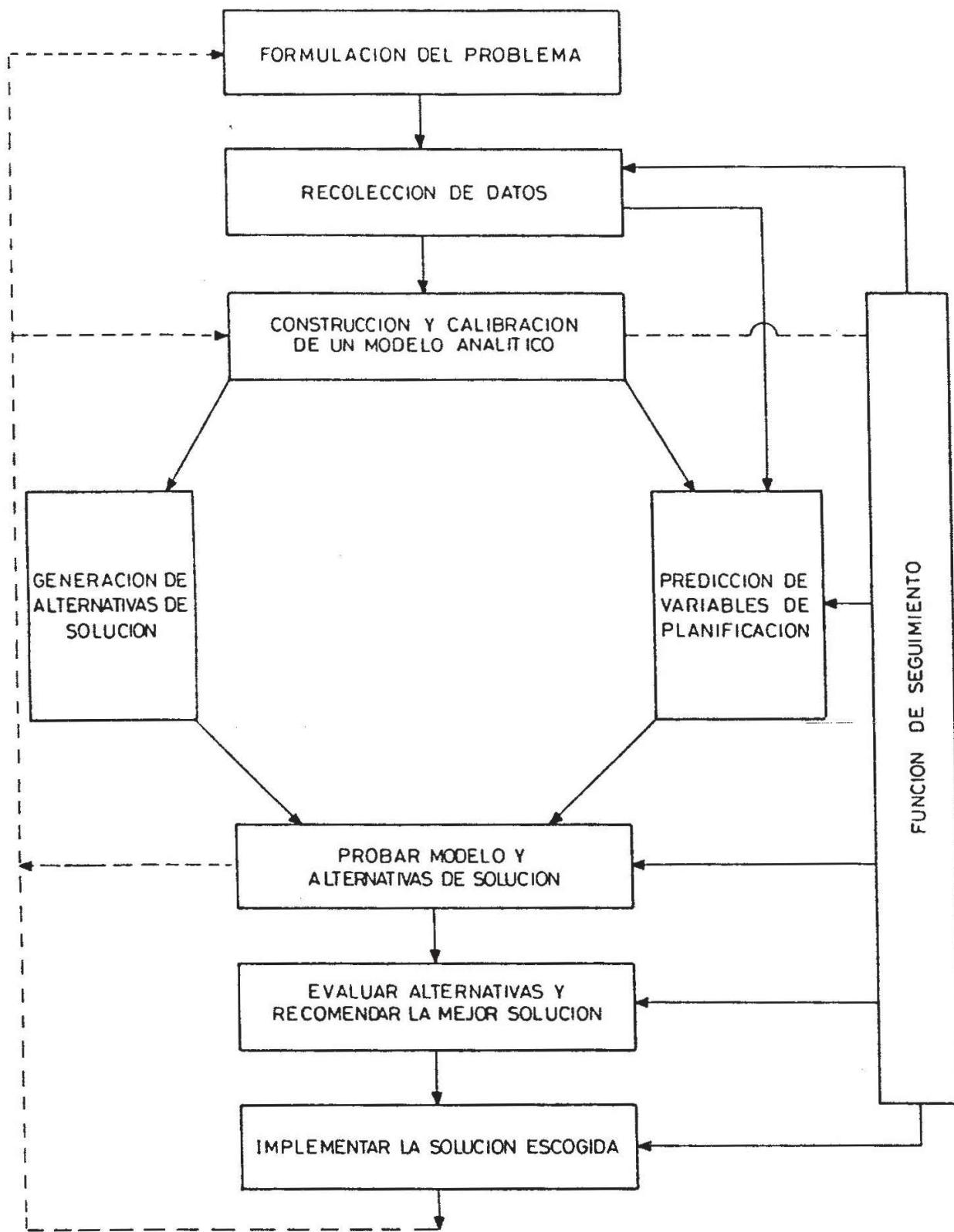


FIG. N°1 UN MARCO PARA LA TOMA DE DECISIONES RACIONAL CON LA AYUDA DE MODELO.