

Evolución histórica de la modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica

HISTORICAL EVOLUTION OF THE URBAN TRANSPORTATION DEMAND MODELLING IN COSTA RICA

Ing. Leonardo Castro Rodríguez. M.E., M.B.A., investigador principal.

Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica
leonardo.castro@ucr.ac.cr

Ing. Gabriela Picado Aguilar, investigadora asociada.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales,
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, Costa Rica
gabriela.picadoaguilar@ucr.ac.cr

Ing. Stephan Rodríguez Shum, investigador asociado.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales,
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, Costa Rica
stephan.rodriguez@ucr.ac.cr

Fecha de Recepción: 21 de marzo de 2017 / **Fecha de Aceptación:** 22 de agosto de 2017

RESUMEN

En el presente artículo se detalla la evolución histórica de la modelación de demanda en Costa Rica, haciendo mención del primer estudio de modelación de demanda de la historia, a nivel internacional, realizado en Chicago en la década de los sesenta, a partir del cual se basa la metodología utilizada en todos los estudios posteriores realizados para Costa Rica. La modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica ha evolucionado según las necesidades y cambios tecnológicos ocurridos en el ámbito de la planificación, sin embargo, las bases metodológicas han variado poco. El primer estudio de modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica, "Estudio de Transportes del Área Metropolitana de San José" (ETAMSJ), fue desarrollado en los años 1973-1976 por un consorcio de empresas internacionales estadounidenses: Allan M. Vorhees & Associates, Inc. y PADCO Inc.. Posteriormente, se realizaron dos estudios de demanda del transporte urbano, ambos desarrollados por consultores nacionales: "Estudio del Transporte Urbano del Gran Área Metropolitana" (ETUGAM) en 1989, para el cual se desarrolló una herramienta computarizada, denominada "Sistema Integrado de Análisis del Transporte del Gran Área Metropolitana" (SIATGAM), y "Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM" como parte del desarrollo del "Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica" (PRUGAM) en el 2007. Desde el año 2016 se está desarrollando el proyecto "Modelo de Demanda de Transporte Urbano en la GAM"

(MDT-UCR), el cual fue formalizado como un proyecto de investigación en la Universidad de Costa Rica (UCR) y está basado en un convenio entre la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (EIC-UCR) y el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme-UCR). Con este proyecto de investigación se busca contar con una herramienta de análisis de la demanda de transporte urbano debidamente actualizada y totalmente funcional para ser aplicada bajo las características particulares de la Gran Área Metropolitana del país; a la misma vez se pretende fortalecer el conocimiento técnico y las capacidades profesionales futuras de los estudiantes de Ingeniería Civil de la UCR. Este artículo fue desarrollado como parte del MDT-UCR y busca brindar un contexto histórico con el cual se resalte la importancia de la planificación y la modelación de demanda, así como de mantener un modelo con sus bases de datos actualizadas.

PALABRAS CLAVES: Demanda, modelación, transporte urbano, Costa Rica.

ABSTRACT

The following article describes the historical evolution of urban transportation demand modeling in Costa Rica, including the first international urban transportation demand modeling study, developed in Chicago in the sixties, on which the methodology used in all subsequent studies in Costa Rica is based. Urban transportation demand modeling in Costa Rica has evolved according to the different needs and technological changes that have occurred in the field of urban planning, however, its methodological bases have not changed significantly. The first urban transportation demand modeling study in Costa Rica, named "Transportation Study for the Great Metropolitan Area of San José" (ETAMSJ), was developed in 1973-1976 by a consortium of two international, U.S. based companies: "Allan M. Vorhees & Associates Inc." and "PADCO Inc." Subsequently, two urban demand transportation studies were developed by national consultants: "Urban Transportation Study for the Great Metropolitan Area" (ETUGAM) in 1989, for which a modeling tool called "Integrated System of Transportation Analysis for the Great Metropolitan Area" (SIATGAM) was developed, and "GMA

Transportation Supply and Demand Study" was developed as part of the "Regional Urban Planning for the GMA of Costa Rica" (PRUGAM) in 2007. The "GMA Urban Transportation Demand Modeling" (MDT-UCR) project began in 2016, conceived as a research project of the University of Costa Rica. Its development is based on a partnership between the Civil Engineering School (EIC) and the National Laboratory of Testing Materials and Structural Models (LanammeUCR). The goal of the project is to be able to have a completely functional and up to date urban demand transportation analysis tool, to be used for the particular characteristic of the GMA of Costa Rica, while simultaneously strengthening the future technical knowledge and capabilities of Civil Engineering students from the University of Costa Rica. The following article was developed as part of the MDT-UCR project and seeks to provide a historical context through which the importance both of planning through demand modeling, and of keeping the databases up to date, is highlighted.

KEY WORDS: Demand, modeling, urban transportation, Costa Rica

TABLA DE CONTENIDOS

I	Introducción.....	7
II	Objetivos.....	9
III	Los inicios internacionales de la metodología: Estudio de Transporte del Área Metropolitana de Chicago (CATS).....	9
IV	Inicio de la aplicación en costa rica de la metodología: Estudio de Transportes del Área Metropolitana de San José ETAMS.....	19
V	Estudio del Transporte Urbano del Gran Área Metropolitana (ETUGAM)	26
VI	Cambio en la plataforma de modelación: Migración de SIATGAM a Emme/2	34
VII	Redefinición completa del modelo de demanda: Estudio de Oferta y Demanda de Transporte de la GAM (PRUGAM).....	34
VIII	Del ámbito público-privado hacia el ámbito académico: Proyecto de modelación de Demanda de Transporte- Universidad de Costa Rica (MDT-UCR).....	43
IX	Resumen de los modelos analizados	45
X	Conclusiones.....	46
XI	Agradecimientos	47
XII	Referencias.....	47

I. INTRODUCCIÓN

En julio de 2016, la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (EIC-UCR) y el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) iniciaron el proyecto de investigación “Modelo de Demanda de Transporte Urbano en la GAM” (MDT-UCR). Desde ese momento y con este proyecto, ambas unidades académicas y de investigación de la Universidad de Costa Rica no solo buscan contar con una herramienta de análisis de la demanda de transporte urbano debidamente actualizada y totalmente funcional para ser aplicada bajo las características particulares de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, sino que también se pretende fortalecer el conocimiento técnico y las capacidades profesionales futuras de los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

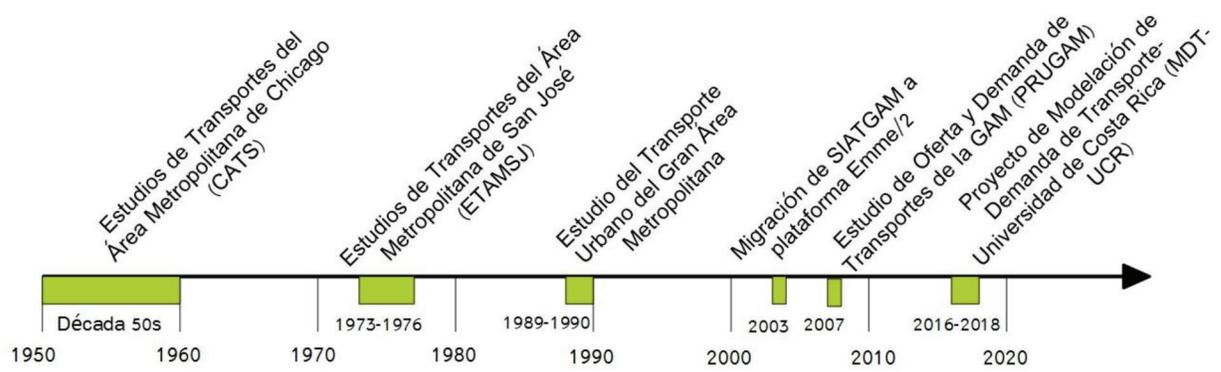
Esta publicación se elaboró como parte de los productos de las labores de investigación asociadas al proyecto MDT-UCR. Con ella se deja documentado el desarrollo histórico de la modelación de la demanda de transporte urbano, desde sus orígenes en Chicago en la década de los cincuentas, hasta sus usos iniciales en Costa Rica durante la década de los setentas, y sus aplicaciones subsecuentes en Costa Rica hasta el año 2017. Es importante aclarar que la descripción de los estudios de Chicago obedece a que la metodología general de predicción de demanda utilizada en la actualidad tuvo su comienzo en dichos estudios, realizados en la década de los cincuentas.

Desde una perspectiva meramente cronológica, el proceso de evolución de la modelación y análisis de la demanda de transporte urbano en Costa Rica se puede resumir, de forma esquemática, como se muestra en la Figura 1.

El primer estudio que incluyó modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica, llamado “Estudio de Transportes del Área Metropolitana de San José” (ETAMSJ), fue

realizado en los años 1973-1976. Este fue desarrollado por un consorcio de dos empresas internacionales: “Allan M. Vorhees & Associates, Inc.” y “PADCO Inc.”, ambas estadounidenses. Desde aquel entonces, se predijo el efecto que tendría el crecimiento poblacional en el Área Metropolitana de San José (AMSJ) sobre la movilidad urbana. El ETAMSJ planteó intervenciones de transporte en el corto, mediano y largo plazo. El largo plazo fue establecido con base en el año horizonte 1990. Como recomendaciones derivadas del estudio, se plantearon, entre otras, la construcción de la carretera de Circunvalación (Ruta 39), la restricción de estacionamiento en las calles del centro de San José, la priorización del transporte público por medio de carriles exclusivos de autobuses y el fomento en el uso de este modo de transporte.

En el año 1989, en vista de que el plazo planteado por el ETAMSJ estaba llegando a su término, el Gobierno de Costa Rica procedió a contratar un nuevo estudio de transportes para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica. Esta investigación, llamada “Estudio del Transporte Urbano del Gran Área Metropolitana” (ETUGAM), fue el primer estudio de demanda de transporte urbano realizado por costarricenses con base en procesos de modelación. Esta modelación se basó en principios y metodologías análogas a las del ETAMSJ, sin embargo, no solo se amplió la región de análisis a la Gran Área Metropolitana, sino que se realizó el montaje del modelo en microcomputadoras por medio de una plataforma computarizada más dinámica, lo que permitió crear una herramienta que se denominó “Sistema Integrado de Análisis del Transporte del Gran Área Metropolitana” (SIATGAM), buscando que no solo se pudiera usar el modelo de demanda de transporte urbano de manera rutinaria, sino que además se le diera el seguimiento necesario y se mantuviera actualizado, aún después de concluido el estudio contratado.



Estudios de Transportes del Área Metropolitana de Chicago (CATS)

Principal implicación: surgimiento a nivel internacional de las metodologías de análisis de demanda de transporte urbano

Encargados del estudio: consultor privado norteamericano (Doug Carroll).

Estudios de Transportes del Área Metropolitana de San José (ETAMSJ)

Principal implicación: por primera vez se aplican las metodologías internacionales de análisis de demanda de transporte urbano en Costa Rica.

Encargado del estudio: empresas consultoras privadas internacionales.

Estudio de Transporte Urbano del Gran Área Metropolitana

Principal implicación: se desarrolla un modelo de demanda de transporte urbano para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, denominado SIATGAM

Encargado del estudio: consultor privado internacional (nacionalidad costarricense).

Migración de SIATGAM a plataforma Emme/2

Principal implicación: se cambia la plataforma tecnológica del SIATGAM de modo que el software base utilizado no es TRANPLAN, sino Emme/2.

Encargado del estudio: empresa consultora privada nacional.

Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM (PRUGAM)

Principal implicación: se redefine el modelo de demanda de transporte urbano de la GAM, ampliando la cobertura y construyendo nuevas funciones a partir de información de campo recabada para ese fin.

Encargado del estudio: empresa consultora privada nacional.

Proyecto Análisis Demanda y Planificación del Transporte-Universidad de Costa Rica (MDT-UCR)

Principal implicación: se migra el modelo de demanda al software adquirido por la Universidad de Costa Rica y se actualizan las bases de datos del modelo.

Encargados del estudio: personal profesional Universidad de Costa Rica (EIC y LanammeUCR).

Figura 1. Evolución cronológica de la modelación de demanda del transporte urbano

Algunos de los estudios posteriormente desarrollados por el Gobierno de Costa Rica, usando el SIATGAM como herramienta principal, fueron: “Plan Maestro del Transporte Urbano en el GAM” (1992), “Estudio de Demanda de Taxis en Costa Rica” (1995), “Reorganización del Transporte Público en el Área Metropolitana de San José” (1999), “Reorganización del Transporte Público en las Áreas Metropolitanas de Cartago y Alajuela” (1999). De estos estudios, resaltan los protocolos técnicos para sectorizar los servicios de transporte público por autobús en las áreas metropolitanas de San José, Alajuela y Cartago, así como la implementación de rutas intersectoriales en

el Área Metropolitana de San José. Entre otras medidas analizadas con el SIATGAM surgieron las recomendaciones de construir intercambios a desnivel en las rotondas de la carretera de Circunvalación (Guadalupe, Bandera, Paso Ancho, San Sebastián y Hatillo), así como en la intersección de La Pozuelo (La Uruca).

El siguiente hito en la historia de la modelación y análisis de la demanda de transporte urbano en Costa Rica ocurrió en 2003 y consistió en la migración de las bases de datos del modelo SIATGAM a una nueva plataforma de modelación: Emme2. Este programa corresponde a un conjunto de sistemas orientados

al análisis de demanda de transporte. La migración del modelo surgió como respuesta a la necesidad de pasar las bases de datos de SIATGAM de un *software* de modelación (TRANPLAN) ya desactualizado en el 2003, a otro más reciente, de mayor capacidad de modelación y con algoritmos más poderosos (Emme2). De igual forma, en 2003 la base de datos original de SIATGAM se encontraba desactualizada, por lo que no solo se actualizó y amplió dicha base de datos, sino que además se incorporaron nuevas variables y algoritmos de análisis, más robustos y eficientes, dentro del proceso de modelación.

En 2007, como parte del desarrollo del “Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica” (PRUGAM, 2007), se realizó el “Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM”. Este estudio incluyó la ampliación y actualización de todas las bases de datos del modelo de demanda de transporte urbano de la GAM montadas en la plataforma Emme2. Adicionalmente, se redefinieron y calibraron todas las ecuaciones de las diferentes fases de la predicción de demanda, lo cual se realizó a partir de información de campo que incluyó una encuesta de hogares especialmente diseñada para el desarrollo del modelo de demanda, así como diferentes muestreos en campo orientados a las diferentes fases del proceso de predicción. Entre las intervenciones de transporte propuestas en el PRUGAM como resultado de los diferentes procesos de modelación de demanda de transporte, se tienen la construcción del Anillo Periférico, la finalización de la nueva radial Desamparados, la ampliación y mejoramiento de la carretera Cartago-Coris-San José, la construcción del tren interurbano de la GAM, etc.. También se verificó y comprobó la urgencia de la sectorización y troncalización de rutas de transporte público por autobús en la GAM, así como la implementación de rutas intersectoriales.

En 2016, ante la necesidad de buscar mecanismos para que la modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica fuera más frecuente, y también se pudiera garantizar soporte y actualización continua de las bases de datos del modelo, así como el mantenimiento de una herramienta adecuadamente calibrada que pudiera ser utilizada por los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, se inició un nuevo proyecto de migración y calibración del modelo de demanda hacia la plataforma TransCAD. Este proyecto, que dio origen al presente artículo, se denominó “Modelo de Demanda de Transporte Urbano en la GAM” (MDT-UCR); fue formalizado como un proyecto de investigación en la Universidad de Costa Rica, y su desarrollo está basado en un convenio entre la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (EIC-UCR) y el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

II. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente artículo consiste en documentar la evolución histórica de la modelación de demanda del transporte urbano en Costa Rica, partiendo de los principios internacionales que dieron origen a las metodologías de análisis en este campo.

III. LOS INICIOS INTERNACIONALES DE LA METODOLOGÍA: ESTUDIO DE TRANSPORTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE CHICAGO (CATS)

Los fundamentos de la metodología de modelación de la demanda de transporte urbano, tal como se conocen en la actualidad, fueron desarrollados alrededor de los años 50 en las ciudades de Detroit y Chicago, Estados Unidos. Doug Carroll, planificador urbano quien había realizado un estudio de transportes previo en la ciudad de Detroit, fue nombrado director del proyecto de demanda de transportes de Chicago. De sus experiencias en Detroit, Carroll concluyó que “debía desarrollarse una metodología diferente a lo que había en el momento para poder lidiar con las dificultades y conflictos que surgieron con la planificación urbana de transporte en las décadas previas y con los problemas asociados a la práctica actual de la planificación de transporte urbano” (Plummer, 2010). Esto porque, hasta el momento, los elementos se estudiaban de manera aislada y, de sus experiencias, Carroll había determinado que los elementos individuales interactuaban entre ellos y debían ser estudiados como un solo sistema integrado de transporte.

3.1 Orígenes

Chicago se encontraba en el periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial (1955-1962) y, como otras ciudades de la época, vivió un crecimiento poblacional producto del fenómeno de los “*baby boomers*”, lo cual tendría su impacto en el área de transportes un par de décadas después. Por otro lado, la infraestructura vial presente hasta el momento no había tenido mayores intervenciones en los últimos 25 años y el uso del automóvil se había extendido a la mayoría de los hogares. Dentro de este contexto, hubo dos motivos principales por los cuales se buscó realizar un estudio de transportes: la construcción de una carretera de peaje que atravesaba los Estados Unidos y la ampliación del servicio de ferrocarril hasta North Michigan Avenue. En su alineamiento original, la ruta estatal de peaje atravesaba por varios kilómetros el área del condado. Esta planificación se realizó sin considerar la red vial de carreteras presente dentro de la ciudad, por lo que se encontraba completamente desintegrada del sistema. De construirse de

esa manera, el gobierno local de la ciudad de Chicago tendría que financiar la construcción de las rutas conectoras, para las cuales no tenía los recursos. Para solucionar el problema se creó una comisión encargada de estudiar la situación, la cual propuso que debía realizarse una encuesta de transportes del área, para desarrollar un plan de acción. Además, se planteó la posibilidad de que el plan incluyera los medios de transporte público disponibles, de manera que se considerara el sistema de transportes completo.

Por otro lado, a la “Greater North Michigan Avenue Association” se le denegó la posibilidad de ampliar el servicio de tren hasta North Michigan Avenue, por lo que se planteó la realización de una encuesta, para así “investigar y reportar formas de mejorar el transporte de personas con viajes diarios de trabajo por medio del sistema ferroviario” (Plummer, 2010), de manera que pudieran justificar la ampliación del servicio.

Se tomó la decisión de hacer el trabajo en conjunto, con la participación del Condado, el Estado, el Gobierno Federal y la asociación de Michigan Avenue, de manera que se realizara una única encuesta de transportes que incluyera todos los aspectos mencionados anteriormente. Además, se estableció

que el proyecto iría mucho más allá de una simple encuesta de origen-destino. El estudio costó entre \$1-\$1,5 millones y les tomó dos años completarlo. Sus objetivos consistieron en “realizar estudios de las facilidades de tránsito, realizar encuestas de transporte e investigación relacionada con el desarrollo de algunas áreas específicas dentro del área metropolitana de Chicago, y la recolección y revisión de información relacionada con todos los factores que influyen la construcción, planificación, reconstrucción, mejoramiento, mantenimiento y operación de todos los tipos de facilidades de transporte” (Plummer, 2010).

Los objetivos del estudio fueron cumplidos a satisfacción, de manera que durante su desarrollo e inclusive hasta por 20 años después de su publicación, profesionales en el área aún lo utilizaban como material referente. También sirvió de base para el desarrollo de estudios en muchas otras ciudades dentro y fuera de los Estados Unidos.

3.2 Aspectos Prácticos

El procedimiento seguido en el estudio del área metropolitana de Chicago se puede resumir esquemáticamente como se muestra en la Figura 2.

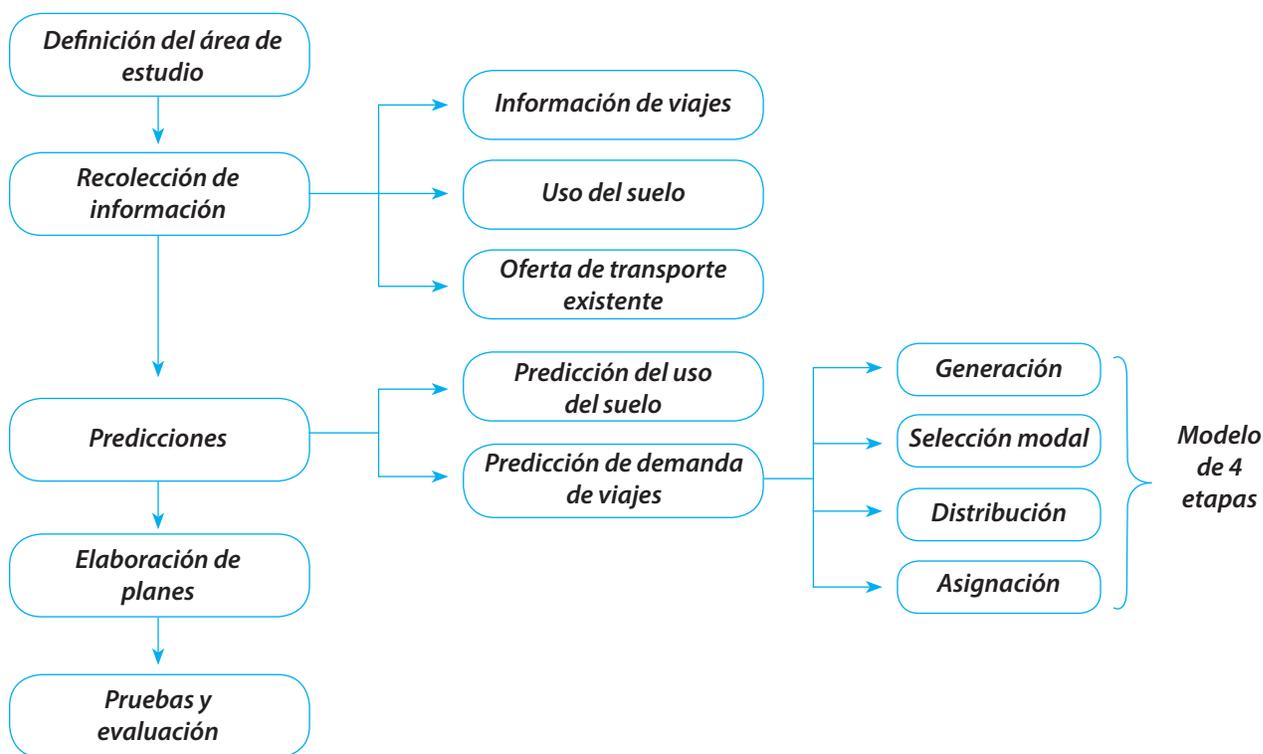


Figura 2. Esquema general del procedimiento aplicado en CATS
(Adaptado de Carol, 1959)

En lo que concierne al presente artículo, el interés principal de este estudio se relaciona con la etapa de predicción de demanda de viajes, la cual requiere como insumo las etapas de definición del área de estudio, recopilación de información y predicción del uso del suelo.

3.3 Definición del Área de Estudio

Como un primer paso de la metodología aplicada, se deben definir los límites del área de estudio. El parámetro utilizado consistió en incluir el área donde se esperaba el mayor crecimiento poblacional durante los siguientes 25 años (Carroll, 1959). Esto es importante para definir tanto el área de alcance de las encuestas, como el alcance de las propuestas de la red de transporte. En términos generales, la mayoría de los viajes eran realizados por los habitantes de la zona, y la mejor manera de cuantificarlos era a través de entrevistas en el hogar. Sin embargo, había viajes que ingresaban o salían del área de estudio, los cuales aportaban a los viajes totales y debían ser considerados en el análisis. Para cuantificar estos viajes, se realizaron encuestas en las rutas principales que atravesaban el perímetro del área definida.

La línea de control atravesaba la región en estudio y en ella se realizaron entrevistas en los vehículos, de manera que se pudieran validar los resultados obtenidos de las encuestas. Además, se definió una segunda área externa como zona de control. Allí se realizaron predicciones particulares para determinar la influencia que sus cambios podrían tener sobre el área de estudio. Según los resultados obtenidos de la validación de viajes a través de las encuestas en la línea de control, se determinó que se podían ampliar las entrevistas en hogares a las áreas cuyos viajes se encontraran subrepresentados por la primera muestra.

En la Figura 3 se ilustra un esquema con el área de estudio y su relación con la recopilación de información básica para la modelación.

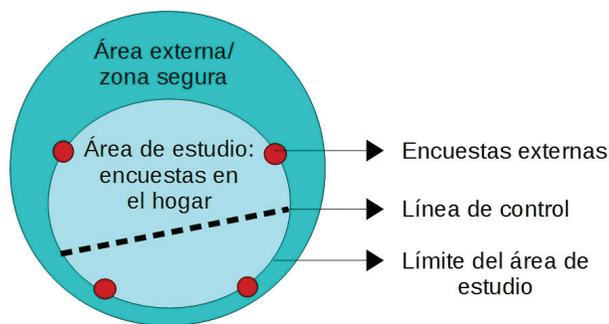


Figura 3. Área de estudio vs. información recopilada
(Adaptado de Carol, 1959)

3.4 Recopilación de Información

Para obtener la información requerida para las predicciones de viajes, se realizaron tres grandes inventarios: uso del suelo, información de viajes y oferta de transporte existente.

- Uso del suelo: levantamiento de las extensiones de los diferentes usos del suelo dentro del área de estudio.
- Información de viajes: encuestas realizadas para obtener todos los viajes de personas y vehículos dentro del área de estudio en un día típico entre semana.
- Oferta de transporte existente: levantamiento de la capacidad y longitud de todas las calles dentro del área de estudio, así como de las rutas de autobús y ferrovías.

3.4.1 Uso del suelo

Se supuso que había una relación directa y cuantificable entre el uso del suelo y la cantidad y distribución de viajes, por lo que se escogió el uso del suelo como un parámetro de predicción. El procedimiento utilizado para determinar el uso del suelo se detalla a continuación:

1. Se dividió el área de estudio en unidades de $0,64 \text{ km}^2$ con una grilla sobre el mapa, con divisiones cada media milla ($0,8 \text{ km}$), tal como se muestra en la Figura 4. En total se definieron 582 zonas. El área de las zonas dependía de la clasificación (central, intermedia o rural). La unidad más pequeña era $0,25$ millas cuadradas o el equivalente de $0,64$ kilómetros cuadrados, y correspondía a la zona central.

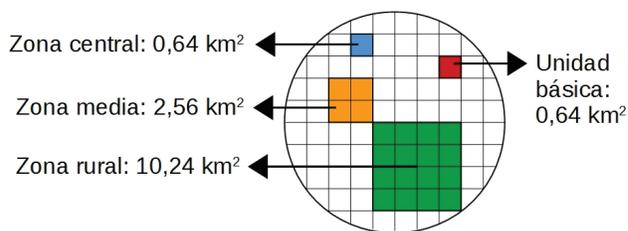


Figura 4. División de zonas dentro del área de estudio
(Adaptado de Carol, 1959)

2. Para cada zona se identificaron los usos del suelo y se midieron las áreas asociadas a cada una. Se identificaron 10 tipos diferentes:
 - Residencial
 - Manufactura
 - Transporte

- Comercial
 - Edificios públicos
 - Calles y callejones
 - Espacio público abierto
 - Parqueos
 - Misceláneos
 - Vacante (clasificados según plan regulador)
 - ✓ Residencial
 - ✓ Comercial
 - ✓ Industrial
3. Se realizó un inventario de espacio de piso para detallar aún más el tipo de uso dentro de edificios.

4. Se sumaron las áreas dentro de cada zona para obtener el resumen de los totales.

3.4.2 Información de viajes

Para determinar la información de viajes, se siguió el procedimiento que se ilustra en la Figura 5.

Los viajes se clasificaron en dos tipos: internos y externos. Los viajes internos son aquellos que no salían del área de estudio, es decir, cuyo origen y destino se encontraban dentro del perímetro definido. Como el proyecto buscaba cuantificar todos los viajes realizados, hacer las encuestas de hogar no era suficiente para obtener toda la información relacionada con los viajes internos. Por lo tanto, se debieron realizar encuestas a los conductores de vehículos de servicio (camiones y taxis).

Las encuestas de hogar buscaban obtener información acerca de los viajes realizados, así como de las características del hogar. En el Cuadro 1 se muestra la información recopilada en las entrevistas en los hogares.

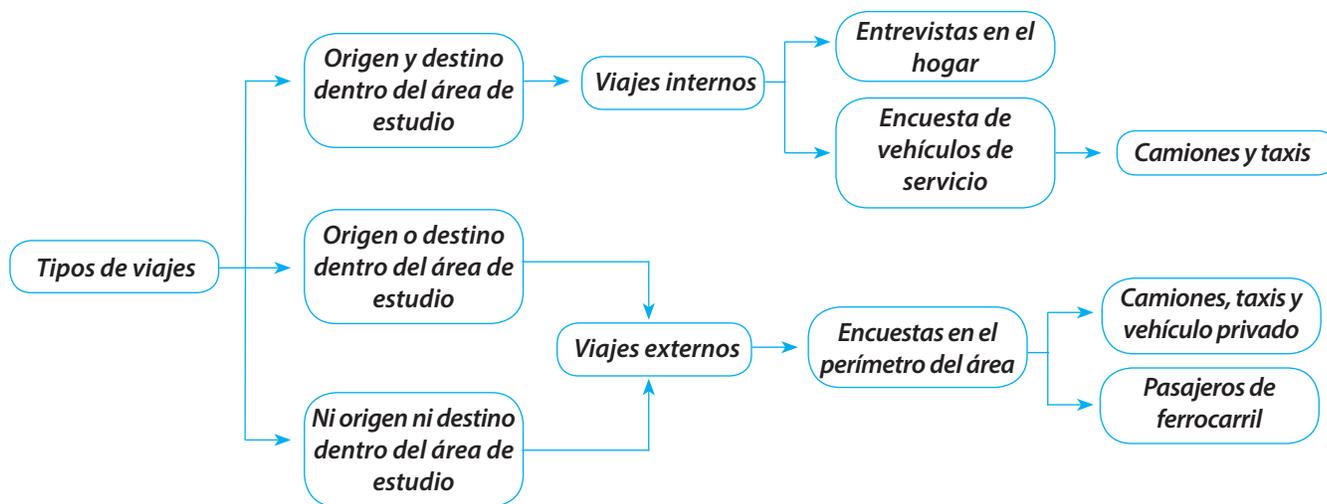


Figura 5. Esquema utilizado para obtener la información de viajes (Adaptado de Carol, 1959)

Cuadro 1. Información solicitada en las encuestas del hogar

Características del hogar	Viajes realizados
Tipo de vivienda	Dirección de origen y destino
Cantidad de personas	Propósito del viaje
Sexo y raza del jefe del hogar	Uso del suelo del origen y destino
Posesión vehicular	Modo usado
Cantidad de conductores	Hora de salida
Cantidad de viajes hechos	Hora de llegada

(Adaptado de Carol, 1959)

En el caso de las entrevistas a conductores de camiones y taxis, se obtuvo información similar a la mostrada en el Cuadro 1.

Para los viajes externos, se consideró que las entrevistas en hogares no resultaría un método efectivo, ya que muchos habitantes de hogares fuera del área de estudio no realizaban viajes al área de estudio y el muestreo sería difícil. Por lo tanto, se decidió realizar encuestas en estaciones externas sobre las rutas que ingresaban al área de estudio a través del perímetro, tal como se mostró en la Figura 3. Para determinar la ubicación de las estaciones externas, se realizaron conteos en todas las rutas que atravesaban el perímetro, de manera que en las estaciones se pudiera muestrear hasta un 95% de los viajes que ingresaban o salían del área (Plummer, 2010). Estas encuestas se realizaron tanto para los conductores de vehículos privados, como para camiones y taxis. Sin embargo, no requerían ser tan detalladas como las de hogar, por lo que la cantidad de información recolectada fue menor. De cada conductor encuestado, se obtuvo la siguiente información:

- Dirección de origen y destino
- Propósito del viaje
- Uso del suelo de origen y destino
- Cantidad de personas en vehículo
- Tipo de vehículo

Finalmente, para tener el panorama completo de los viajes, se realizaron encuestas a los pasajeros del ferrocarril suburbano que pasaba por el área de estudio. La información recopilada fue similar a la de las entrevistas de los conductores.

3.4.3 Oferta de transporte existente

Para determinar la oferta de transporte existente, se dividió el sistema en dos partes: las calles y las rutas de transporte público. Si bien en ambos casos se quería determinar la capacidad de movilizar personas, la metodología utilizada es diferente para cada uno.

En el caso de las calles, estas fueron clasificadas en 4 categorías: locales, colectoras, arteriales y autopistas. Debido a que la función de las calles colectoras era la de brindar acceso a todos los usos del suelo, los volúmenes movilizados por lo general eran bajos y, por lo tanto, se excluyeron del inventario. Las calles colectoras fueron divididas y clasificadas a su vez como locales o arteriales, según sus características. El levantamiento de carreteras se hizo únicamente para las arteriales y autopistas. Se dividieron las calles en secciones, las cuales consistieron en tramos continuos de calle entre intersecciones con otras rutas del sistema considerado en el

inventario. La información recopilada para cada sección de calle, fue la siguiente:

- Ubicación de intersecciones terminales
- Longitud
- Tipo
- Ancho
- Uso del suelo
- Parqueos existentes
- Diseño geométrico
- Volumen estimado

Adicionalmente a la información de cada sección, se hicieron observaciones respecto a la relación entre velocidad, volumen y densidad en carreteras, capacidad de las intersecciones y mediciones de volúmenes en la red. Además, se realizaron estimaciones de las millas-vehículo de viaje en un día típico entre semana, para poder hacer comparaciones con la oferta de carreteras y determinar las zonas donde había superávit y déficit.

Con la información recopilada se tuvo que desarrollar una metodología, de manera que se pudiera obtener un valor de capacidad para las carreteras. Se observaron los factores que podían afectar la capacidad de las calles, tales como presencia de parqueos, paradas de autobús y proporción de giros. Finalmente, se obtuvieron valores globales de capacidad, según el tipo de ruta y su ancho promedio. En el Cuadro 2 se muestran los valores obtenidos.

Cuadro 2. Capacidad de calles, según su tipo y ancho

Calles arteriales por tipo de área	1/2 ancho del pavimento [metros]		
	3,05	6,10	9,15
Zona urbana	480	1080	1800
Zona intermedia	600	1320	2160
Zona rural	660	1440	2160
Autopistas	2100 veh/hr/carril		

(Adaptado de Carol, 1959)

En el caso de las rutas de transporte público, no se podía determinar la capacidad del sistema según el ancho de la vía, sino que debía calcularse según la capacidad del vehículo, por unidad de tren o autobús. Se consideraron las rutas de autobús, así como el tren suburbano y las líneas de tránsito rápido. Las variables recopiladas fueron:

- Longitud de cada sección de ruta
- Frecuencias en hora pico
- Cantidad en vehículos y asientos en hora pico
- Velocidad de operación
- Cantidad de vehículos programados por ruta durante el día

Para medir la capacidad, se utilizó la unidad de millas-asiento recorridas, es decir, si un tren tenía capacidad de transportar 200 personas y recorría 10 millas, su capacidad era de 2000 millas-asiento.

3.4.4 Aspectos conceptuales

La información presentada a continuación con respecto a las predicciones realizadas en el estudio de Chicago fueron tomadas del segundo volumen del estudio “Chicago Area Transportation Study: Data Projections” (Carroll, 1960).

Predicción del uso del suelo Las predicciones del uso del suelo, 25 años en el futuro, se basaron en el inventario del uso del suelo levantado. Adicionalmente, se estudiaron los planes reguladores de la región, así como las áreas reservadas para usos de suelo particulares y las diferentes propuestas para volver a desarrollar las zonas construidas. Además, se tomaron en cuenta estimaciones de crecimiento poblacional, así como de indicadores económicos.

Las áreas de suelo fueron divididas en dos grandes categorías: vacante y utilizada. El uso de suelo vacante, pero inservible para ser desarrollado, se mantuvo en el futuro sin intervenciones. Con base en observaciones de cambios del uso del suelo en el pasado, se determinó que era poco probable que se llevaran a cabo grandes cambios en la densidad y tipo de uso del suelo que ya se encontraba desarrollado. Por lo tanto, el suelo vacante, pero con potencial para ser desarrollado, fue el utilizado para las predicciones del uso del suelo.

Para realizar las proyecciones de uso del suelo futuro, se debió determinar el requerimiento de áreas para los diferentes usos de suelo, con base en las estimaciones de población y crecimiento económico para el año horizonte. Las áreas netas se determinaron restándole al total de área requerida el área ocupada por cada uso del suelo. El área neta requerida se distribuyó entre las áreas vacantes identificadas previamente.

Adicionalmente, se consideraron tres principios fundamentales, basados en observaciones, en los cambios en el uso del suelo ocurridos en el pasado, los cuales debían mantenerse a través de las estimaciones del uso del suelo realizadas:

- La intensidad del uso del suelo disminuye conforme se aleja del centro de la ciudad.
- La cantidad de suelo en uso disminuye proporcionalmente con respecto al área disponible.
- La proporción de la cantidad de suelo dedicada a cada uso se mantiene estable.

Los usos de suelo proyectados se clasificaron en las siguientes categorías de uso y se asignaron en ese orden:

- Espacio públicos
- Industria
- Área para transporte
- Calles y callejones
- Residencial
- Otros

Las áreas asociadas a los diferentes usos fueron determinadas con base en las necesidades particulares requeridas de cada uno. Se buscó suplir los déficits determinados en el inventario para algunos de los usos, y distribuir los diferentes usos de manera que no interfirieran con sus respectivos desarrollos y que tuvieran buen acceso a los diferentes medios de transporte.

Para una explicación más detallada del procedimiento utilizado para asignar los diferentes usos del suelo, se recomienda consultar el Capítulo 3 del segundo volumen (Proyección de datos) del Estudio de transporte del área de Chicago (Carroll, 1960).

3.5 Generación de Viajes

La primera etapa del modelo de 4 etapas para estimar la demanda de viajes es la generación. La generación de viajes típicamente se divide en dos componentes: producción y atracción de viajes. Para efectos del estudio de Chicago, la estimación de ambos componentes se realizó en tres partes: viajes internos, viajes externos y viajes realizados por vehículos pesados.

Para determinar la producción de viajes en el área de Chicago, se realizaron dos procedimientos independientes: la estimación con base en el uso del suelo y la estimación con base en variables de población. Ambos procedimientos dieron resultados diferentes y las estimaciones con base en las variables de población fueron escogidas para determinar la producción de viajes. Al estar basadas en población, las producciones reflejaban directamente las necesidades de viajar para satisfacer las necesidades básicas humanas, lo cual no es el caso de las variables de uso del suelo.

Sin embargo, una razón más práctica para escoger este método, fue que permitía modificar las tasas de generación para reflejar los cambios en las características socioeconómicas de las familias en el futuro.

Las variables utilizadas para la producción de viajes fueron la posesión vehicular y área residencial neta. La ecuación de producciones generada es la siguiente:

$$p_i = 682,84 + 3,8109 x_{1i} - 0,1939 \log(x_{2i}) \quad (1)$$

donde:

p_i : viajes por hogar producidos en zona i

x_{1i} : carros cada 100 hogares de la zona i

x_{2i} : hogares cada 10 hectáreas de la zona i

Para determinar las proyecciones de posesión vehicular, se determinaron dos tasas de crecimiento, una para el centro de Chicago y otra para las áreas suburbanas. Estas tasas fueron aplicadas a cada una de las zonas del área de estudio, según su ubicación, para obtener la posesión vehicular estimada por zona en el año horizonte. La densidad residencial neta se calculó con base en las proyecciones de uso del suelo.

De la ecuación 1 se obtuvieron las proyecciones de viajes por hogar por zona; sin embargo, estos viajes eran valores totales y no se encontraban clasificados por propósito. La metodología utilizada en Chicago, a diferencia de la actual, no clasificó los viajes por propósito, sino por uso del suelo. En la Figura 6 se muestran los porcentajes de distribución de viajes por uso de suelo, para diferentes cantidades de viajes por hogar.

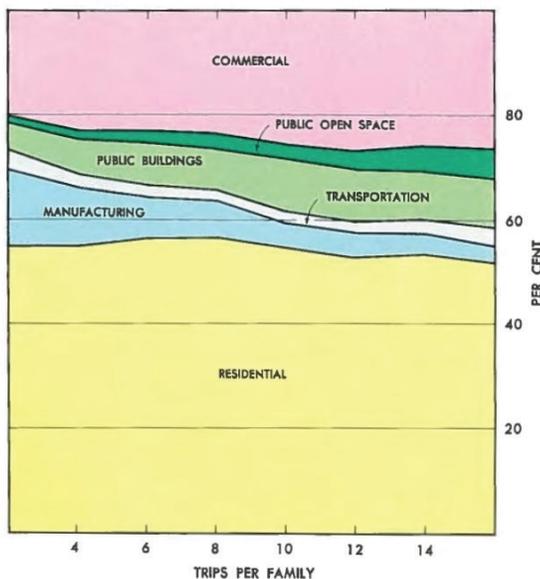


Figura 6. Proporción de tipo de uso del suelo, según cantidad de viajes (Carrol, 1960)

Con base en esta información se podía asociar un uso de suelo a cada uno de los viajes realizados en el área de estudio, lo que en términos actuales equivaldría a asignarle un propósito.

Seguidamente, se debían definir las tasas de atracción. Como resultado de las encuestas de hogares y el levantamiento del uso del suelo, se definieron tasas de atracción por uso del suelo, para el año base (por ejemplo 100 viajes/Ha residencial neta). Sin embargo, estas tasas no se mantenían constantes en el tiempo, debido a que la población y el uso del suelo crecían en proporciones diferentes. Para determinar las nuevas tasas de atracción, se evaluaron los 6 posibles usos de suelo mostrados en la Figura 6 de manera independiente. Sin embargo, en todos los casos se partió de las tasas determinadas para el año base.

El ejemplo más claro es el de espacio público. La población crecía en mayor proporción que las áreas destinadas para el espacio público, sin embargo, la distribución de viajes por uso se mantuvo constante, tal como se muestra en la Figura 6. Por lo tanto, había una mayor cantidad de gente con necesidad de usar este tipo de suelo, pero el área disponible era menor. Las tasas de atracción de este uso debieron ser modificadas, ya que las áreas serían utilizadas con mayor incidencia en el futuro. Al estimar el crecimiento de la población y conociendo el porcentaje de las áreas de espacio público dentro de cada zona, se pudieron recalcular las tasas de atracción, suponiendo que el total de viajes era un número conocido e invariable. Un procedimiento similar se realizó para calcular las tasas de atracción de los diferentes usos del suelo.

La estimación de los viajes externos se dividió en dos partes: los viajes generados en el área externa y los viajes generados más allá del límite externo. Se estimó que el aumento de estos viajes era directamente proporcional al crecimiento en la población, por lo que se proyectaron con base en las tasas de crecimiento poblacional. Los viajes de las zonas externas fueron determinados con base en tasas de crecimiento para cada zona, mientras que los viajes fuera del área externa fueron estimados con base en tasas de crecimiento de población generadas a nivel nacional. Además, estos viajes fueron ubicados en 10 puntos de entrada, por fuera del límite externo.

Finalmente, los viajes en vehículos pesados fueron estimados con base en las tasas de producción de viajes. Se estimaron, en el año base, tasas de viajes de vehículos pesados por cada 100 viajes de personas y se supuso que estas tasas de mantendrían constantes en el tiempo. Es decir, al calcular el aumento en los viajes de personas en el año horizonte, se pudieron estimar también los viajes de camiones. En las únicas áreas donde se aumentaron las tasas de generación fue en las de uso industrial, donde se esperaba mayor generación de viajes.

Las tasas de atracción de los viajes externos, así como los viajes de vehículos de carga, fueron determinadas con base en las tasas de atracción calculadas para los viajes internos, según el uso del suelo.

3.6 Selección Modal

Una vez determinada la distribución de viajes, según el uso del suelo para cada zona, se procedió a estimar los modos en los que se realizarían los viajes. Estos modos fueron divididos en dos grandes categorías: transporte público y vehículo privado. Los viajes realizados en transporte masivo se subdividieron a su vez en los viajes conectados al área central (con origen o destino, pero no ambos, en el área central) y los restantes, denominados locales. Los viajes de ambas categorías tenían características diferentes entre sí, por lo que se prefirió considerarlos de manera independiente. Las proyecciones de viajes centrales serían suplidas por los modos con vía exclusiva (ferrovías), mientras que los viajes locales serían suplidos por los modos sobre la calle (autobuses).

La cantidad de viajes en transporte masivo que se llevarían a cabo en el área central, estaría principalmente determinada por el desarrollo que tendría el área en el futuro. Sin embargo, el área central se encontraba bastante desarrollada para el momento del estudio, y si bien se preveían crecimientos de ciertas partes, estos no representaban más de un 10% de aumento. Además, por el

tipo de usuarios del área, se supuso que la cantidad de viajes en transporte público se iban a mantener constantes. En vista de que la población crecería, se tendría como resultado una disminución en las tasas de viajes en transporte público. Se realizaron estimaciones de orígenes por zona que consideraban lo siguiente:

- La cantidad de orígenes debía ser igual a la cantidad de destinos con uso de suelo asociado a transporte (porque eran viajes totales en un día).
- Las tasas de viajes por cada 100 habitantes disminuían proporcionalmente, de manera que no había cambios relativos entre las zonas.

Las zonas se clasificaron según su distancia respecto al área central, por lo que las tasas de viajes centrales realizados en transporte público se resumieron como se muestra en la Figura 7.

En el caso de los viajes locales en transporte público, su modo principal de viaje era el autobús. Se determinó una tendencia histórica, la cual dictó que conforme aumentaba la posesión vehicular por hogar, disminuían los viajes en autobús, tal como se muestra en la Figura 8.

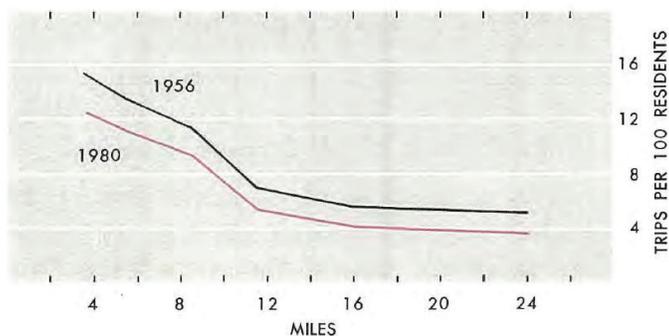


Figura 7. Viajes en transporte público al área central generados por zona, según su distancia al área central (Carrol, 1960)

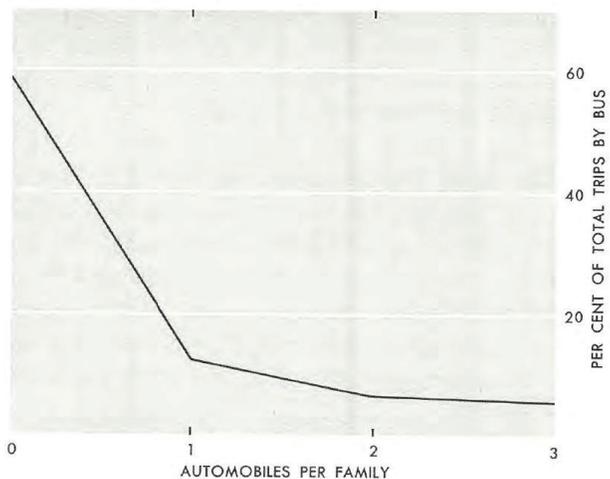


Figura 8. Porcentaje de viajes en autobús realizados por familia, según posesión vehicular (Carrol, 1960)

Con base en las proyecciones de posesión vehicular para el año horizonte y las producciones de viajes estimadas por zona, se pudieron determinar los viajes locales esperados en transporte público.

Para determinar los viajes en modos privados de transporte, se tomó el total de viajes realizados en medios de transporte masivo y se restó al total de viajes de personas proyectados. Al dividir este valor entre la ocupación media, se obtuvo el total de viajes de vehículos privados. Sin embargo, se desconocía el valor de ocupación media del año horizonte, no se esperaba que se mantuviera constante en el tiempo y era difícil de predecir. Además, se requirió desagregar los viajes en las diferentes zonas. Para ello, se calcularon los viajes totales realizados por zona con base en la posesión vehicular esperada por cada zona, y los resultados fueron ajustados para tomar en consideración cambios en el uso del suelo y la densidad de población. Se calculó la ocupación vehicular proyectada y se estimó que en promedio esta iba a disminuir de 1,56 en el año base a 1,53 en el año horizonte.

La ocupación media futura se consideró menor a la ocupación media durante la realización del estudio, lo cual era consistente con el crecimiento económico esperado.

3.7 Distribución de viajes

Como resultado de los pasos anteriores, se conocía la cantidad de viajes realizados en los diferentes modos de transporte. Sin embargo, se desconocía cómo se distribuirían dentro de los diferentes orígenes y destinos. Se consideró que la mejor manera de evaluar la distribución sería pasando de viajes totales a millas-viaje, ya que estas representaban de mejor manera la demanda de viajes. Los viajes en vehículo privado se consideraron en millas-vehículo, mientras que los viajes en transporte público se consideraron en millas-persona. Para ello, se estudiaron los cambios en orígenes y destinos de viajes, y se analizó si los viajes realizados en el futuro mantendrían su longitud promedio.

Las millas-vehículo se pudieron evaluar con base en los cambios en el uso del suelo y el crecimiento poblacional. Se esperaba que la longitud promedio de viaje de las zonas más cercanas al centro de la ciudad aumentara, mientras que la de las zonas más alejadas disminuyera. Esto porque conforme la ciudad se dispersaba más lejos del centro, los viajes al centro se volvían más largos, pero, a la vez, conforme se densificaban los asentamientos de población de las afueras, cambiaban los patrones de uso y se creaban negocios para satisfacer las necesidades de la población, de manera que el propósito de algunos viajes se podía satisfacer recorriendo una distancia más corta.

De igual manera, los viajes en millas-personas (en transporte masivo), debían ser evaluados con base en la longitud de los viajes. Al igual que en el análisis para vehículo privado, se esperaba que los viajes centrales aumentaran considerablemente, debido a la dispersión de personas del centro de la ciudad. Los viajes locales, por otro lado, aumentarían, pero en una proporción mucho menor.

Una vez determinadas las millas-personas y millas-vehículo se debía identificar cómo se distribuían en la red de transporte.

3.7.1 Vehículo privado

La mayoría de los viajes en vehículo privado eran cortos y, conforme aumentaba la longitud del viaje, disminuía su frecuencia. Esto podía ser explicado por la fricción, la cual causaba que se debiera incurrir en un costo para desplazarse de un lugar a otro. Para distribuir los viajes entre los orígenes y destinos, se desarrolló la metodología que se explica a continuación. Esta metodología se basó en que, si bien los usuarios buscaban la ruta más corta, el viaje debía satisfacer un propósito particular y, cuanto menos común fuera ese propósito, la necesidad de viajar más lejos era mayor.

La probabilidad de que un viaje originado en la zona i tuviera como destino la zona j , se describió mediante la siguiente ecuación:

$$V_{ij} = \sum_{l=1}^n \Delta V_{il} [(1-l)^V - (1-l)^{V+V_j}] \quad (2)$$

El valor l se refiere a la probabilidad de escoger un destino cualquiera, según el propósito del viaje (cuanto más común era el propósito, mayor era la probabilidad de escoger un destino cercano como punto de parada). El término $(1-l)^V - (1-l)^{V+V_j}$ se refiere a la probabilidad de parar en la zona j , después de haber pasado por todas las zonas más cercanas al origen V . ΔV_{il} se refiere a la proporción de viajes generados en la zona i con propósito j . Por lo tanto, la ecuación describía la sumatoria de todos los viajes originados en la zona i para cada propósito con probabilidad de detenerse en la zona j . Una explicación más detallada de los términos de la ecuación se puede estudiar en CATS Vol 2 (p.81-82).

Después de determinada la ecuación, se debían resolver dos problemas: cómo determinar el valor l y en qué orden se debían ir descartando las zonas de destino v . Se evaluaron tres medidas diferentes con base en las cuales se podría determinar la escogencia de destinos: distancia, tiempo y costos de viaje. Si bien

los costos de viaje son los que mejor describirían la escogencia de destinos, su determinación con base en la información del momento era complicada, por lo que se optó por usar el tiempo como la medida de cercanía.

Para ello, con ayuda de la computadora, se hicieron corridas para estimar la ruta más corta entre todas las zonas, en términos de tiempo. De esta manera, se determinaba el orden en el que se debían ir evaluando las zonas para la distribución de viajes. Seguidamente, se debía determinar un valor de l . Se evaluó la posibilidad de asignar un valor fijo de l , pero los resultados no se acercaban a los valores obtenidos en las encuestas de viajes. Por lo tanto, se estableció un método alternativo para su determinación. El método consistió en dividir los viajes de cada zona en dos categorías: los viajes con un valor alto de l (viajes locales) y aquellos con un valor bajo de l (viajes especializados). Los viajes con un valor bajo de l fueron restringidos, de manera tal que aquellos con origen residencial tuvieran destinos no residencial y viceversa.

Ambos valores de l fueron determinados empíricamente para reflejar de mejor manera los tipos de viajes. El de l para viajes locales fue calibrado para describir la cantidad de viajes que no salían de su zona de origen, mientras que el valor de l para viajes especializados fue calibrado para describir el resto de viajes. Con base en esta calibración, se reescribió la ecuación de la siguiente forma:

$$V_{ij} = \sum_s \Delta V_{is} [e^{-l_s V_s} - e^{-l_s (V_s + V_{js})}] \quad (3)$$

donde s representa cada uno de los dos subgrupos. Se hicieron estimaciones para varias zonas con características diferentes entre sí y se compararon con los valores obtenidos de la encuesta de hogares. Los resultados dieron muy similares, por lo que se consideró que los valores de l estimados eran válidos. Sin embargo, estos mismos valores no podían ser utilizados para la distribución de viajes del año horizonte, sino que debían ser modificados según los cambios en los patrones de viaje. Para ello, se supuso que la proporción de viajes cortos (con origen y destino dentro de la misma zona) se mantenía para el año horizonte. Es decir,

$$l_{s \text{ año base}} * V_{is \text{ año base}} = l_{s \text{ año horizonte}} * V_{is \text{ año horizonte}}$$

En términos generales, se estimó un 15% de crecimiento en los viajes locales de cada zona, por lo que el valor de l de viajes locales se redujo en un 15%.

Por otro lado, para modificar el valor de l de los viajes especializados se calcularon las millas totales de viaje del año base y se determinó un valor de l que diera como resultado la mejor aproximación a las millas-viaje estimadas en el año horizonte.

Con base en los valores de l modificados y la ecuación 3, se obtuvo la distribución de viajes en vehículo privado para el año horizonte.

3.7.2 Transporte público

Al igual como se dividieron los viajes en transporte público en locales y centrales, se usó la misma clasificación para determinar la distribución de viajes en la red.

Los viajes centrales eran aquellos cuyo origen o destino (pero no ambos) se encontraba en la zona central. Se sabía que cada viaje de una zona periférica a la zona central tenía su recíproco en algún momento del día, de la zona central a la zona periférica. Por lo tanto, con identificar cuantos de los viajes originados en cada una de las zonas periféricas tenían su destino en cada una de las 20 zonas centrales, se podían contabilizar todos los viajes centrales. Se supuso que los viajes cuyos orígenes se encontraban en la zona periférica, se distribuían entre los destinos de manera proporcional a las áreas con uso de transporte de cada destino.

Los viajes locales no podían ser determinados de la misma manera. Se sabía que estos viajes eran en su mayoría cortos y podían ser descritos de forma similar a los viajes en vehículo privado. Por lo tanto, se procedió a utilizar la misma metodología. Se establecieron valores empíricos de l para cada zona, calculando la cantidad de destinos que se encontraban dentro de un radio igual a la longitud media típica de viaje.

Se hicieron predicciones y se compararon con los viajes obtenidos de las encuestas de hogares. Los valores dieron muy similares, con lo que se validaron los métodos utilizados. Finalmente, se ajustaron los métodos para distribuir los viajes en el año horizonte. Los viajes centrales se estimaron de la misma manera, pero con los destinos de uso previstos en el año horizonte. Por otro lado, los valores de l de los viajes locales se ajustaron manteniendo fija la longitud promedio del viaje.

3.8 Asignación

La asignación de viajes se hizo con ayuda de una computadora. Conociendo la distribución de viajes, así como su modo de transporte, se procedió a determinar la ruta más corta entre cada par de zonas.

Se utilizó el método de asignación conocido actualmente como “todo o nada”, el cual no considera restricciones por capacidad. El método consistió en encontrar la ruta más rápida entre cada par de zonas, sobre la cual se asignaban todos los viajes estimados entre dichas zonas. La ruta más rápida para viajes en vehículo privado se estimó en términos de tiempo, con base en la longitud y velocidad de los enlaces, mientras que la ruta más rápida en transporte público se determinó considerando el modo de transporte más rápido, frecuencias y tiempo en ruta.

Si bien el método de asignación tenía sus limitaciones, se pudieron comparar los volúmenes obtenidos a través de la asignación con las capacidades conocidas de las rutas (tanto carreteras como rutas de transporte público), para determinar las rutas que serían utilizadas por los viajeros si la congestión no fuera un factor determinante, e identificar las áreas donde debían realizarse intervenciones o ampliaciones de servicios.

IV. INICIO DE LA APLICACIÓN EN COSTA RICA DE LA METODOLOGÍA: ESTUDIO DE TRANSPORTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN JOSÉ ETAMSJ

Entre 1973-1976 se desarrolló el primer estudio de modelación de demanda del transporte urbano en Costa Rica, específicamente del Área Metropolitana de San José. Fue elaborado por la empresa estadounidense Alan M. Voorhees and Associates, Incorporated (AMV) y la compañía PADCO Inc. Contó como contraparte local a representantes del Ministerio de Obras Públicas y Transportes

(MOPT), el Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU), la Oficina de Planificación Nacional (OFIPLAN) y el Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM). La consultoría fue financiada mediante una donación del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

4.1 Aspectos Generales del Estudio

4.1.1 Área de Estudio

El área de estudio abarcó los 165,30 km² correspondientes al Área Metropolitana de San José (AMSJ) de la época y se extendió 398,26 km² por fuera de los límites definidos para el Área Metropolitana, ya que se estimaba que el crecimiento poblacional urbano previsto durante el período de planificación se extendería más allá de los límites del Área Metropolitana y debía ser incluido en los análisis. El área de estudio total correspondió a 563,6 km². Dentro de ella, se identificaron ocho grandes sectores, según se detalla en el Cuadro 3.

El sector denominado “Central” coincidía con los cuatro distritos centrales del cantón de San José, mientras que los sectores restantes correspondían a las zonas donde se ubicaban las principales carreteras de los distintos corredores. Los sectores fueron segmentados en un total de 145 zonas.

El Área Metropolitana de San José consistía de 38,1 km² de área desarrollada y 127,2 km² de área sin desarrollar. El uso de suelo detallado se desglosa en el Cuadro 4.

Cuadro 3. Segmentación de áreas de estudio consideradas en el ETAMSJ

Sector Número-Eje	Principales centros urbanos del sector	Área (km ²)
Centro	Cuatro distritos centrales de San José	9,40
1 Norte	Cinco Esquinas, San Juan de Tibás, Santo Domingo de Heredia, Heredia	85,39
2 Nordeste	Guadalupe, San Vicente de Moravia, San Isidro	33,24
3 Este	San Pedro de Montes de Oca, Zapote, Curridabat, Tres Ríos	77,58
4 Sureste	San Francisco de Dos Ríos, Desamparados	96,43
5 Sur	Hatillo, San Sebastián, Alajuelita, Paso Ancho	30,07
6 Oeste	Escazú, Santa Ana, Pavas	103,15
7 Noroeste	Alajuela, San Antonio de Belén, San Rafael de Cinco Esquinas, Uruca	128,33
Total (km ²)		563,59

(Adaptado de Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

Cuadro 4. Áreas según uso de suelo del Área Metropolitana para 1973

Uso de suelo	Área (km ²)	Área desarrollada (%)	Área metropolitana (%)
Vivienda	24,0	63,0%	14,5%
Servicios particulares	4,8	12,0%	2,9%
Industria	3,1	8,0%	1,8%
Servicios del gobierno	4,2	11,0%	2,6%
Áreas verdes	2,1	5,0%	1,3%
Área desarrollada	38,1	100,0%	23,0%
Área sin desarrollar	127,2	0,0%	77,0%
Área total	165,3	-	100,0%

(Adaptado de Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

En el caso de la parte externa al Área Metropolitana, se segmentó de forma global en una zona semiurbana de 69,4 km², 300,76 km² para uso en agricultura y ganadería y 28,1 km² de uso denominado “montaña”. La distribución detallada se presenta en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Áreas según uso de suelo fuera del Área Metropolitana para 1973

Uso de Suelo	Área (km ²)	Área Total (%)
Semi-Urbana	69,4	17%
Café	156,1	39%
Azúcar	12,0	3%
Agricultura	27,8	7%
Potrerros	104,9	26%
Montaña	28,1	7%
Área Total	398,26	100%

(Adaptado de Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

4.1.2 Datos Socioeconómicos

Las características socioeconómicas se obtuvieron a partir de recopilación bibliográfica y un muestreo del censo de población del año 1973. El muestreo consideró 17.000 boletas censales, equivalentes a 14,2% del total de familias residentes en el área de estudio. El resumen de las características socioeconómicas para 1973 se presenta en los Cuadros 6 y 7.

Cuadro 6. Características socioeconómicas en 1973

Características	Valor
Población total (personas)	656.670
Tamaño familiar (personas)	5,49
Ingreso familiar mensual (colones)	1.537
Vehículos en circulación (unidad)	36.810

(Adaptado de Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

Cuadro 7. Distribución de actividades en 1973

Empleos por sector	Cantidad de trabajadores	Nivel educativo	Cantidad de estudiantes
Industrias y construcción	48.716	Primaria	128.724
Comercio	49.678	Secundaria	54.474
Servicios	76.948	Universidad	20.442
Otros (agricultura, minería, etc.)	12.795	Otros	8.379
Total	188.137	Total	212.019

4.1.3 Patrón de Viajes

Los datos del censo de población indicaron que, en un día típico entre semana, se realizaban 745.822 viajes en distintos modos, o 777.000 incluyendo peatones. La distribución modal, excluyendo los viajes a pie, era de 74% en autobús, 23% en automóvil y 3% en otros vehículos. Más de la tercera parte de los viajes en vehículo automotor se realizaron entre el hogar y trabajo, y casi una cuarta parte tuvieron relación con actividades escolares; el 40% restante de los viajes se segmentó en otros motivos como compras, actividades sociales y misceláneas.

4.1.4 Transporte Público

En 1970 existían más de 200 empresas que brindaban servicio de transporte público por autobús en el Área Metropolitana de San José, con una flota de 458 autobuses y alrededor de 920 taxis.

Los viajes en un día típico correspondían a más del 70% en autobús para todos los pares origen-destino, y 76% para los viajes cuyo origen o destino correspondía al área central comercial de San José.

4.1.5 Periodo de estudio

El periodo de análisis considerado en el ETAMSJ fue del año 1976 hasta el año horizonte 1990.

4.2 Aspectos Conceptuales de la Modelación de Demanda

El análisis de demanda de transporte urbano se basó en un modelo de cuatro etapas, como se ilustra en la Figura 9.

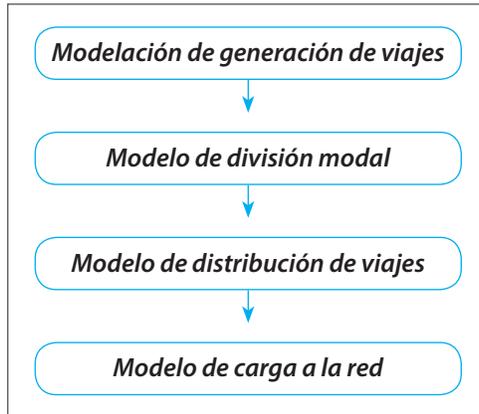


Figura 9. Cadena del modelo operacional ETAMSJ (Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

4.2.1 Modelación de Generación de Viajes

Producciones de Viajes

Para la producción de viajes se determinaron las correlaciones entre los viajes producidos por familia, según propósito (para periodo pico 6:00-8:00 a.m.), el ingreso familiar mensual en colones y la cantidad de personas en la vivienda que realizaban la actividad o motivo de viaje. Las variables seleccionadas fueron aquellas que presentaban una mejor correlación con las variables dependientes, las cuales además concordaban con las variables determinadas como significativas en otros estudios efectuados sobre generación de viajes. Se utilizaron las siguientes variables de producción: población, tamaño de la familia, ingreso familiar, número de estudiantes, número de trabajadores y número de automóviles particulares.

En las Figuras 10 a 12 se presentan los gráficos de producción de viajes con propósito de trabajo, estudio y otros, y la ecuación 4 muestra la regresión lineal determinada para la producción de viajes en vehículos de carga.

VIAJES AL TRABAJO POR FAMILIA VS. INGRESO FAMILIAR PERIODO PICO 6A.M.-8A.M.

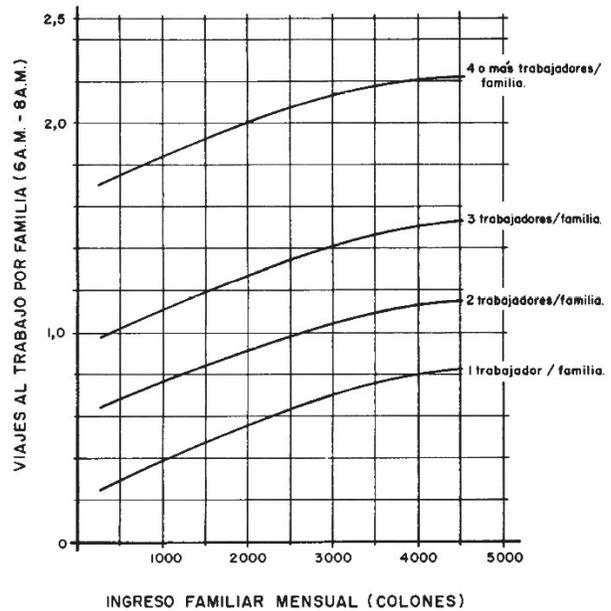


Figura 10. Relación de viajes al trabajo, por familia, contra ingreso familiar mensual (Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

VIAJES A LA ESCUELA POR FAMILIA VS. INGRESO FAMILIAR PERIODO PICO 6A.M.-8A.M.

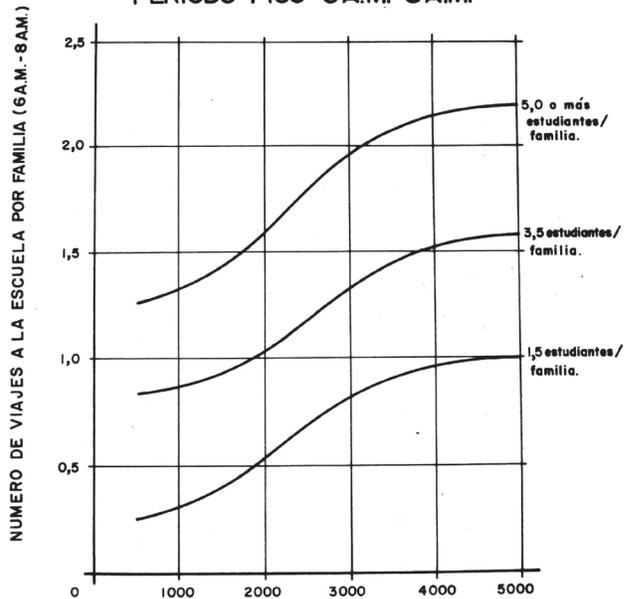


Figura 11. Relación de viajes a la escuela, por familia, contra ingreso familiar mensual (Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

TOTAL DE OTROS VIAJES POR FAMILIA VS. INGRESO PERIODO PICO 6 A.M. - 8 A.M.

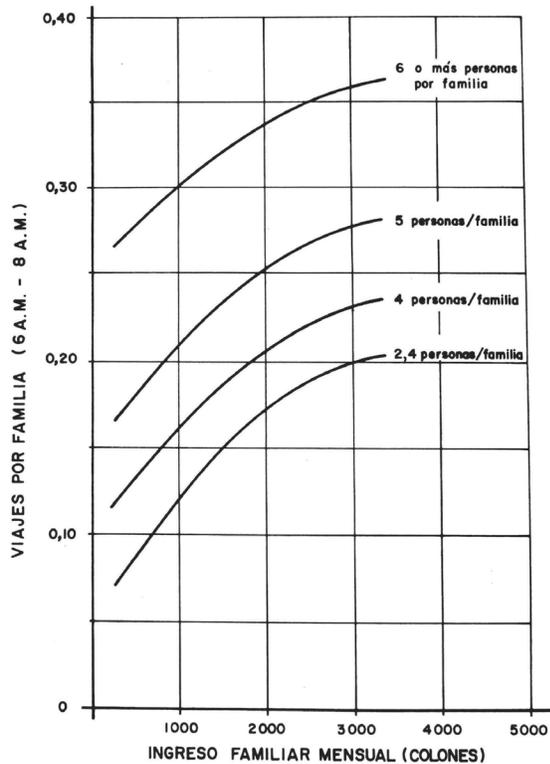


Figura 12. Relación de viajes por otros motivos, por familia, contra ingreso familiar mensual (Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

$$p_{vc} = 127,2 + 0,25 E \quad (4)$$

donde:

p_{vc} : viajes producidos en vehículos de carga

E : empleos en industria y construcción

Atracciones de Viajes

Las variables de atracción consideradas fueron: total de empleos, empleos en servicios, empleos en industria y construcción, empleos en comercio, empleos en agricultura, minería y otras actividades y estudiantes inscritos. Dentro de este componente se incluye la atracción de viajes al trabajo, a la escuela dentro y fuera del área central, otros viajes y viajes en vehículos de carga.

Las ecuaciones utilizadas se reproducen a continuación:

donde:

$$a_t = 20,38 + 0,341 E_{IC} + C + 0,137 S \quad (5)$$

$$a_{EAC} = 0,518 M \quad (6)$$

$$a_{EO} = 0,228 M \quad (7)$$

$$a_o = 67,6 - 0,108 E_{IC} + 0,447 C + 0,059 S \quad (8)$$

$$a_{vc} = 127,2 - 0,25 E_{IC} + 0,46 C \quad (9)$$

donde:

a_t : atracción de viajes al trabajo

a_{EAC} : atracción de viajes a la escuela (en el Área Central)

a_{EFAC} : atracción de viajes a la escuela (fuera del Área Central)

a_o : atracción de viajes con otros propósitos

a_{vc} : atracción de viajes en vehículo de carga

E_{IC} : empleos en industria y construcción

C : empleos en comercio

S : empleos en servicio

M : matrícula escolar

4.2.2 Modelo de División Modal

Al igual que en la etapa de generación de viajes, se determinaron las correlaciones que permitían estimar la producción de viajes en automóvil, según los distintos motivos de viaje por familia. Estos gráficos se presentan en las Figuras 13 a 15 para el periodo pico 6:00 a.m. - 8:00 a.m.

PRODUCCIONES DE VIAJES EN AUTOMOVIL AL TRABAJO POR FAMILIA VS. INGRESO Y PROPIEDAD DE AUTOMOVILES PERIODO PICO 6 A.M. - 8 A.M.

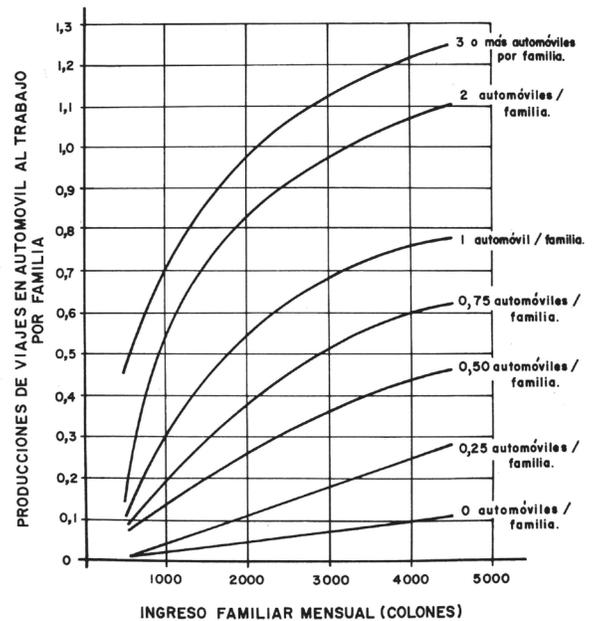


Figura 13. Relación de viajes al trabajo en automóvil, por familia, contra ingreso familiar mensual

(Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

**PORCENTAJE DE PRODUCCIONES DE VIAJES
A LA ESCUELA EN AUTOMOVIL
PERIODO PICO 6 A.M. - 8 A.M.**

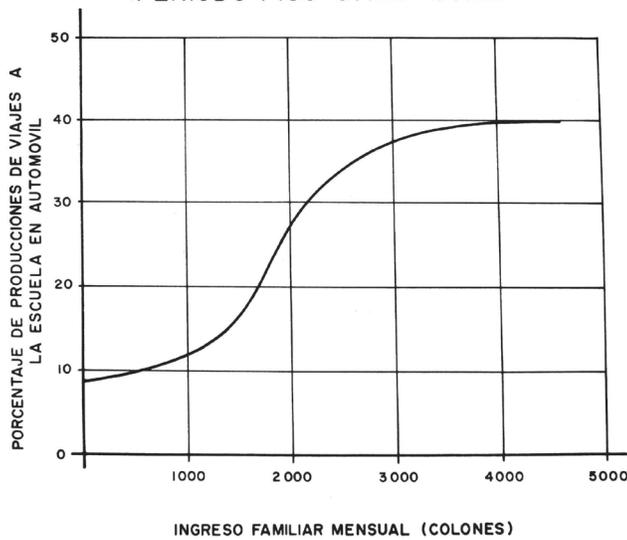


Figura 14. Relación de viajes a la escuela en automóvil, por familia, contra ingreso familiar mensual

(Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

**PORCENTAJE DE PRODUCCIONES DE
"OTROS" VIAJES EN AUTOMOVIL
VS. INGRESO
PERIODO PICO 6 A.M. - 8 A.M.**

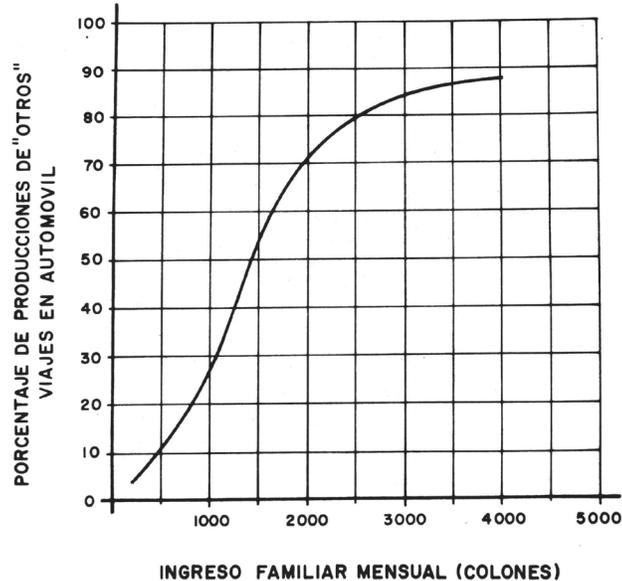


Figura 15. Relación de viajes con otros propósitos en automóvil, por familia, contra ingreso familiar mensual

(Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

Adicionalmente, se desarrollaron ecuaciones para la atracción de viajes de personas en automóvil incluyendo la división modal, segmentadas por viajes de personas al trabajo, escuela dentro y fuera del área central y otros viajes, las cuales se muestran a continuación.

$$V_t = 0,89 E \quad (10)$$

$$V_{EAC} = 0,037 M \quad (11)$$

$$V_{EFAC} = 0,164 M \quad (12)$$

$$V_o = 53,16 + 0,046 E \quad (13)$$

donde:

V_t : viajes al trabajo

V_{EAC} : viajes a la escuela (en el Área Central)

V_{EFAC} : viajes a la escuela (fuera del Área Central)

V_o : viajes con otros propósitos

E : total de empleos

M : matrícula escolar

4.2.3 Modelo de Distribución de Viajes

La distribución de viajes se basó en el modelo de gravedad:

$$T_{ij} = P_i A_j F_{ij} K_{ij} \quad (14)$$

donde:

T_{ij} : número de viajes de la zona i a la j

P_i : número de viajes producidos en la zona i

A_j : número de viajes atraídos en la zona j

F_{ij} : función del tiempo o costo generalizado del viajes en entre las zonas i y j

K_{ij} : factor de ajuste de características socioeconómicas de los viajes entre las zonas i y j

Las variables P_i y A_j usadas en el proceso de calibración se obtuvieron a partir de los datos de la encuesta de hogares. La variable F_{ij} se calibró para cada categoría de propósito de viaje; la función es inversamente proporcional al tiempo de viaje entre las zonas. La variable K_{ij} se determinó mediante la comparación de los resultados del modelo calibrado con los resultados de la

encuesta, agregados a través de las líneas de barrera principales, con el fin de identificar sesgos geográficos en el modelo producto de desplazamientos especiales dentro de la ciudad que no fuesen explicables únicamente por tiempo de viaje (Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976).

Como resultado de las modelaciones, en la Figura 16 se presenta una comparación entre las distribuciones de frecuencia de tiempos de viajes obtenidas de las entrevistas y de los modelos de viajes al trabajo en automóvil. Cabe destacar que las aproximaciones del modelo y de las entrevistas presentan, en general, una tendencia similar, lo cual indica que el modelo refleja el comportamiento deseado.

COMPARACION ENTRE LAS DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA DE TIEMPOS DE VIAJES OBTENIDAS DE LAS ENTREVISTAS Y DE LOS MODELOS DE VIAJES AL TRABAJO EN AUTOMOVIL

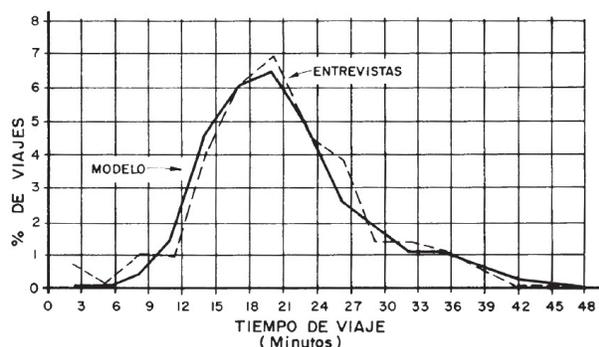


Figura 16. Comparación entre las distribuciones de frecuencia de tiempos de viajes obtenidas de las entrevistas y de los modelos de viajes al trabajo en automóvil (Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

4.2.4 Modelo de Carga a la Red o Asignación de Viajes

La asignación de viajes a la red de carreteras y a la red de transporte público se realizó mediante el método de asignación “Todo o Nada”, según los algoritmos estándar predominantes internacionalmente en la década de los setentas.

4.3 Recursos Tecnológicos

Para las modelaciones se utilizaron equipos de cómputo tipo *mainframe* y *software* originalmente desarrollado por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) para este tipo de equipo. El *software* original se denominaba “Urban Transportation Planning Software” (UTPS). Es importante señalar que el advenimiento de las microcomputadoras personales ocurrió en la década de los

ochenta, así como el desarrollo de programas para la modelación de demanda de transporte urbano en dichas computadoras. Antes de esa época, los procesos de cálculo se realizaban mediante equipos de cómputo centrales, los cuales requerían espacios físicos controlados para su funcionamiento y eran operados mediante tarjetas perforadas.

4.4 Proyectos propuestos

Como parte del ETAMSJ, se analizaron diferentes proyectos para el Área Metropolitana de San José. Estos se agruparon en tres grandes categorías: Programa de Corto Plazo (1974-1976), Planes de Mediano Plazo (1977-1981) y Planes de Largo Plazo (1982-1990). Los proyectos analizados se muestran en los Cuadros 8, 9 y 10.

Cuadro 8. Proyectos planteados en el ETAMSJ en el corto plazo

Proyectos en transporte público	Proyectos en calles y carreteras	Proyectos operativos/política pública
<ul style="list-style-type: none"> • Interconexión de rutas de autobuses • Rutas de fuera del área comercial central (ACC) • Microbuses y autobuses expresos • Organización y propiedad de la industria de transporte público • Prioridad para autobuses en la Avenida Segunda • Carril para autobuses en Avenida Tercera, Parque Morazán • Ampliación de la Calle Central, entre Avenidas 20 y 22 • Puente sobre río María Aguilar, Ruta 124 • Carril Exclusivo para autobuses en Avenida Central, Calles 33-37 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de semáforos para el ACC • Intercambio del Hospital México • Separación de niveles en la Calle 42 • Semáforo en Ruta 6-Calle 1 (Guadalupe) • Puente sobre el Río María Aguilar, Ruta 213 • Canalización en Ruta 1-Ruta 100 (Copey) • Ampliación en Ruta 7-Entrada a Rohrmoser (Anonos) • Ampliación de la Intersección Ruta 7-Ruta 105 (S. Rafael) • Circunvalación de San José 	<ul style="list-style-type: none"> • Especificaciones funcionales para autobuses • Programa de inspección de vehículos de autobuses • Incentivo para los pasajeros de transporte público • Sistema de semáforos para el ACC • Semáforo en Ruta 6-Calle 1 (Guadalupe) • Eliminación de obstáculos en Avenida Central y Primera • Reducción de accidentes de tránsito en Calle Segunda • Imposición forzosa de prohibiciones sobre estacionamientos

(Adaptado de Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

Cuadro 9. Proyectos planteados en el ETAMSJ en el mediano plazo

Proyectos en transporte público	Proyectos en calles y carreteras	Proyectos operativos/política pública
<ul style="list-style-type: none"> Vía autobuses sobre vía del ferrocarril (FC) Sabana-Calle 13 (Av. 8) Vía autobuses Estación FC Atlántico-Fuentes Calles para autobuses Interconexión de rutas de autobuses Rutas de autobuses que no cruzan el ACC Extensión de servicios de buses a nuevas áreas Servicios de microbuses y autobuses expresos 	<p><i>Nuevos proyectos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Circunvalación Curridabat-Tres Ríos San José-Escazú Escazú-Ciudad Colón San José-Siquirres Calle Negritos (UCR)-Barrio Escalante Radial Desamparados Radial Sabanilla-Hatillo-Alajuelita <p><i>Ampliaciones:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Ruta San José-San Sebastián Ruta 1 San José-Heredia Ruta Guadalupe-Coronado Ruta 2 San José-San Pedro Radial Zapote 	<ul style="list-style-type: none"> Alamedas peatonales Prohibición de estacionamientos en la calle Especificaciones funcionales para autobuses Incentivos para los pasajeros de autobuses Compra en exceso de derechos de vía Participación de la comunidad en transporte público Adiestramiento de inspectores de tránsito Fijación de precios por estacionamiento en el ACC Fijación de precios de la gasolina

(Adaptado de Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976.)

Cuadro 10. Proyectos planteados en el ETAMSJ en el largo plazo

Proyectos en transporte público	Proyectos en calles y carreteras
<p>Vía autobuses FC Calle 13 (Av. 8)-La Luz</p> <p>Plazas de transporte público en el ACC</p>	<p><i>Nuevos proyectos:</i></p> <p>Conexión Calle 24-Sabana Norte</p> <p>Carretera San José-Heredia</p> <p>Carretera San José-Guadalupe</p> <p>Carretera Zapote-Curridabat</p> <p>Puente sobre el río Torres (Ruta 5)</p> <p>Desvío de la Ciudad de Alajuela</p> <p><i>Ampliaciones:</i></p> <p>Puente sobre el río Tiribí (Ruta 214)</p> <p>Calle Radial Los Colegios</p> <p>Av. Central a 6 carriles</p> <p><i>Mejoras:</i></p> <p>Carretera Sabana-Pavas</p> <p>Vía Fuentes-Ruta Sabanilla</p> <p>Carretera Copey-Llorente (Ruta 101)</p> <p>Calle 21</p> <p>Ruta 4 Y Griega-Desamparados</p> <p>Ruta 4 Plaza Víquez-Y Griega</p> <p>Carretera San Pedro-Betania-Guadalupe</p> <p>Calle Y Griega-Radial Zapote</p> <p>Ruta 204 San Francisco-Zapote</p>

Nota¹: En el largo plazo no se plantearon políticas públicas.

(Adaptado de Alan M. Voorhees and Associates, Inc. & PADCO Inc., 1976).

4.5 Medidas para Modificar la Demanda:

Con el fin de evitar que la relación volumen/capacidad aumentara de 0,75 en 1974 a 1,11 en 1990 según las estimaciones realizadas, se analizaron las siguientes restricciones de demanda como contramedida a la inminente congestión vehicular y para fomentar el uso de transporte público:

- Aumentar el precio de los combustibles para motores
- Aumentar el costo del estacionamiento en el área central de San José
- Reducir o eliminar el costo de las tarifas del transporte público
- Aumentar el precio de compra de los automóviles (directamente o por medio de impuestos)
- Imponer el cobro de una cuota adicional para operar automóviles particulares en el área central de San José
- Suministrar una red considerable de vías para autobuses destinadas a aumentar las velocidades de los autobuses y la seguridad a los automóviles

V. ESTUDIO DEL TRANSPORTE URBANO DEL GRAN ÁREA METROPOLITANA (ETUGAM)

El ETUGAM fue desarrollado en los años 1989-1990 por un consultor costarricense especializado en Planificación de Transporte. Para este estudio se elaboró, con todos sus alcances, un modelo de demanda de transporte urbano para la GAM. El modelo fue estructurado sobre la plataforma de modelación TRANPLAN, basado en el esquema de predicción de demanda mediante el enfoque de cuatro etapas. La información que se presenta en esta sección está basada en el informe final del estudio: “Estudio del Transporte Urbano del Gran Área Metropolitana” (1991).

5.1 Aspectos Generales del Estudio

Las necesidades de la época justificaban un nuevo estudio, no solo por el crecimiento urbano de la región y el aumento en los problemas de movilidad en la GAM a principios de la década de los ochenta, sino también porque habían pasado casi 15 años desde la finalización del ETAMSJ. La población había aumentado de tal forma, que la infraestructura vial del momento ya no tenía la capacidad suficiente para satisfacer las necesidades de movilidad de los usuarios durante los periodos pico, además de que muchos de los planteamientos indicados en el ETAMSJ al

corto, mediano y largo plazo no se llevaron a cabo y ameritaban revisiones y actualizaciones. El ETUGAM se concentró en el desarrollo completo y calibración de un nuevo modelo de demanda de transporte urbano para la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, denominado “Sistema Integrado de Análisis del Transporte del Gran Área Metropolitana” (SIATGAM). Inmediatamente después de finalizado el ETUGAM, en el año 1991, el mismo equipo profesional del ETUGAM, ampliado con varios profesionales más, realizó un proyecto en el que, mediante el uso del SIATGAM, se elaboró un Plan Maestro de Transporte Urbano para la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

Como parte del desarrollo del Plan Maestro de transporte urbano y para atender las necesidades de vialidad del momento, se plantearon las siguientes labores por realizar (Castro, 1991):

- Determinar valores de demanda del transporte urbano tomando diferentes años horizonte de análisis y diferentes escenarios
- Estudiar los impactos de cambios en el uso del suelo
- Optimizar el uso del sistema de vías existente
- Analizar nuevos proyectos viales
- Analizar detalladamente nuevas rutas de transporte público
- Estudiar el efecto de alternativas de manejo de sistemas de transporte
- Mantener actualizadas las diferentes bases de datos que involucran las características de transporte del GAM
- Definir nuevas directrices a corto, mediano y largo plazo

5.1.1 Área de Estudio

El estudio se enfocó en el Gran Área Metropolitana (GAM), la cual fue segmentada para el modelo SIATGAM en 373 zonas con base en los siguientes criterios (Castro, 1991):

- Reproducir, mediante la unión de zonas la división político-administrativa prevaleciente en la GAM, para ser consistente con la información segregada a nivel de distrito que se recopiló y facilitó por parte de las dependencias del gobierno de Costa Rica.
- Las segregaciones consideraron las características del uso del suelo, por lo que se identificaron fronteras aislando zonas industriales, zonas comerciales, núcleos administrativos, núcleos educativos de magnitud importante, hospitales, etc.

- La función de la zonificación radicaba en la necesidad de definir unidades de análisis con características homogéneas. Dentro de las variables utilizadas para analizar la homogeneidad se identificó el ingreso, por lo que se plantearon sectores separados en términos del ingreso.
- Se definieron límites zonales en función de áreas cuyos usos fueron previamente definidos, a nivel urbano, en el “Plan Regional Metropolitano” (1983) y poseían un carácter catalogado como “neutro” en términos de transporte, ya que presentaban potencial para el desarrollo futuro de la región. Estos casos aplicaron a las áreas boscosas y de protección, recreativas, de veda, de influencia de aeropuertos, proyectos de riego y agrícolas, parques nacionales, embalses, etc.
- Se consideraron como límites zonales los ríos, dado que representaban barreras físicas que obligaban a canalizar movimientos de personas por tramos específicos.
- Al realizar el análisis de la demanda de transporte, las zonas fungían como centros de producción y/o atracción de viajes, cuyas generaciones de viajes debían ser canalizadas por las vías de transporte y sus modos asociados. Con el propósito de definir zonas tributarias en función de las vías existentes y proyectadas, la revisión final de la zonificación se realizó sobre el complejo vial existente y proyectado, de tal forma que en ciertos casos se definieron nuevos límites zonales en términos de ese sistema vial.

Para tomar en cuenta los flujos que provenían de zonas externas a la GAM, pero que por su origen o destino requerían transitar dentro de la zona de estudio, se consideraron los viajes que se generaban o pasaban por las siguientes zonas:

- Puriscal
- Tarrazú
- Pérez Zeledón
- León Cortés
- Grecia
- Atenas
- Orotina
- Paraíso
- Turrialba
- Sarapiquí
- Liberia
- Pococí

5.1.2 Datos Socioeconómicos y Demográficos

Como parte del proceso de desarrollo del SIATGAM, en los meses desde abril hasta junio de 1990, se desarrollaron encuestas en 12.754 hogares de la GAM. Con estas encuestas se buscó identificar las características que serían utilizadas para generar relaciones econométricas, ecuaciones de predicción e información básica para la modelación de la demanda de transporte. El diseño de los formularios de encuesta, así como el diseño estadístico de la muestra, su distribución en función de la zonificación y los protocolos del proceso de muestreo, fue realizado por el mismo equipo profesional encargado de desarrollar el modelo de demanda. Seguidamente se listan algunos indicadores generales derivados de los resultados de la encuesta (Castro, 1991):

- El tamaño promedio de los hogares era de 4,6 personas
- Un 73,7% de los hogares tenían dos o más miembros entre 25 y 59 años
- En 48% de los hogares sólo una persona trabajaba
- En 64,6% de los hogares había uno o más estudiantes
- El 85% de los hogares no contaba con personas con título universitario.
- Las empresas privadas proveían de trabajo al jefe de familia en el 33,8% de los hogares.
- Solo una de cada tres familias poseía vehículo.
- Un 36% de las familias vivían con ingresos inferiores a los 20.000 colones mensuales.

Como complemento a la información derivada de la encuesta de hogares, cabe destacar que en 1990 más del 50% de la inversión pública, así como más del 70% de las actividades industriales, se desarrollaban en la GAM.

5.1.3 Patrón de Flujos

Basado en la encuesta de hogares realizada en la GAM para 1990, se indican los principales hallazgos relacionados a los patrones de flujos de viajes (Castro, 1991):

- Durante los períodos pico de la mañana, un 60,4% de los viajes iniciaron antes de las 6:30 a.m.
- El 54,4% de las personas que salieron de sus hogares durante el periodo pico de la mañana, regresaron a ellos durante el pico de la tarde.

- Un 53,3% y un 22,5% de los viajes durante el periodo pico de la mañana tuvieron como propósito trabajo y estudio, respectivamente. De todos ellos, un 16,2% realizó transbordos.
- El 64,0% de las personas que regresaron a sus hogares provenían directamente del trabajo.
- Un 70,3% de las personas que viajaron durante el periodo pico de la mañana, lo hizo en autobús público.
- El 72,0% de las personas que regresaron a sus hogares en el transcurso del día, lo hizo en autobús público.

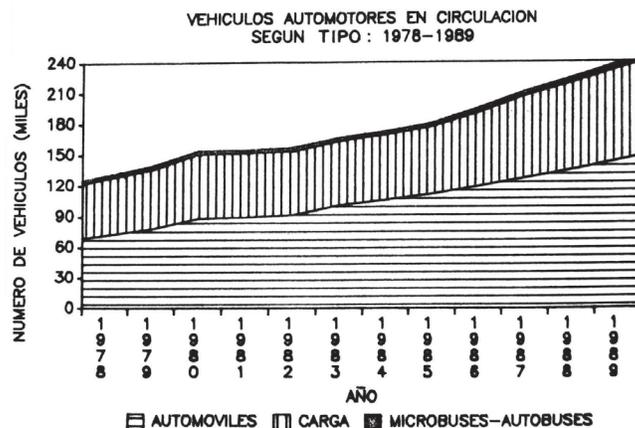


Figura 17. Aumento en la flota vehicular entre 1978 y 1989 (Castro, 1991)

5.1.4 Infraestructura, Transporte Público y Vehículos Privados

En lo que se refiere a infraestructura vial, se resalta como principal obra de los ochentas la construcción de tramos de la ruta de Circunvalación. Esta obra fue planteada en el ETAMSJ en 1973 y su planteamiento incluía pasos elevados, alta velocidad de diseño y dos carriles por sentido de circulación con separación física, entre otros aspectos asociados a buenos estándares de diseño. Sin embargo, su construcción inició en 1978 con variaciones en su diseño, tramos de un carril y rotondas en lugar de pasos elevados, lo cual modificaba su funcionamiento previsto de vía expresa de tránsito rápido, al de boulevard. Para el año 1990, este proyecto vial se encontraba inconcluso, con los tramos norte y oeste sin construir.

Otro proyecto conceptualizado y planteado en los sesentas, conocido como el Anillo Periférico, ideado como una ruta circunferencial externa para unir los núcleos periféricos de AMSJ, no se había tomado en cuenta y para 1990 nada del proyecto había sido construido.

En detrimento de las condiciones de servicio de la infraestructura vial, entre 1978 y 1989 se duplicó la flota vehicular en todo el país, tal como se muestra en la Figura 17. Entre otras causas, este incremento se favoreció por las siguientes medidas fiscales (Castro, 1991):

- Fuerte disminución de los impuestos sobre los vehículos tipo pick-up de hasta una tonelada de carga útil (1986).
- Aumento en los impuestos sobre los vehículos tipo pick-up, pero disminución de los impuestos sobre los automóviles con motores de 1300 centímetros cúbicos o menos (Ley del Auto Popular de 1987).
- Bajas imposiciones fiscales relativas sobre los vehículos usados importados, con cinco o más años de uso (1986).

Por otro lado, en términos de viajes diarios, en 1987 se registraron en promedio 1.266.989 viajes de personas que entraron y salieron del casco central de San José durante todo el día. Un 62% de las personas viajaron en autobús, correspondientes a apenas un 7% de la flota vehicular, mientras que un 30% de las personas viajaron en automóviles, los cuales representaban un 73% de la flota vehicular. Claramente, existía un desbalance entre la cantidad de personas que se movilizaban por medio de autobuses con respecto a la cantidad de viajes de vehículos asociados a ese modo de transporte. Este contraste entre la movilidad de personas y vehículos al comparar el transporte público y el vehículo privado persiste aún a la altura del 2017.

En las horas pico de 1990, aproximadamente el 80% de los viajes en el Área Metropolitana de San José se realizaban en transporte público, y en promedio 30 personas por autobús viajaban de pie.

5.2 Aspectos Conceptuales

Para realizar el proceso de modelación de demanda, en el SIATGAM se utilizó el enfoque de cuatro etapas mencionado a lo largo del presente artículo. Las ecuaciones y funciones correspondientes se calibraron con base en la información derivada de las encuestas de hogares realizadas como parte del estudio ETUGAM.

5.2.1 Generación de Viajes

Se calibraron ecuaciones de regresión que relacionaron el número de viajes producidos por familia en cada zona, con las características sociales, demográficas y económicas de las familias en cada zona.

$$p_t = 0,259 + 0,484 T + 0,023 I \quad (15)$$

$$p_e = 0,017 + 0,591 E + 0,011 I \quad (16)$$

$$p_o = -0,104 + 0,133 O + 0,022 I$$

(17)

O: número de otros miembros en el hogar

donde:

 p_i : producción de viajes por hogar con propósito trabajo p_e : producción de viajes por hogar con propósito estudio p_o : producción de viajes al hogar con otros propósitos

T: número de trabajadores en el hogar

E: número de estudiantes en el hogar

I: categoría del ingreso familiar

Para las atracciones en cada zona, el número de viajes atraídos se relacionó con las características de uso del suelo de la zona. En este caso, no se estimaron valores absolutos de viajes atraídos por zona, sino que se determinaron los porcentajes de atracción por cada zona para los tres propósitos considerados en las ecuaciones de producción, como se puede verificar en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Porcentajes de atracción de viajes por propósito, segmentado por provincia y cantón de la GAM

Identificación		Porcentajes de atracción		
		Trabajo	Estudio	Otros
1. Provincia: San José				
1.1	Cantón Central	50,54	22,99	49,09
1.2	Cantón Escazú	1,23	2,13	2,12
1.3	Cantón Desamparados	2,75	8,22	2,95
1.6	Cantón Aserrí	0,48	1,37	0,23
1.7	Cantón Mora	0,25	0,61	0,3
1.8	Cantón Goicochea	4,39	5,13	4,47
1.9	Cantón Santa Ana	0,49	1,23	0,45
1.10	Cantón Alajuelita	0,45	2,04	0,68
1.11	Cantón Vásquez de Coronado	0,83	1,62	0,45
1.13	Cantón Tibás	2,22	3,16	3,26
1.14	Cantón Moravia	0,96	3,70	0,15
1.15	Cantón Montes de Oca	4,57	3,47	3,03
1.18	Cantón Curridabat	1,68	1,62	1,97
2. Provincia: Alajuela				
2.1	Cantón Alajuela	7,24	9,63	8,48
2.2	Cantón Atenas	0,70	1,79	0,23
2.8	Cantón Poás	0,59	0,83	0,08
3. Provincia: Cartago				
3.1	Cantón Central	6,39	7,48	6,36
3.2	Cantón Paraíso	1,45	2,17	0,76
3.3	Cantón Unión	1,15	2,57	1,52
3.6	Cantón Alvarado	0,21	0,46	0,08
3.7	Cantón Oreamuno	0,47	1,32	0,68
3.8	Cantón Guarco	0,68	1,39	0,38
4. Provincia: Heredia				
4.1	Cantón Central	4,85	6,27	9,24
4.2	Cantón Barva	0,51	1,59	0,68
4.3	Cantón Santo Domingo	0,86	1,79	0,53
4.4	Cantón Santa Bárbara	0,47	1,17	0,15
4.5	Cantón San Rafael	0,67	1,34	0,61
4.6	Cantón San Isidro	0,20	0,64	0,23
4.7	Cantón Belén	1,82	0,77	0,61
4.8	Cantón Flores	0,65	0,85	0,23
4.9	Cantón San Pablo	0,25	0,66	0,00

(Castro, L., 1991) Modificado por autores

5.2.2 Distribución de Viajes

Se utilizó el Modelo de Gravedad para realizar la distribución de viajes entre los pares origen destino:

$$T_{ij} = \frac{P_i A_j f(t_{ij})}{\sum_j A_j f(t_{ij})} \quad (18)$$

donde:

T_{ij} : número de viajes de la zona i a la j

P_i : número de viajes producidos en la zona i

A_j : número de viajes atraídos en la zona j

t_{ij} : tiempo de viaje entre las zonas ij

$f(t_{ij})$: función de impedancia

Las funciones de impedancia por propósito fueron calculadas a partir de la encuesta de hogares. En la Figura 18 se muestran las funciones de impedancia para cada uno de los distintos propósitos de viaje contemplados en el modelo.

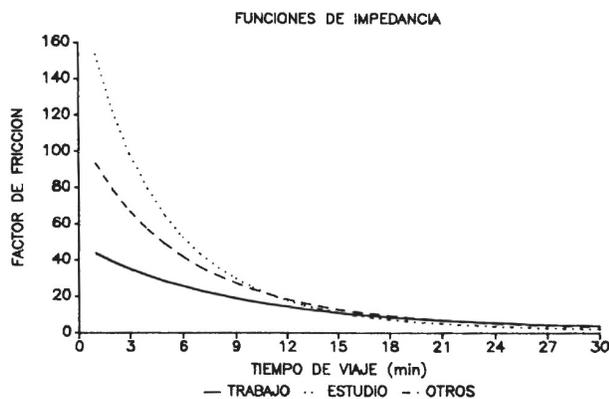


Figura 18. Funciones de impedancia para cada propósito de viaje (Castro, 1991)

5.2.3 Distribución Modal

Se utilizó el Modelo Logit para determinar la distribución modal entre dos posibles modos: vehículo privado y transporte público. El modelo permitió determinar las probabilidades de escogencia asociadas a los diferentes modos en cada par origen-destino y, a partir de la cantidad total de viajes entre el origen y destino, se obtuvo la cantidad de viajes por cada modo. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$P_{ij}(a) = \frac{e^{U_{aij}}}{\sum_{K=1}^M e^{U_{Kij}}} \quad (19)$$

donde:

$P_{ij}(k)$: probabilidad de que sea escogido el modo k para viajes entre ij

$U_{aij}(k)$: función de utilidad del modo k para viajes ij

M : cantidad total de modos disponibles

Con base en la incorporación de los parámetros específicos por modo en la modelación (tarifa de viaje en autobús para transporte público y costo de operación percibido para transporte por automóvil), se generaron funciones que permitieron estimar la probabilidad de selección de transporte público, segmentado por propósito, tal como se ilustra en las curvas de diversión de la Figura 19.

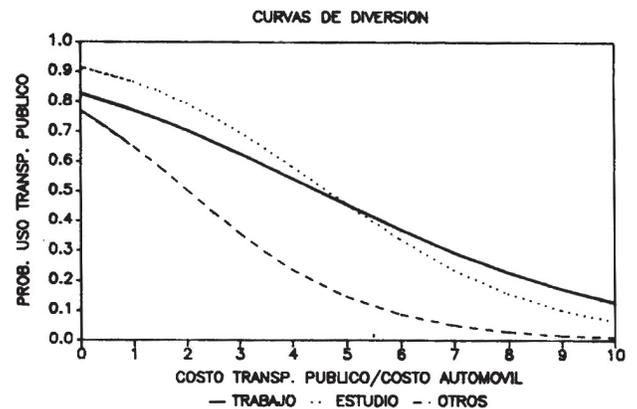


Figura 19. Curva de diversión para estimar la probabilidad de uso de transporte público segmentado por propósito (Castro, 1991)

Evidentemente, la probabilidad de uso del vehículo privado era el complemento de la probabilidad de uso del transporte público determinada a partir de las curvas de diversión.

5.2.4 Asignación de flujos

Para el caso de los viajes en transporte público, el método utilizado para distribuir viajes entre las diferentes rutas era la asignación "Todo o Nada", la cual consiste en asignar todos los viajes de cada par origen destino al conjunto de rutas de menor costo (tiempo de viaje), mientras que nada se asigna a las rutas con costos superiores.

La asignación de flujos de viajes en automóvil se realizó mediante el método de Equilibrio del Usuario, el cual busca las condiciones óptimas de viaje (menor tiempo posible) para el usuario, según los principios de Wardrop, lo que en términos prácticos ocurre cuando todos los viajes en la red se realizan por la ruta de menor costo posible para el usuario, es decir, ningún viaje puede ser realizado por una ruta alterna sin aumentar el costo (tiempo) del viaje. El algoritmo de cómputo utilizado en SIATGAM para reproducir el proceso de asignación óptima para el usuario,

se basaba en un procedimiento de aproximaciones sucesivas, asignando volúmenes de manera incremental. Las iteraciones se cortaban con base en una variación máxima permitida entre los volúmenes de dos iteraciones sucesivas, o con base en una cantidad máxima aceptada de iteraciones.

5.3 Recursos Técnicos

El SIATGAM constaba de doce módulos, con un módulo principal correspondiente a la interfaz que facilitaba el manejo del sistema permitía por parte del usuario. Dicho módulo principal estaba compuesto por menús y submenús interactivos para ejecutar los once módulos restantes, divididos en dos grupos (Castro, 1991):

- Módulos de apoyo: Contemplaban la agregación e impresión de zonas, edición de la red de carreteras, edición de la red de transporte público, determinación de rutas de costo mínimo en transporte público, reportes y gráficos.
- Módulos de cálculo de demanda: Procesos de cálculo según las fases de generación de viajes, distribución de viajes, distribución modal, asignación de flujos en transporte público y asignación de flujos en vehículo privado.

La estructura general de los módulos se ilustra en la Figura 20.

5.4 Proyectos Analizados

Después de desarrollado el SIATGAM, éste se utilizó para analizar la demanda de transporte urbano en diferentes estudios, como los que se listan a continuación:

- “Plan Maestro del Transporte Urbano en el Gran Área Metropolitana 1992-2012” (1992).
- “Estudio de Demanda de Taxis en Costa Rica” (1995).
- “Estudio de Factibilidad para la Ampliación y Mejoramiento de la Autopista General Cañas” (1997).
- “Reorganización del transporte público del Área Metropolitana de San José” (1999).
- “Reorganización del transporte público de las Áreas Metropolitanas de Alajuela y Cartago” (1999).

En los Cuadros 12, 13 y 14 se listan, a manera de ejemplo, los proyectos de infraestructura y políticas que se propusieron en el “Plan Maestro del Transporte Urbano en el Gran Área Metropolitana” (1992), como resultado de los análisis mediante SIATGAM. Los proyectos se presentan ordenados por prioridad y plazo de ejecución; adicionalmente, se segmentan en proyectos viales menores, mayores y asociados a políticas.

Las propuestas indicadas en los planes de reorganización del transporte público para San José, Alajuela y Cartago (1999), analizadas mediante SIATGAM, consideraron aspectos operativos que permitirían mejorar el funcionamiento del sistema de transporte público específico en cada área metropolitana. Dentro de tales propuestas se consideraron aspectos como la sectorización de rutas de transporte público, la troncalización de rutas y la implantación de rutas intersectoriales.

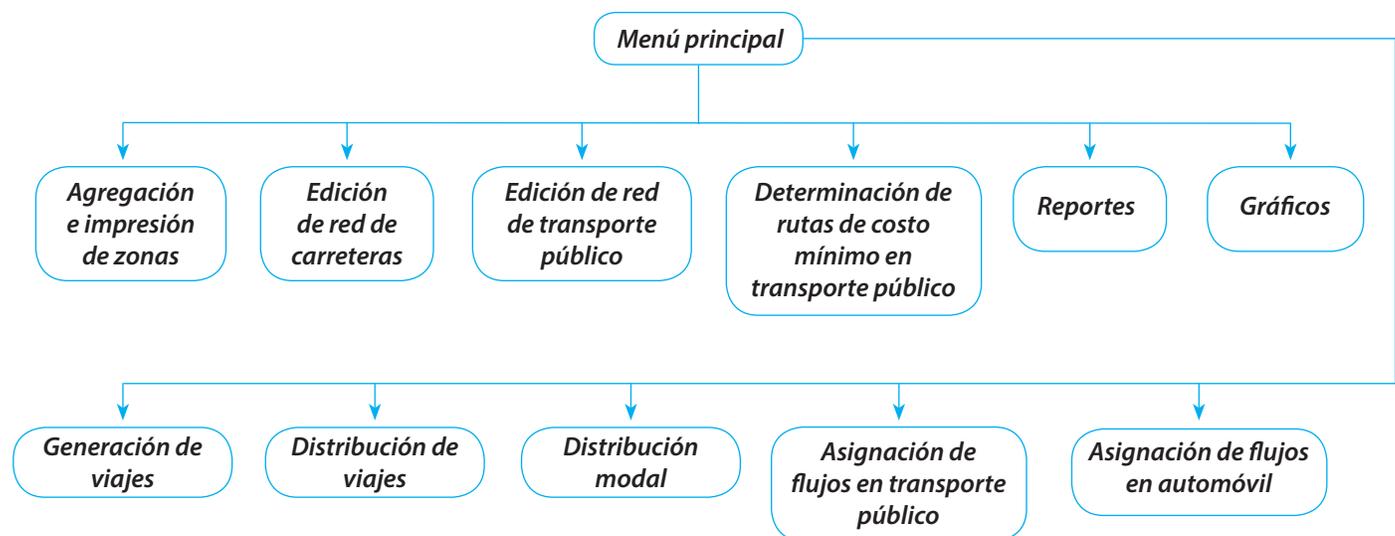


Figura 20. Diagrama de flujo de los módulos del SIATGAM (Castro, 1991)

Cuadro 12. Priorización de proyectos para el corto plazo (1992-1993)

Proyectos menores	Proyectos mayores
<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de bahías en carreteras radiales • Mejoras de la conectividad en el Norte • Nueva Radial San José-Guadalupe con puente en Circunvalación • Construcción de terminales cantonales • Cambios en Rotonda de San Pedro • Tramo Tournón-La Uruca • Construcción de Terminal Interregional Norte • Automatización de tiempos de semáforos del ACC de San José (manejo por computadora) 	<ul style="list-style-type: none"> • Circunvalación Norte con pasos a desnivel • Construcción de Terminal Urbana No. 3 en ACC y alameda peatonal • Intercambios en desnivel en Rotondas La Bandera y Guadalupe • Construcción del tramo inicial de la Radial a Desamparados • Prolongación de la Av. 7 hasta Sabana Norte
Políticas públicas	
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento y renovación de la flota de autobuses • Reserva de terrenos para terminales y eje Intercantonal Norte • Contratación del diseño de terminales del ACC de San José • Respaldo al funcionamiento de rutas intersectoriales • Sectorización del servicio de transporte público por autobús • Introducción de servicios semiexpresos con autobuses o busetas • Control estricto de emisiones de humo y ruido de la flota de vehículos • Cambio en el sistema de concesiones de transporte hacia la sectorización • Moratoria en la creación de estacionamiento en el ACC de San José • Multas a los estacionamientos que causen congestión de las vías • Impulso a la creación de la oficina reguladora de las ciudades de la GAM • Reconstrucción de aceras de los centros urbanos primarios y secundarios • Control del abuso de los espacios públicos (aceras y calles) • Campaña de educación a los taxistas respecto a la manera de operar • Plan de experimentación de cambios temporales de sentido en ciertas vías • Campaña de información y rotulación permanente en las ciudades • Impulso de la telemática para contener la demanda de viajes • Campaña de educación a los conductores de vehículos 	

(Castro, 1992)

Cuadro 13. Priorización de proyectos para el mediano plazo (1993-1998)

Proyectos menores	Proyectos mayores
<ul style="list-style-type: none"> Mejoramiento de conectividad norte ACC (puente calle 6) Terminal interregional del Oeste Intercambio en desnivel en Matra-La Uruca Intercambio en desnivel en Pozuelo Ampliación de carretera cruce Tibás-Llorente Ampliación carretera Paso Ancho-Desamparados y Puente Rotonda Zapote 	<ul style="list-style-type: none"> Construcción del eje intercantonal por el Norte Construcción de Terminales ACC No. 2 y 5 (alameda peatonal Calle 4) Construcción de Radial Zapote-Curridabat Anillo Periférico Sector Norte
Políticas públicas	
<ul style="list-style-type: none"> Creación de mercados periféricos fuera del centro de San José Estímulo a la densificación de corredores radiales de San José Generación de asentamientos de vivienda con mayor densidad Tecnificación de conductores y administradores de transporte Uniformización de la flota de autobuses con unidades idóneas Identificación de las rutas por colores según sectores Introducción del taxi colectivo tipo microbús Impulso a estacionamientos fuera del área restringida Ampliación de aceras en algunas vías del centro del ACC de San José Estimular el uso de la telemática para reducir demanda de viajes Mantener controles de abuso de aceras y calles en las ciudades Eliminación total de exoneraciones al modo taxi 	

(Castro, 1992)

Cuadro 14. Priorización de proyectos para el largo plazo (1998-2010)

Proyectos menores	Proyectos mayores
<ul style="list-style-type: none"> Intercambio San Sebastián Nueva radial a Desamparados (segmento sur hasta Desamparados) Construcción de terminales de Cartago Intercambio Rotonda Hatillo-Alajuelita 	<ul style="list-style-type: none"> Nueva radial a Heredia Construcción de Terminales ACC No. 4 y 1 Terminales del centro de Heredia Nueva carretera a Cartago por sector de Coris Terminales del centro de Alajuela y Cartago
Políticas públicas	
<ul style="list-style-type: none"> Capacitar a los funcionarios de la administración del transporte Crear zonas verdes enlazadas en las ciudades Prolongar las horas funcionamiento de la ciudad Establecer zonas restringidas para la creación de estacionamiento en las ciudades secundarias de la GAM (Heredia, Alajuela, Cartago) 	

(Castro, 1992)

VI. CAMBIO EN LA PLATAFORMA DE MODELACIÓN: MIGRACIÓN DE SIATGAM A EMME2

6.1 Consideraciones de la migración

El conjunto de programas denominado SIATGAM, basado en el *software* TRANPLAN, fue generado entre los años 1989 y 1990. Como consecuencia de la necesidad de contar con una herramienta de predicción de demanda más poderosa, actualizada y que permitiera modelar transporte público de forma más detallada, en el año 2003 surgió el proyecto de migración de las bases de datos de SIATGAM hacia la plataforma de modelación Emme2, proyecto desarrollado por la empresa L.C.R. Logística S.A. para el Consejo Nacional de Concesiones, que además incluyó la calibración de los algoritmos de modelación bajo esta nueva plataforma.

El *software* Emme2, corresponde a un conjunto de sistemas orientados al análisis de demanda de transporte. El acrónimo Emme es derivado del nombre en francés e inglés “Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium”, el cual se refiere a la teoría de equilibrio sobre la cual se basan los modelos multimodales de predicción de viajes.

La selección final del sistema Emme2 como nueva plataforma involucró un proceso de diagnóstico del modelo existente en aquel entonces (2003) frente a nuevas y más poderosas herramientas de modelación. Como parte del diagnóstico, se identificaron fortalezas y debilidades del sistema SIATGAM, desarrollado desde los años 1989-1990, ya que para el 2003 tenía casi 15 años de haber sido creado. Entre las debilidades identificadas, las cuales debían ser afrontadas con ayuda de la nueva plataforma, se pueden mencionar (L.C.R. Logística S.A., 2003):

- Desactualización del *software* TRANPLAN.
- El proveedor de TRANPLAN había discontinuado el desarrollo del paquete de modelación de demanda de transporte urbano.
- La capacidad del *software* no permitía la modelación de la red vial total de la GAM, por lo que en el SIATGAM se incluía alrededor del 40% de toda la red vial existente bajo los nuevos límites de la GAM.
- Las limitaciones de capacidad y de los algoritmos de asignación de flujos de transporte público obligaban a obviar algunas variables de transporte público cuya incorporación resultaba, en la mayoría de los casos, importantes en el proceso de modelación.

- TRANPLAN no contaba con la flexibilidad requerida para introducir ecuaciones analíticas y presentaba pocas herramientas misceláneas de cálculo.
- El algoritmo de asignación de flujos en vehículo privado utilizado por TRANPLAN se basaba en una aproximación del equilibrio a partir de un proceso incremental iterativo, por lo que no era viable utilizar el algoritmo analítico completo de asignación óptima para los usuarios, metodología que permitiría reproducir el comportamiento del tránsito de forma más apegada a la realidad.

Al considerar el *software* Emme2 como nueva plataforma para sustituir al TRANPLAN, se identificaron los siguientes beneficios que serían obtenidos (L.C.R. Logística S.A., 2003):

- A pesar de no contar con rutinas específicas preelaboradas para las fases de generación de viajes, distribución de viajes y distribución modal, Emme2 permitía, mediante arreglos matriciales y un poderoso lenguaje de macros, generar procedimientos para reproducir las tres etapas de generación, distribución y selección modal sin mayor dificultad técnica.
- En la etapa de asignación de flujos en vehículo privado, Emme2 contaba con la ventaja de ofrecer una mayor flexibilidad, espacio para más variables, espacio para redes más grandes y, de forma directa (no por aproximaciones), el algoritmo de asignación por equilibrio.
- La factibilidad de migrar las bases de datos del SIATGAM a Emme2 no solo implicaba el aprovechamiento de la información existente en el SIATGAM, sino que permitiría utilizar las herramientas y algoritmos presentes en Emme2 para depurar los procesos de cálculo.
- Emme2 contaba con algoritmos de asignación de flujos en transporte público mucho más completos y precisos que TRANPLAN.

El producto final del proyecto fue un modelo fundamentado en las bases de datos de SIATGAM, pero estructurado alrededor de una plataforma tecnológica de mayores capacidades y calibrado para las condiciones de la GAM prevalecientes en el año 2003.

VII. REDEFINICIÓN COMPLETA DEL MODELO DE DEMANDA: ESTUDIO DE OFERTA Y DEMANDA DE TRANSPORTE DE LA GAM (PRUGAM)

7.1 Aspectos Generales del Estudio

El Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM fue realizado en el año 2007 como parte del proyecto de Planificación

Regional y Urbana de la GAM (PRUGAM). Entre los alcances del proyecto se incluyeron el diseño y aplicación de una nueva encuesta de hogares y diversos muestreos en campo. Con base en la información obtenida, se calibraron nuevas funciones para las diferentes etapas de modelación de la demanda de transporte urbano en la GAM. Adicionalmente, se amplió el área de estudio respecto a la existente en el modelo anterior, de modo que la nueva región abarcaba desde Paraíso de Cartago por el este, hasta San Ramón de Alajuela por el oeste. Al igual que la versión anterior, el nuevo modelo fue desarrollado alrededor de la plataforma Emme2.

Una vez calibrado el modelo, este se utilizó como herramienta para el análisis del transporte urbano en la GAM. En ese proceso, se consideraron escenarios de modelación para diferentes años horizonte: 2006, 2010, 2015, 2020, 2025, 2030 y 2035. Entre las diferentes intervenciones que se estudiaron con ayuda del modelo calibrado, se pueden mencionar los siguientes tipos (L.C.R. Logística S.A., 2007a):

- Cambios en la infraestructura vial, dentro de las cuales se consideraron mejoras, ampliaciones y/o construcción de nuevos tramos de vías.
- Modificaciones en los itinerarios de los servicios de transporte público por autobús.
- Cambios en la estructura de operación de los servicios de transporte público por autobús.
- Nuevos modos de transporte público masivo (por ejemplo, el tren interurbano).
- Políticas tarifarias en los servicios de transporte público por autobús.
- Carreteras sujetas a peajes.
- Densificación habitacional de áreas específicas (aumento en las producciones de viajes).
- Densificación industrial y/o comercial de áreas específicas (aumento en las atracciones de viajes).

La información que se presenta está basada en el Informe Final: Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM del 2007.

7.1.1 Área de Estudio

El área de estudio, con una extensión de 1.967 km², contempló 37 cantones y 202 distritos de las provincias de San José, Alajuela, Cartago y Heredia, los que en 2007 componían la Gran Área

Metropolitana. Para efectos del estudio, la región se subdividió en 424 zonas, a las cuales se le agregaron 14 zonas externas que tenían influencia directa sobre los viajes en la GAM. Para efectos de modelación, las zonas externas incorporadas al área de estudio fueron las siguientes:

- Orotina-Desmonte
- Santiago de Puriscal
- San Gabriel-Jérico de Desamparados
- Corralillo de Cartago
- San Isidro de General y Zona Sur
- Juan Viñas y Turrialba
- Santa Cruz de Turrialba
- Puerto Viejo de Sarapiquí
- Guápiles y Zona Atlántica
- Tucurrique
- Puntarenas y Guanacaste
- Zarceros
- Bajo Rodríguez
- Orotina-Autopista

Los límites oficiales de la GAM fueron definidos por la Dirección de Urbanismo del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) en el año 2005.

A continuación se indican los criterios contemplados para realizar la zonificación interna asociada a la modelación de demanda (L.C.R. Logística S.A., 2007a):

1. La zonificación debía ser compatible con la división político-administrativa de la GAM, de tal forma que el agrupamiento de zonas permitiera reproducir totalmente dicha división. Por otro lado, dado que la mayor parte de la información que se recopila y procesa por las diferentes dependencias gubernamentales en Costa Rica es generada a nivel de distritos, era indispensable que una agregación de zonas permitiera reproducir los límites de los distritos.
2. El tamaño de las zonas debía ser tal que, el supuesto de que la mayor parte de las actividades se concentraran en el centroide, fuera válido. Es importante señalar, no obstante, que la existencia de zonas pequeñas tiene la ventaja de que se pueden agregar dependiendo del tipo de proyecto bajo análisis, pero una gran cantidad de zonas pequeñas dificultan la tarea de estimación de las variables en los

diferentes años horizontes, pues la información deber ser recolectada a un mayor nivel de desagregación.

3. Las zonas debían ser, en la medida de lo posible, homogéneas en su uso del suelo y/o la composición de la población. De aquí se desprendería que las fronteras de las zonas industriales marcaran límites zonales, así como los centros comerciales, los núcleos administrativos, núcleos educativos, hospitales, etc.
4. El propósito primordial que se persigue al zonificar una región es definir unidades de análisis con un alto grado de homogeneidad interna. Existen variables importantes que se utilizaron como base para buscar esta homogeneidad, tales como el ingreso y el uso del suelo. La zonificación, por tanto, se desarrolló separando sectores con base en diferencias marcadas en los ingresos.
5. En el proceso de modelación de la demanda de transporte, las diferentes zonas se convierten en centros de producción y/o generación de viajes a ser canalizados por las vías de transporte y sus diferentes modos (automóviles, autobuses, taxis, etc.). A efectos de definir zonas tributarias en función de las vías existentes o proyectadas, la revisión final de la zonificación se hizo sobre el complejo vial existente y proyectado, de modo que en los casos en que fuera necesario se definieron límites zonales adicionales en términos de la red vial.
6. Los ríos constituyen barreras físicas naturales que obligan a canalizar el movimiento de personas por puntos específicos (puentes), de aquí que la hidrografía marcara, necesariamente, límites zonales.
7. La zonificación final debía ser compatible con el estudio ETUGAM del año 1990, de forma tal que una agregación de la nueva zonificación permitiera reproducir la zonificación del estudio mencionado.

7.1.2 Datos Socioeconómicos y Demográficos

Como parte de este estudio, se realizó una encuesta, debidamente diseñada, para determinar las características demográficas y socioeconómicas necesarias para desarrollar los diferentes componentes analíticos del modelo. La encuesta involucró una muestra de 14.053 hogares de la GAM. A manera ilustrativa, a continuación se mencionan algunos datos descriptivos generales derivados de los resultados de dicha encuesta (L.C.R. Logística S.A., 2007a):

- El 22% de los hogares reportó un ingreso mensual familiar inferior a 120.000 colones, mientras el 33% poseía un ingreso entre 120.000 y 240.000 colones (2007).

- Cerca de dos terceras partes de los hogares muestreados pertenecían a grupos socioeconómicos de ingreso medio y bajo.
- En promedio, había un vehículo por cada dos hogares, mientras el 56% de los hogares no poseía vehículo.
- Del total de hogares encuestados, que incluyeron 56.048 personas, el 50,6% eran mujeres.
- Solo el 16% de las personas encuestadas contaba con estudios posteriores a la secundaria.
- En promedio, los hogares encuestados estaban conformados por cuatro miembros, dos mujeres y dos hombres.
- En un 40% de los hogares solo una persona trabajaba, mientras que dos personas trabajaban en el 28% de los hogares.
- En el 27% de los hogares al menos un miembro estudiaba, mientras que en el 21% al menos dos miembros estudiaban.

7.1.3 Patrón de Flujos

A partir de la encuesta de hogares se determinaron los periodos pico de demanda de transporte urbano. Para el periodo pico de la mañana, asociado a los viajes de salida de los hogares, la mayor concentración de viajes se presentaba entre las 5:30 a.m. y las 7:30 a.m., tal como se ilustra en la Figura 12. Adicionalmente, se determinaron los diferentes propósitos de los viajes y se agregaron en tres categorías, trabajo, estudio y otros, para facilitar la modelación de demanda de viajes. En el cuadro 15 se muestra un resumen de la cantidad de viajes por propósito ocurridos en el periodo pico de la mañana.

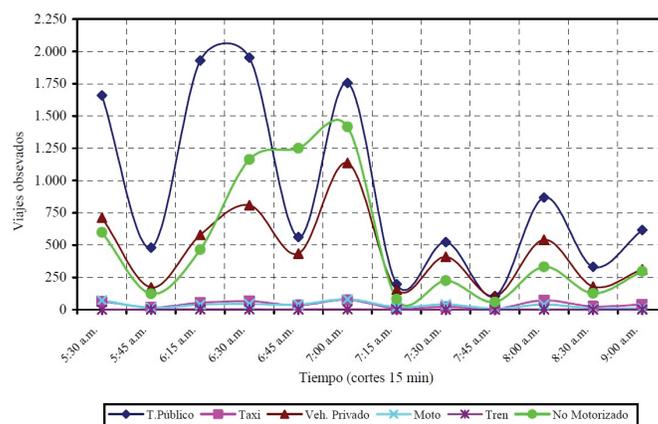


Figura 21. Distribución de viajes de salida según hora de salida y modo de transporte empleado (L.C.R. Logística S.A., 2007a)

Cuadro 15. Distribución de los viajes según el propósito en el periodo 5:30 a.m. a 7:30 a.m.

Propósito de viaje desagregado	Viajes observados 5:30-7:30 a.m.	Viajes (%)	Propósito de viaje agregado	Viajes observados 5:30-7:30 a.m.	Viajes (%)
Trabajo	11.801	60,1%	Trabajo	11.801	60,1%
Escuela	3.023	15,4%	Estudio	6.121	31,2%
Colegio	2.631	13,4%			
Universidad	467	2,4%			
Salud	298	1,5%			
Compras/Trámites	405	2,1%	Otros	1.616	8,2%
Social/Recreación	202	1,0%			
Acompañar	569	2,9%			
Otro	142	0,7%			
NS/NR	99	0,5%	NS/NR	99	0,5%
Total	19.637	100,0%		19.637	100,0%

(L.C.R. Logística S.A., 2007a)

Otras características ilustrativas generales, derivadas de la encuesta, son las siguientes:

(L.C.R. Logística S.A., 2007a):

- El periodo donde se movilizaban más viajes de salida en la mañana, correspondía a las dos horas entre 5:30 a.m. y 7:30 a.m., con cerca de 90% del total de los viajes, tanto para viajes motorizados como para viajes totales en los que se incluían los modos “caminando” y “en bicicleta”.
- Cerca del 50% de los viajes motorizados de salida se realizaban entre las 5:30 y 6:30 a.m, mientras que un 46% de los viajes motorizados de regreso ocurrían en el periodo comprendido entre las 6:00 p.m. y las 8:00 p.m..

- Para el intervalo de 5:30 a 9:00 a.m., del total de viajes motorizados de salida, el 66% correspondía al propósito de trabajo, el 21% a estudio y el 13% restante a otros propósitos. Para el regreso, del total de los viajes motorizados, el 73% tenía su origen en el lugar de trabajo, 15% en el lugar estudio y 12% en otros lugares.
- Asociado con los patrones de viajes motorizados según el modo, más de un 50% de los viajes se realizaban en transporte público y cerca de un 30 % en vehículo privado (automóvil conductor y/o pasajero), tanto para los viajes de salida como de regreso. La segmentación por modo detallada se presenta en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Distribución de los viajes motorizados de salida y regreso, según el modo de transporte usado

Modo de Transporte	Frecuencia		Porcentaje		Porcentaje Acumulado	
	Salida	Regreso	Salida	Regreso	Salida	Regreso
Autobús Público	9.630	7.698	55,13%	58,45%	61,11%	58,45%
Autobús Escolar/Colegial	1.045	480	5,98%	3,64%	61,53%	62,09%
Autobús Universitario	74	54	0,42%	0,41%	62,96%	62,50%
Autobús Institucional	249	200	1,43%	1,52%	63,05%	64,02%
Tren	16	9	0,09%	0,07%	83,30%	64,09%
Automóvil Conductor	3.538	2.763	20,25%	20,98%	94,84%	85,07%
Automóvil Pasajero	2.015	1.267	11,53%	9,62%	97,25%	94,69%
Taxi Formal	421	299	2,41%	2,27%	97,61%	96,96%
Porteador/Pirata	63	54	0,36%	0,41%	100,00%	97,37%
Moto	418	347	2,39%	2,63%	55,13%	100,00%
Total	17.469	13.171	100,00%	100,00%		

(L.C.R. Logística S.A., 2007a)

7.1.4 Infraestructura, Transporte Público y Vehículos Privados

Dentro de los problemas viales que afectaban la vialidad de la época, en los informes del estudio se mencionaron los siguientes (L.C.R. Logística S.A., 2007b):

- Durante los periodos pico, la congestión vial en la GAM alcanzaba niveles excesivos, por lo que los tiempos de viajes aumentaban aceleradamente.
- La GAM, y Costa Rica en general, presentaban problemas serios de seguridad vial, lo cual se ve reflejado en la ocurrencia de accidentes con saldos totales muy altos de heridos y muertos anualmente.
- A pesar de los severos problemas de congestión durante los periodos pico y los aumentos significativos en los precios internacionales de petróleo, la flota vehicular mantenía un crecimiento sostenido y desproporcionado.
- Como ejemplo ilustrativo del aumento acelerado en el tránsito vehicular, se identificaba la Autopista General Cañas, en el tramo entre el Hospital México-Aeropuerto Juan Santamaría, el cual presentaba un aumento de volumen cercano al 200% entre los años 1990-2006, pasando de un TPDA aproximado de 30.000 veh/día en 1990 a valores cercanos a 90.000 veh/día en el 2006.

En lo que se refiere al transporte público, en el estudio se identificaron 431 rutas de servicio regular de transporte público por autobús. Todas ellas fueron incorporadas a las bases de datos del modelo de demanda, incluyendo los siguientes parámetros a ser usados en los procesos de modelación:

- Tiempo de arribo entre unidades por ruta (minutos)
- Tarifa por ruta (colones)
- Recorrido por ruta (km)
- Velocidad media de operación (km/hr)

Para calibrar el algoritmo de flujos de transporte público se realizaron conteos de usuarios y vehículos de transporte en 54 tramos durante los periodos pico de la mañana y de la tarde, lo cual permitió comparar, con valores reales, los viajes asignados por tramos en la modelación.

Con el propósito de realizar la calibración del algoritmo de asignación de flujos de tránsito del modelo de demanda, se realizaron conteos de tránsito en 90 puntos de la GAM durante los periodos pico de la mañana y de la tarde. Los conteos fueron clasificados por tipo de vehículo: liviano, autobús y microbús, taxi y vehículos pesados desglosados por número de ejes.

En lo que se refiere a modos complementarios o paralelos de transporte público, en 2007 en la GAM había aproximadamente 15.000 taxis regulares con concesiones debidamente adjudicadas, más de 500 taxis informales con placas falsificadas de servicios regulares, más de 3.000 porteadores (taxis informales con placas particulares y emblemas de empresas privadas de transporte no registradas) y más de 2.000 vehículos informales sin distintivo alguno (piratas).

7.2 Aspectos Conceptuales de la Modelación de Demanda

En el estudio PRUGAM se utilizó el enfoque de modelación en cuatro etapas para analizar la demanda de transporte urbano de la GAM.

7.2.1 Generación de Viajes

Los modelos de generación se desarrollaron a partir de información derivada de la encuesta de hogares específicamente diseñada para el proyecto.

Mediante regresión lineal múltiple se generaron ecuaciones de producción de viajes para tres propósitos de viaje (trabajo, estudio, otros):

$$P_t = \frac{\rho_a}{h} * (0,35983 * T_h + 0,04827 * I) \quad r^2 = 0,54 \quad (20)$$

$$P_e = \frac{\rho_a}{h} * (0,16222 * E_h + 0,02797 * I) \quad r^2 = 0,54 \quad (21)$$

$$P_o = \frac{\rho_a}{h} * (0,01112 * h + 0,01622 * I) \quad r^2 = 0,05 \quad (22)$$

donde:

P_t : producción de viajes con propósito trabajo [viajes/hogar en 2 horas pico a.m.]

P_e : producción de viajes con propósito estudio [viajes/hogar en 2 horas pico a.m.]

P_o : producción de viajes con otros propósitos [viajes/hogar en 2 horas pico a.m.]

P_a : población por zona para el año a [personas]

h : tamaño del hogar [personas/hogar]

T_h : trabajadores en el hogar [número de trabajadores/hogar]

E_h : estudiantes en el hogar [número de estudiantes/hogar]

I : ingreso familiar estandarizado [ingreso familiar/salario mínimo vigente]

Con base en la encuesta de hogares realizada se estimaron las proporciones de atracciones relativas por propósito de viaje de cada zona.

7.2.2 Distribución de Viajes

En esta etapa se construyó un modelo tipo gravedad, empleando las herramientas matriciales y macros de Emme2:

$$T_{ij}^p = P_i^p \frac{A_j^p f(C_{ij})}{\sum_{k=1}^n A_k^p f(C_{ik})} \quad (23)$$

donde:

T_{ij}^p : número de viajes de la zona i a la j para el propósito p

P_i^p : número de viajes producidos en la zona i para el propósito p

A_j^p : número de viajes atraídos en la zona j para el propósito p

C_{ij} : costo generalizado de viajar entre las zonas ij

$f(C_{ij})$: función de impedancia para viajar entre las zonas ij

La calibración de las funciones de impedancia del modelo de gravedad se realizó utilizando como insumo las matrices de viajes derivadas de la encuesta de hogares y los tiempos generalizados de viaje calculados entre cada par origen-destino. Los gráficos de las funciones de impedancia se presentan en la Figura 22.

7.2.3 Selección Modal

Para la distribución de viajes por modo de transporte, se calibró un modelo Logit Multinomial mediante el cual se podía determinar la probabilidad de utilizar cada modo, tanto transporte privado como público, para cada par origen-destino y según el propósito. Las funciones Logit por propósito de viaje, se presentan a continuación:

$$P(TP)_{trabajo} = \frac{e^{-11,32613X_1 - 11,90138X_2 + 13,12483}}{1 + e^{-11,32613X_1 - 11,90138X_2 + 13,12483}} \quad (24)$$

$$P(TP)_{estudio} = \frac{e^{-24,24499X_1 - 5,63014X_2 + 18,25250}}{1 + e^{-24,24499X_1 - 5,63014X_2 + 18,25250}} \quad (25)$$

$$P(TP)_{otros} = \frac{e^{-14,49212 - 4,85766X_2 + 13,90893}}{1 + e^{-14,49212X_1 - 4,85766X_2 + 13,90893}} \quad (26)$$

donde:

P: probabilidad de escogencia del transporte público

x1: relación entre los costos percibidos de viaje por transporte público con respecto al vehículo privado

x2: posesión vehicular de la zona de origen del viaje

1-P(TP): probabilidad de escogencia del vehículo privado

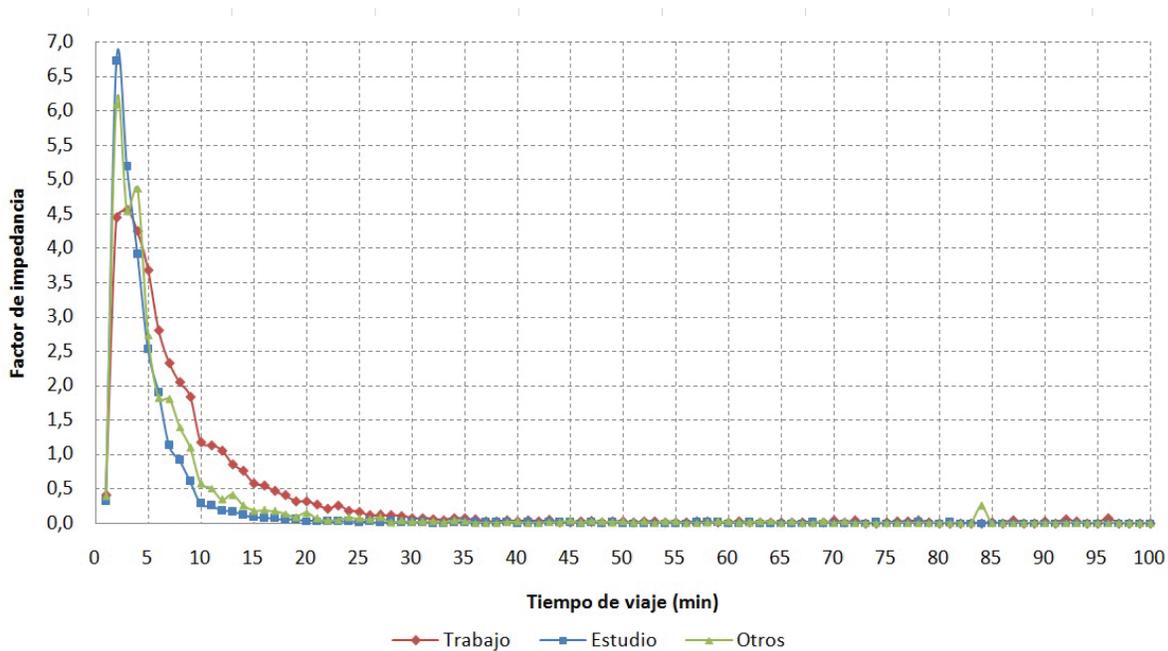


Figura 22. Funciones de impedancia por propósito de viaje (L.C.R. Logística S.A., 2007a)

Adicionalmente, se construyeron las curvas de diversión mediante las cuales se puede determinar la probabilidad de utilizar el autobús en función del costo relativo de este respecto al automóvil. Dichas curvas se ilustran en las Figuras 23, 24 y 25.

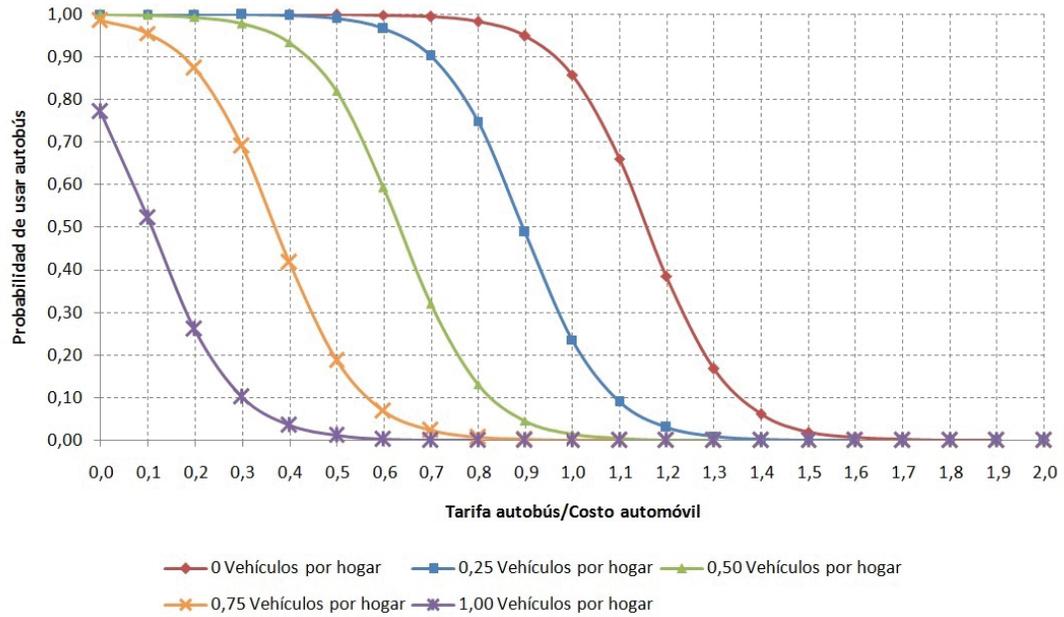


Figura 23. Curvas de diversión para propósito trabajo
(L.C.R. Logística S.A., 2007a)

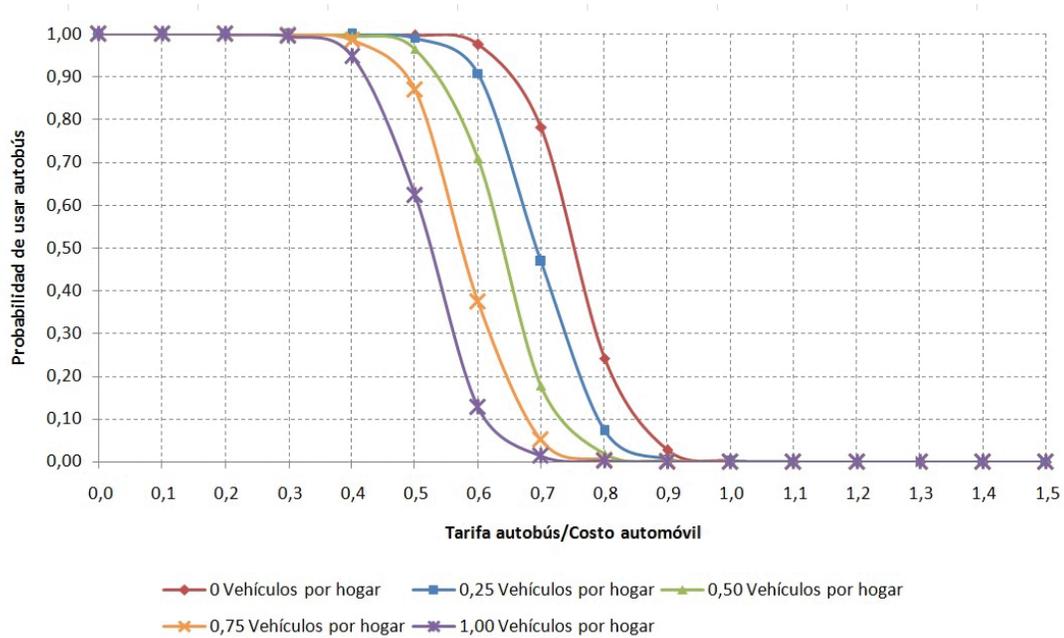


Figura 24. Curvas de diversión para propósito estudio
(L.C.R. Logística S.A., 2007a)

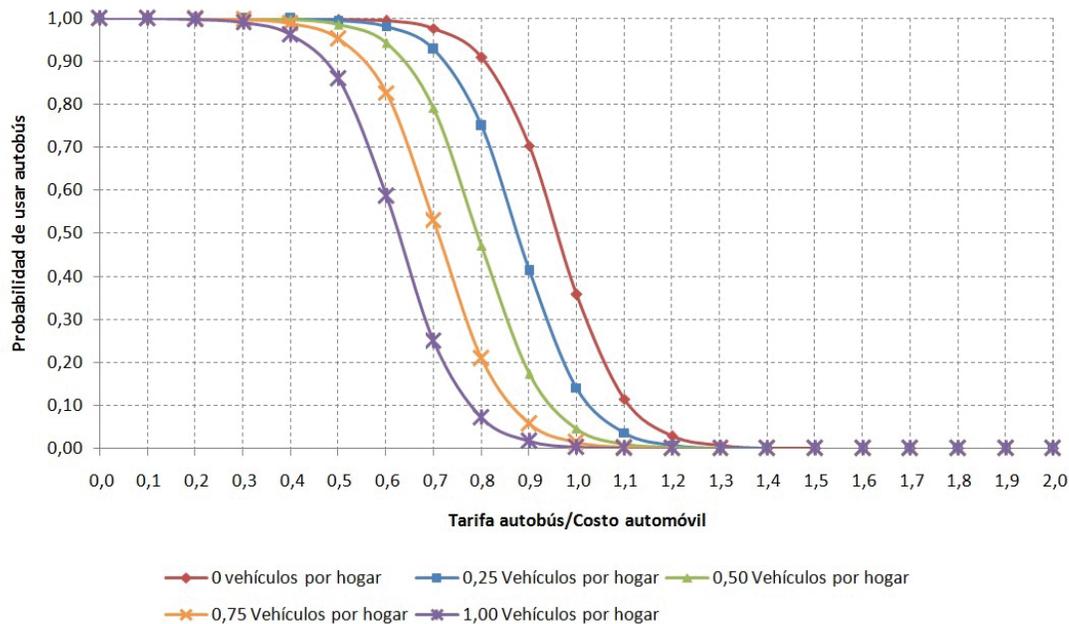


Figura 25. Curvas de diversión para otros propósitos
(L.C.R. Logística S.A., 2007a)

7.2.4 Asignación de viajes

Asignación de viajes en vehículo privado. Para la asignación de viajes en vehículo privado se utilizó el método de Equilibrio del Usuario. Este método busca, mediante diversas iteraciones de asignación de flujos a la red, converger en una condición de asignación de flujos para la cual no sea posible encontrar otro recorrido mediante el cual se reduzcan los tiempos de viaje entre un par origen-destino cualquiera.

Para cada enlace, la asignación utiliza una función de costo promedio, la cual permite determinar una relación entre el tiempo de viaje y el flujo en el enlace. La función, de tipo cónica, permite definir un factor que incrementa el tiempo de viaje en cada enlace según el flujo asignado, simulando el comportamiento de congestión en las vías. El cálculo del factor se muestra en la ecuación 27.

$$F_d = 2 + \sqrt{\alpha^2 \left[1 - \frac{V}{C}\right]^2 + \beta^2} - \alpha \left[1 - \frac{V}{C}\right] - \beta \quad (27)$$

donde:

F_d : factor de incremento del tiempo de viaje en el enlace

α : variable determinada por las condiciones geométricas de la vía

β : $(2\alpha-1)/(2\alpha-2)$

V/C: relación volumen capacidad del enlace

Los valores de alfa y beta dependen de la cantidad y tipo de carril, tal como se muestra en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Valores de alfa y beta de la función cónica, según cantidad y tipo de carriles

Carril	Alfa	Beta
2 carriles por sentido con separación física	2	1,50
1 carril por sentido	3	1,25
2 carriles por sentido	4	1,66
3 carriles por sentido	24	1,02

Sin embargo, en el proceso de ajustes del modelo desarrollado en el proyecto PRUGAM, se determinó que para relaciones V/C mayores a 1,05, la función no aumentaba el tiempo promedio del enlace de manera que desincentivara el uso de dichas rutas. Por esta razón, se le hizo una modificación a la función y se le agregó una asíntota a partir de las relaciones V/C mayores a 1,05. Las funciones correspondientes a las asíntotas, se reproducen en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Ecuaciones de asíntotas según tipo de carril para modificación de la función cónica

Carril	Asíntota
2 carriles por sentido con separación física	$-9,1+5*2,13 V/C$
1 carril por sentido	$-15,47+5*3,36 V/C$
2 carriles por sentido	$-22,33+5*4,68 V/C$
3 carriles por sentido	$-46,96+1*47,98 V/C$

El comportamiento de la función cónica modificada se ilustra en la Figura 26.

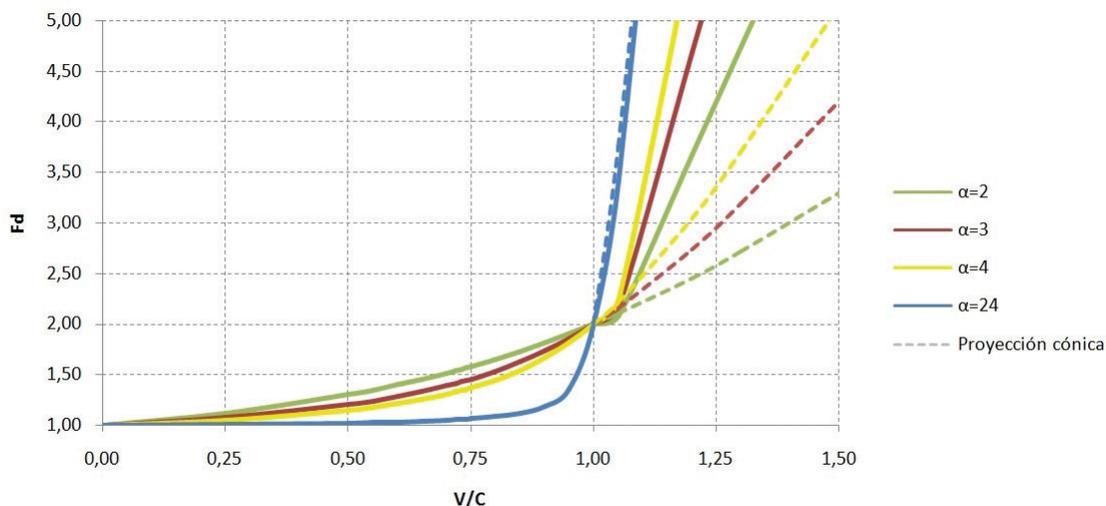


Figura 26. Función cónica modificada por tipo de carril
(Adaptado de L.C.R. Logística S.A., 2007a)

Asignación de viajes en transporte público. El proceso de asignación de viajes en transporte público se basa en el concepto de estrategias óptimas, el cual consiste en llegar al destino minimizando el costo total esperado. El costo esperado se estima sumando, para cada enlace, el tiempo de viaje ponderado por la probabilidad de viajar en el enlace a y el tiempo de espera en el nodo i ponderado por la probabilidad de viajar por el nodo i (Spiess, 1993).

Algunas de las variables asociadas al transporte público que fueron consideradas en la modelación, incluyen:

- Acceso desde el origen del viaje hacia la parada de transporte público.
- Espera por un vehículo.
- Viaje dentro del vehículo.
- Abordaje del vehículo.
- Desabordaje del vehículo.
- Caminado entre paradas de transporte público.
- Caminado de la parada de transporte público hasta el destino.

Las variables mencionadas fueron consideradas mediante un valor de tiempo o costo, y un peso que permite cuantificar el impacto de la variación del parámetro en la toma de decisiones de los usuarios. Para el caso de espera por un vehículo, el tiempo se determina mediante una distribución estadística que cuantifica el tiempo de arribo del primer vehículo de una ruta a una parada específica.

7.2.5 Recursos Tecnológicos

El programa utilizado para la modelación de demanda del PRUGAM, fue el sistema Emme2, el cual podía ser utilizado mediante una microcomputadora personal fija o portátil.

7.3 Proyectos Analizados

Mediante el modelo de demanda calibrado sobre la plataforma Emme2, en el estudio PRUGAM se analizaron diversas intervenciones de transporte en la GAM. A partir de modelaciones en varios años horizonte y usando indicadores macro derivados de esas modelaciones, todas las intervenciones fueron evaluadas desde el punto de vista económico mediante el cálculo de indicadores como el Valor Actual Neto Económico (VANE) y la Tasa Interna de Retorno Económico (TIRE).

Cuadro 19. Intervenciones propuestas en transporte público

Corto Plazo	Mediano y Largo Plazo
<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de rutas intersectoriales y troncales con alimentadoras 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación del tren interurbano e integración con todos los modos

(L.C.R. Logística S.A., 2007b)

Cuadro 20. Intervenciones propuestas en infraestructura vial de prioridad muy alta

Urbana	Interregional
<ul style="list-style-type: none"> • Radial Desamparados • Radial Heredia • Carretera El Coyol • Proyecto vial Hacienda Vieja-Plaza Víquez 	<ul style="list-style-type: none"> • Proyecto Cartago-San José • Cartago-Coris-San José • Anillo Periférico Norte • Anillo Periférico Sur

(L.C.R. Logística S.A., 2007b)

Cuadro 21. Intervenciones propuestas en infraestructura vial de prioridad alta

Urbana
<ul style="list-style-type: none"> • Radial Atenas-Ciudad Colón-Orotina • Radial Sarchí • Mejoramiento Ruta Nacional 102 (Moravia-Coronado) • Pasos a desnivel en las intersecciones de Circunvalación: Radial Alajuelita, Hatillo 1, La Bandera y Radial Guadalupe • Mejoramiento Rutas 218 y 401 (Tierra Blanca-Rancho Redondo) • Radial Atenas-Palmare

(L.C.R. Logística S.A., 2007b)

Cuadro 22. Intervenciones propuestas en infraestructura vial de prioridad media

Urbana	Regional
<ul style="list-style-type: none"> • Radial Escazú. • Anillo Metropolitano Sur Cartago • Mejoramiento Ruta Nacional 3 (vía antigua Heredia-Alajuela) • Anillo Metropolitano Norte Cartago • Radial San Antonio del Tejar • Vía Coyol-Rincón Chiquito 	<ul style="list-style-type: none"> • Circunvalación Alajuela • Circunvalación Norte San José

(L.C.R. Logística S.A., 2007b)

Cuadro 23. Intervenciones propuestas en infraestructura vial de prioridad baja

Arteria Urbana Menor	Colector Urbano
<ul style="list-style-type: none"> • Mejoramiento Ruta Nacional 10 (Paraíso-Cartago) • Conexión Heredia-Mercedes-Alajuela 	<ul style="list-style-type: none"> • Eje Interno Sur Cartago

(L.C.R. Logística S.A., 2007b)

7.4 Proyectos Analizados Después de PRUGAM

El modelo de demanda desarrollado como parte del estudio PRUGAM (2007-2008), fue posteriormente utilizado en diferentes estudios específicos de transporte en la GAM que involucraron análisis de demanda. La mayoría de estudios fueron realizados por empresas internacionales a las que el Ministerio de Obras Públicas y Transportes le cedió la base de datos y el modelo generado en el proyecto PRUGAM. Como ejemplos de estos estudios, se pueden citar:

- Kohon, J, Champin, J, Masjuán, F. *Estudio del Modo Ferroviario para la Implementación de un Sistema de Tren Rápido de Pasajeros (TRP) para el Gran Área Metropolitana*

(GAM) de Costa Rica. Banco Interamericano de Desarrollo BID. San José, Costa Rica. Julio, 2016. (Consultores de Chile y Argentina).

- Consorcio EPYPSA-SIGMA GP. *Apoyo al modelo general de sectorización de transporte público de San José, Costa Rica.* Banco Interamericano de Desarrollo BID. San José, Costa Rica. Febrero, 2015. (Consultores de Colombia y España).
- INECO. *Estudio de Factibilidad para la implantación de un Sistema de Transporte Ferroviario en el Área Metropolitana de San José.* San José, Costa Rica. Junio, 2013. (Consultores de España).
- INECO. *Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035.* Ministerio de Obras Públicas y Transportes. San José, Costa Rica. Setiembre, 2011. (Consultores de España).

VIII. DEL ÁMBITO PÚBLICO-PRIVADO HACIA EL ÁMBITO ACADÉMICO: PROYECTO DE MODELACIÓN DE DEMANDA DE TRANSPORTE-UNIVERSIDAD DE COSTA RICA (MDT-UCR)

En julio de 2016, la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (EIC-UCR) y el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), iniciaron el proyecto de investigación "Modelo de Demanda de Transporte Urbano en la GAM" (MDT-UCR). Este artículo fue elaborado como parte de ese proyecto, mientras todas las actividades de investigación del mismo, estaban en desarrollo.

8.1 Aspectos Generales del Estudio

El objetivo principal del proyecto de investigación consistió en desarrollar un modelo de demanda de transporte urbano de la GAM en la plataforma tecnológica TransCAD. Los objetivos específicos fueron:

- Estructurar una plataforma de análisis del transporte urbano de la GAM usando el sistema TransCAD, previamente adquirido por el LanammeUCR.
- Calibrar dicha plataforma para las condiciones existentes de la GAM.
- Capacitar al personal del LanammeUCR en aspectos de modelación de demanda de transporte urbano.
- Aplicar la herramienta de modelación para el análisis de proyectos concretos en Costa Rica.

- (v) Fortalecer la formación de los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica en el uso de modelos complejos de demanda de transporte.

En el desarrollo general del proyecto de investigación, primero se requirió migrar la base de datos y ecuaciones derivadas del estudio PRUGAM, fundamentadas en los formatos de Emme2, a la plataforma TransCAD. Posteriormente se realizó un proceso de calibración, de modo que el nuevo modelo calibrado reflejara los resultados de Emme2 para diferentes años horizonte. Luego se procede a revisar y actualizar toda la base de datos, tanto a nivel de red vial, como de rutas de transporte público, datos socioeconómicos, ecuaciones de las diferentes etapas del modelo, etc., con base en información actualizada según las condiciones de la GAM en 2017. El proyecto se encontraba en esta etapa a la fecha de elaboración del presente artículo.

Dentro de las actividades del proyecto de investigación se incluye la aplicación del modelo calibrado al análisis de ciertas intervenciones específicas de transporte en la GAM, así como la preparación de material de apoyo básico para las labores académicas y de capacitación dentro de la Universidad de Costa Rica. Está previsto que el proyecto de investigación culmine con actividades de capacitación sobre el tema de modelación de demanda de transporte urbano.

8.2 Aspectos Conceptuales

Para realizar el análisis de la demanda de transporte urbano, el modelo de demanda derivado del proyecto MDT-UCR utiliza el enfoque de cuatro etapas. Las primeras tres etapas, correspondientes a la generación de viajes, distribución de viajes y selección modal, están basadas en las funciones determinadas en el proyecto PRUGAM. Por otra parte, producto del cambio en el recurso tecnológico, en la cuarta etapa (asignación de viajes) se utilizan métodos de asignación diferentes a los del proyecto PRUGAM, tanto para transporte público como para vehículo privado.

8.2.1 Asignación de Viajes

Asignación de viajes en vehículo Privado.

En el modelo MDT-UCR se utiliza el método “Equilibrio del Usuario Conjugado”, el cual se fundamenta en el algoritmo estándar “Equilibrio del Usuario”, pero con una convergencia más rápida. Para ello, se utiliza un proceso iterativo basado en el método de Frank Wolfe (FW) o el método biconjugado descendiente de Frank Wolfe (BFW), para así alcanzar una solución que converja. Dicha convergencia está orientada por el mismo principio que históricamente se ha utilizado a nivel teórico: el equilibrio se alcanza cuando ningún usuario puede mejorar su tiempo de viaje al cambiar de ruta.

La representación del comportamiento de los enlaces conforme varían los flujos, se establece a partir de las funciones cónicas originales y no las modificadas en el proyecto PRUGAM, pues en el proceso de asignación, el *software* TransCAD no permite ingresar ecuaciones modificadas por el usuario. Este programa ya tiene incorporadas diferentes bibliotecas de enlace dinámico (DLL) para la asignación de flujos, las que no son fácilmente modificables.

Asignación de viajes en transporte Público

En el modelo MDT-UCR se utiliza el método “Equilibrium Pathfinder”, el cual consiste en una generalización mejorada del método de estrategias óptimas, permitiendo además considerar el comportamiento de zonas de parqueo para intermodalidad (“Park and Ride”), así como la capacidad de las rutas de transporte público y de los tramos peatonales.

Adicionalmente, con el modelo MDT-UCR se pueden asignar múltiples clases de usuarios de forma simultánea, lo que permite asignar viajes en vehículo privado y en transporte público al mismo tiempo, de esta forma se puede analizar, de manera más apegada a la realidad, la congestión por agotamiento de la capacidad de las vías. El algoritmo utiliza una función de penalización del costo generalizado, de modo que aumenta el costo del tramo de red conforme aumenta la congestión.

8.2.2 Recursos Tecnológicos

El *software* TransCAD, utilizado como plataforma en el modelo MDT-UCR, consiste en un conjunto de programas de modelación de demanda de transporte urbano integrado con un sistema de información geográfica (SIG). Tiene incorporadas las cuatro etapas tradicionales de modelación de demanda de transporte urbano: generación de viajes, distribución de viajes, selección modal y asignación de flujos. La modelación puede realizarse mediante una computadora portátil o de escritorio convencional, sin embargo, la densidad de la red y la complejidad de los análisis pueden implicar equipos con altas capacidades de procesamiento.

El sistema TransCAD cuenta con una interfaz gráfica que permite al usuario acceder a cada una de las etapas del proceso de modelación. Para cada etapa se encuentran ecuaciones estándar típicas asociadas (ej. regresión lineal para generación de viajes), de manera que el usuario únicamente requiere incorporar los coeficientes de las ecuaciones correspondientes. Si no se tienen ecuaciones calibradas, se podrían elegir, de tablas ya incorporadas al sistema TransCAD, valores típicos según las diferentes características demográficas de la zona. Esto, sin embargo, no es recomendable pues tales valores corresponden con las características particulares de las ciudades de Estados Unidos.

Por medio de un lenguaje propio del sistema TransCAD (GISDK), se pueden programar, de forma parecida a como se hace en

Emme2, las diferentes etapas del modelo completo de demanda de transporte urbano, de manera que las diferentes etapas de cálculo se pueden completar a través de comandos y macros. La elaboración de macros no solo permite al usuario tener mayor flexibilidad durante el proceso de modelación, sino además determinar y usar ecuaciones particulares específicas para el área de estudio bajo análisis. Es esta facilidad la que permitió incorporar las ecuaciones desarrolladas y calibradas en el proyecto PRUGAM, al modelo MDT-UCR en plataforma TransCAD.

IX. RESUMEN DE LOS MODELOS ANALIZADOS

La modelación de la demanda de transporte urbano, a pesar de iniciar en la década de los 50, ha mantenido una estructura similar en la actualidad, fundamentada en los mismos supuestos, pero con modificaciones a nivel de procesamiento numérico y algoritmos matemáticos. Los avances tecnológicos han permitido aproximar métodos de forma más ágil y precisa, tomando en consideración cada vez más variables y factores de ajuste que permiten modelar de forma cada vez más apegada a las condiciones reales. En el Cuadro 24 se resumen los métodos de modelación utilizados y las variables consideradas en cada uno de los estudios incluidos en el presente artículo.

Cuadro 24. Resumen de las características del modelo de cuatro etapas utilizado en los estudios CATS, ETAMSJ, ETUGAM, PRUGAM y MDT-UCR.

Estudio	Etapas de modelación			
	Generación	Distribución	Selección Modal	Asignación
CATS	Producciones: Viajes internos, externos y vehículos pesados. Variables: posesión vehicular y área residencial neta. Atracciones: Tasas de atracción según uso del suelo (residencial, comercial, manufactura, transporte, instituciones públicas y espacio público)	Distribución basada en probabilidad de selección de un destino según propósito, con costo en términos del tiempo de viaje.	Tasas de producción de viajes en transporte público, según el modo (autobús y tren). Los viajes en vehículo privado se calcularon como la resta del total de viajes menos los viajes en transporte público, dividida entre la ocupación media vehicular.	Vehículo privado: Método "Todo o Nada". Transporte público: Método "Todo o Nada".
ETAMSJ	Producciones: Viajes por propósito (trabajo, escuela, otros) y en vehículo de carga. Variables: trabajadores, estudiantes y personas por hogar, ingreso y cantidad de empleos en industrias y construcción. Atracciones: Tasas de atracción por propósito según variables: empleos en industria, construcción, comercio y servicio y matrícula escolar.	Modelo de Gravedad, con costo en términos del tiempo de viaje y factor de ajuste basado en variables socioeconómicas.	Tasas de producción de viajes por propósito para los viajes en vehículo privado Variables: posesión vehicular, ingreso, total de empleos y matrícula escolar. Los viajes en transporte público se calcularon como la resta del total de viajes menos los viajes en vehículo privado.	Vehículo privado: Método "Todo o Nada". Transporte público: Método "Todo o Nada".
ETUGAM (SIAT-GAM)	Producciones: Viajes por propósito (trabajo, estudio y otros). Variables: ingreso, trabajadores, estudiantes y personas por hogar. Atracciones: Tasas de atracción segmentadas por zona y propósito (trabajo, estudio y otros)	Modelo de Gravedad, con funciones de impedancia por propósito y costo en términos del tiempo de viaje.	Modelo Logit segmentado por propósito. Variables: tarifa del transporte público y costo de operación del vehículo.	Vehículo privado: Método "Todo o Nada" con restricción de capacidad. Transporte público: Método "Todo o Nada"
PRUGAM	Producciones: Viajes por propósito (trabajo, estudio y otros). Variables: población, ingreso, trabajadores, estudiantes y personas por hogar Atracciones: Tasas de atracción segmentadas por zona y propósito (trabajo, estudio y otros)	Modelo de Gravedad, con funciones de impedancia por propósito y costo en términos del tiempo de viaje.	Modelo Logit segmentado por propósito. Variables: posesión vehicular y relación de costo percibido de transporte público entre la de vehículo privado.	Vehículo privado: Método "Equilibrio del Usuario" Transporte público: Método "Estrategias óptimas"
MDT-UCR	Producciones: Mismas que PRUGAM con valores de población actualizados. Atracciones: Mismas tasas de atracción que PRUGAM	Modelo de Gravedad utilizado en PRUGAM	Modelo Logit utilizado en PRUGAM	Vehículo privado: Método "Equilibrio del Usuario" conjugado. Transporte público: Método "Equilibrium Pathfinder"

X. CONCLUSIONES

10.1 Evolución de Aspectos Conceptuales

- Los fundamentos de la metodología de modelación de la demanda de transporte urbano surgieron en los años 50 en las ciudades de Detroit y Chicago (CATS). Casi siete décadas después, esos mismos fundamentos orientan el proceso internacionalmente aceptado de modelación de demanda de transporte urbano, con la importante diferencia de que ahora se cuenta con mucho mejores recursos tecnológicos, lo que permite análisis más dinámicos y exhaustivos.
- El primer estudio que incluyó modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica, llamado ETAMSJ, fue realizado en los años 1973-1976 por un consorcio de dos empresas extranjeras, en tanto el primer modelo de demanda de transporte urbano para la GAM, implantado y calibrado por consultores nacionales, corresponde a los años 1989-1990. A este modelo se le denominó SIATGAM.
- Respecto a la producción de viajes, en el estudio CATS se segmentaron los viajes de manera genérica en internos y externos, así como los realizados por vehículos pesados. El cálculo de la producción de viajes se basó en el uso de suelo y la posesión vehicular. En el caso de Costa Rica, a partir del ETAMSJ se asoció la producción de viajes a propósitos de tipo trabajo, estudio y otros, dependientes de variables como el ingreso, cantidad de trabajadores, estudiantes y miembros en el hogar. Aunque las variables independientes seleccionadas han variado como resultados de las encuestas de hogares realizadas en diferentes momentos, en Costa Rica la segmentación por los propósitos de viaje (trabajo, estudio y otros) se ha mantenido hasta la actualidad.
- En el estudio CATS las atracciones de viajes se calcularon a partir de tasas de atracción por uso de suelo, asociando viajes a unidades de área. Esto cambió en el ETAMSJ, donde se generaron ecuaciones con variables como la cantidad de empleos en industria, construcción, comercio y servicio, así como la matrícula escolar, y se segmentaron las atracciones de viajes por propósito (trabajo, estudio, otros) y viajes en vehículo de carga. A partir del desarrollo del SIATGAM (1989-1990), en Costa Rica se utilizaron porcentajes de atracción segmentados por zona y propósito.
- El procedimiento de distribución de viajes del estudio CATS, fundamentado en la probabilidad de selección de un destino, según el propósito, utilizando el tiempo de viaje como costo por ruta, estableció las bases del conocido “Modelo de Gravedad”, utilizado posteriormente, con algunas variantes, en el ETAMSJ, ETUGAM, PRUGAM y en el MDT-UCR.
- Para la distribución modal, las estimaciones iniciales del CATS consideraban supuestos tales como una cantidad constante de viajes en transporte público a través del tiempo y una distribución según el origen-destino de los viajes asociada al modo de transporte masivo correspondiente (tren o autobús), condiciones mediante las cuales se lograron segmentar los viajes por modo (autobús, tren y vehículo privado). En el caso del ETAMSJ, el proceso de distribución modal se basó en ecuaciones y gráficos que permitieron correlacionar los viajes a nivel de modo y propósitos. Ya para los estudios ETUGAM, PRUGAM y MDT-UCR, la norma es el uso de modelos tipo “Logit” para estimar, en función de los costos relativos de los modos, la probabilidad de uso de cada modo de transporte.
- Para la asignación de viajes en vehículo privado, en el CATS se utilizó el método “Todo o Nada” para realizar la asignación, el cual no consideraba la capacidad de las calles en el algoritmo de asignación. En el ETUGAM se utilizó el método de asignación “Todo o Nada con restricción de capacidad”, el cual ya tomaba en cuenta la capacidad de las calles. Posteriormente, en el PRUGAM se utilizó un algoritmo complejo de aproximación al método “Asignación por equilibrio”, en el cual se incorporaban funciones de costos por enlace de la red vial. En el estudio MDT-UCR se utiliza una aproximación más precisa del método “Asignación por equilibrio”, el cual permite una convergencia aún más rápida del algoritmo de asignación respecto al usado en PRUGAM.
- En la asignación de viajes en transporte público, históricamente las mayores variaciones en los algoritmos han sido las más recientes. Tanto en el CATS como el ETAMSJ y el ETUGAM se utilizó el método de asignación “Todo o Nada”, aunque en el ETUGAM ya era posible utilizar costos generalizados mezclando tiempos y tarifas de las rutas de transporte público. Los saltos cualitativos y cuantitativos más importantes ocurrieron en el PRUGAM, donde el método de “Estrategias Óptimas” utilizado en la plataforma Emme2, permitía incorporar múltiples variables de las rutas de transporte público en el proceso de asignación: velocidad, frecuencia, tarifa, caminado, espera, integración tarifaria, etc. En el MDT-UCR, con el método “Equilibrium Pathfinder” en la plataforma TransCAD, la gama de variables que es posible utilizar ha aumentado aún más, lo que permite obtener no solo resultados más cercanos a la realidad, sino también analizar políticas más complejas de integración intramodal e intermodal.

10.2 Impactos de los Cambios Tecnológicos

- Desde su concepción en la década de los años 50, el modelo de cuatro etapas ha evolucionado de la mano de las nuevas tecnologías para predecir la demanda de viajes de forma cada vez más eficiente y eficaz. Si bien algunos de los elementos no han sufrido muchos cambios desde su origen, como el modelo de gravedad, el uso de nomogramas y gráficos generales se encuentran prácticamente superados, gracias a las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías para realizar, de forma rápida y precisa, cálculos y modelos matemáticos complejos.
- Las herramientas de modelación de demanda de transporte urbano existentes en 2017, como Emme2 y TransCAD, permiten realizar modelaciones de diferentes escenarios y años horizonte de manera relativamente sencilla, comparada con sus programas antecesores.
- Las mejoras en los programas de modelación de transporte urbano han permitido una caracterización más detallada de cada uno de los modos de transporte involucrados en los análisis, así como el estudio de sus dependencias e interacciones. Adicionalmente, la reducción en los tiempos de simulación permite una mayor flexibilidad para modificar los parámetros que permiten simular la realidad de forma más precisa.
- El avance en los recursos técnicos ha permitido realizar modelaciones cada vez más dinámicas, de manera que se pueden retroalimentar los parámetros de entrada con base en los resultados obtenidos por los modelos. Esto permite evaluar no solo escenarios estáticos en el futuro, sino también los comportamientos esperados producto de cambios en las variables analizadas, al modificar los diferentes parámetros de modelación. Como resultado, el modelador puede obtener un amplio espectro de posibilidades, en lugar de un único resultado por cada escenario analizado.

XI. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean manifestar su profundo agradecimiento a la Unidad de Seguridad Vial y Transportes del Programa de Infraestructura del Transporte del LanammeUCR, por facilitar el equipo necesario y las condiciones logísticas, así como por su colaboración general, para el desarrollo del proyecto de investigación “Modelo de Demanda de Transporte Urbano en la GAM” (MDT-UCR).

XII. REFERENCIAS

- Allan M. Voorhees & Associates, Inc., PADCO, Inc. (1976). *Estudio de Transporte del Área Metropolitana de San José*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. San José, Costa Rica.
- Carroll, J. (1959). *Chicago Area Transportation Study. Volume I: Survey Findings*. Illinois, USA.
- Carroll, J. (1960). *Chicago Area Transportation Study. Volume II: Data Projections*. Illinois, USA.
- Castro, L. (1989). *Software para Modelación de Demanda de Transporte, Caracterización y Zonificación del Área de Estudio, Cálculos Estadísticos Preliminares*. Dirección General de Planificación, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. San José, Costa Rica.
- Castro, L. (1991). *Estudio del Transporte Urbano del Gran Área Metropolitana*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. San José, Costa Rica.
- Castro, L. (1992). *Plan Maestro del Transporte Urbano en el Gran Área Metropolitana*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo. (2005). *Revisión y Actualización del Límite de la Gran Área Metropolitana*. San José, Costa Rica.
- L.C.R. Logística S.A. (2007a). *Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM. Tomo 1 Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana: Modelo de Demanda-Oferta de Transporte Urbano en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica*. Informe Final. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. San José, Costa Rica.
- L.C.R. Logística S.A. (2007b). *Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM. Tomo 2 Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana: Componente Movilidad y Transporte*. Informe Final. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. San José, Costa Rica.
- L.C.R. Logística S.A. (2003). *Calibración del Modelo de Demanda de Transporte Emme 2 para la Gran Área Metropolitana de Costa Rica*. Consejo Nacional de Concesiones, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. San José, Costa Rica.
- Plummer, A. (2010). *The Chicago Area Transportation Studies: Creating the First Plan (1955-1962)*.
- Spiess, H. (1993). *Transit Equilibrium Assignment based on Optimal Strategies: An Implementation in EMME/2*. EMME/2 Support Center. Aegerten, Suiza.