

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



ESTIMACION DE UNA MATRIZ ORIGEN-DESTINO
A PARTIR DE AFOROS VEHICULARES

Por:

HILDA LAURA BOCANEGRA LOPEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con especialidad en:
Ingeniería de Tránsito

CD. UNIVERSITARIA

FEBRERO DE 2005.

TM

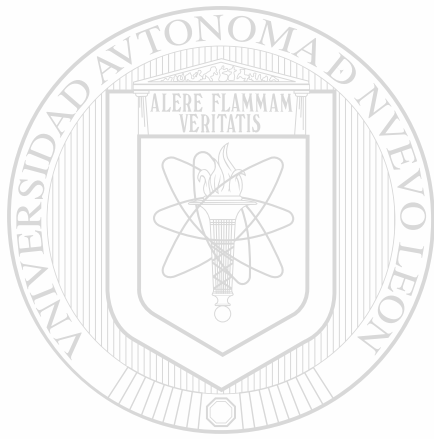
HD373

.M6

B6

2005

c.1



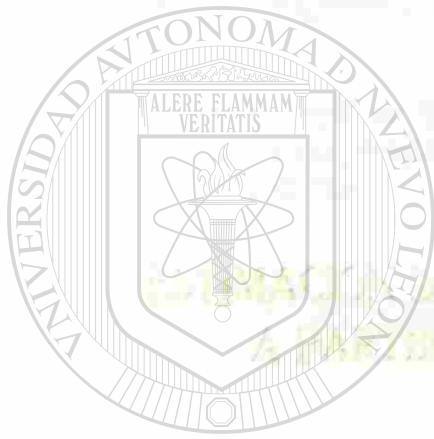
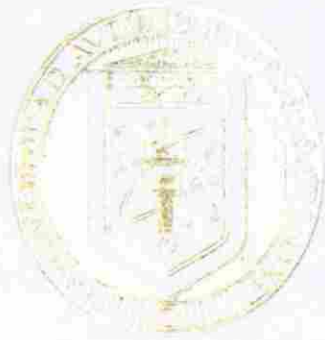
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Por:
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
HILDA LAURA BUCANEGRA LOPEZ

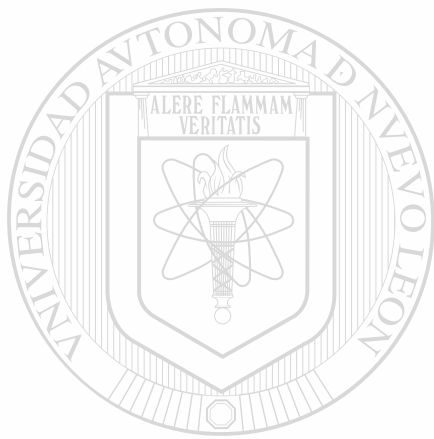
®

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con especialidad en
Ingeniería de Tránsito

C. UNIVERSITARIA

FEBRERO 2014

TM
HE373
.M6
B6
2005



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





COMPROBANTE DE CORRECCION

Tesista: HILDA LAURA BOCANEGRA LÓPEZ

Tema de la tesis: ESTIMACIÓN DE UNA MATRIZ
ORIGEN-DESTINO, A PARTIR DE AFOROS VEHICULARES.

Este documento certifica la corrección (DEFINITIVA)
 del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográficos,
 metológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

NINGUNA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Nombre y firma de quien corrigió:


ARG. RAMON LONGORIA RAMIREZ


ING. JUSITNO CÉSAR GONZÁLEZ ALVAREZ M.en I.

Ciudad Universitaria, a _____ de _____ del 2004.



Sanfandila, Qro., 1° de octubre de 2004

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

C. M. en C. RAFAEL GALLEGOS LÓPEZ,
Coordinador de la Maestría en Ingeniería de Tránsito,
Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Nuevo León,
Presente.

Por medio del presente hago constar que la **C. ING. HILDA LAURA BOCANEGRA LÓPEZ**, alumna de esa Universidad Autónoma de Nuevo León, concluyó bajo mi dirección en la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte, su trabajo de tesis titulado *"Estimación de una matriz origen-destino a partir de aforos vehiculares"*. Por lo anterior, agradeceré a usted iniciar los trámites para la titulación.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente,
El Coordinador

DR. ALBERTO MENDOZA DÍAZ



San Nicolás de los Garza, N.L., 13 de diciembre del 2004.

C. PRESIDENTE DEL COMITÉ DE MAESTRÍA,
Presente.

De acuerdo a lo que se me informa que se me ha asignado como Evaluador de la tesis "**Estimación de una Matriz Origen-Destino a partir de Aforos Vehiculares**", presentada por la **CHILITA LAURA Bocanegra López**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería de Tránsito, comunico a usted que se ha realizado la revisión y la evaluación correspondientes a la misma, y después de haber tomado en cuenta y corregido las observaciones pertinentes, se le considera como **APROBADA**.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Sin otro particular de momento,

ATTENTAMENTE,


M.C. JOSEFINA ELENNA PEREA VALLEAL.

San Nicolás de los Garza, N.L., 13 de diciembre del 2004.

C. PRESIDENTE DEL COMITÉ DE MAESTRÍA,
Presente.

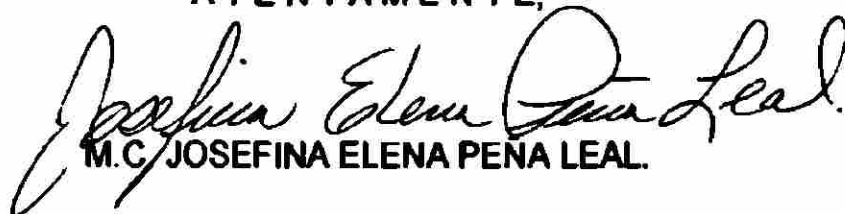
De acuerdo a oficio donde se me informa que se me ha asignado como Evaluador de la tesis "*Estimación de una Matriz Origen-Destino a partir de Aforos Vehiculares*", presentada por la C Hilda Laura Bocanegra López, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería de Tránsito, comunico a usted que se ha realizado la revisión y la evaluación correspondientes a la misma, y después de haber tomado en cuenta y corregido las observaciones pertinentes, se le considera como **APROBADA**.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Sin otro particular de momento,

ATENTAMENTE,


M.C. JOSEFINA ELENA PEÑA LEAL.

San Nicolás de los Garza, N.L, Enero 12 del 2005.

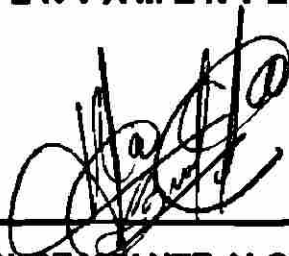
**Presidente del Comité de Maestría
P r e s e n t e .-**

En atención al oficio, en el que se me informa que he sido designado como EVALUADOR de la tesis "ESTIMACIÓN DE UNA MATRIZ ORIGEN-DESTINO A PARTIR DE AFOROS VEHICULARES", que presenta la Ing. Hilda Laura Bocanegra López, como requisito parcial para obtener el Grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería de Tránsito, comunico a usted que he revisado y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como APROBADA.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

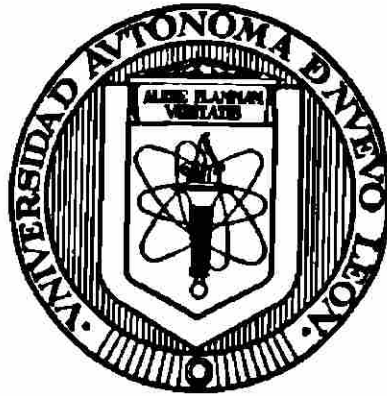
ATENTAMENTE



M.C. RITA BUSTAMANTE ALCANTARA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ESTIMACIÓN DE UNA MATRIZ ORIGEN-DESTINO
A PARTIR DE AFOROS VEHICULARES**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Por: DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

HILDA LAURA BOCANEGRA LÓPEZ

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con especialidad en
Ingeniería de Tránsito.**

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Febrero de 2005

Agradecimientos

Al Dr. Alberto Mendoza Díaz, quien con sus conocimientos, esfuerzo, dedicación y cariño me dirigió y asesoró durante la elaboración de esta tesis.

A cada uno de los integrantes de la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte, del Intituto Mexicano del Transporte, por su infinito apoyo y consejos brindados; en especial, a *Emilio Abarca Pérez* y *Francisco L. Quintero Pereda*.

Al Instituto Mexicano del Transporte, por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de postgrado y la realización de esta tesis.

Al Ing. Oscar Moreira Flores, director de la Facultad de Ingeniería Civil (F.I.C.) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (U.A.N.L.), por el apoyo en el transcurso de los estudios de posgrado.

Al M.C. Rafael Gallegos López, coordinador de la maestría, por todos los conocimientos brindados y el apoyo incondicional durante los estudios de posgrado y la realización de esta tesis.

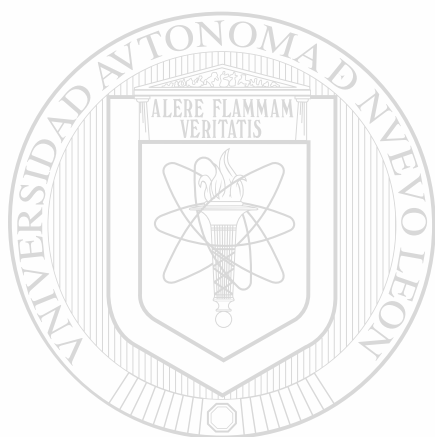
A cada uno de los *catedráticos* que me proporcionaron, con su esfuerzo y dedicación, los conocimientos adquiridos durante mis estudios en la maestría.

Al Instituto de Ingeniería Civil (I.I.C.) de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por brindarme nuevamente el apoyo para seguir con mis estudios de posgrado.

A cada uno de mis compañeros de generación de la maestría, por su apoyo y comprensión.

Dedicatoria

A mis padres *Raúl y María de Jesús:*



Con mi eterno cariño y agradecimiento por todo el apoyo que me brindaron durante mis estudios y realización de esta tesis . . . sabiendo de antemano que no los iba a defraudar e iba a aprovechar cada uno de los conocimientos que me han brindado durante toda mi vida . . .

Siempre con ustedes . . .

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

A mis hermanos *Héctor, Hugo, Gloria, Marú, Olga y Benjamín* y a mi eterna amiga *Tere:*

Por darme su amor, comprensión y confianza.

Resumen Autobiográfico

Hilda Laura Bocanegra López

**Candidato para el grado de
Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería de Tránsito**

Tesis:

**ESTIMACION DE UNA MATRIZ ORIGEN-DESTINO
A PARTIR DE AFOROS VEHICULARES**

Campo de Estudio: Planeación de sistemas de transporte.

Biografía:

Nacido en: Monterrey, Nuevo León el día 10 de abril de 1980.

Hijo del Sr. Raúl Bocanegra Ramos y la Sra. María de Jesús López Macías

Educación: Egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Grado obtenido: Ingeniero Civil.

Experiencia Profesional:

- **Servicios y estudios de ingeniería, BCP Servicios Administrativos, S.A. de C.V.**
- **Investigador para estabilización de suelos, Instituto de Ingeniería Civil, U.A.N.L.**
- **Colaborador para la realización de estudios de ingeniería de tránsito, Instituto de Ingeniería Civil, U.A.N.L.**

Resumen Técnico

Título del estudio:

ESTIMACIÓN DE UNA MATRIZ ORIGEN-DESTINO A PARTIR DE AFOROS VEHICULARES

Área de estudio: Planeación de sistemas de transporte

Autor: Hilda Laura Bocanegra López

Número de páginas: 160

Fecha de graduación: Febrero de 2005

**Candidato para el grado de
Maestro en Ciencias, con especialidad en Ingeniería de Tránsito**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]

Propósito, contribuciones y conclusiones:

Se analizan las metodologías existentes para la estimación de matrices O-D a partir de aforos, seleccionándose una de ellas, la cual se aplica a un ejemplo sencillo así como a un caso práctico relacionado con los flujos de libramiento y acceso de pasajeros y vehículos al Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM). La importancia de este trabajo reside en que, por cuestiones económicas, en el país se privilegia la medición de aforos a la recopilación de información O-D, por lo cual, este trabajo hará posible sacar un mayor provecho a los aforos existentes, permitiendo generar la información O-D requerida para llevar a cabo una planeación más adecuada del tránsito y del transporte.

DIRECTOR DE TESIS: *Dr. Alberto Mendoza Díaz*

Índice de Contenido

Capítulo	Página
1	Introducción 1
1.1	Aspectos preliminares 3
1.1.1	Utilidad de los estudios O-D 3
1.1.2	Métodos para realizar estudios O-D 5
1.1.3	Estimación de la matriz O-D a partir de aforos vehiculares 9
1.1.4	Modelos de asignación más comunes 13
1.1.5	Programas computacionales para la planeación del transporte 15
1.1.6	Evolución urbana y del transporte en el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) 23
1.2	Objetivos y Metas 25
1.3	Hipótesis 26
1.4	Metodología 26
1.5	Alcances 27
1.6	Utilidad 28
2	Antecedentes 30
2.1	Elección de ruta y estimación de matrices 33
2.2	Calibración de un modelo de demanda de viajes a partir de aforos vehiculares 34
2.3	Estimación de matrices a partir de aforos vehiculares 37
2.4	Aforos vehiculares y estimación de matrices 47

Capítulo	Página
2.4.1 Independencia	48
2.4.2 Inconsistencia	49
2.5 Extensiones	53
2.5.1 Asignación no-proporcional	53
2.5.2 Métodos heurísticos	55
3 Selección de la Metodología	57
3.1 Bases tradicionales para la modelación del tránsito	58
3.2 Método SPME	62
3.2.1 El principio del SPME	62
3.2.2 Ejemplos de calculo usando SPME	66
3.2.3 Elección del modelo de asignación dentro del SPME	70
3.2.4 Discusión sobre el SPME	72
3.3 Método MPME	74
3.3.1 Principios	74
3.3.2 Algunos ejemplos de cálculo	76
3.3.3 Algunos características del MPME	79
3.4 Metodología seleccionada	80
3.5 Ejemplos del SPME utilizando TransCAD	82
3.5.1 Procedimiento general	82
3.5.2 Ejemplo de la Figura 3.1	91
3.5.3 Ejemplo de la Figura 3.2	93
4 Aplicación a un caso práctico	95
4.1 Descripción de los elementos básicos	96

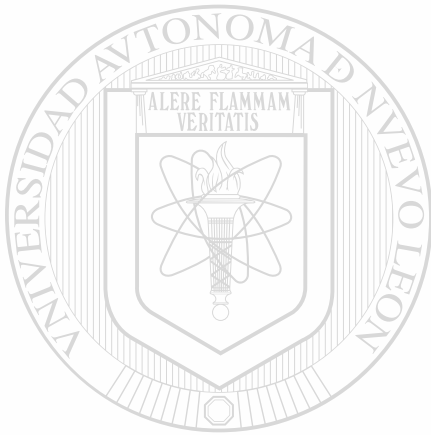
Capítulo	Página
4.1.1 La red	96
4.1.2 Los aforos	99
4.1.3 La matriz semilla	101
4.2 Calibración de la matriz semilla	109
5 Conclusiones y recomendaciones	113
Referencias	116
Anexo A Algoritmos de camino óptimo	120
Anexo B Número de identificación de centroides	127
Anexo C Matriz semilla	131

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Índice de Figuras

Figura	Página
2.1 Red simple con aforos vehiculares	39
2.2 Aforos dependientes	48
2.3 Inconsistencias en los aforos	50
2.4 Métodos de asignación para estimar matrices O-D	54
2.5 Métodos para estimar matrices O-D a partir de aforos vehiculares	56
3.1 Red con aforos vehiculares inconsistentes	66
3.2 Otra red con aforos vehiculares inconsistentes	69
3.3 Red con aforos vehiculares consistentes	70
3.4 Comparación del ME2, SPME y MPME	73
3.5 Otra red con aforos vehiculares inconsistentes	78
3.6 Diagrama de la metodología seleccionada	81
4.1 Representación en TransCAD del modelo de red del AMCM	98
4.2 Representación en TransCAD de los 38 sitios de aforo seleccionados para el área de estudio	101
4.3 Representación en TransCAD de las 10 estaciones seleccionadas para el área de estudio	105
4.4 Representación en TransCAD de los 36 pares O-D con mayor flujo vehicular en ambos sentidos, obtenidos de la matriz semilla	107
4.5 Representación gráfica de los flujos resultantes de la asignación de la matriz semilla	108
4.6 Representación gráfica de los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación de la matriz semilla Vs. los valores de aforos	109

Figura	Página
4.7 Representación en TransCAD de los 75 pares O-D con mayor flujo vehicular en ambos sentidos, obtenidos de la matriz estimada	110
4.8 Representación gráfica de los flujos resultantes de la asignación de la matriz estimada	111
4.9 Representación gráfica de los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación de la matriz estimada Vs. los valores de aforos	112



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Índice de Tablas

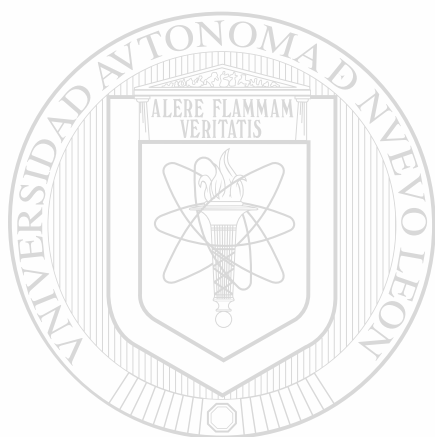
Tabla	Página
2.1 Cálculo de seis matrices factibles	40
2.2 Algoritmo multi-proporcional aplicado a dos aforos	45
2.3 Algoritmo multi-proporcional aplicado a tres aforos	46
3.1 Método SPME utilizando el problema dado en la Figura 3.1	68
3.2 Método MPME utilizando el problema dado en la Figura 3.4	74
3.3 Método MPME utilizando el problema dado en la Figura 3.5	77
4.1 TPDA de las entidades federativas del área de estudio	100
4.2 Estaciones de encuestas O-D seleccionadas en el área de estudio	105

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Siglas y Abreviaturas

AMCM	Área Metropolitana de la Ciudad de México
BPR	Agencia de Caminos Públicos, por sus siglas en inglés
EECAN	Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional
EMME/2	Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium, por sus siglas en inglés y francés
etc.	Etcétera
GIS	Sistemas de información Geográfica, por sus siglas en inglés
Mb	Megabits
ME2	Maximización de la Entropía
MPME	Estimación de la Matriz por Camino Múltiple, por sus siglas en inglés
MSA	Método de Promedios Sucesivos, por sus siglas en inglés
O-D	Origen-Destino
p. ej.	Por Ejemplo
RP	Preferencias Relevadas, por sus siglas en inglés
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SP	Presencias Establecidas, por sus siglas en inglés
SPME	Estimación de la Matriz por Camino Sencillo, por sus siglas en inglés
STAN	Análisis Estratégico del Transporte, por sus siglas en inglés
SUE	Equilibrio del Usuario Estocástico, por sus siglas en inglés
TDPA	Tránsito Diario Promedio Anual

TLD	Distribución de la Longitud por de los Viajes, por sus siglas en inglés
UE	Equilibrio del Usuario, por sus siglas en inglés



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1. INTRODUCCIÓN

Las matrices de origen a destino (O-D) cuantifican los flujos del tránsito (de vehículos de pasajeros y de carga) entre diferentes zonas de un área considerada de estudio; lo cual significa que, previamente a su generación dicha área debe estar dividida en zonas que en su interior sean homogéneas en términos socio-económicos.

Normalmente las matrices O-D se estiman a través de una encuesta que se aplica a una muestra de los usuarios que se desplazan entre las diferentes zonas. Tanto la encuesta como su aplicación deben diseñarse para captar la información específica del tipo de viaje deseado (p. ej. matriz O-D de pasajeros de la hora de máxima demanda o pico de la mañana). Por supuesto, la información generada a partir de una encuesta es una muestra, que como tal, debe ser expandida posteriormente para estimar los flujos totales. La confiabilidad estadística de estos últimos depende del tamaño de la muestra, y es por lo general, prohibitivamente caro y difícil levantar encuestas del tamaño necesario para generar resultados confiables.

Suele ser más conveniente utilizar herramientas computacionales para estimar matrices O-D a partir de conteos o aforos vehiculares, ya que éstos son económicos de obtener y generalmente se dispone de ellos rutinariamente a partir de los procesos de monitoreo del comportamiento de los arcos de la red.

Contar con información de origen a destino en la forma de matrices O-D es de utilidad en los procesos de planeación de la infraestructura y los servicios de transporte entre las zonas del área de estudio, ya que permite contrastar la demanda cuantificada entre los sitios de origen y destino (o flujos estimados en los pares O-D) contra la infraestructura y los servicios existentes, permitiendo identificar y definir medidas de mejoramiento.

Por todo lo anterior, en este trabajo se pretende explorar algunas metodologías para la estimación de matrices O-D, a partir de aforos o conteos sobre algunos de los arcos de la red considerada. Se seleccionará una metodología y su herramienta computacional correspondiente, aplicándose ambos a un ejemplo sencillo así como a un caso práctico relacionado con los flujos de libramiento y acceso de pasajeros y vehículos al Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM). La herramienta computacional que se utilizará para lo anterior es el programa TransCAD, que es un programa de planificación del transporte, diseñado para trabajar en una plataforma de sistema de información geográfica (GIS) (Referencia 1).

1.1 Aspectos Preliminares

Los estudios O-D son la base para la preparación de planes globales de transporte para un área determinada. Debido a que los planes integrales son a largo plazo y lentos en su implantación y ya que las obras de transporte deben construirse para muchos años de uso, la información O-D recopilada, debe proyectarse para proporcionar datos de las demandas futuras del transporte.

Estos estudios también son empleados para los propósitos de la planeación del transporte, como son la localización, proyecto y programación de nuevas carreteras, para mejorarlas y para obras del transporte público o servicios.

1.1.1 Utilidad de los Estudios O-D

Los estudios O-D sirven para obtener datos sobre el número y tipo de viajes en un área considerada, incluyendo movimientos de vehículos de pasajeros y carga, desde las zonas de origen hasta las zonas de destino.

La utilidad de las matrices O-D está vinculada con el paso de asignación del denominado proceso de planeación del transporte, el cual consta de los siguientes cuatro pasos (Referencias 2 y 3):

1. **Generación/Atracción.** Es el proceso mediante el cual se cuantifican los viajes (producidos o atraídos) realizados por las personas que residen o desarrollan actividad en una determinada área urbana, o por vehículos relacionados con dicha área.

2. **Distribución.** Es el proceso mediante el cual se determinan las zonas de origen y destino de los viajes generados, esto es, las producciones de viaje de cada zona que se conectan con todas las zonas a las cuales son atraídos.

3. **División Modal.** Determina la proporción de los usuarios que seleccionan el modo de transporte para la realización de sus viajes.

4. **Asignación.** Se utiliza para estimar el flujo en una red de transporte, usualmente a través de algún método de equilibrio que utiliza el tiempo de viaje y congestión, con la premisa de que los individuos puedan reducir sus costos mediante la selección de rutas. Este paso permite desarrollar mejoras de transporte a la red.

Nota: en adelante, cuando se mencione el término *asignación*, en este documento, deberá considerarse que se está haciendo referencia a este paso del proceso de planeación del transporte.

1.1.2 Métodos para Realizar Estudios O-D

Los procedimientos para realizar estudios O-D son variados. En los métodos más extensos se obtienen los datos para una muestra de viajes, incluyendo la identificación del origen y del destino, el propósito del viaje, el tiempo del viaje, el modo (automóvil, transporte público, camión, taxi, etc.), los usos del suelo en el origen y en el destino, los datos socio-económicos de los viajeros, etc.

El método para la recopilación de la información O-D se selecciona considerando las necesidades de datos, el personal del que se dispone, el presupuesto y las limitaciones de tiempo.

A continuación se mencionan algunos métodos (Referencias 4 a 7):

Encuesta domiciliaria.

Consiste en aplicar encuestas directamente en cada una de las viviendas que pertenecen a una muestra previamente seleccionada. Esta encuesta permite obtener información sobre los viajes que fueron realizados en el día inmediatamente anterior al día de la encuesta, por cada una de las personas mayores de cinco años, incluyendo los viajes en transporte público, camiones, taxis y automóviles particulares, así como información sobre las variables socio-económicas, como son: el ingreso y la tenencia de vehículos. Este método se debe apoyar en otros complementarios como:

a. Entrevista a un lado del camino o método del aforo vehicular

Este tipo de estudio puede proporcionar, con frecuencia, la mayoría de los datos necesarios para la planeación o evaluación de un libramiento. En este método, se detiene a los conductores a un lado de la vía y se les pregunta sobre su origen, su destino y otros datos deseados sobre el viaje que realiza cada vehículo. Este estudio está dirigido a conductores de automóviles, camiones y autobuses. Sólo se solicita información sobre el viaje que en ese momento se está realizando, sin producir ningún dato relacionado con los pasajeros. Para detener los vehículos es conveniente y necesario contar con el apoyo de la policía o de agentes de tránsito.

b. Método de registro de las placas de los vehículos en tránsito

En este método los observadores deben anotar las cuatro últimas cifras alfanuméricas de las placas de los vehículos, agrupándolos en períodos cortos, (de un minuto), anotando la hora al final de cada período. Conforme pasa el vehículo por cada estación, se registra; lo que permite trazar el viaje a través del área de estudio. El origen del viaje corresponde a la estación donde el vehículo fue registrado por primera vez, y el destino es el lugar donde fue visto por última vez. En el caso de sitios con altos volúmenes, se requiere del empleo de una grabadora portátil por cada observador para lograr registrar las placas de todos los vehículos. Se recomienda que, paralelamente, se efectúen conteos vehiculares para realizar el ajuste a la muestra que finalmente se logre obtener.

c. Etiquetas en el vehículo

Éste es otro método de vehículo en movimiento, que no depende de la cooperación total de los conductores, que puede utilizarse cuando el tránsito es demasiado pesado. Se entrega al conductor una tarjeta codificada, o bien, se fija a su vehículo, al entrar a la ruta o zona de estudio. Se informa al conductor acerca de la naturaleza del estudio y de que la tarjeta será recogida al salir de la ruta o zona de estudio. Cuando el vehículo sale de la ruta o zona, se registran en la tarjeta, la hora, la estación, la dirección del viaje y observaciones.

d. Tarjetas postales al conductor

Este método puede usarse cuando el volumen vehicular es alto y no es posible detener al conductor el tiempo necesario para la entrevista. Consiste en entregar a los conductores, unas tarjetas postales con las preguntas, en las que se solicita llenarlas y dejarlas en algún buzón del correo. Se necesitan aforos de volúmenes de tránsito en cada hora y en ambas direcciones para extender la muestra.

e. Cuestionario a empleados

Éste es un estudio dirigido específicamente a un generador de tránsito. Se pueden distribuir los cuestionarios a todos los empleados de un centro de

trabajo. Éstos, a su vez, proporcionarán los datos de su residencia, cómo llegan al lugar de trabajo, la hora de entrada y salida, información sobre el estacionamiento y costos de viaje. Los datos anteriores se pueden obtener para conductores de automóvil y para pasajeros en automóvil, en autobús y taxi.

Método de ascenso y descenso de pasajeros en una ruta de transporte público

Este método es independiente de las encuestas domiciliarias y se utiliza para determinar la movilización O-D de pasajeros en una ruta dada.

El estudio precisa los orígenes y destinos de los pasajeros que utilizan una ruta específica de transporte público, utilizándose principalmente para planear las mejoras de una ruta o reestructurar los despachos de vehículos. En algunas

ocasiones se puede utilizar para autorizar nuevas rutas. En este caso, por las necesidades de desplazamiento, los usuarios del servicio organizan sus propios paraderos, donde son recogidos y transportados por vehículos particulares, requiriéndose de la autorización y legalización de la ruta.

Uno o dos encuestadores abordan el vehículo y distribuyen un cuestionario a cada pasajero que sube al automotor. El cuestionario debe ser recogido por el personal de campo cuando el pasajero baja del vehículo. Adicionalmente al cuestionario, se registra en un formulario el número de pasajeros que ascienden y descienden, describiéndose el sitio donde una u otra cosa ocurre (paradero).

1.1.3 Estimación de la Matriz O-D a Partir de Aforos Vehiculares

Conforme aumenta el tamaño del área considerada, se eleva la necesidad de datos O-D detallados, así como la complejidad y el costo para obtenerlos mediante estudios O-D. La estimación de la matriz O-D a partir de aforos vehiculares se desarrolla con el propósito de reducir ambos aspectos anteriores, logrando, además, un nivel de confiabilidad adecuado en esa estimación.

Para un área de estudio determinada y su correspondiente red de transporte, el problema consiste en estimar la matriz O-D que sea consistente con un conjunto de aforos vehiculares en los arcos de esa red. Los enfoques más prácticos para lo anterior parten de una matriz O-D previa o inicial, aplicándose

un procedimiento que iterativamente la va actualizando hasta lograr una versión de la misma para la que se obtiene un buen nivel de consistencia entre los flujos predichos en los arcos mediante asignación y los aforos vehiculares con los que se cuenta. A los procedimientos que siguen el enfoque anterior se les denomina como de "actualización de matrices".

Esta estimación tiene la ventaja de que sólo se requiere instalar aparatos contadores automáticos en los nodos y/o arcos en la zona de estudio, reduciendo el tiempo, el número de personal en el campo y en la oficina, la capacitación de éste, la coordinación con las autoridades, la difusión del estudio, la instalación de estaciones, la recopilación de información, la

codificación, las capturas y el procesamiento, las demoras y congestionamiento en las vías, así como el equipo necesario para llevar a cabo el estudio, obteniéndose también una buena confiabilidad en los resultados que se generan.

Los procedimientos de actualización o ajuste de matrices tienen como objetivo utilizar información sobre los aforos del volumen de vehículos, normalmente disponibles o que pueden obtenerse fácilmente, para estimar una matriz de viajes (Referencia 2).

El desarrollo teórico de los procedimientos de actualización de matrices empezó hacia fines de la década de los 70's como una respuesta a las necesidades de estudios que exigían la obtención de matrices de viajes en plazos y costos

menores que los asociados a las formas tradicionales de acopio de información.

En lugar de utilizar investigaciones domiciliarias de origen/destino, encuestas en vehículos u otras formas de colecta de datos, se busca la utilización de aforos de tránsito, que se caracterizan por la ejecución simple, la interferencia reducida en el flujo de tránsito y un elevado grado de automatización.

La idea básica de estos procedimientos consiste en estimar los valores de las celdas de una matriz (T_{ij}) de tal forma que el siguiente conjunto de restricciones sea satisfecho:

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} \cdot P_{ij}^a \quad \text{para } a \in A \quad (1.1)$$

donde:

V_a = Volumen de tránsito observado en el arco a .

T_{ij} = Número de viajes de la zona i hacia la zona j .

p_{ij}^a = Proporción de viajes de i a j que utilizan el arco a .

A = Conjunto de arcos para los cuales existen aforos de tránsito.

Algunos enfoques alternativos fueron adoptados para adicionar informaciones que permitieron la estimación de las variables. En general, estos enfoques buscan introducir algún tipo de estructura en la matriz de viajes. Entre estos enfoques, aquél que representa mayores ventajas y que, por lo tanto, es más adoptado en aplicaciones prácticas, es el que utiliza el concepto de maximización de entropía.

La maximización de la entropía es un concepto derivado de la Teoría de la Información, cuya aplicación inicial al desarrollo de modelos de transporte se debe a Wilson (Referencia 8). Una buena discusión sobre el concepto, sus marcos teóricos, su evolución histórica y sus aplicaciones al desarrollo de modelos puede encontrarse en la Referencia 9.

En su esencia, la maximización de la entropía busca alcanzar el estado más probable de un determinado sistema, respetadas algunas condiciones establecidas exógenamente.

Así, en el caso de la actualización de matrices de viajes, cuando se impone una estructura a la matriz que satisfaga la condición de maximización de entropía, se busca determinar el conjunto más probable de (T_{ij}) que satisfaga las restricciones de la ecuación (1.1). Entre las ventajas de la utilización del concepto de maximización de entropía para la utilización de matrices, con respecto a otras alternativas presentadas en la literatura especializada, está la posibilidad de utilizar informaciones existentes como si fuera una matriz antigua o previa, o aquella correspondiente a otro período u otro modo de transporte.

En este caso, la solución formal del problema está dada por:

$$T_{ij} = t_{ij} \cdot \prod_a (X_a)^{p_{ij}^a} \quad (1.2)$$

donde:

T_{ij} = Número de viajes de la zona i hacia la zona j .

p_{ij}^a = Proporción de viajes de i a j que utilizan el arco a .

t_{ij} = Número de viajes entre i y j en la matriz conocida.

X_a = Factores de corrección o balanceamiento.

En el caso de actualización de matrices, los factores de corrección o balanceamiento (X_a) que intervienen en la celda ij son aquellos correspondientes a los arcos en el camino entre i y j que poseen informaciones de aforos.

En cuanto a su aplicación, los procedimientos de actualización de matrices son primordialmente utilizados para estimar matrices de viajes de vehículos, sean éstos automóviles, autobuses o camiones, en conjunto o por separado. Es posible ajustar matrices para diferentes períodos del día o del año, en función de los aforos disponibles. Sin embargo, no es práctico, aunque posible, aplicarlos para estimar matrices por motivo de viaje, una vez que esto exigiría la realización de encuestas para categorizar las informaciones de los aforos en los diferentes motivos (Referencia 6).

1.1.4 Modelos de Asignación de Tránsito más Comunes

Todo o Nada

En la asignación "Todo o Nada", todo el tránsito que fluye entre los pares O-D se asigna a los caminos más cortos que conectan los orígenes y destinos. Este modelo es poco realista, debido a que sólo un camino entre cada par O-D se utiliza, aun cuando exista otro camino con el mismo o casi el mismo tiempo de viaje o costo. También el tránsito en los arcos se asigna sin considerar si hay o no congestión o la capacidad adecuada; el tiempo de viaje es fijo y no varía dependiendo de la congestión en el arco.

Equilibrio del Usuario (UE)

El método "Equilibrio del Usuario" utiliza un proceso iterativo para lograr una solución convergente en la que ningún viajero puede mejorar su tiempo de viaje al cambiar de ruta. En cada iteración, se calculan los flujos en los arcos de la red, lo cual incorpora efectos de restricción de la capacidad de los arcos y tiempos de viaje dependientes de los flujos. En la solución que corresponde al equilibrio, para cada par O-D, el tiempo de viaje en todos los caminos usados es igual, y también menor que o igual al tiempo de viaje que experimentaría un solo usuario por cualquiera de los caminos no utilizados. La definición anterior implica que los usuarios (conductores) tienen información completa (es decir, conocen el tiempo de viaje en todas las rutas posibles) y que consistentemente toman la decisión que más les conviene en relación con su elección de ruta. La asignación del UE se plantea mediante la formulación de un programa matemático, el cual se resuelve en la práctica a través del algoritmo de Frank y Wolf. Tanto el programa matemático que resuelve el UE como el algoritmo de Frank y Wolf, se emplean en el programa TransCAD (Referencia 1).

Equilibrio del Usuario Estocástico (SUE)

El método "Equilibrio del Usuario Estocástico" es una generalización del "Equilibrio del Usuario", que asume que los viajeros no tienen información perfecta acerca de los atributos de la red y/o que perciben los costos de viaje de diferentes maneras. Las asignaciones SUE producen resultados más realistas

que el modelo determinístico UE, debido a que SUE permite el uso de rutas menos atractivas, así como de las más atractivas. Las rutas menos atractivas tendrán menor utilización, pero no tendrán flujo igual a cero, como tendrían bajo UE. El SUE se calcula utilizando el Método de Promedios Sucesivos (MSA), que es el único método convergente conocido (Referencias 10 y 11). Debido a la naturaleza de este método, debe utilizarse un número grande de iteraciones. Este tipo de asignación, así como su algoritmo de solución (MSA), están implementados en el programa TransCAD (Referencia 1).

1.1.5 Programas Computacionales para la Planificación del Transporte

El programa TransCAD

El TransCAD es un programa de planificación del transporte, diseñado para trabajar en una plataforma de sistema de información geográfica (GIS), que permite analizar y hacer mapas de sistemas de transporte en una escala de vecindad, ciudad, estado, nación o mundial.

Los sistemas de información geográfica (GIS), son sistemas automatizados de procesamiento de información que parten de una base de datos geográfica para realizar diferentes tipos de análisis y obtener resultados significativos desde un punto de vista espacial. La cualidad de trabajar bajo una base de datos geográfica o geo-referenciada, le da la confiabilidad de mantener la integridad de los datos en su conjunto evitando inconsistencias.

El TransCAD combina un único set de capacidades para construir mapas digitales, manejo de bases de datos geográficos, y presentaciones gráficas con herramientas con aplicación a transporte sofisticado, operaciones de investigación y modelos estadísticos.

El programa TransCAD organiza la información de un mapa en bases de datos geográficos que a su vez están constituidas por "layers" o capas. Cada capa es un grupo de elementos de información del mismo tipo. El control del contenido de un mapa se efectúa seleccionando las capas que serán incluidas y el orden en el cual serán trazadas.

Una base de datos geográfica contiene como mínimo una capa de información y cada capa de un mapa tiene un nombre por medio del cual se identifican los elementos que la componen. TransCAD puede representar tres tipos de bases que son: puntos, líneas y áreas, en las que cada una contiene las coordenadas y los atributos que describen sus características particulares.

OBSERVACIONES:

El TransCAD tiene aplicaciones para todos los tipos de datos de transporte y para todos los modos de transporte, y es ideal para la construcción de sistemas de información y de soporte de decisiones para el transporte; también sirve en la modelación de flujo de pasajeros y carga a nivel estatal o nacional, cuenta

con varios sub-módulos (modelo de generación de viajes, modelo de distribución de viajes, modelo de reparto modal, modelo de asignación a la red).

El TransCAD usa matrices para almacenar datos de flujo de transporte, tiempos de viaje, distancias y resultados de tabulación cruzada. Las matrices del TransCAD son una forma extremadamente eficiente de almacenamiento de datos de transporte que no encajan bien en bases de datos u hojas. Se pueden crear, editar, manipular y combinar matrices de muchas formas diferentes para soportar aplicaciones analíticas.

El TransCAD es un software *ágil y versátil*, debido a que los modelos o redes se pueden realizar en una forma *fácil y sencilla*, en comparación con otros programas para la planificación de transporte, que se describen a continuación:

El programa STAN

El STAN es un modelo general de transporte interurbano, que considera múltiples modos (multimodo) y múltiples productos (multiproducto), y que está orientado a la planificación estratégica de nivel nacional o regional de transporte (Referencia 12).

En un sistema de transporte interurbano, los modos interactúan sobre una red de transporte, para satisfacer la demanda de transporte (que se ingresa al modelo expresada en matrices de viajes) de carga y pasajeros, resultando flujos

de equilibrio sobre cada uno de los arcos de la red. En consecuencia, para su operación se requiere la especificación detallada de las características de:

- a) Atributos de las redes,
- b) Matrices de demanda,
- c) Funciones de Costo de Arcos y Transbordos.

Las redes representan la oferta de infraestructura y servicios de transporte. Los arcos y nodos representan la topología del sistema (con sus características físicas y de operación), los modos especifican los servicios de transporte disponibles y sus características y los transbordos capturan las operaciones intermodales realizadas en estos sistemas. Los centroides representan los puntos en que se genera y atrae demanda, los que deben ser conectados a la red de transporte a través de arcos de acceso.

La demanda específica representa cuáles son los productos y propósitos de viajes de personas relevantes para el análisis y la cantidad de cada uno a ser transportada entre cada par de zonas. Las decisiones relacionadas con la generación, atracción y distribución son exógenas a la modelación de STAN.

El STAN realiza una asignación multimodal y multiproducto, que simula el comportamiento del tránsito y del sistema de transporte, es decir, como se satisface la demanda al mover las cantidades de diferentes tipos de productos

especificadas en las matrices O-D, sobre la red multimodal, de acuerdo con un determinado criterio cuantificado a través de las funciones.

El STAN utiliza el criterio de asignar los flujos en las matrices O-D sobre la red considerada, de tal manera que se minimice el costo total de transporte de dichos flujos calculando dicho costo de acuerdo con los criterios en las funciones (costos y tiempo de viaje, congestión, etc.).

OBSERVACIONES:

El STAN es *única y exclusivamente para vehículos de carga*, ya sea a nivel regional o nacional, es decir, no modela pasajeros.

Como se mencionó anteriormente el STAN es un software que realiza asignación de tráfico ya sea con uno solo modo de transporte o varios modos de transporte, ya que tiene la opción de hacerse multimodal, agregando otros modos de transporte. Para realizar el modelo requiere de varios insumos, tales como los modos, productos, vehículos, la red a modelar, transferencias entre modos, las funciones de costo de comportamiento de tráfico y matrices.

El programa EMME/2

El EMME/2 es un sistema de vanguardia en la planificación multimodal del transporte. El cual proporciona herramientas flexibles y amplias a proyectistas,

para el análisis y modelación de la demanda, así como para el análisis y evaluación de redes (Referencia 12).

El EMME/2 puede usarse para una gran variedad de problemas de planificación del transporte, desde estudios de autopistas interurbanas hasta estudios de rutas urbanas, de transporte público y de transporte multimodal, permitiendo manejar y estructurar de forma eficiente grandes cantidades de datos y de resultados relacionados con la planificación del transporte.

El EMME/2 ofrece herramientas de manipulación de matriz que permiten la aplicación de una amplia variedad de modelos de pronósticos de demanda de viaje; procedimientos de asignación, basados en teorías legítimas; cálculos interactivos que permiten la implementación de las evaluaciones y métodos de análisis de impacto; un poderoso macro lenguaje, para automatizar los procedimientos repetitivos; capacidad de despliegue de graficas completas; editores de redes de gráficos-interactivos.

OBSERVACIONES:

El EMME/2 es un software muy parecido al STAN, solo que la diferencia radica en que este programa *modela flujos multimodales de pasajeros*, y es utilizado en áreas urbanas, ya que el algoritmo con el que se desarrolló toma en cuenta factores como el de penalización por semáforos, y congestionamiento. La metodología para hacer el modelo es muy similar al STAN, también se puede

crear redes multimodales (autos, autobuses, camiones de carga, metro, tren ligero, y peatones).

El programa ArcINFO

El ArcINFO es un software completamente equipado de GIS para visualizar, manejar, crear y analizar datos geográficos, incorpora herramientas adicionales para funciones de geoprocésamiento avanzado y conversiones entre formatos (Referencia 13).

Las herramientas de ArcINFO se estructuran en tres aplicaciones cuyo uso combinado permite acceder a toda su funcionalidad:

ArcMap: Permite la visualización, consulta, edición avanzada y análisis de los datos implicados en el estudio.

ArcCatalog: Constituye un avanzado explorador de datos geográficos y alfanuméricos, pensado para la visualización, administración y documentación de la información.

ArcToolbox: Es la aplicación que permite realizar conversiones entre formatos, cambios de proyección, y ajuste espacial. Incluye además herramientas para la generación de geometrías complejas, una lista innumerable de funciones de geoprocésamiento.

Estas herramientas permiten realizar de forma sencilla diversas tareas de edición:

- Edición de elementos siguiendo las reglas topológicas definidas, así como corrección de errores topológicos.
- Definición y gestión para la edición multiusuario con el posterior tratamiento de conflictos (bases de datos corporativas).
- Edición de elementos complejos: rutas calibradas y redes geométricas.
- Edición en modo desconectado de los datos (bases de datos corporativas).
- Creación y edición de anotaciones asociadas a elementos.
- Generación y edición de clases de elementos de tipo "acotación".
- Permite administrar, organizar, crear y previsualizar tanto datos geográficos como alfanuméricos.

OBSERVACIONES:

El ArcINFO, es una *herramienta cara* y su interfase *no es fácil de aprender* (todo por comandos y se necesita una cierta base en conceptos GIS para poder entender lo que se hace). El ArcINFO es un GIS que se utiliza como apoyo para realizar las redes de transporte (arcos, nodos, intersecciones entre arcos, etc.)

1.1.6 Evolución Urbana y del Transporte en el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM)

La ciudad de México, capital de la República Mexicana, es el lugar donde se concentran las más importantes actividades económicas, políticas y culturales del país, dado que alberga la sexta parte de la población de México.

Durante las últimas décadas, el Distrito Federal ha vivido un proceso de despoblamiento de las delegaciones centrales, a pesar de ser las de mayor infraestructura urbana (Referencia 14). Esta situación ha sido acompañada de un crecimiento expansivo hacia las delegaciones del poniente, oriente y sur, y, en mayor medida, hacia los municipios del Estado de México, particularmente los ubicados al oriente. Este proceso de concentración de la población en las áreas externas de la ciudad ha provocado cambios importantes en los patrones de viaje.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Una implicación importante de la expansión urbana es el crecimiento de la demanda de viajes que no ha ido acompañada de una red de infraestructura de transporte adecuada. De esta forma, la movilidad en el Valle de México se enfrenta a varias distorsiones e insuficiencias tanto en los modos de transporte (el auto particular, el transporte público de mediana y gran capacidad, como los autobuses y el metro, y una creciente dotación de transporte concesionado como los taxis y los microbuses) como en la red vial disponible.

La movilidad (la cual está determinada fundamentalmente por el origen y el destino del viaje) tanto de personas como de bienes en las actuales condiciones del Distrito Federal y del Área Metropolitana que la circunda, son generadores de molestias cotidianas y masivas, al igual que el crecimiento desordenado de la ciudad y su metrópoli.

La movilidad se refiere tanto a la demanda de viajes que requiere una población creciente y con empleos, viviendas y accesos a educación, cultura y comercio, cada vez mas distanciados entre sí, y por otro lado, a la oferta de infraestructura vial de avenidas y calles, con sus intersecciones, así como a los diversos servicios que se utilizan para realizar los viajes.

La movilidad en la red vial del AMCM es deficitaria, con fallas de integración para facilitar transferencias en los modos de transporte y entre las vialidades primarias y las secundarias, donde a su saturación se le suman las deficiencias en la administración, control y regulación del tránsito, así como una escasa cultura vial que colaboran a acentuar los congestionamientos. El resultado es una saturación crónica y una reducción de velocidad. Por lo anterior, la naturaleza de la movilidad en el AMCM se revela como un "desorden sistémico", donde la lentitud del tránsito, la insuficiencia e inseguridad del transporte, son apenas un síntoma irritante de un mal que surge del patrón urbano, el desorden en los modos de transporte y la insuficiencia y mal aprovechamiento de la red de vialidades.

1.2 Objetivos y Metas

En este trabajo se analizarán las metodologías existentes para la estimación de matrices O-D a partir de aforos, y se seleccionará una de ellas, la cual se aplicará a un ejemplo sencillo así como a un caso práctico relacionado con los flujos de libramiento y acceso de pasajeros y vehículos al Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM). Sobre este último punto, se pretende desarrollar una matriz O-D a partir de aforos vehiculares considerando como área de estudio los estados de la Región Centro del país (Estado de México así como su Área Metropolitana, Distrito Federal, Estado de Hidalgo, Estado de Morelos, Estado de Puebla, Estado de Tlaxcala y Estado de Querétaro), utilizando como herramienta computacional el software TransCAD para resolver dicha matriz, en el cual se analizará la problemática del área de estudio y se propondrán eventualmente mejoras en la infraestructura de la red carretera.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Las alternativas de mejora que podrían definirse con la matriz O-D generada para la red vial considerada (vías de penetración y vías perimetrales), son las siguientes:

- 1. Un mejor nivel de servicio.**
- 2. Modernización de la infraestructura: construcción, ampliación, operación y mejoramiento de las vialidades.**
- 3. Agilizar la movilidad del transporte público y privado.**

4. **Aminorar los conflictos viales.**
5. **Disminuir el déficit de las vialidades.**
6. **Reducir las horas-hombre invertidas en los traslados.**
7. **Reducir la contaminación generada por las fuentes móviles.**

1.3 Hipótesis

Si es posible contar con una matriz O-D preliminar, así como con un conjunto de aforos o conteos vehiculares en algunos arcos, entonces se puede seleccionar y aplicar un algoritmo que iterativamente la vaya ajustando, hasta generar una matriz O-D ajustada, que al ser asignada sobre la red considerada produzca unos flujos predichos, compatibles con los flujos o aforos medidos en los arcos, dentro de un error máximo, para un cierto nivel de confiabilidad.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1.4 Metodología

Se basa en el desarrollo de las siguientes tareas o actividades:

1. **Revisión Detallada de los Antecedentes.** Incluye lo correspondiente a la obtención de información O-D a partir de estudios de campo, a los principios de estimación de matrices O-D a partir de aforos vehiculares en los arcos y al GIS para la planeación del transporte denominado TransCAD.

2. **Selección de Metodología.** Partiendo de un conjunto de conceptos básicos, se escoge un algoritmo que estima paso a paso una matriz O-D a partir de aforos vehiculares, cuya aplicación se describe a través del desarrollo de un pequeño ejemplo.

3. **Aplicación a un Caso Práctico.** Con la recolección y elaboración de los datos de la muestra se utiliza el software TransCAD, en el cual se estima la matriz O-D a partir de aforos vehiculares, para el acceso o libramiento al AMCM y su área conurbada. Lo anterior permitirá eventualmente proponer las medidas necesarias para alcanzar los resultados que se desean obtener para mejorar la infraestructura vial.

4. **Redacción de la Tesis.** Se refiere a la escritura de los capítulos que conforman esta tesis: introducción, antecedentes, selección de la metodología, descripción y fundamentos de la aplicación a un caso práctico, así como conclusiones y/o recomendaciones resultantes de la investigación.

1.5 Alcances

Los alcances de este trabajo se encuentran definidos en cada uno de los capítulos que lo componen, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1. Se introduce el tema de tesis y el problema a analizar, se describe el trabajo a realizar, los aspectos preliminares, los objetivos y metas, la hipótesis, la metodología, los alcances y su utilidad.

Capítulo 2. Se presentan los antecedentes, incluyendo los enfoques más relevantes que se han venido dando a la estimación de matrices O-D a partir de aforos vehiculares.

Capítulo 3. Se describe la selección de la metodología. Se escoge un algoritmo que estima paso a paso una matriz O-D a partir de aforos vehiculares, cuya aplicación se describe a través del desarrollo de un pequeño ejemplo.

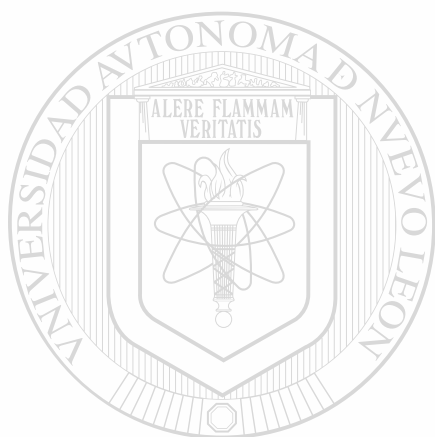
Capítulo 4. Se describe la aplicación a un caso práctico, utilizando el software TransCAD, en el cual se estima la matriz O-D a partir de aforos vehiculares para el acceso o libramiento al AMCM y su área conurbada.

Capítulo 5. Se presentan las conclusiones y recomendaciones más importantes derivadas del desarrollo del trabajo.

1.6 Utilidad

Este trabajo permitirá seleccionar una metodología para estimar matrices O-D a partir de aforos de vehículos de pasajeros y de carga. La importancia de este

trabajo reside en que, por cuestiones económicas, en el país se privilegia la medición de aforos a la recopilación de información O-D. Por lo anterior, la información de aforos con que se cuenta tanto a nivel nacional, regional y local, es más detallada, completa, frecuente y actualizada que la información O-D. Por consiguiente, este trabajo hará posible sacar un mayor provecho a los aforos existentes, con el fin de complementar la información O-D requerida para llevar a cabo una planeación más adecuada.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

2. ANTECEDENTES

Los métodos convencionales para la recopilación de información origen-destino, por ejemplo, entrevistas en el hogar o a la orilla del camino tienden a ser costosas, de labor intensiva y a generar pérdida de tiempo para los viajeros. El problema es aún más agudo en países en desarrollo donde los cambios rápidos en el uso del suelo y en la población desactualizan los datos rápidamente. La necesidad por desarrollar métodos de bajo costo para estimar matrices O-D presente y futura, es evidente (Referencia 15)

Los aforos vehiculares pueden verse como el resultado de combinar una matriz de viajes y un patrón de elección de ruta. Ellos proporcionan la información directa sobre la suma de todos los pares O-D que utilizan los arcos aforados. Los aforos vehiculares son muy atractivos como fuente de datos porque no generan pérdida de tiempo para los viajeros, están generalmente disponibles, su obtención es barata y su recopilación automatizada está muy avanzada. La idea de estimar matrices de viajes o modelos de demanda a partir de aforos vehiculares merece una seria consideración y la última década ha visto el desarrollo de numerosos enfoques dirigidos justamente a ello.

Considérese un área de estudio que está dividida en N zonas interconectadas por una red vial que consiste en una serie de arcos y nodos. La matriz de viajes para esta área de estudio consiste de N^2 celdas o (N^2-N) celdas si los viajes intrazonales no son considerados. La etapa más importante para la estimación de un modelo de demanda de transporte a partir de aforos vehiculares es, identificar los caminos seguidos por los viajes desde cada origen hasta cada destino. La variable p_{ij}^a se utiliza para definir la proporción de viajes de la zona i a las zonas j a través del arco a . Así, el flujo (V_a) en un arco particular a es la suma de las contribuciones a ese arco de todos los viajes entre zonas.

Matemáticamente, puede expresarse como sigue:

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^a \quad 0 \leq p_{ij}^a \leq 1 \quad (2.1)$$

donde:

V_a = Aforo o flujo vehicular observado en el arco a .

T_{ij} = Número de viajes de la zona i hacia la zona j .

p_{ij}^a = Proporción de viajes de i a j que utilizan el arco a .

La variable p_{ij}^a puede ser obtenida utilizando varias técnicas de asignación de viajes, desde una simple asignación tipo todo-o-nada hasta una asignación más complicada tipo "Equilibrio del Usuario" (Referencia 16). Dados todos los p_{ij}^a y todos los aforos vehiculares observados (V_a), habrá N^2 términos desconocidos

T_y 's a ser estimados de un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas L (2.1), dónde L es el número total de aforos vehiculares.

En un principio, se requieren N^2 aforos vehiculares independientes y consistentes, con el fin de determinar una solución única para la matriz de viajes $\overline{\overline{T}}_y$. En la práctica, el número de los aforos vehiculares observados es

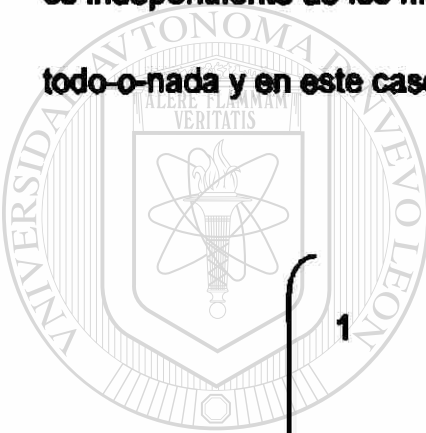
mucho menor que el número de términos T_y 's desconocidos. Por consiguiente, es imposible determinar una única solución para el problema de estimación de la matriz O-D. En general, habrá más de una matriz de viajes O-D que, cuando se cargue en la red, reproducirá los aforos vehiculares. Hay dos enfoques básicos para resolver este problema: *los métodos estructurados y los no estructurados*. En el caso de los estructurados, el modelador restringe el

espacio de factibilidad para la matriz estimada, imponiendo una estructura particular que es proporcionada usualmente por un modelo existente de demanda de viajes, por ejemplo, un modelo de gravedad o de demanda directa.

El enfoque no estructurado se basa en principios generales, como el de maximización de la entropía, con el fin de proporcionar el mínimo de información adicional requerido para estimar una matriz. Estos dos enfoques generales se describirán más adelante, pero primero se discutirá la relación entre elección de ruta y la estimación de modelo.

2.1 Elección de Ruta y Estimación de Matrices

Robillard (Referencia 17) clasificó los métodos de asignación para la estimación de matrices de viajes a partir de aforos en dos grupos principales: *asignación proporcional* y *no-proporcional*. Los métodos de asignación proporcional consideran que la proporción de usuarios (conductores) que escogen cada ruta es independiente de los niveles de flujo. El ejemplo más común es la asignación *todo-o-nada* y en este caso p_{ij}^a se define como:



1

si los viajes desde los orígenes i a los destinos j usan el arco a .

p_{ij}^a

0

en caso contrario.

Los métodos de asignación puramente estocásticos, como el de Burrell y Dial, también caen dentro de este grupo, pero en estos casos p_{ij}^a puede también tomar valores intermedios entre 0 y 1.

Las técnicas de asignación no-proporcional toman explícitamente en consideración los efectos del congestionamiento y, por consiguiente, la

proporción de viajeros que usan cada arco depende de los flujos en los arcos. Los métodos de asignación del "Equilibrio del Usuario" (UE) o del "Equilibrio del Usuario Estocástico" (SUE) forman parte de este grupo.

Las técnicas de asignación no-proporcional se piensa que son más realistas para condiciones de congestión. Sin embargo, la ventaja de los métodos de asignación proporcional es que permiten la separación de los problemas de elección de ruta y de estimación de matriz; puede asumirse que la proporción de viajes que utilizan cada arco p_j^r es independiente de la matriz de viajes a estimar. En contraste, la elección de ruta no-proporcional requiere de la estimación conjunta e iterativa de la elección de ruta y de las matrices de viajes, para que los dos sean consistentes. Primero se asumirá que los métodos de asignación proporcional son una aproximación razonable a la elección de ruta, presentándose posteriormente los supuestos necesarios para cubrir los métodos no-proporcionales.

2.2 Calibración de un Modelo de Demanda de Viajes a Partir de Aforos Vehiculares

La calibración del modelo de gravedad fue uno de los primeros métodos propuestos para estimar matrices O-D a partir de aforos vehiculares. La idea básica es postular una forma particular de modelo gravitacional y examinar qué

pasa cuando se asigna a la red. Por ejemplo, en el caso de los viajes interurbanos, la matriz O-D podría ser:

$$T_{ij} = \frac{\alpha P_i P_j}{d_{ij}^2} \quad (2.2)$$

donde: T_{ij} son los numero de viajes de la zona i a la zona j , P_i es la población del área urbana i , P_j es la población del área urbana j , d_{ij}^2 es la distancia entre las dos zonas o regiones y α es una constante de calibración, en este caso la única. Si una matriz del tipo anterior es asignada a la red, se obtiene:

$$V_a = \frac{\sum_{ij} p_{ij}^a \alpha P_i P_j}{(d_{ij})^2} = \frac{\alpha \sum_{ij} p_{ij}^a P_i P_j}{(d_{ij})^2} \quad (2.3)$$

Nótese que en el lado derecho de la ecuación anterior, α es lo único desconocido, y las demás variables son proporcionadas por datos externos o un buen modelo de elección de ruta. El modelo anterior puede generalizarse e incluir otros factores de generación/atracción de viajes, tales como el empleo, la producción industrial, el espacio comercial, etc. Si esta parte del modelo gravitacional se denota por:

$$G_{ij} = \frac{O_i D_j}{d_{ij}^2} \quad (2.4)$$

donde:

G_{ij} = Viajes producidos por la zona i y atraídos por la zona j .

O_i = Total de viajes producidos por la zona i .

D_j = Total de viajes atraídos por la zona j .

d_{ij}^2 = Distancia entre la zona i y la zona j .

y además se permiten varios propósitos de viaje k (o tipos de mercancías si se trata de movimientos de carga), entonces:

$$V_a = \sum_k \sum_{ij} \frac{p_{ij}^a \alpha_k O_i^k D_j^k}{(d_{ij})^2} = \sum_k \alpha_k \sum_{ij} p_{ij}^a G_{ij}^k \quad (2.5)$$

En la expresión anterior, las α_k son parámetros de calibración o ajuste, pero el resto de los datos se asume que están disponibles. Es relativamente sencillo observar que las α_k pueden ser estimadas utilizando técnicas de mínimos cuadrados. En este caso, se asume que $V_a' = V_a + \varepsilon_a$, donde ε_a es el error. Si se realiza el siguiente cambio de variables:

$$X_k = \sum_{ij} p_{ij}^a G_{ij}^k$$

se obtiene:

$$V_a' = \alpha_0 + \sum_{ij} \alpha_k X_k \quad (2.6)$$

donde α_0 es el intercepto y puede interpretarse como la parte del flujo no representada por el modelo gravitacional; por ejemplo, el tránsito local o intrazonal. Este tipo de enfoque fue seguido por los primeros investigadores en esta área.

Una vez obtenidos los parámetros α_k por ajuste de mínimos cuadrados, el flujo T_{ij}^k puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$T_{ij}^k = \frac{\alpha_k O_i^k D_j^k}{d_{ij}^2} \quad (2.7)$$

o si lo que se desea es conocer la matriz agregada (en vez de la matriz desagregada por tipo de producto):

$$T_{ij} = \sum_k T_{ij}^k \quad (2.8)$$

2.3 Estimación de Matrices a Partir de Aforos Vehiculares.

Durante muchos años, las técnicas de maximización de la entropía y de minimización de información han sido utilizadas como herramientas de elaboración de modelos en la planeación urbana, regional y del transporte. El principio de maximización de la entropía proporciona una matriz O-D que, como ya se dijo en el capítulo anterior, tiene la máxima probabilidad de ser la real y

que, además, es consistente con la información disponible representada como restricciones de un problema de maximización (de una función de entropía).

La idea anterior fue utilizada por Willumsen (Referencia 18) para derivar un modelo de estimación de matrices O-D a partir de aforos vehiculares. El problema puede escribirse como:

$$\text{Maximizar } S(\bar{T}_y) = -\sum_y (T_y \ln T_y - T_y) \quad (2.9)$$

sujeto a:

$$V_a - \sum_y T_y p_y^a = 0 \quad (2.10)$$

para cada arco aforado a, y:

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN $T_y \geq 0$ ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La disponibilidad de una matriz previa o antigua, o simplemente de una matriz estimada a partir de otro estudio, puede utilizarse con alguna ventaja. Si \bar{t}_y es esa matriz previa, algunas veces denominada como 'matriz meta de viajes'; la nueva función objetivo se vuelve:

$$\text{Maximizar } S_1\left(\frac{\bar{T}_y}{\bar{t}_y}\right) = -\sum_y \left(T_y \ln \frac{T_y}{\bar{t}_y} - T_y + \bar{t}_y\right) \quad (2.11)$$

sujeta a las mismas restricciones (2.10) y de no-negatividad. Esta función objetivo es convexa y el término t_j , que es una constante, sólo se incluye por conveniencia, pudiendo, de hecho, ser eliminado del modelo.

A manera de ejemplo, considérese la red simple mostrada en la Figura 2.1. Esta red tiene dos orígenes (1 y 2) y dos destinos (3 y 4). Los flujos y todos los arcos se muestran también en la figura.

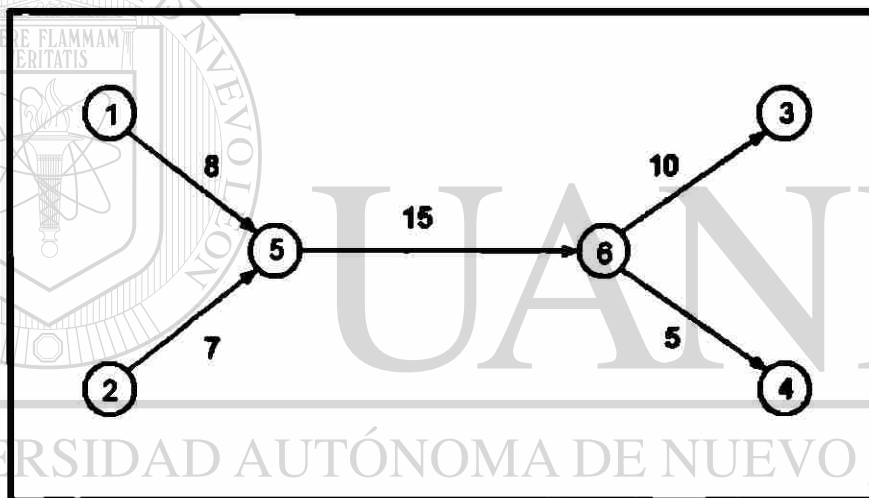


Figura 2.1 Red simple con aforos vehiculares

Puede verse que hay sólo seis matrices (enteras) que pueden reproducir los flujos observados mostrados arriba.

El formalismo de la maximización de la entropía busca identificar la matriz de viajes más probable que sea consistente con la información disponible, en este caso, 5 aforos vehiculares. Incidentalmente, puede verificarse que sólo tres de

esos aforos son independientes, por consiguiente, el problema está de hecho sub-especificado. Los valores de la función objetivo $S(\overline{T}_y)$ (Ecuación 2.9) se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1

Cálculo de $S(\overline{T}_y)$ y $S_1(\overline{T}_y/\overline{t}_y)$ para las seis matrices factibles

	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4
1	8	0	7	1	6	2	6	3	4	4
2	2	5	3	4	4	3	5	2	6	1
$S(\overline{T}_y)$	-11.07		-7.46		-5.98		-5.78		-6.84	
$S_1(\overline{T}_y/\overline{t}_y)$	-5.79		-3.69		-3.70		-5.07		-7.22	

De acuerdo con la tabla anterior, la matriz de viajes más probable sería la cuarta, {5, 3, 5, 2}, debido a que tiene el valor máximo de entropía (-5.78). Si una matriz previa está disponible, entonces puede utilizarse una segunda función objetivo (2.11). Así, se asume que la matriz previa {3, 2, 1, 3} está disponible; los nuevos valores de la función de entropía son los que se muestran en la tabla arriba. La matriz de viajes más probable en estas circunstancias se vuelve ahora la segunda {7, 1, 3, 4}. De hecho, en problemas más prácticos se puede esperar que puedan calcularse directamente los valores de entropía para todas las matrices posibles. Nótese, por ejemplo, que al reducir el número de aforos aumenta el número de matrices O-D factibles. Aún más importante, los flujos del orden de los cientos o los miles, aumentan enormemente el número de matrices

O-D posibles. Lo que se necesita es un método efectivo de solución que no requiera de identificación de matrices.

Hay varios métodos posibles para resolver el modelo (2.11). El más utilizado es el enfoque multi-proporcional. En este método, se emprenden una serie de correcciones sucesivas a la matriz previa de viajes, con el fin de reproducir los aforos observados. Este enfoque es uno de los que en el capítulo anterior fueron referidos como procedimientos de actualización de matrices. En este enfoque, hay un factor de corrección o balanceamiento X_a , para cada aforo vehicular y su cálculo involucra la estimación iterativa de estos factores hasta que los flujos observados en los arcos son reproducidos dentro de una tolerancia aceptable. Si no hay matriz previa inicial disponible, \bar{t}_y puede tomarse como la unidad.

El modelo de estimación de matrices basado en la maximización de la entropía (ME2) siempre reproducirá las observaciones V_a^i dentro de una tolerancia dada, asumiendo que las restricciones definen un espacio de factibilidad, es decir, las ecuaciones (2.10) deben tener cuando menos una solución dentro de todas las posibilidades no negativas para T_y .

Se ha demostrado que minimizar el negativo de la función objetivo (2.11) es aproximadamente equivalente a minimizar:

$$S_2 \left(\frac{\overline{\overline{T_y}}}{\overline{\overline{t_y}}} \right) = \frac{0.5(T_y - t_y)^2}{T_y} \quad (2.12)$$

Esto es una medida de la probabilidad de la diferencia entre los valores de t_y y T_y . De hecho, el negativo de $S_1 \left(\frac{\overline{\overline{T_y}}}{\overline{\overline{t_y}}} \right)$ es también una medida natural de la diferencia entre los valores correspondientes en las celdas: es cero cuando $t_y = T_y$, aumentado positivamente, a medida que la diferencia se incrementa.

En este sentido, la matriz estimada es aquella más cercana a la matriz previa que, cuando es cargada a la red, puede reproducir los aforos vehiculares.

El modelo puede acomodar otras fuentes de datos si éstos pueden ser incorporados como restricciones lineales. Un ejemplo de este tipo puede ser información sobre la distribución de la longitud de los viajes (TLD), considerada como realista para el área de estudio. Este tipo de información puede ser transformada en restricciones equivalentes como sigue:

$$\frac{1}{T} \sum_y T_y \delta_y^k = P_k \quad (2.13)$$

donde T es el número total de viajes; P_k es la proporción de viajes en el rango de longitud (o costo) k ; δ_y^k es 1 si los viajes entre i y j tienen longitud en el rango k , y cero en caso contrario.

Los sistemas de transporte público con un sistema tarifario zonal o cualquier otro sistema tarifario variable, permiten la introducción de restricciones de este tipo para apoyar la estimación de las matrices de viaje correspondientes utilizando conteos de pasajeros y datos de ventas de boletos.

El programa matemático también puede escribirse con una combinación de restricciones de igualdad y desigualdad, aumentando el valor de este tipo de enfoque. Por ejemplo, el planificador puede saber que la capacidad de un arco es Q_a pero no tener un aforo vehicular para él; o que no más de D_j vehículos pueden ir a un destino particular debido a la capacidad del estacionamiento ahí. Este tipo de información puede incorporarse como restricciones de desigualdad, por ejemplo:

$$\sum_{i} T_{ij} p_{ij}^a \leq Q_a \text{ para algunos arcos } a \quad (2.14)$$

$$\sum_j T_{ij} \leq D_j \text{ para algunos destinos } j \quad (2.15)$$

Lamond y Stewart (Referencia 19) han demostrado cómo el algoritmo multi-proporcional puede ser expandido para manejar restricciones de desigualdad, por lo tanto, el mismo método de solución puede usarse para este modelo expandido.

Una de las características del modelo ME2 (expandido) es su naturaleza multiplicativa. Esto significa que si una celda en la matriz previa es cero, seguirá siendo cero también en la solución. Esto podría originar problemas si la celda

en la matriz previa es cero por alguna circunstancia (por ejemplo, debido a la proporción de muestreo adoptada en el estudio) en vez de realmente representar un par de O-D sin viajes. Una solución pragmática a este problema, para matrices previas muy dispersas (con muchos ceros en sus celdas), es 'sembrar' las celdas vacías con un valor pequeño, por ejemplo, 0.5 viajes. Las restricciones, a través del algoritmo multi-proporcional u otro algoritmo de solución, asegurarán que algunos de estos viajes 'crezcan' a uno o más viajes completos mientras que otros retoman su valor de cero.

Considérese la misma red que en el ejemplo de la Figura 2.1 pero asúmase ahora que se tienen sólo dos aforos vehiculares, en los arcos 5-6 y 2-5 (15 y 7). La Tabla 2.2 muestra los algoritmos multi-proporcionales aplicados a este problema. La tabla muestra primero la solución completa para el caso de una matriz previa (inexistente) uniforme (Caso A).

Como puede verse, toma sólo cinco iteraciones alcanzar la convergencia dentro de una tolerancia del 5%. La solución {3.99, 3.99, 3.5, 3.5} no coincide con la solución de la maximización de la entropía en la Tabla 2.1 debido a que el número de aforos no es el mismo. El caso B muestra el problema con la matriz previa {3, 2, 1, 3}; de nuevo, toma sólo cinco iteraciones alcanzar la convergencia satisfactoria. La solución {4.81, 3.21, 1.75, 5.25} es de hecho diferente, lo cual muestra cómo la información contenida en una matriz de viajes antigua puede utilizarse ventajosamente en la estimación de matrices; siempre hay algo de valor en información pasada, que vale la pena utilizar.

El Caso C ilustra lo que pasa cuando hay un valor de cero en la matriz de viajes. Existe todavía una solución pero el cero se conserva. Finalmente el Caso D muestra el efecto de 'sembrar' el cero en la matriz previa, con 0.5. La solución aquí, {4.81, 3.21, 1.0, 6.0}, afecta sólo los viajes desde el origen correspondiente a la celda con valor igual a cero.

Tabla 2.2
Algoritmo multi-proporcional aplicado al problema con dos aforos

	Aforo de Tránsito	Flujo Modelado	Factor de Corrección	Viajes por Par O-D			
				1-3	1-4	2-3	2-4
CASO A	—	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00
Matriz Previa	—	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00
Iteración 1	15	4.00	3.750	3.75	3.75	3.75	3.75
	7	7.50	0.933	—	—	3.50	3.50
Iteración 2	15	14.50	1.034	3.88	3.88	3.62	3.62
	7	7.24	0.967	—	—	3.50	3.50
Iteración 3	15	14.78	1.016	3.94	3.94	3.56	3.56
	7	7.11	0.984	—	—	3.50	3.50
Iteración 4	15	14.89	1.008	3.97	3.97	3.53	3.53
	7	7.05	0.992	—	—	3.50	3.50
Iteración 5	15	14.95	1.004	3.99	3.99	3.51	3.51
	7	7.03	0.996	—	—	3.50	3.50
CASO B	—	—	—	3.00	2.00	1.00	3.00
Iteración 5	15	15.03	0.998	4.81	3.21	1.75	5.24
	7	6.98	1.002	—	—	1.75	5.25
CASO C	—	—	—	3.00	2.00	0.00	3.00
Iteración 6	15	15.06	0.998	4.82	3.21	0.00	6.97
	7	6.97	1.004	—	—	0.00	7.00
CASO D	—	—	—	3.00	2.00	0.50	3.00
Iteración 6	15	15.04	0.998	4.81	3.21	1.00	6.99
	7	6.98	1.002	—	—	1.00	6.00

Considérese ahora el efecto de aumentar el número de aforos a tres, al incluir el arco 6-3. Los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3

Algoritmo multi-proporcional aplicado al problema con tres aforos

	Aforo de Tránsito	Flujo Modelado	Factor de Corrección	Viajes por Par O-D			
				1-3	1-4	2-3	2-4
CASO A	—	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00
Matriz Previa	15	4.00	3.750	3.75	3.75	3.75	3.75
Iteración 1	7	7.50	0.933	—	—	3.50	3.50
	10	7.25	1.379	5.17	—	4.83	—
Iteración 20	15	15.04	0.998	5.33	2.70	4.64	2.35
	7	6.99	1.001	—	—	4.65	2.35
	10	9.98	1.002	5.34	—	4.66	—
CASO B	—	—	—	3.00	2.00	1.00	3.00
	15	15.09	0.994	6.82	1.50	3.43	3.56
Iteración 15	7	6.98	1.003	—	—	3.43	3.57
	10	9.95	1.005	6.55	—	3.45	—
CASO C	—	—	—	3.00	2.00	0.00	3.00
	15	17.15	0.875	8.75	0.13	0.00	6.12
Iteración 20	7	6.12	1.143	—	—	0.00	7.00
	10	8.75	1.143	10.00	—	0.00	—
CASO D	—	—	—	3.00	2.00	0.50	3.00
	15	15.08	0.995	6.98	1.04	2.97	4.01
Iteración 20	7	6.98	1.003	—	—	2.98	4.02
	10	9.96	1.004	7.01	—	2.99	—

Primero, nótese que el número de iteraciones requeridas ha aumentado. Esto parece depender, no tanto del número real de aforos utilizados sino del nivel de restricción que ellos imponen a la estimación de la matriz. En este caso, se remueven tres de cuatro grados de libertad por los tres aforos ahora considerados. La solución en el caso A, {6.55, 2.68, 4.67, 2.35}, es la que maximiza $S(\overline{T}_v)$ y, si se redondea a enteros, coincide con la solución de la Tabla 2.1.

La solución para el caso B, {6.55, 1.51, 3.45, 3.58}, tiene las mismas propiedades con respecto a $S_1(\overline{T}_v/\overline{t}_v)$. El Caso C es interesante, dado que muestra que ante la inclusión de un cero en la matriz previa, el algoritmo falla en converger aún después de 20 iteraciones. Se puede verificar que forzar la celda 2-3 a cero, hace que el problema sea no factible: hay siete viajes que salen del nodo 2 pero sólo cinco deben llegar a su destino. En el Caso D se ilustra el efecto de sembrar la celda vacía con 0.5 viajes; el algoritmo ahora converge a una solución razonable.

2.4 Aforos Vehiculares y Estimación de Matrices

En esta fase es importante analizar si cualquier conjunto de aforos es conveniente para la estimación de matrices de viajes; es decir, si ciertas

combinaciones de aforos no permiten estimar una matriz que los satisfaga. Estos problemas se discuten a continuación.

2.4.1 Independencia

No todos los aforos contienen la misma cantidad de 'información'; por ejemplo, en la Figura 2.2 el tránsito en el arco *c* se compone de la suma del tránsito en los arcos *a* y *b*. El tránsito aforado en el arco *c* es, por lo tanto, redundante y puede decirse que sólo dos aforos son independientes.

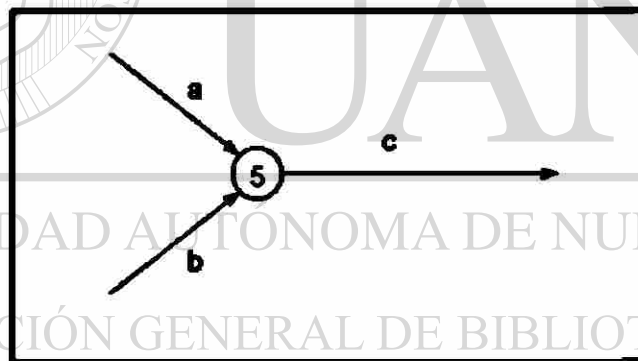


Figura 2.2 Aforos dependientes

Siempre que pueda escribirse una ecuación de continuidad de flujo del tipo 'los flujos que entran hacia' un nodo son iguales a 'los flujos que salen desde' el nodo, sus aforos serán dependientes linealmente. En este caso, será siempre posible describir el flujo en un arco como la combinación lineal del resto. Un conector de centroide, unido al nodo 5, removerá la dependencia en la Figura 2.2.

2.4.2 Inconsistencia

Los errores en el conteo vehicular y el hecho de que frecuentemente los aforos son obtenidos en diferentes momentos (horas, días, semanas), probablemente conducirán a inconsistencias en los flujos. En otras palabras, las relaciones esperadas de continuidad del flujo no se cumplirán. Si el aforo V_i en la Figura 2.2 es de 160 en lugar de 150, las ecuaciones correspondientes serían inconsistentes y ninguna matriz de viajes podría reproducir esos flujos. Una forma de reducir este problema es permitir un término de error en las ecuaciones o remover las inconsistencias de antemano.

Es posible identificar dos fuentes de inconsistencias en los flujos en los arcos. La primera es simplemente el hecho de que los errores en los aforos pueden conducir a situaciones en las que 'el flujo total que entra hacia' un nodo no es igual 'al flujo total que sale desde' el mismo nodo, por lo que no se cumplen las condiciones de continuidad de flujo en los arcos. La segunda fuente es un desajuste entre el modelo de asignación de tránsito asumido y los flujos observados. Por ejemplo, un modelo de asignación puede asignar cero viajes en un arco que tiene un flujo observado (quizá pequeño). En estas condiciones no habrá matriz de viajes capaz de reproducir los flujos aforados en los arcos utilizando ese modelo de elección de ruta.

Es útil distinguir entre dos tipos de inconsistencia; primero a nivel de flujo y después a nivel de flujo de camino. Asíumase que se tienen aforos del flujo de

cuatro arcos (identificados por el par de nodos que los delimitan) y se desea encontrar las matrices no negativas de viajes que satisfagan esos aforos y un modelo de elección de ruta como se muestra en la Figura 2.3.

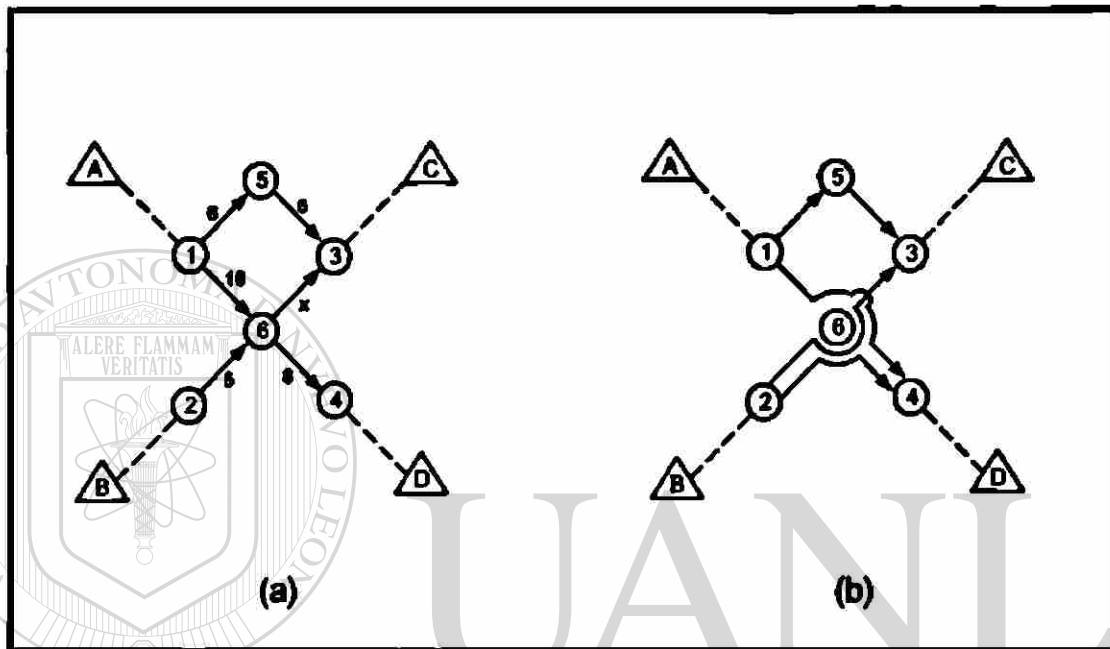


Figura 2.3 Inconsistencia en: (a) los flujos en los arcos de una red, y (b) los flujos en los arcos en relación con los flujos en los caminos

Considérese primero el caso en el se ha obtenido que el aforo x es igual a 8, con lo cual el flujo total que entra hacia el nodo 6 es igual a 15, y el flujo hacia fuera de ese nodo es igual a 16. Estos aforos, son por lo tanto, inconsistentes, quizá porque fueron medidos en diferentes días o simplemente debido a errores de conteo. Se puede remover esa inconsistencia aumentando arbitrariamente los flujos en los arcos (1,6) o (2,6) en uno, o reduciendo los flujos en los arcos (6,3) o (6,4) en uno. Adoptando un enfoque más sistemático, pueden hacerse los menores ajustes necesarios para preservar las condiciones de continuidad

de flujo. Por ejemplo, si lo que se desea es minimizar la suma de cuadrados de los incrementos/reducciones, entonces el cambio óptimo es 0.25 en cada arco.

Considérese ahora el caso en que el aforo x es igual a 7. Puede observarse que las condiciones de continuidad de flujo en los arcos se cumplen ahora. Sin embargo, la asignación asumida, mostrada en la Figura 2.3b, es incompatible con los flujos mostrados en Figura 2.3a. Ninguna matriz de viajes factible puede reproducir el aforo de 7 en el arco (6,3) debido a que el único camino que lo utiliza, B-C, está limitado a un máximo de 5 por el arco (2,6).

El conjunto de ecuaciones lineales que corresponden a este ejemplo está dado por:

$$\text{Arco (1,5)} \quad T_{AC} = 6 \quad (2.16)$$

$$\text{Arco (5,3)} \quad T_{AC} = 6 \quad (2.17)$$

$$\text{Arco (1,6)} \quad T_{AD} = 10 \quad (2.18)$$

$$\text{Arco (2,6)} \quad T_{BC} + T_{BD} = 5 \quad (2.19)$$

$$\text{Arco (6,3)} \quad T_{BC} = 7 \quad (2.20)$$

$$\text{Arco (6,4)} \quad T_{AD} + T_{BD} = 8 \quad (2.21)$$

Claramente las ecuaciones (2.19) y (2.20) son inconsistentes con la no-negatividad de T_{BC} . Lo mismo se aplica a las ecuaciones (2.18) y (2.21), haciendo imposible resolver este sistema de ecuaciones. En problemas sencillos como éste, las inconsistencias pueden identificarse por inspección pero en redes más complejas sólo pueden ser identificadas por medio de

operaciones de renglón y de columna en las ecuaciones lineales. Para sistemas grandes, estas operaciones son probablemente costosas, en términos de requerimientos computacionales.

En este ejemplo sencillo, no es difícil observar que el problema se origina en la ruta simple asumida entre A y C. Si se permitiesen dos caminos, uno a través del nodo 5 y el camino a través del nodo 6, la inconsistencia podría ser removida. Además, el valor de la variable resultante p_{AC}^6 no puede escogerse arbitrariamente; de hecho, una solución factible requiere que:

$$0.2 \leq p_{AC}^6 \leq 0.5$$

El hecho de que las condiciones de continuidad del flujo de camino no se satisfacen, parece reflejar errores en la asignación, mientras que las discontinuidades del flujo en los arcos son un reflejo de errores en los aforos vehiculares. Parece razonable desarrollar una técnica para remover las inconsistencias del flujo en los arcos con el fin de asegurar que las condiciones de continuidad del flujo en los arco sean satisfechas. Por otra parte, un enfoque razonable para manejar la falta de consistencia al nivel del flujo en los caminos parece ser la adopción de un mejor modelo de elección de ruta. En términos generales, la consistencia a nivel del flujo en los arco es una condición necesaria pero no suficiente para la consistencia a nivel del flujo en los caminos. Sin embargo, la consistencia a nivel del flujo en los caminos sí es una condición suficiente para la consistencia del flujo en los arcos. Puede verificarse

que hay sólo siete diferentes matrices de viajes (enteras) que pueden satisfacer los aforos en el ejemplo anterior.

2.5 Extensiones

2.5.1 Asignación No-Proporcional

Lo antes presentado se basa fundamentalmente en el supuesto de que es posible obtener las proporciones de los viajes que van por las diferentes rutas (proporciones de elección de ruta) a través de un modelo de asignación, independientemente del proceso de estimación de la matriz O-D. Cuando el congestionamiento juega un papel importante en la elección de ruta, el supuesto anterior se vuelve discutible, dado que las proporciones de elección de ruta obtenidas de la asignación y la matriz de viajes se vuelven interdependientes. Por sus ventajas teóricas y prácticas, el modelo de asignación del "Equilibrio del Usuario" proporciona el marco de referencia natural para extender el modelo ME2 al caso de redes congestionadas.

Una forma de manejar la interdependencia entre las proporciones de elección de ruta y la matriz O-D a estimar, es a través del siguiente procedimiento iterativo: asúmase un conjunto de proporciones de elección de ruta $\{p_v^a\}$, estímesese una matriz \bar{T}_v , cárguela a la red y obtenga un nuevo conjunto de

proporciones de elección de ruta; repítase el procedimiento anterior hasta que las proporciones y las matrices estimadas sean mutuamente consistentes.

El esquema general anterior puede ser implementado de diferentes maneras; por ejemplo, en un enfoque que es común, las proporciones de elección de ruta se estiman utilizando los valores α_n de cada iteración, del algoritmo de Frank y Wolfe (Referencia 16) que resuelve la asignación del "Equilibrio del Usuario" (dichas proporciones son estimadas como la combinación lineal óptima de flujos acumulados y auxiliares). Se reconoce que los flujos en los caminos bajo condiciones de equilibrio no son únicos, sin embargo, este enfoque asume que sí son únicos.

La Figura 2.4 muestra un diagrama general de los métodos de asignación para estimar matrices O-D, vistos en este capítulo



Figura 2.4 Métodos de asignación para estimar matrices O-D

2.5.2 Métodos Heurísticos

La mayoría de los métodos convencionales asume que los aforos vehiculares son variables determinísticas libres de error, o usan un modelo de asignación simplificado. Sin estos supuestos generales, los métodos frecuentemente requieren tiempos de cálculo prohibitivos. Para superar estos problemas en la práctica, se formulan los métodos heurísticos. Dos de esos métodos son el "SPME (Single Path Matrix Estimation o Estimación de la Matriz por Camino Sencillo)" y el "MPME (Multiple Path Matrix Estimation o Estimación de la Matriz por Camino Múltiple)", ambos formulados por Nielsen (Referencia 20). Estos dos métodos son capaces de manejar aforos vehiculares con inconsistencias e incertidumbres. En ambos métodos, la matriz O-D estimada refleja los patrones de elección de ruta proporcionados por modelos de asignación según el denominado "Método de Promedios Sucesivos (MSA)", incluyendo el Equilibrio Estocástico del Usuario (SUE). Ambos métodos son más convenientes cuando se requiere actualizar una matriz antigua de viajes, para ser utilizada en estudios de planeación o como una matriz de pivote en modelos de tránsito más grandes.

Los dos métodos anteriores se presentan con mayor detalle en el capítulo siguiente, pues por sus ventajas prácticas, la recomendación de algoritmo que se hace en esta tesis, se centra en torno a ellos.

La Figura 2.5 muestra un diagrama general de los métodos de estimación de matrices O-D a partir de aforos vehiculares, vistos en este capítulo.

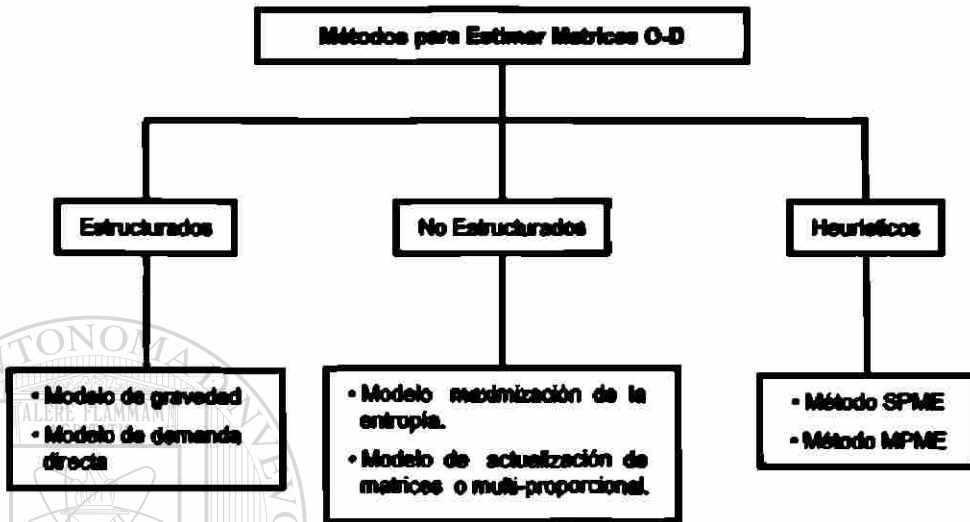


Figura 2.5 Métodos para estimar matrices O-D a partir de aforos vehiculares

3. SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Tradicionalmente, los modelos de tránsito son estimados utilizando encuestas de tránsito muy extensas, con base en entrevistas. Sin embargo, en años recientes, el interés de métodos alternativos de estimación ha aumentado. Para reducir el costo de adquisición de datos, la mayoría de estos métodos se basan en aforos vehiculares, complementados con algunos supuestos sobre la elección de la ruta de los usuarios.

En este capítulo se presentan dos métodos heurísticos para estimar matrices O-D a partir de aforos, los cuales son prácticos, fáciles de implementar, convergen rápidamente, pueden manejar inconsistencias e incertidumbres en los aforos y se basan en modelos avanzados de elección de rutas.

El primer método *SPME* (Single Path Matrix Estimation o Estimación de la Matriz por Camino Sencillo), fue originalmente formulado por Nielsen (Referencia 20), quien también sugirió el segundo método *MPME* (Multiple Path Matrix Estimation o Estimación de la Matriz por Camino Múltiple). Mientras que el principal enfoque del *SPME* fue que debe ser una herramienta fácil de

implementar, MPME fue desarrollado para reflejar mejor el patrón de elección de ruta.

3.1 Bases Tradicionales para la Modelación del Tránsito

Quando se elige un modelo de tránsito, una de las principales consideraciones es que coincidan el modelo, el método de estimación y el estándar de los datos. Las fuentes de los datos han sido tradicionalmente las "encuestas de tránsito", pero el uso de aforos vehiculares ha aumentado debido al desarrollo de métodos estructurados, no estructurados y de fusión de datos. En las encuestas de tránsito, los usuarios, pasajeros o simplemente una muestra de la población, son interrogados sobre su comportamiento de viaje. Algunas técnicas como las Preferencias Reveladas (*Revealed Preference* o *RP*) o las Presencias Establecidas (*Stated Preference* o *SP*), pueden utilizarse para estimar un modelo de tránsito directamente a partir de las encuestas de tránsito. A pesar de que las entrevistas son frecuentemente indispensables para estimar los modelos de tránsito, hay también desventajas por utilizar los modelos de tránsito estimados sólo a través de encuestas de tránsito, debido a que:

- El costo es alto, ya que se necesitan muchas entrevistas para describir los patrones de viaje entre diferentes zonas. Usualmente, sólo un número limitado de personas pueden ser entrevistadas debido a

restricciones presupuestales, lo cual resulta en una estimación "gruesa" de los flujos de tránsito;

- Un menor número de entrevistas dificultan describir características locales especiales por los modelos;
- Los modelos de tránsito basados en encuestas a menudo comparan pobremente con los aforos vehiculares sobre los tramos individuales de camino, debido a que los aforos vehiculares no se utilizan para la estimación del modelo, sino sólo para el control de los resultados finales;
- A menudo, una fuente considerable de conocimiento no se utiliza, dado que no se utilizan matrices O-D existentes en la estimación.

Como ya se mencionó en el Capítulo 2, los métodos de estimación no estructurados (Referencia 21) utilizan aforos para estimar matrices de viajes, sin

utilizar ninguna expresión de modelo general (o estructura) para describir el comportamiento de realización de los viajes. Debido a restricciones presupuestales, lo anterior tiene que realizarse utilizando sólo aforos y conocimiento sobre las elecciones de ruta. Sin embargo, se requiere una matriz O-D antigua como información suplementaria sobre el patrón de viajes, debido a que el número de elementos de la matriz usualmente excede por mucho el número de aforos. Las matrices O-D estimadas pueden utilizarse subsecuentemente para estimar el modelo de tránsito, lo cual se realiza de una manera indirecta y pueden ser usadas como matrices pivote para un modelo de tránsito o directamente en la evaluación de un esquema carretero. Tales

métodos a menudo harán que los modelos representen bien los flujos de tránsito aforados, pero, no obstante, los métodos pueden causar problemas:

- No es necesariamente cierto que los flujos de tránsito asignados sean iguales a los flujos reales, puesto que el problema de estimación es muy indefinido. Esto se debe a que el número de pares O-D es mucho mayor que el número de aforos.
- Los datos de encuestas de tránsito antiguas se utilizan indirectamente en el proceso de calibración en la forma de una matriz O-D original.
- Los métodos proporcionan sólo una explicación general indirecta de los patrones de viaje. Así, son inadecuados para predicciones más estratégicas y de largo plazo.

Debido a su eficiencia económica en la práctica, los métodos de estimación de matrices O-D han despertado considerable interés en los investigadores (Referencias 22 y 23). Los *métodos estructurados* (Referencias 15 y 24) estiman los modelos de tránsito *directamente* a partir de los aforos. Así, se asume que el comportamiento de realización de los viajes en el área de estudio puede ser bien representado por un cierto modelo general, la *estructura* (Referencia 21). Los métodos comparten algunas de las desventajas de las encuestas de tránsito tradicionales, debido a que:

- No se toman en cuenta las características locales especiales;
- Los métodos no hacen uso de matrices existentes de viajes.

Otro problema es que el complejo de modelación de tránsito tiene que ser estimado en un solo paso a partir de los aforos vehiculares. Normalmente, esto sólo es posible con modelos muy simplificados. Aún modelos tipo boceto utilizan modelos de asignación no proporcional, que se resuelven a través de un algoritmo iterativo que dificulta la formulación del problema de estimación. La Referencia 25 define la fusión de datos como "el proceso de combinar dos o más fuentes complementarias en una sola base de datos global. El método de fusión de datos puede explotar las ventajas de las fuentes de datos y compensar sus desventajas, combinando dichas fuentes en una sola base de datos".

La Referencia 26 utilizó encuestas de tránsito y aforos vehiculares como ejemplo para la estimación directa de modelos. Los métodos de fusión de datos resultaron ventajosos para modelos de pequeña escala, cuando el principio "Todo o Nada" puede ser considerado como un modelo apropiado de asignación de tránsito. Sin embargo, el problema de la estimación aumenta significativamente cuando se utilizan modelos de asignación de tránsito más grandes con múltiples caminos, o cuando se consideran casos de escala completa. En la práctica, parece difícil utilizar encuestas de tránsito y aforos vehiculares para estimar modelos de tránsito simultáneamente. Sin embargo, en lugar de no utilizar aforos, éstos pueden ser utilizados para estimar matrices de viajes, y subsecuentemente utilizarse por sí solos, o junto con encuestas, para estimar el modelo de tránsito. Además, las matrices pueden utilizarse

como matrices pivote o directamente como la entrada a modelos simplificados para la evaluación de esquemas carreteros.

3.2 Método SPME

Como ya se mencionó, este método es heurístico y fue desarrollado para actualizar una matriz O-D antigua para la Región de Copenhague, Dinamarca, donde hay muchas alternativas de caminos o rutas en la red vial, con retrasos frecuentes y "colas" en ocasiones. Además, los aforos disponibles mostraron un componente estocástico considerable; incluso algunos aforos fueron claramente inconsistentes. Esto pudo deberse al método de aforo o conteo, al modelo de elección de ruta, o a la representación simplificada de la red y la estructura de zonas en el modelo. La mayoría de los métodos y software existentes para la estimación de matrices O-D no pueden considerar estas circunstancias.

3.2.1 El Principio del SPME

El método SPME estima una nueva matriz de viajes que se ajusta, tanto como es posible, a los aforos vehiculares (ver Ecuación 3.1). Una consecuencia de esto es que la matriz original es modificada más que en muchos otros métodos de estimación de matrices. Este enfoque es fácilmente justificado cuando se actualiza una matriz antigua utilizando aforos más nuevos y más precisos.

$$\min_{T_a} [f_1(\bar{t}_y, \bar{T}_y, \bar{V}_a, \bar{T}_a)] \quad (3.1)$$

donde \bar{T}_a es obtenido a través de un modelo de asignación de tránsito $\bar{T}_a = f_2(\bar{T}_y, \bar{t}_y)$, \bar{t}_y es la matriz de viajes original que describe el tránsito de la zona i a la j , \bar{T}_y es la nueva matriz de viajes, \bar{V}_a es el tránsito aforado en el arco a y \bar{T}_a es el tránsito asignado en el arco a . f_1 estima la nueva matriz, f_2 es el modelo de asignación de tránsito.

El modelo de asignación de tránsito, f_2 , puede ser cualquier tipo de modelo y puede "correrse" en un software estándar, pero el comportamiento del SPME depende naturalmente de qué tan razonable sea el modelo de asignación. El modelo de estimación de la matriz, f_1 , estima cada elemento (o par O-D) en la nueva matriz de viajes, para minimizar la desviación promedio entre el tránsito aforado y el asignado a lo largo del camino óptimo entre cada par O-D considerado (de aquí, el nombre de *Método de Estimación de la Matriz por Camino Sencillo*).

El procedimiento consiste en calcular el tránsito esperado $T_{(E)a}$ para cada arco donde el tránsito ha sido aforado:

$$T_{(E)a} = \frac{V_a}{T_a} \cdot t_y \quad (3.2)$$

donde $T_{(E)ij}$ es el tránsito esperado entre la zona i y j en relación con el tránsito aforado en el arco a . t_{ij} es un elemento de la matriz original de viajes, o en la matriz de la iteración anterior. V_a / T_a define el factor por el cual T_a debe multiplicarse para reproducir V_a . La lógica es que todos los elementos de la matriz, con respecto a ese aforo específico, deben ser modificados con la misma proporción (tasa) para reproducir el aforo. La *media aritmética* puede utilizarse para estimar los T_{ij} 's a partir de los $T_{(E)ij}$'s (si puede considerarse que los aforos siguen una distribución normal o de Poisson):

$$T_{ij} = \frac{1}{N_{a \in (\tau,r)}} \cdot \sum_{a \in (\tau,r)} T_{(E)ija} \quad (3.3)$$

donde $T_{(E)ij}$ es el tránsito esperado entre el par de zonas i, j desde la perspectiva del arco a . τ es el conjunto de arcos con tránsito aforado a lo largo de la ruta (óptima) r . N es el número de aforos a lo largo del camino.

Alternativamente, la *media armónica* como estimador minimiza el error cuadrado entre el tránsito aforado y el tránsito asignado (Ecuación 3.4):

$$\min_{T_{ij}} \left[Err_{sq} = \frac{1}{N_{a \in (\tau,r)}} \cdot \sum_{a \in (\tau,r)} \frac{(T_{(E)ija} - T_{ij})^2}{T_{(E)ija}} \Rightarrow T_{ij} = \frac{N_{a \in (\tau,r)}}{\sum_{a \in (\tau,r)} 1/T_{(E)ija}} \right]$$

Si la asignación depende del tránsito, la nueva matriz estimada conducirá a otros patrones de flujo diferentes a aquéllos utilizados para la estimación. Así, la

estimación debe ser resuelta a través de un enfoque iterativo. Si éste converge, entonces los elementos de la matriz cumplirán con las ecuaciones (3.3) o (3.4). El enfoque más sencillo es "correr" la asignación y la estimación de la matriz en una vuelta:

1. *Inicio*: Haga el número de iteración, $n = 1$ y la matriz de viajes $\overline{\overline{T}}_{j^{(0)}}$ igual a la matriz semilla.
2. Asigne $\overline{\overline{T}}_{j^{(n-1)}}$ en la red de tránsito. Salve los flujos $\overline{\overline{T}}_{a^{(n-1)}}$.
3. Estime la matriz según las ecuaciones (3.3) o (3.4), los caminos óptimos, pueden encontrarse por el *algoritmo de Dijkstra* u otros métodos, los cual se describe en el Anexo A (Referencia 27).
4. *Criterio para parar*: Pare según algún criterio para parar establecido; de otra manera, vaya al paso 2.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

El algoritmo es muy eficaz, dado que sólo se necesita una asignación de tránsito por cada iteración principal. Además, la memoria requerida para guardar los caminos no es mayor que aquella dentro del modelo de asignación; típicamente elementos $i \cdot j$ y no elementos $a \cdot i \cdot j$ como con algunos otros métodos, por ejemplo Yang (Referencia 28); Ben-Akiva y Morikawa (Referencia 25). Así, para un modelo grande de tránsito, tal como el modelo de la Región de Copenhague, la memoria requerida para guardar los caminos o rutas, puede reducirse considerablemente (en este caso, de alrededor de 800 Mb a alrededor de 0.3 Mb).

3.2.2 Ejemplos de Cálculo Usando SPME

Para la red en la Figura 3.1, la Tabla 3.1 muestra el SPME correspondiente (los valores han sido redondeados a partir de una hoja de cálculo).

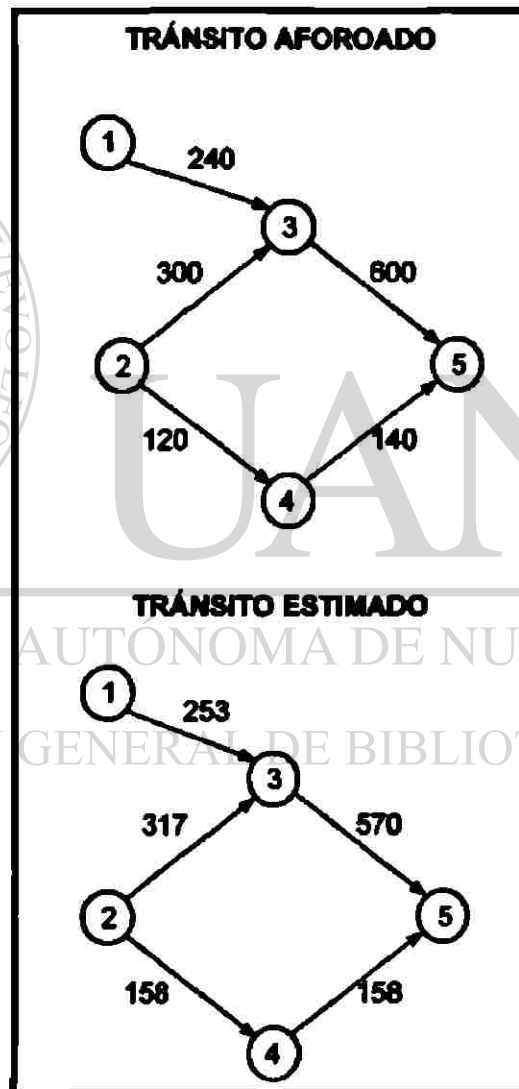
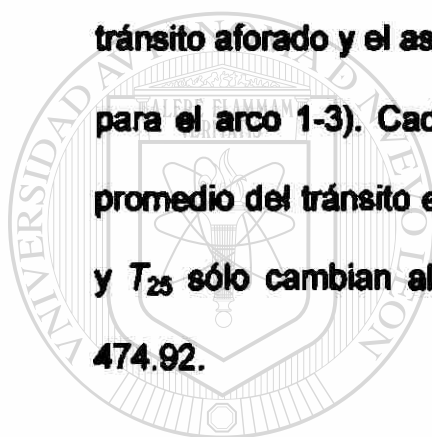


Figura 3.1 Red con aforos vehiculares inconsistentes

La matriz semilla tiene dos pares O-D $T_{15} = 300$ y $T_{25} = 360$, pero la solución es independiente de la matriz semilla en este problema sobreespecificado de estimación. El modelo de asignación es fijo o tipo "Todo o Nada"; T_{25} escoge los caminos o rutas 2-3-5 y 2-4-5 con probabilidades $2/3$ y $1/3$, respectivamente. En cada iteración, el tránsito esperado relacionado con cada elemento de la matriz (p. ej. T_{25}) es calculado como el elemento de la matriz a partir de la iteración anterior (p. ej. 300 de la primera iteración), multiplicado por el cociente entre el tránsito aforado y el asignado (p. ej. el tránsito esperado de $240/300 \cdot 300 = 240$ para el arco 1-3). Cada elemento de la matriz es estimado entonces como el promedio del tránsito esperado a lo largo de la ruta. En la décima iteración, T_{15} y T_{25} sólo cambian al nivel del primer decimal y tienen valores de 253.39 y 474.92.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 3.1

Método SPME utilizando el ejemplo dado en la Figura 3.1

Ruta		Tránsito Asignado y Esperado En los Arcos					Matriz Estimada	
		g_{1-3}	g_{2-3}	g_{3-3}	g_{3-4}	g_{4-5}	$T_{(p-1)}$	$T_{3-0(p-1)}$
Aforos, V_a		240	600	300	120	140		
Matriz Original, $T_{(0)}$							300	300
Asignación	r_{1-3}	300	300	—	—	—		
	r_{2-3}	—	240	240	—	—		
	r_{2-4}	—	—	—	120	120		
	$T_{(1)}$	300	540	240	120	120		
	Matriz Estimada $T_{(1)(1-3-5)}$	240	333.33	—	—	—	286.67	—
	$T_{(1)(2-3-5)}$	—	400	450	—	—	—	425
Asignación	r_{1-3}	286.67	286.67	—	—	—		
	r_{2-3}	—	283.33	283.33	—	—		
	r_{2-4}	—	—	—	141.67	141.67		
	$T_{(1)}$	286.67	570	283.33	141.67	141.67		
	Matriz Estimada $T_{(2)(1-3-5)}$	240	301.75	—	—	—	270.88	—
	$T_{(2)(2-3-5)}$	—	447.37	450	—	—	—	448.68
Asignación	r_{1-3}	270.88	270.88	—	—	—		
	r_{2-3}	—	299.12	299.12	—	—		
	r_{2-4}	—	—	—	149.56	149.56		
	$T_{(2)}$	270.88	570	299.12	149.56	149.56		
	Matriz Estimada $T_{(3)(1-3-5)}$	240	285.13	—	—	—	262.57	—
	$T_{(3)(2-3-5)}$	—	472.30	450	—	—	—	461.16
....								
Asignación	r_{1-3}	253.44	253.44	—	—	—		
	r_{2-3}	—	316.56	316.56	—	—		
	r_{2-4}	—	—	—	158.28	158.28		
	$T_{(10)}$	253.44	570	316.56	158.28	158.28		
	Matriz Estimada $T_{(10)(1-3-5)}$	240	266.78	—	—	—	253.30	—
	$T_{(10)(2-3-5)}$	—	400.84	450	—	—	—	474.92

La Figura 3.2 muestra otro ejemplo de una red con aforos inconsistentes. En este caso, la matriz semilla tiene tres pares O-D T_{24} , T_{23} y T_{13} (aquí, fijados a 200 cada uno). En la 30ª iteración, los elementos sólo cambiaron al nivel del segundo decimal, obteniéndose valores de 208.31, 272.49 y 769.20. Para propósitos de comparación, la solución analítica de minimizar el cuadrado ponderado entre el tránsito aforado y el asignado, da valores de 208.00, 272.00 y 767.00 y 767.00.

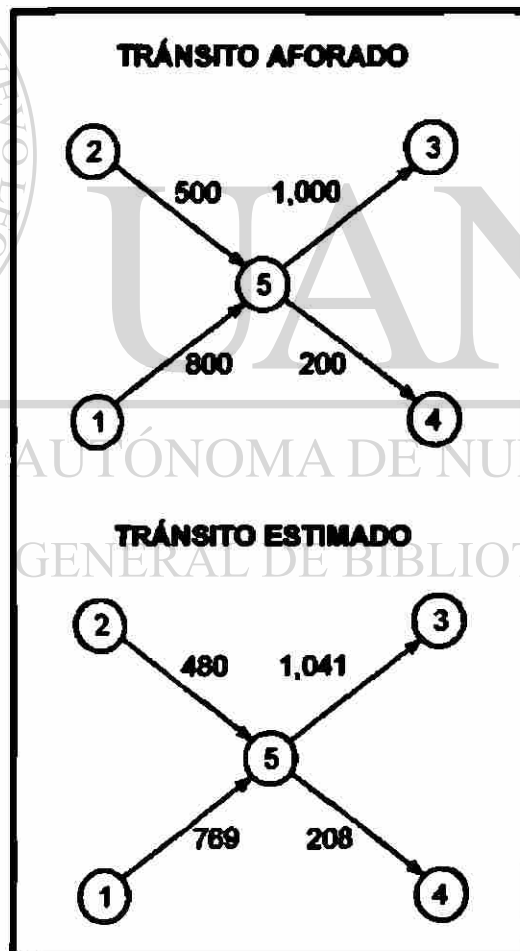


Figura 3.2 Red con aforos vehiculares inconsistentes

La Figura 3.3 muestra un ejemplo de una red con aforos consistentes; donde, por definición, son reproducidos exactamente por SPME. La matriz semilla tiene tres pares O-D $T_{12} = 200$, $T_{34} = 200$ y $T_{56} = 600$. En la 10ª iteración, los elementos sólo cambiaron al nivel del segundo decimal, obteniéndose valores de 184.32, 115.69 y 815.66. Para propósitos de comparación, la solución analítica de minimizar el cuadrado ponderado entre la matriz semilla y la matriz estimada, da valores de 185.71, 114.29 y 814.29, considerando que los aforos son reproducidos exactamente.

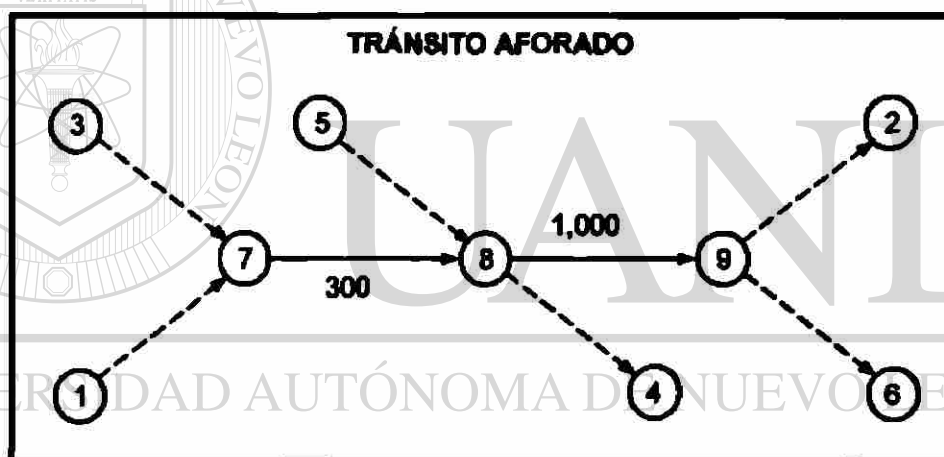


Figura 3.3 Red con aforos vehiculares consistentes

3.2.3 Elección de Modelo de Asignación dentro del SPME

La elección de ruta y de modelos de asignación de tránsito, han atraído considerable atención en la literatura. Los primeros modelos estocásticos de tipo Logit se basan en el supuesto de que las diferentes rutas son independientes (Referencia 29). Por lo anterior, generan problemas en redes

con rutas que se traslapan (Referencia 10), que es casi siempre el caso en redes de tamaño real. La Referencia 31 sugirió el uso de modelos de tipo Probit para superar ese problema y la Referencia 11 presentó un algoritmo de solución operacional. Un concepto similar es utilizado como parte del "Equilibrio del Usuario Estocástico" (SUE), sugerido en la Referencia 30 e implementado operacionalmente en la Referencia 11; pero aquí los tiempos de viaje son también dependientes del flujo. Así, el principio del SUE establece que "se alcanza un equilibrio cuando ningún viajero cree que puede mejorar su tiempo de viaje al cambiar unilateralmente de ruta". Se discute a menudo sobre cuándo conviene utilizar la asignación tipo Probit, tipo Equilibrio de Usuario (UE) o ambas (SUE). La asignación tipo Probit puede ser utilizada en redes no congestionadas y la tipo UE puede utilizarse como una buena aproximación para el tipo SUE en redes congestionadas. El enfoque SUE debe utilizarse para niveles intermedios de congestión (Referencia 10). Sin embargo, dado que las tres circunstancias ocurren en la mayoría de las ciudades, y muchas rutas consideran arcos no congestionados, semicongestionados y completamente congestionados, se recomienda utilizar siempre el enfoque SUE (Referencia 32). En comparación con otros métodos heurísticos, los modelos anteriores todos permiten el "Método de Promedios Sucesivos (MSA)", mencionado en el Capítulo 2, el cual puede demostrarse que converge. Las Referencias 10, 32, 33, y 34, entre otras, proporcionan revisiones de literatura sobre modelos de asignación vehicular y recomiendan el uso de SUE.

3.2.4 Discusión sobre el SPME

En SPME, sólo los aforos a lo largo del camino óptimo son utilizados para la estimación. La lógica es que las desviaciones relativas entre el tránsito aforado y el asignado a lo largo de este camino proporcionan una estimación adecuada para el elemento. Esta simplificación es realizada con el fin de reducir la complejidad del cálculo. Experiencias pasadas han demostrado que el método converge relativamente rápido, encontrándose implementado en TransCAD 3.0 por Caliper (Referencia 35). Lo anterior indica que el SPME es utilizable en la práctica. Sin embargo, SPME no representa completamente el patrón de flujos del SUE y no siempre converge suavemente. Esto es especialmente cierto en el caso de redes con muchas rutas con resistencias similares de viaje entre los pares O-D.

La Figura 3.4 muestra, en una red vial simplificada, los resultados del método ME2 o modelo de estimación de matrices basado en la maximización de la entropía (Referencias 15 y 36), SPME y el método MPME en donde todos los aforos son utilizados (véase la descripción de MPME, más adelante). La Figura 3.4 muestra qué tanto influyen los aforos en el resultado final (columna intermedia) presentando también el tránsito asignado (columna derecha). T_{16} fue asignado para los métodos SPME y MPME en la red, utilizando un modelo de asignación estocástico con proporciones fijas entre rutas. En el ME2, el tránsito estimado para el par 1-6 es igual al último aforo utilizado en el algoritmo, es decir, el aforo en el arco 1-4. El estimado sería, entonces, 640

vehículos. En el SPME, los errores relativos a lo largo del camino óptimo son $(640 - 800)/800 = -20$ por ciento y $(840 - 800)/800 = 5$ por ciento. De esta manera, el tránsito esperado sería $1,300 \cdot 80\% = 1,040$ y $1300 \cdot 105\% = 1,365$ y el estimado es $(1,040 + 1,365)/2 = 1,203$.

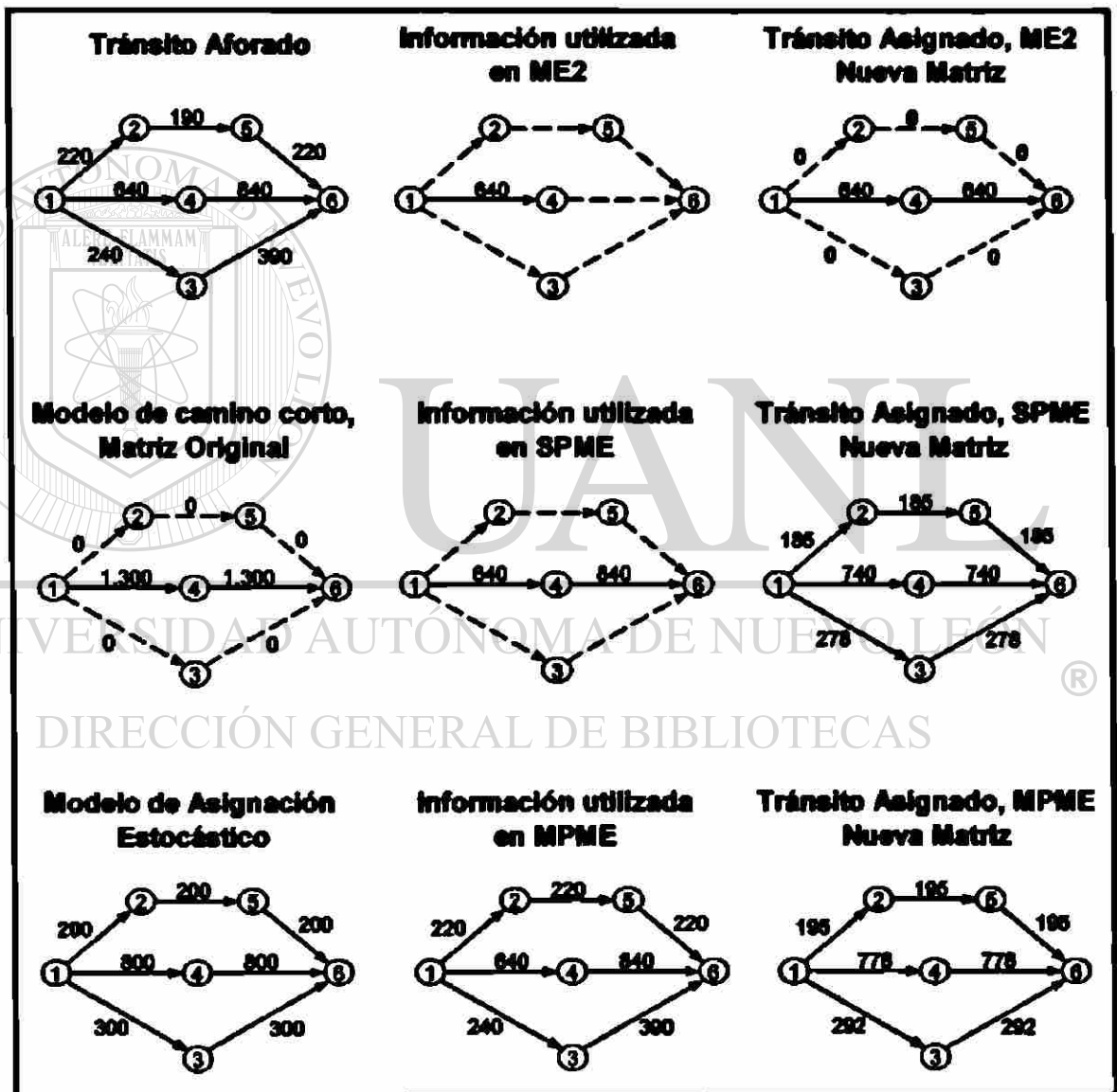


Figura 3.4 Comparación del ME2, SPME y MPME del tránsito en los nodos 1 al 6

En el MPME, el tránsito se estima igual a 1,265, como se muestra en la Tabla 3.2. Se aprecia que los métodos SPME y MPME proporcionan un mucho mejor resultado que el ME2, mientras que el MPME sólo resulta en un mejoramiento marginal comparado con el SPME. En redes más grandes, es de esperarse que el mejoramiento proporcionado por el MPME sea mayor, debido a que hay muchas más rutas alternativas en esas redes.

Tabla 3.2

Método MPME utilizando el ejemplo dado en la Figura 3.4

Camino	1-2-5-6	1-3-6	1-4-6	Suma
Esperado	Arco 1-2: 220	Arco 1-3: 240	Arco 1-4: 640	—
Tránsito	Arco 2-5: 190 Arco 5-6: 220	Arco 3-6: 300	Arco 4-6: 640	—
Estimado	210	315	740	1265

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3.3 Método MPME

3.3.1 Principios

Como ya se indicó, la idea en el MPME es, para cada camino, utilizar todos los aforos a lo largo del camino para estimar el par O-D correspondiente. Las inconsistencias en algunos aforos a lo largo del camino son, por lo tanto, moderadas por otros aforos. Sin embargo, a diferencia del SPME, donde sólo

se utilizan los aforos a lo largo del camino óptimo, en el MPME lo anterior se realiza para todos los caminos según la probabilidad de escoger cada uno.

Así, el tránsito entre cada par O-D debe ser la suma del tránsito esperado a lo largo de cada camino o ruta entre el par, multiplicado por la probabilidad de elegir esa ruta (Ecuación 3.5a). Esto asigna un peso elevado a la elección de ruta, dado que a cada ruta se le asigna el mismo peso (según su probabilidad), independientemente del número de aforos a lo largo de la ruta. Puede asumirse que el tránsito esperado a lo largo de cada ruta es el promedio, a lo largo de la ruta, del tránsito esperado definido a partir de cada aforo (Ecuación 3.5b). El tránsito esperado, de acuerdo con cada aforo (Ecuación 3.5c), es equivalente al obtenido mediante la Ecuación 3.2 para el SPME.

$$T_{ij(n)} = \sum_r (T_{(E)jr} \cdot P_r) \quad (3.5a)$$

donde:

$$T_{(E)jr} = \frac{1}{N_{a \in (\tau, r)}} \cdot \sum_{a \in (\tau, r)} T_{(E)ja} \quad (3.5b)$$

y

$$T_{(E)ja} = \frac{V_a}{T_{a(n-1)}} \cdot T_{ij(n-1)} \quad (3.5c)$$

donde $T_{(E)ja}$ es el tránsito esperado entre las zonas i y j en el arco a ; τ es el conjunto de arcos con aforo; p_r es la probabilidad de que la ruta r sea utilizada entre las zonas i y j ; y n es el número de iteración.

Es casos muy simples, esto puede realizarse en un paso. Sin embargo, usualmente p_w depende del tránsito en cada arco (elección no proporcional de ruta), y $T_{a(n-1)}$ depende de otros elementos de la matriz diferentes de $T_{a(n-1)}$. En este caso, un enfoque podría ser utilizar la Ecuación (3.5a) en un ciclo iterativo (donde n es el número de iteración). Si esto converge (lo cual puede probarse fácilmente en la práctica), la solución cumple con los supuestos que conducen a la ecuación.

Cabe señalar que, así como el SPME puede resolverse para redes reales con el software TransCAD, el MPME puede resolverse mediante el software denominado ArcINFO (Referencia 13).

3.3.2 Algunos Ejemplos de Cálculo

La Tabla 3.3 muestra el uso del MPME en la misma red de la Figura 3.1 (algunos valores han sido redondeados a partir de una hoja de cálculo). Los resultados se muestran en la Figura 3.5. En la 10ª iteración, T_{15} y T_{25} apenas cambian a nivel del segundo decimal, teniendo valores de 261.82 y 438.18. Para propósitos de comparación, la solución exacta de minimizar el cuadrado ponderado entre el tránsito aforado y el asignado, da valores de 260.28 y 434.04.

Tabla 3.3

Método MPME utilizando el ejemplo dado en la Figura 3.6

Ruta		Tránsito Asignado y Esperado en los Arcos					Tránsito Esperado en las Rutas y Estimación de los elementos de la Matriz		
		a_{1-3}	a_{3-5}	a_{2-3}	a_{2-4}	a_{4-5}	$T_{(E)1}$	$T_{1-2(n-1)}$	$T_{2-2(n-1)}$
Aforos, V_a		240	600	300	120	140			
Matriz Original, $T_{(0)}$							—	300	300
Asignación	f_{1-3-5}	300	300	—	—	—			
	f_{2-3-5}	—	240	240	—	—			
	f_{2-4-5}	—	—	—	120	120			
	$T_{a(0)}$	300	540	240	120	120			
	$T_{(E)1-3-5}$	240	333.33	—	—	—	286.67	286.67	—
	$T_{(E)2-3-5}$	—	286.67	300	—	—	283.33	—	413.33
	$T_{(E)2-4-5}$	—	—	—	120	140	130.00	—	—
Asignación	f_{1-3-5}	286.67	286.67	—	—	—			
	f_{2-3-5}	—	275.56	275.56	—	—			
	f_{2-4-5}	—	—	—	137.78	137.78			
	$T_{a(1)}$	286.67	562.22	275.56	137.78	137.78			
	$T_{(E)1-3-5}$	240	305.93	—	—	—	272.98	272.98	—
	$T_{(E)2-3-5}$	—	294.07	300	—	—	297.04	—	427.04
	$T_{(E)2-4-5}$	—	—	—	120	140	130.00	—	—
Asignación	f_{1-3-5}	272.98	272.98	—	—	—			
	f_{2-3-5}	—	284.09	284.09	—	—			
	f_{2-4-5}	—	—	—	142.35	142.35			
	$T_{a(2)}$	272.98	557.06	284.09	142.35	142.35			
	$T_{(E)1-3-5}$	240	293.09	—	—	—	286.86	286.86	—
	$T_{(E)2-3-5}$	—	308.31	300	—	—	303.16	—	433.16
	$T_{(E)2-4-5}$	—	—	—	120	140	130.00	—	—
.....									
Asignación	f_{1-3-5}	281.80	281.80	—	—	—			
	f_{2-3-5}	—	292.14	292.14	—	—			
	f_{2-4-5}	—	—	—	146.07	146.07			
	$T_{a(10)}$	281.80	553.93	292.14	146.07	146.07			
	$T_{(E)1-3-5}$	240	283.57	—	—	—	281.78	281.78	—
	$T_{(E)2-3-5}$	—	318.43	300	—	—	308.22	—	438.22
	$T_{(E)2-4-5}$	—	—	—	120	140	130.00	—	—

Como puede observarse, el MPME proporcionó una mejor solución que el SPME en ese caso, dada su habilidad para utilizar todos los aforos a lo largo de todas las rutas. En relación con los otros ejemplos resueltos para el SPME (Figuras 3.2 y 3.3), hubo sólo una ruta entre cada par O-D, por lo cual con SPME y MPME se obtendrán los mismos resultados.

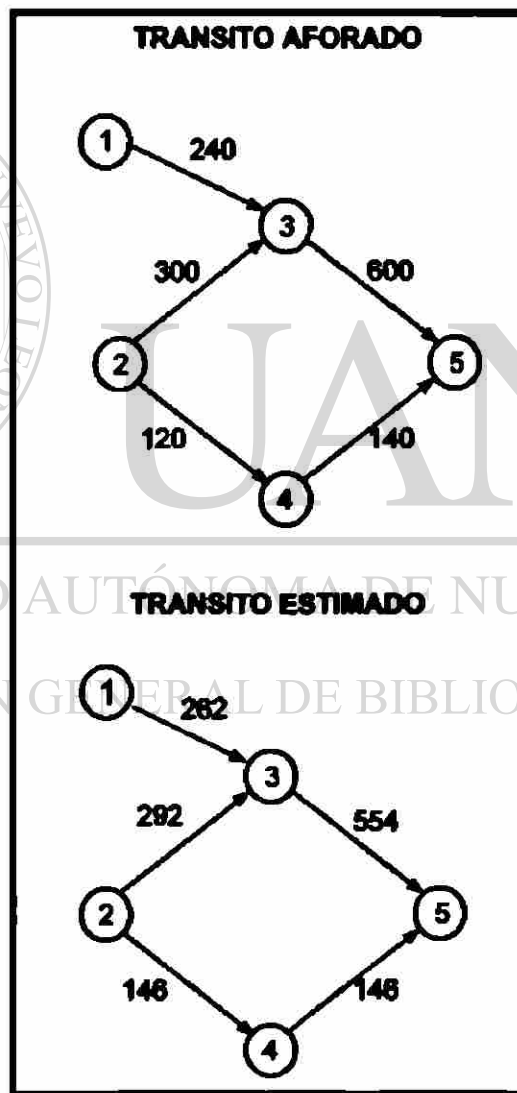


Figura 3.5 Red con aforos vehiculares inconsistentes

3.3.3 Algunas Características del MPME

La base fundamental del MPME son los aforos. En redes con más aforos que elementos matriciales (muy raras veces), la solución será independiente de la matriz semilla. Si los aforos son inconsistentes, el MPME encontrará una solución donde el tránsito esperado promedio a lo largo de cada ruta (Ecuación 3.5b) y la suma del tránsito esperado en todas las rutas entre el par O-D considerado, han convergido (Ecuación 3.5a). Si los aforos son consistentes, continuará modificando los elementos de la matriz hasta que se obtenga un ajuste perfecto. Además de estas características, algunas pruebas prácticas (incluyendo aquellas de las Figuras 3.2 y 3.5) han demostrado que la solución es bastante cercana a la minimización del cuadrado ponderado entre el tránsito aforado y el asignado (aunque el supuesto detrás del MPME no es igual a este problema de minimización):

$$\min \left[\sum_a \frac{(T_a - V_a)^2}{V_a} \right] \quad (3.6)$$

En casos con más elementos matriciales que aforos, todos los elementos relacionados con un aforo serán modificados en la misma dirección. Naturalmente este efecto puede reducirse debido a otros aforos. La modificación de los elementos matriciales cumple la restricción de que el modelo de elección de ruta sea seguido y que la Ecuación 3.2 debe converger. La solución es bastante cercana a la minimización del cuadrado ponderado

entre la matriz semilla y la matriz estimada (aunque el supuesto detrás del MPME no es igual a este problema de minimización):

$$\min \left[\sum_y \frac{(T_y - t_y)^2}{t_y} \right] \quad (3.7)$$

3.4 Metodología Seleccionada

Después de la revisión de los principios generales, algoritmos y programas computacionales hasta aquí efectuada, se seleccionó el SPME y el software TransCAD para los desarrollos que se realizan en las secciones subsiguientes de esta tesis.

La elección del SPME (y con ello la del software TransCAD) reside en que dicha metodología tiene requerimientos computacionales razonables, además de que converge rápidamente, proporcionando frecuentemente una solución bastante cercana a la exacta, como ya se mencionó. Por lo tanto, la selección anterior de herramientas debe generar una solución adecuada, con niveles razonables de complejidad en casos reales, como el que se abordará en el capítulo siguiente. Como ya también se indicó, en estos casos, diferentes porciones de la red presentan distintos niveles de congestión, variando entre porciones no congestionadas, semicongestionadas y completamente congestionadas. En

estas situaciones, el modelo de asignación vehicular recomendado es el "Equilibrio del Usuario Estocástico" (SUE), por lo cual es el que se utilizará en el caso real en el capítulo siguiente. La Figura 3.6 muestra un diagrama de la metodología seleccionada.

Se recomienda explorar en trabajos posteriores la conveniencia de aplicar otras metodologías y herramientas computacionales (p ej. MPME y ArcINFO), las cuales están fuera de los alcances de este trabajo.



Figura 3.6 Diagrama de la metodología seleccionada.

3.5 Ejemplos del SPME resueltos con el TransCAD

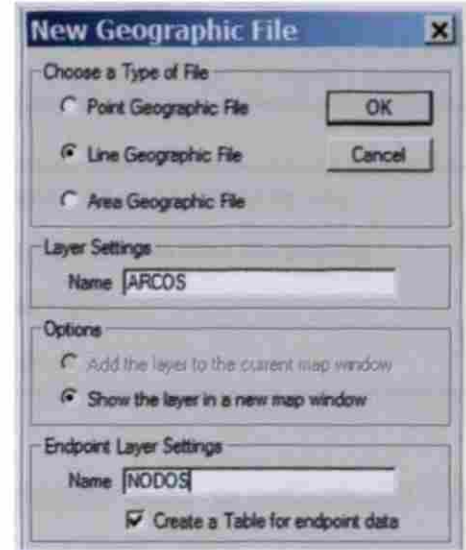
A continuación se describen el procedimiento y los resultados obtenidos para los casos en las Figuras 3.1 y 3.2, utilizando el software TransCAD. El caso de la Figura 3.1 se resuelve utilizando el SPME con un modelo de asignación fijo o tipo "Todo o Nada", para poder comparar los resultados obtenidos con el TransCAD, con los ya presentados en la Sección 3.2.2, obtenidos de la aplicación manual del SPME. El caso de la Figura 3.2, también se resuelve aplicando el SPME a través del TransCAD, pero en este caso, como entre cada par O-D sólo existe una alternativa de ruta, cualquier modelo de asignación elegido proporciona los mismos resultados.

3.5.1 Procedimiento General

Para los dos ejemplos, primero se generó con TransCAD la representación geográfica o mapa del problema y, posteriormente, el modelo de red correspondiente.

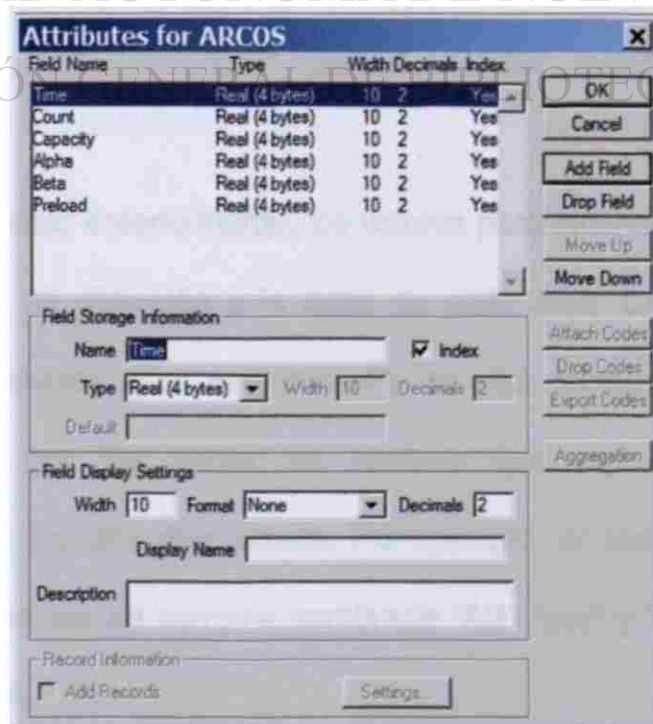
Generación de la representación geográfica

- Se preparó un archivo geográfico con un "layer" (capa) para arcos y otro para nodos. A continuación se ilustran dos pantallas de TransCAD, generadas durante la creación de dichos "layers".

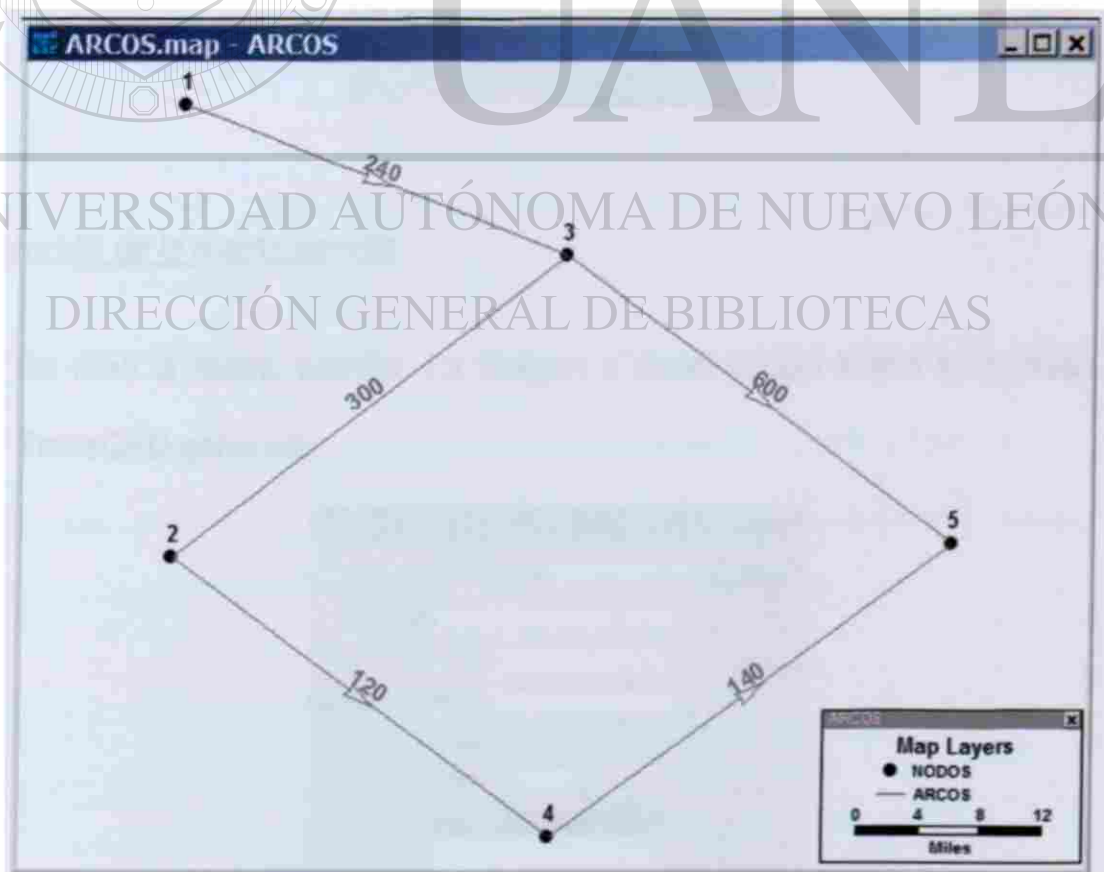


- Se generó la estructura de la base de datos requerida para ingresar los atributos de los arcos. Enseguida se ilustra una pantalla de TransCAD, generada durante la preparación de los datos correspondientes al ejemplo de la Figura 3.1.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

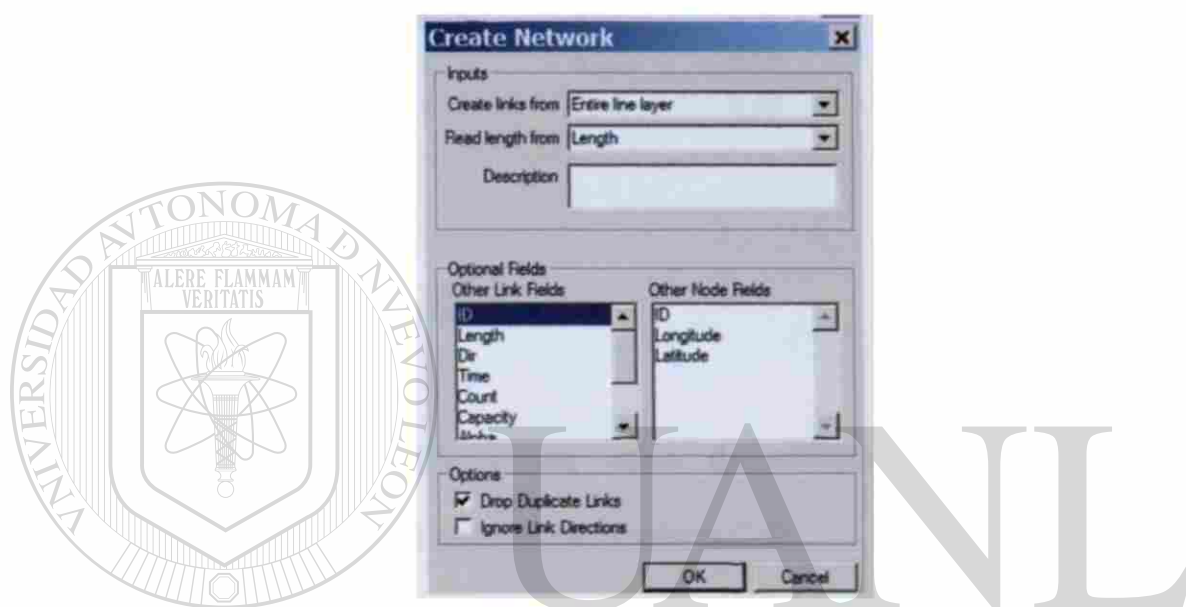


- De manera similar, de ser el caso, se crea una estructura para la base de datos de nodos.
- Con las herramientas de TransCAD para dibujar arcos, se generó la representación del problema en el "layer" de arcos, ingresándose posteriormente los atributos pertinentes de los arcos. La representación contiene todos los nodos de origen y destino que están en la matriz semilla, así como todos los arcos que pueden ser utilizados por los viajes O-D. De ser el caso, se ingresan los atributos de los nodos. Enseguida se ilustra la representación creada para el ejemplo de la Figura 3.1.



Creación del modelo de red

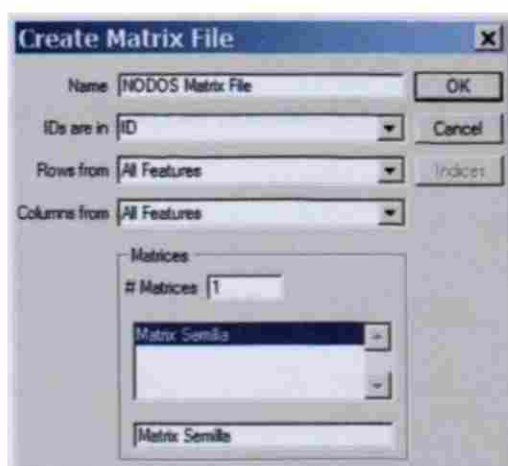
- Una vez generado el mapa del problema, fue necesario generar el modelo correspondiente de red. A continuación se ilustra una pantalla de TransCAD generada durante la creación de la red correspondiente.



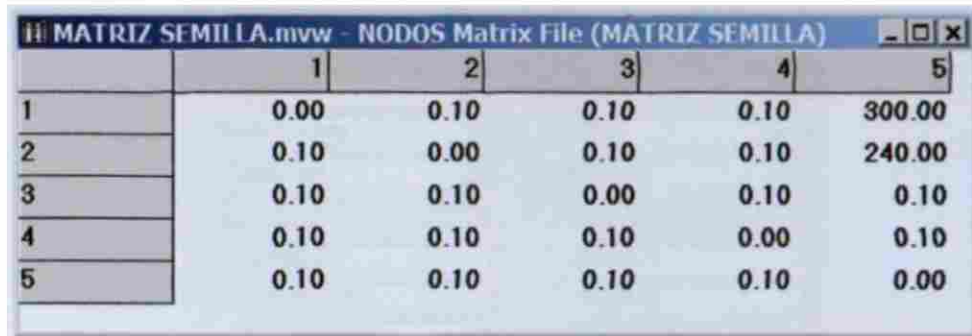
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Creación de la matriz semilla

- Se creó la matriz semilla. La imagen a continuación ilustra la pantalla de TransCAD generada.



- Se ingresaron los flujos de la matriz semilla. La imagen a continuación ilustra la pantalla de TransCAD generada.

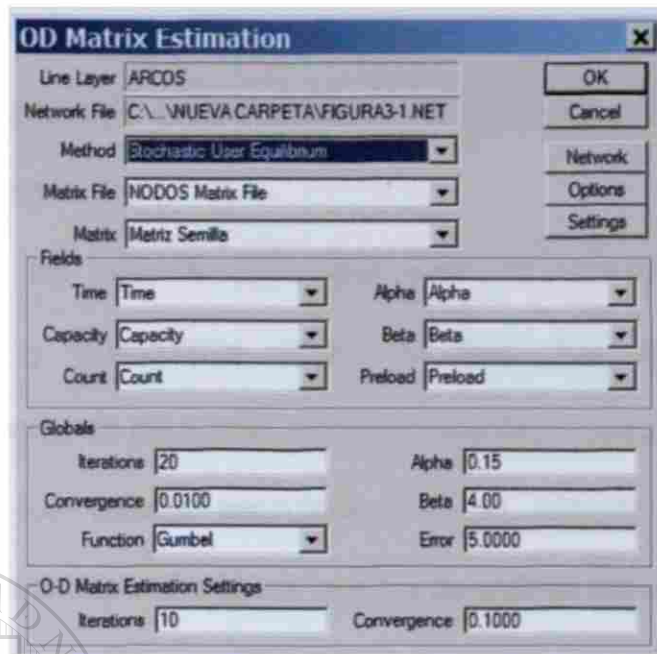


	1	2	3	4	5
1	0.00	0.10	0.10	0.10	300.00
2	0.10	0.00	0.10	0.10	240.00
3	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10
4	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10
5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00

Estimación de la matriz O-D

Una vez que se ingresaron los datos de entrada, se llevó a cabo el procedimiento para la estimación de la matriz O-D.

1. Se abrió el mapa que contenía la red que se generó, activándose posteriormente el "layer" de arcos.
2. Se abrió la matriz semilla.
3. De la barra de herramientas *Planning-OD Matrix Estimation*, se abrió el cuadro de diálogo para la estimación de matrices O-D. La imagen a continuación ilustra la pantalla de TransCAD generada.



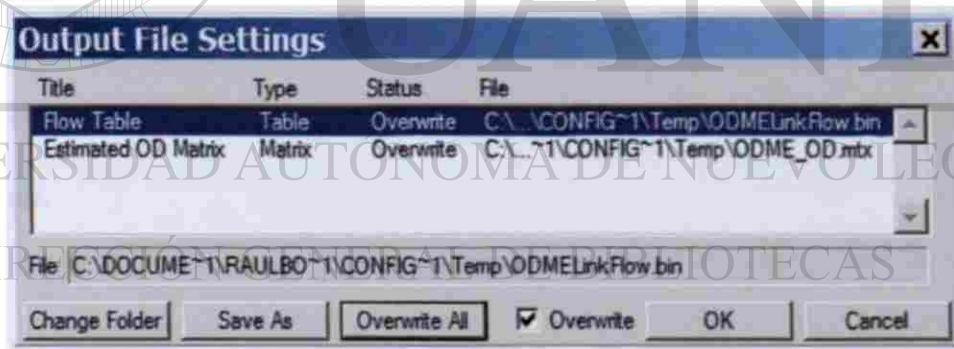
4. A partir de la lista desplegada en "Method", se eligió el método de asignación. Por lo antes dicho, para el caso de la Figura 3.1 se eligió el modelo de asignación fijo o tipo "Todo o Nada". Para el caso de la Figura

3.2, se eligió el modelo de asignación tipo "Equilibrio del Usuario Estocástico" (SUE).

5. De la lista desplegada en "Matrix File", se abrió el archivo de matrices semilla ("NODOS Matriz File" para los dos ejemplos considerados). Asimismo, se activó la matriz semilla del problema a analizar (p. ej. "Figura 3-5-1").

6. Dependiendo del método de asignación elegido, se activan unos campos u otros de los apartados "Fields", "Globals" y "O-D Matrix Estimation Settings" de la pantalla arriba mostrada. En esta pantalla se muestran los campos que se activan cuando se elige el "Equilibrio del Usuario" como método de asignación.

7. Para cada parámetro en el apartado "Fields", TransCAD tomó por omisión los valores ingresados, para cada arco, en los campos del mismo nombre del "layer" de arcos.
8. Se teclearon los valores escogidos para el número de iteraciones, convergencia y parámetros Alpha y Beta (de las funciones de congestamiento de los arcos), correspondientes al modelo de asignación.
9. Se teclearon los valores escogidos para el número de iteraciones y convergencia, correspondientes al modelo de estimación de la matriz.
10. Se pulsó el botón OK para desplegar el cuadro de diálogo "Output File Settings". Se escoge "use", "rename", o "overwrite" en cada archivo como se describe abajo:



Si el estado es:

En uso, o existe, el archivo debe guardarse

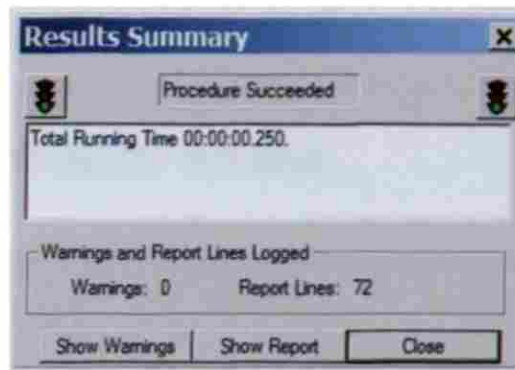
Si Existe, y el archivo no puede ser renombrado

Haga esto:

De clic en Save As, escoja el fólder, teclee el nombre y de clic en Save. El estado se cambiara a uno nuevo.

Revies Overwrite. El estado será cambiado por Overwrite. Si se desea borrar todos los archivos cuyo estado este en Existente, clic Overwrite All.

11. Se pulsó el botón OK. TransCAD generó la matriz O-D que mejor se ajustó a los aforos de la red observados, desplegándose el cuadro de diálogo "Results Summary":



Para hacer esto:

Haga esto:

Ver cualquier advertencia

De Clic en Show Warnings y desplace el fondo del archivo. Cierre el programa Notepad cuando ya este hecho.

Ver el reporte

De Clic en Show Report y desplace el fondo del archivo. Cierre el programa Notepad cuando ya este hecho.

Cerrar el cuadro de diálogo

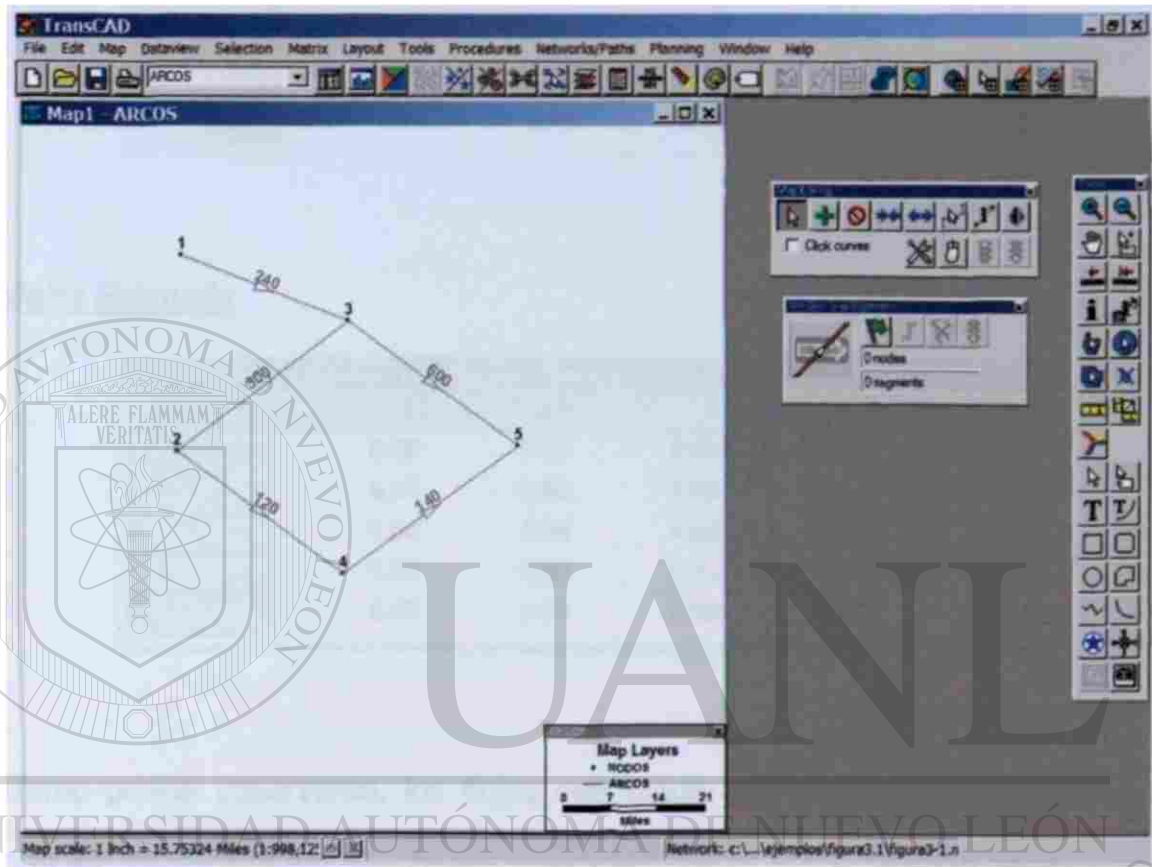
De clic en Close.

TransCAD despliega la matriz O-D resultante y una tabla que muestra los flujos en los arcos correspondientes a la matriz O-D estimada. Dependiendo de ciertas opciones escogidas, TransCAD también puede reportar tabulaciones de flujo y desplegar un tema de flujos mediante símbolos a escala.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3.5.2 Ejemplo de la Figura 3.1

Generación de la representación geográfica

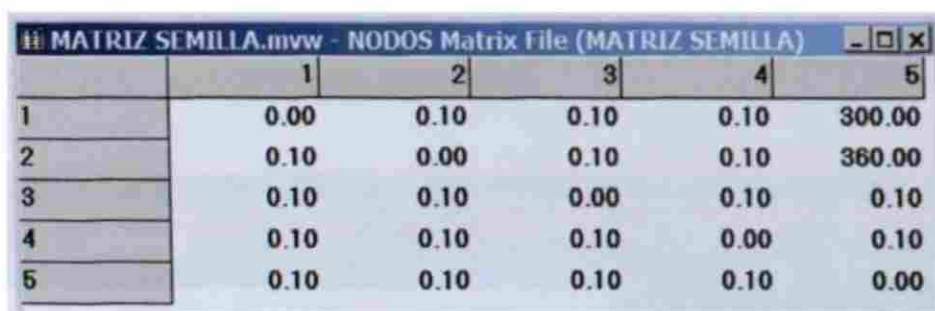


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Atributos de los arcos

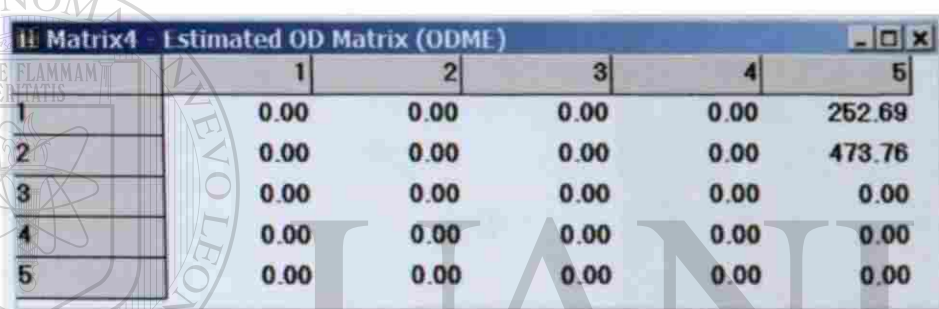
ID	Length	Dir	Time	Count	Capacity	Alpha	Beta	Preload
1	40.00	1	20.00	240	1,000	0.15	4.00	0.00
2	40.00	-1	20.00	120	1,000	0.15	4.00	0.00
3	40.00	1	19.30	300	1,000	0.15	4.00	0.00
4	40.00	1	20.00	600	1,000	0.15	4.00	0.00
5	40.00	1	20.00	140	1,000	0.15	4.00	0.00

Matriz Semilla



	1	2	3	4	5
1	0.00	0.10	0.10	0.10	300.00
2	0.10	0.00	0.10	0.10	360.00
3	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10
4	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10
5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00

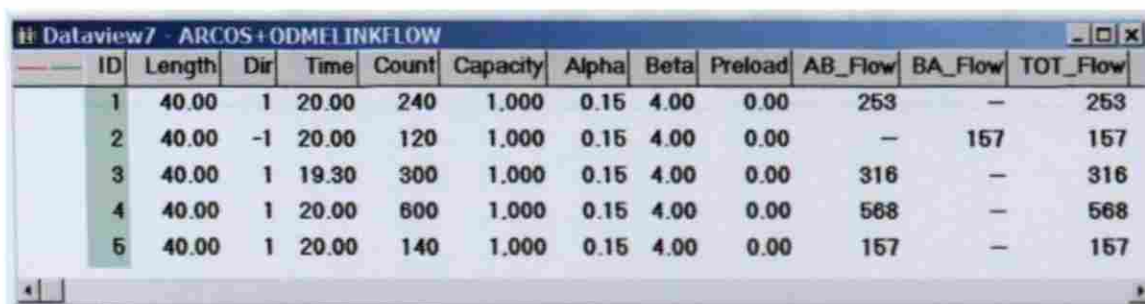
Matriz Estimada



	1	2	3	4	5
1	0.00	0.00	0.00	0.00	252.69
2	0.00	0.00	0.00	0.00	473.76
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Como puede observarse, los flujos estimados mediante el TransCAD ($T_{15} = 253.44$, $T_{25} = 474.85$) resultaron muy similares a los estimados mediante la realización de 30 iteraciones para este ejemplo en la Sección 3.2.2 ($T_{15} = 252.69$, $T_{25} = 473.76$).

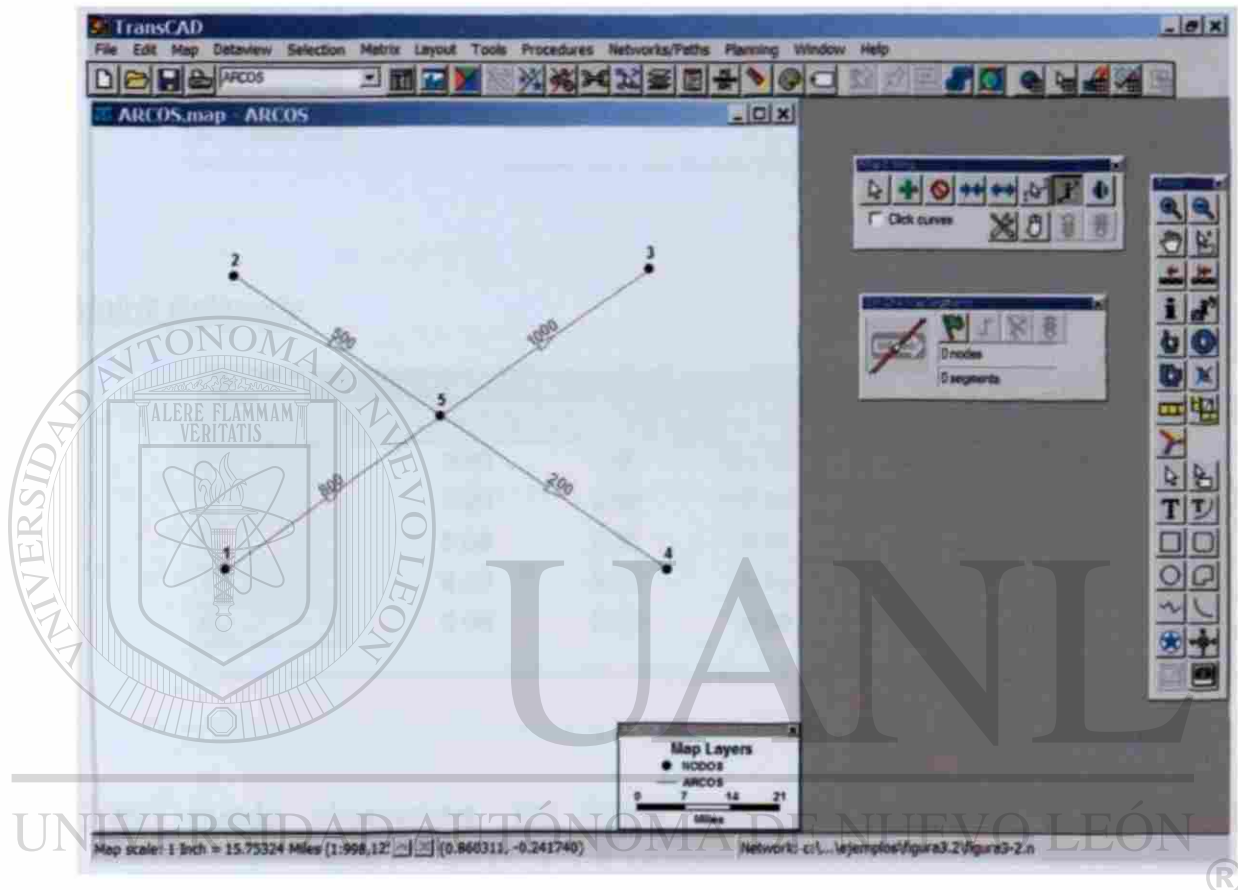
Flujos en los arcos correspondientes a la Matriz Estimada



ID	Length	Dir	Time	Count	Capacity	Alpha	Beta	Preload	AB_Flow	BA_Flow	TOT_Flow
1	40.00	1	20.00	240	1,000	0.15	4.00	0.00	253	—	253
2	40.00	-1	20.00	120	1,000	0.15	4.00	0.00	—	157	157
3	40.00	1	19.30	300	1,000	0.15	4.00	0.00	316	—	316
4	40.00	1	20.00	600	1,000	0.15	4.00	0.00	568	—	568
5	40.00	1	20.00	140	1,000	0.15	4.00	0.00	157	—	157

3.5.3 Ejemplo de la Figura 3.2.

Generación de la representación geográfica



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Atributos de los arcos

ID	Length	Dir	Time	Count	Capacity	Alpha	Beta	Preload
1	40.00	1	20	800	10.000	0.00	1.00	0
2	40.00	-1	20	200	10.000	0.00	1.00	0
3	40.00	-1	20	500	10.000	0.00	1.00	0
4	40.00	1	20	1.000	10.000	0.00	1.00	0

Matriz Semilla

	1	2	3	4	5
1	0.00	-	200.00	-	-
2	-	0.00	200.00	200.00	-
3	-	-	0.00	-	-
4	-	-	-	0.00	-
5	-	-	-	-	0.00

Matriz Estimada

	1	2	3	4	5
1	0.00	0.00	764.20	0.00	0.00
2	0.00	0.00	278.36	205.38	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Como puede observarse, los flujos estimados mediante el TransCAD ($T_{13}=764.20$, $T_{23}=278.36$ y $T_{24}=205.38$) resultaron muy similares a los estimados mediante la realización de 30 iteraciones para este ejemplo en la Sección 3.2.2 ($T_{13}=769.20$, $T_{23}=272.49$ y $T_{24}=208.31$).

Flujos en los arcos correspondientes a la Matriz Estimada

ID	Length	Dir	Time	Count	Capacity	Alpha	Beta	Preload	AB_Flow	BA_Flow	TOT_Flow
1	40.00	1	20	800	10.000	0.00	1.00	0	763	-	763
2	40.00	-1	20	200	10.000	0.00	1.00	0	-	205	205
3	40.00	-1	20	500	10.000	0.00	1.00	0	-	485	485
4	40.00	1	20	1.000	10.000	0.00	1.00	0	1.043	-	1.043

4. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO

En este capítulo se presenta un ejemplo de aplicación del SPME (Single Path Matrix Estimation o Estimación de la Matriz por Camino Sencillo), junto con el modelo de asignación vehicular recomendado que es el "Equilibrio del Usuario Estocástico" (SUE), al problema específico de la estimación de la matriz O-D para el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM).

Como ya se mencionó, dicha aplicación se efectuará utilizando el programa TransCAD.

Según los principios metodológicos presentados en los capítulos anteriores, el desarrollo del ejemplo requiere trabajar con los siguientes tres elementos básicos: un modelo de red de la región de interés (el AMCM), un conjunto de aforos en sitios importantes de dicha red y una matriz semilla. En una primera parte de este capítulo se describe cada uno de esos elementos. En una segunda parte se presenta la calibración de la matriz semilla y se discuten algunos resultados relevantes.

Dado que el proceso de calibración de la matriz semilla será contra valores de tránsito promedio diario anual (TPDA), medidos en sitios de la red considerada, la matriz O-D obtenida después de la calibración será de flujos vehiculares diarios. Como la matriz semilla se obtendrá de la contabilización de todos los vehículos registrados entre cada par O-D en estaciones de encuesta instaladas en diferentes sitios de la red, la matriz semilla así como la matriz O-D calibrada, serán de flujos vehiculares totales (p. ej. integrados por los flujos de automóviles, autobuses, camiones, etc.).



4.1 Descripción de los Elementos Básicos

4.1.1 La Red

En TransCAD, la especificación de la red para este ejemplo debe realizarse a través de tres capas de información o "layers": una para los límites geográficos de las jurisdicciones (Estados) que componen el área de estudio (AMCM), otra para los arcos de la red de transporte modelada, y una tercera para los nodos que delimitan dichos arcos. Cada una de las capas anteriores puede alimentarse al TransCAD a través de una base de datos de Visual Fox Pro.

La información de las tres capas para el área de estudio, fue obtenida a partir de trabajos anteriores que abarcaron todo el país (Referencias 37 y 38). En cada caso, se tomó la base de datos electrónica correspondiente.

En relación con la capa de límites, el área de estudio se integró por el Distrito Federal y los Estados de Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Puebla y Tlaxcala. En cada registro de la base de datos de esta capa se almacenaron los atributos de cada una de las siete jurisdicciones (área, perímetro, etiqueta, etc.).

La capa de arcos quedó integrada por 1,324 arcos (114 correspondientes a autopistas de cuota, 882 a carreteras libres, 188 a conectores de centroide de la subred de carreteras, etc.). En cada registro de esta capa se almacenó la información correspondiente a cada arco (longitud, identificador, etiqueta, etc.).

La capa de nodos quedó constituida por un total de 1,046 nodos, de los cuales: 161 son centroides y 885 son nodos regulares. En cada registro de esta capa se almacenó la información correspondiente a cada nodo (coordenadas geográficas, identificador, etiqueta, indicador de si el nodo es centroide o no, etc.). Cabe señalar que, en la red modelada, el identificador de cada nodo es un número de identificación. En el Anexo B se presenta el número de identificación asignado a cada uno de los 161 centroides.

Las tres capas anteriores fueron alimentadas a un archivo geográfico de TransCAD. La Figura 4.1 ilustra la representación en TransCAD del modelo de red considerado.

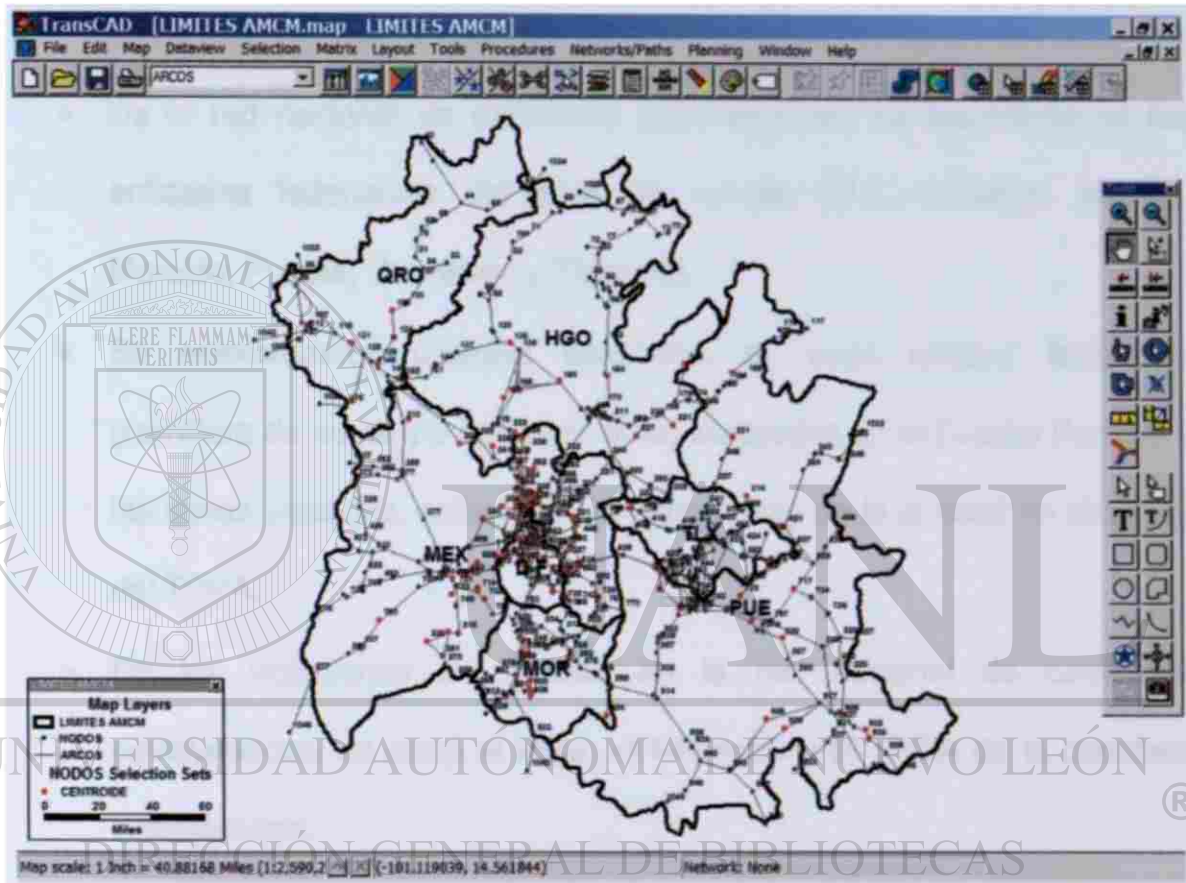


Figura 4.1 Representación en TransCAD del modelo de red del AMCM.

4.1.2 Los Aforos

Del archivo de Datos Viales de la SCT de 2004 (Referencia 39), se seleccionaron una serie de sitios de aforo con base en los siguientes criterios:

- **De la red nacional de carreteras pavimentadas, se seleccionaron las entidades federativas del área de estudio (D.F., Hidalgo, México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala).**
- **Se seleccionaron distintas carreteras de cada entidad federativa (carretera de cuota y/o carretera libre) incidentes en el Distrito Federal y las zonas aledañas, entre las más importantes de la entidad en términos del TDPA.**
- **De los volúmenes de tránsito en la red nacional de carreteras pavimentadas, se tomó el lugar, el kilómetro y el TPDA de la carretera seleccionada.**
- **En total, se seleccionaron 38 sitios de aforo. La Tabla 4.1 muestra la información obtenida de la Referencia 39 para cada uno de ellos.**

Tabla 4.1

TPDA de las entidades federativas del área de estudio

EDG.	No. AFORO	LUGAR	TIPO	CARRETERA	Km	TPDA
B.F.	1	MEXICO - CUERNAVACA	CUOTA	CASETA DE COBRO	23.30	13,420
	2	MEXICO - CUERNAVACA	LIBRE	T. IZQ. TEPOZTLAN	71.88	5,918
	3	CHALCO - MIXQUIC		MIXQUIC	10.00	5,384
	4	MEXICO - LA MARQUESA	CUOTA	PUNTE CONAPRUT	0.00	20,428
	5	SAN GREGORIO - OAXTEPEC		SAN GREGORIO	0.00	8,121
MEXICO	6	MEXICO - TOLUCA		LIBRAMENTO TOLUCA	82.20	31,765
	7	MEXICO - LA MARQUESA	CUOTA	MEXICO-TOLUCA	19.30	11,875
	8	MEXICO - TIZAYUCA	CUOTA	OTUMBA-TIZAYUCA	55.46	8,924
	9	MEXICO - QUERETARO	CUOTA	JILOTEPEC-MARVILLAS	107.00	14,185
	10	TOLUCA - CD. ALTAMIRANO		T.DER. ZINACATEPEC	10.21	10,528
	11	MEXICO - PUEBLA	CUOTA	LOS REYES	20.00	38,874
	12	NAUCALPAN - TOLUCA		T DER. LOMA LINDA	3.13	22,282
	13	LECHERIA - APAXCO		CUATUTTLAN	8.00	14,255
MIDALGO	14	TLAXCO	LIBRE	APIZACO-TEJOCOTAL	29.91	5,282
	15	MEXICO - PACHUCA	CUOTA	LIBRAMENTO PACHUCA	88.00	19,322
	16	MEXICO - QUERETARO	CUOTA	CASETA DE COBRO TEPOZTLAN	49.01	21,791
	17	ENT. COLONA - PORTEZUELO		DOMQUILPAN	75.20	13,491
	18	VENTA DE CARPIO - T.C. (PACHUCA-TLAXPAN)		T.C. PACHUCA-TLAXPAN	84.08	4,754
MORELOS	19	CUERNAVACA - ACAPULCO	CUOTA	CUERNAVACA	0.00	18,594
	20	SANTA BARBARA - IZUCAR MATAMOROS		CHALCO	8.00	16,042
	21	SAN GREGORIO - OAXTEPEC		T DER. YAUTEPEC	89.00	7,134
	22	SANTA BARBARA - IZUCAR MATAMOROS		T IZQ. LIBRAMENTO CUAUTLA	77.06	13,207
	23	PUNTE DE OXTLA - IGUALA	CUOTA	PUNTE DE OXTLA	2.00	6,210
PUEBLA	24	AMOXOC - TEZUITLAN		PUEBLA-CORDOBA (CUOTA)	1.40	10,808
	25	APIZACO - TEJOCOTAL		APIZACO	0.00	7,884
	26	PUEBLA - HUAJUAPN DE LEON		ATLIXCO	28.88	11,354
	27	MEXICO - PUEBLA	LIBRE	CHOLLULA	119.98	14,213
	28	LOS REYES - ZACATEPEC		TEXCOCO	23.02	30,464
QUERETARO	29	LIB. NORTE QUERETARO		MEXICO-QUERETARO	8.00	23,974
	30	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA		CADEREYTA DE MONTES	47.90	2,890
	31	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA		JALAPAN DE SIERRA	179.30	1,994
	32	TOLUCA - PALMILLAS		ATLACOMULCO	65.00	7,084
	33	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA		T.DER. LIB. SAN JUAN DEL RIO	5.20	4,987
TLAXCALA	34	CALPULALPAN - EL OCOTE		CALPULALPAN	0.00	7,564
	35	VILLA ALTA - T.C. (PUEBLA - TLAXCALA)		PUEBLA-TLAXCALA	22.06	4,885
	36	LOS REYES - ZACATEPEC		LIBRAMENTO DE HUAMANTLA	141.70	10,899
	37	PUEBLA - TLAXCALA		TLAXCALA	39.22	30,082
	38	SAN MARTIN TEXMELUCAN - TLAXCALA		SAN MARTIN TEXMELUCAN	0.00	13,855

La Figura 4.2 ilustra la ubicación de los 38 sitios de aforo seleccionados para este trabajo. Los números con los que se etiquetan los sitios de aforo en la

figura, corresponden al número secuencial dado a los mismos en la columna 2 de la Tabla 4.1.

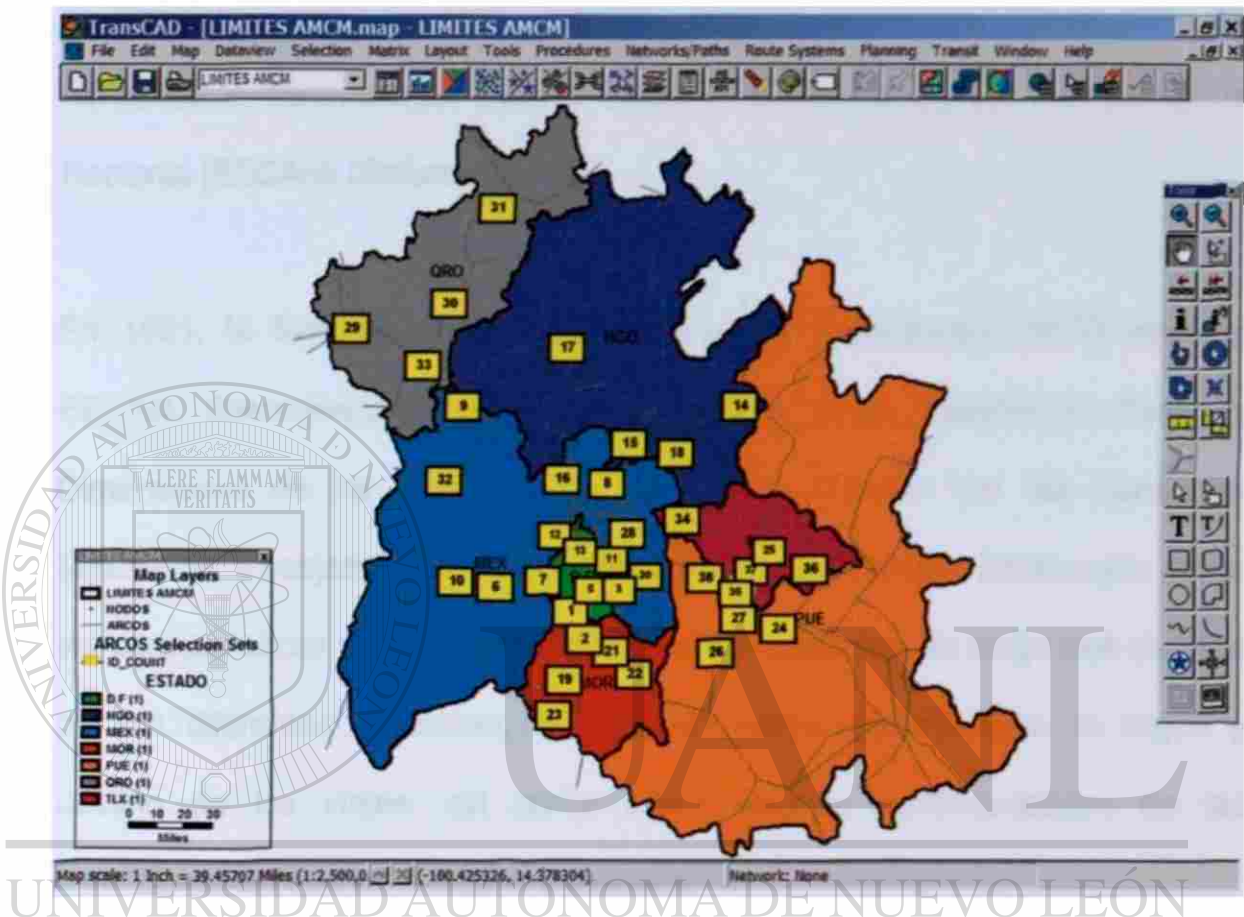


Figura 4.2 Representación en TransCAD de los 38 sitios de aforo seleccionados para el área de estudio.

4.1.3 La Matriz Semilla

Como ya se señaló en el Capítulo 3, el método SPME con asignación tipo SUE requiere de una matriz O-D semilla, sobre la que realiza una serie de ajustes iterativos con base en los aforos considerados, hasta obtener la matriz calibrada que, al ser asignada a la red, mejor reproduce los aforos.

Para el caso particular de este ejemplo, la matriz semilla fue generada a partir de una serie de estudios O-D realizados en estaciones de encuesta instaladas en carreteras dentro del área de estudio. Estos estudios O-D forman parte del formalmente denominado: Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional (EECAN) (Referencia 40).

En 1991, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) inició el EECAN, denominado en sus etapas iniciales como: Estudio de Pesos y Dimensiones de los Vehículos de Carga que Circulan por las Carreteras Mexicanas. El objetivo principal del EECAN ha sido generar información sobre las características más representativas de los vehículos de carga que circulan por las diferentes carreteras, los tipos de carga transportados, el origen y destino de los viajes, así como sobre algunas particularidades de las condiciones en que se realiza el transporte.

A partir de 1991, cada año se han realizado estudios en una serie de estaciones de exploración instaladas en diferentes sitios de la red carretera nacional, que permiten obtener la información antes mencionada. Este trabajo utiliza la información correspondiente a las 10 estaciones de encuesta instaladas entre los años 1995 a 2003.

Los trabajos de campo que se realizan como parte del EECAN consisten en recopilar información en las carreteras seleccionadas, mediante una encuesta.

Hasta la fecha, la exploración de campo se ha llevado a cabo en sitios específicos o estaciones distribuidas por toda la red.

En general, en las estaciones se capta a todos los vehículos de carga que circulan por ellas, durante 24 horas, cuatro días consecutivos (martes a viernes). En primer lugar, se aplica un cuestionario a los conductores. Posteriormente, los vehículos se miden (en ocasiones) y pesan. Hasta 2002 se han instalado 155 estaciones, 10 en 1991; 3 en 1992; 15 en 1993; 18 en 1994; 21 en 1995; 11 en 1996; 20 en 1997; 13 en 1998; 7 en 1999; 4 en 2000 y 21 en 2001. En todas se ha aplicado la encuesta origen-destino.

Es importante señalar que en algunos años, como en 2002, las estaciones de campo no sólo se han instalado con objeto de estudiar el transporte de carga, sino también, por el interés de distintas dependencias de la SCT, se ha buscado investigar otros diversos aspectos de utilidad para esas dependencias, tales como el comportamiento de la demanda en las autopistas de cuota, el origen y destino de los automóviles y los autobuses, etc.

En 2002, por ejemplo, se incluyó en la encuesta a todos los vehículos (autos, autobuses y camiones); en el caso de los autos, se incluyó en el cuestionario el motivo del viaje (trabajo, escuela, compras, etc.), y en el caso de los autobuses, el número de pasajeros.

A partir del estudio en cada estación, se genera una base de datos en la que en cada registro se almacena la información correspondiente a cada vehículo encuestado. A su vez, en campos de dicho registro, se almacena la siguiente información para ese vehículo: sitio de origen del viaje, por población y entidad de origen; el sitio de destino del viaje, por población y entidad de destino; el tipo de vehículo (A, B o C según se trate de un automóvil, de un autobús o de un camión de carga); la cantidad y las unidades transportadas (p. ej. 40 pasajeros, 25 toneladas, etc.); y el tipo de carga, en caso de tratarse de un camión de carga.

Para este trabajo, se seleccionaron 10 bases de datos, correspondientes a 10 estudios O-D realizados en estaciones de encuesta instaladas de 1995 a 2003.

La Tabla 4.2 resume información general de cada una de las estaciones seleccionadas (p. ej. nombre, ubicación, fecha de encuesta y vehículos encuestados). El último renglón de la tabla indica que la muestra considerada para la obtención de la matriz semilla para este ejemplo se constituyó por 330,340 vehículos.

La Figura 4.3 ilustra la ubicación de las 10 estaciones. Los números con los que se etiquetan las estaciones en la figura, corresponden al número secuencial dado a los mismos en la columna 1 de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2

Estaciones de encuestas O-D seleccionadas en el área de estudio

No.	Nombre	Ubicación		Tipo	Km	Fecha		Aforo
		Carrilera	Tramo			Día-Mes	Año	
1	Atzacmulco	Toluca - Patmilas	Pestejo - Atzacmulco	Libre	88+100	28 Oct-01 Nov	1998	84,788
2	El Refugio	Portezuelo - Patmilas	Joncocpa - Patmilas	Libre	67+000	27-30 May	2003	28,888
3	Las Rañas	Neuquipan - Toluca	T Izq. Chichioapa - T.Der. Zolotepac	Libre	29+800	09-11 Jul	2003	21,888
4	San José	Pachuca - Tulancingo	T.C. Veritas de Carpio / Tulancingo - T.Izq. Lib. de Tulancingo	Libre	40+000	17-30 Oct	1998	68,888
5	San Martín	México - Puebla	San Martín Texmelucan - Puebla	Cuota	91+000	13-15 Ago	2003	44,888
6	San Mateo	México - Puebla	San Martín Texmelucan - T.Der Cholula	Libre	81+800	05-08 Ago	2003	28,848
7	Singulucan	Veritas de Carpio - T.C. (Pachuca - Tulancingo)	Pirámides - T.C. (Pachuca - Tulancingo)	Cuota	71+800	05-08 Jun	2003	21,434
8	Tehuiztzingo	Puebla - Huixtla	Izucar de Matamoros - Tehuiztzingo	Libre	147+000	23-25 Sep	1998	2,188
9	Yauatepec	Cuernavaca - Cuautlaco	Yauatepec - Cocoyoc	Libre	33+300	23-25 Sep	1998	9,171
10	Zumpango	Iguale - Chilpancingo	Ent. Milpilas - Chilpancingo	Libre	209+300	23-25 Sep	1998	18,148
SUMA =								238,248

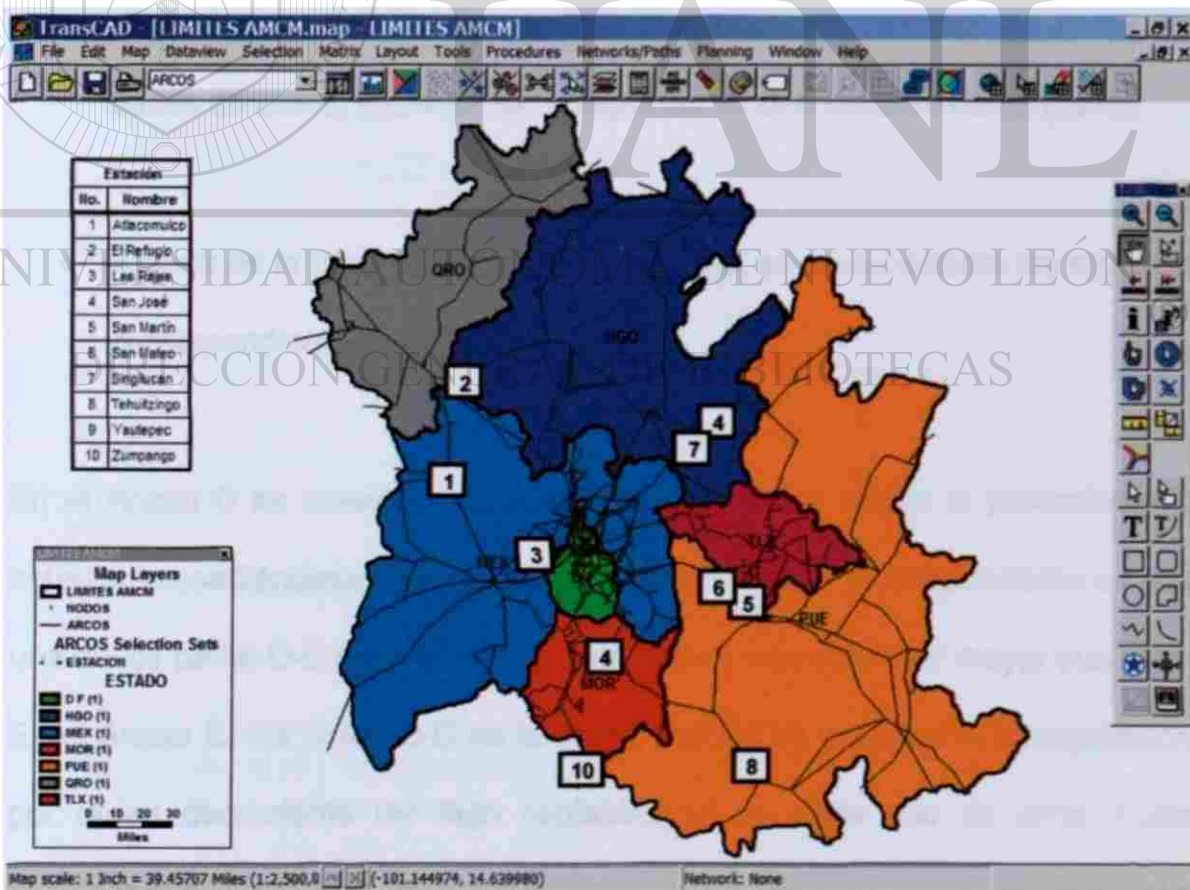


Figura 4.3 Representación en TransCAD de las 10 estaciones seleccionadas para el área de estudio.

El procedimiento seguido para la obtención de la matriz semilla a partir de las 10 bases de datos consideradas, fue el siguiente:

- **Para cada registro de cada base de datos, a partir de la población y entidad de origen del viaje, de los 161 centroides considerados se seleccionó como centroide de origen aquél geográficamente más cercano a dicha población, ingresándose en un campo su identificador.**

El mismo procedimiento se realizó para registrar el identificador del centroide de destino.

- **Una vez completado lo anterior para todos los registros de todas las bases de datos, éstas fueron integradas en una base de datos global.**

- **A partir de la base de datos global anterior, se contabilizaron los registros correspondientes a cada par O-D.**

En el Anexo C se muestra la matriz semilla obtenida según el procedimiento anterior, presentándose en cada renglón la información correspondiente a cada uno de los pares O-D para los que se contabilizó flujo vehicular mayor que cero.

En el Anexo C, los pares O-D de la matriz semilla se encuentran jerarquizados por orden decreciente del flujo contabilizado en cada uno de ellos. Cabe destacar que la suma de los flujos vehiculares de todos los pares resultó igual a 330,340 (vehículos encuestados en las 10 estaciones consideradas).

La Figura 4.4 muestra una representación gráfica, realizada en TransCAD, de los 36 pares O-D con mayor flujo contabilizado en ambos sentidos (con flujo en ambos sentidos superior a 1,000 vehículos). El flujo vehicular para todos los pares O-D se muestra en el Anexo C. Cabe señalar que el flujo total en ambos sentidos de los 36 pares en la Figura 4.4 (221,146 vehículos) representa el 66.94% del flujo contenido en toda la matriz semilla (330,340 vehículos).

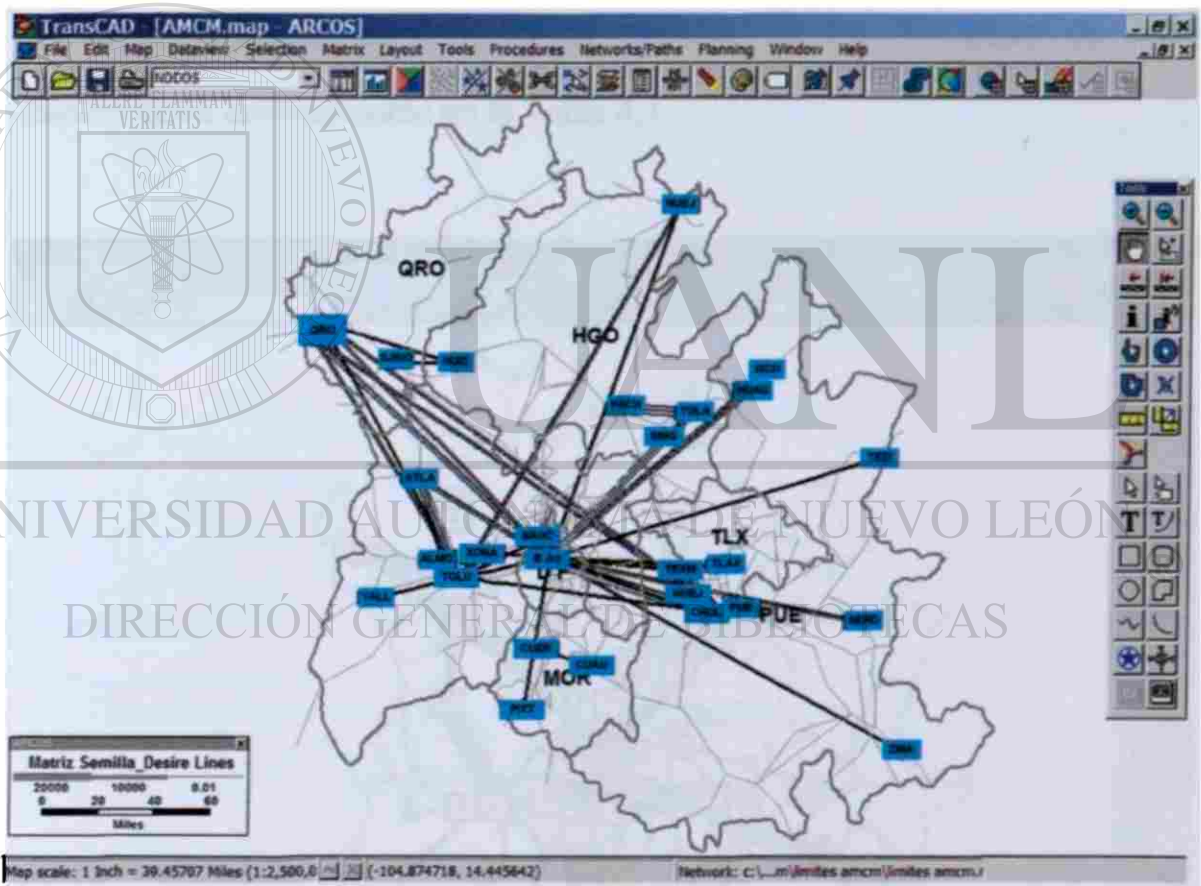


Figura 4.4 Representación en TransCAD de los 36 pares O-D con mayor flujo vehicular en ambos sentidos, obtenidos de la matriz semilla.

Posteriormente se realizó una asignación tipo SUE de la matriz semilla, a la red considerada. La Figura 4.5 muestra la representación gráfica de los flujos

asignados en todos los arcos, donde el ancho de la banda en cada arco es proporcional a la magnitud del flujo en los dos sentidos de dicho arco.

En la Figura 4.5 es evidente que los flujos de mayor magnitud resultantes de la asignación de la matriz semilla, se generan por las autopistas México-Querétaro, México-Puebla, México-Pachuca, México-Toluca, Toluca-Atacomulco y Atacomulco-Palmillas. Cabe señalar que en la Figura 4.5, en recuadros amarillos se muestra el número de los 38 sitios de aforo mencionados anteriormente en la Tabla 4.1.

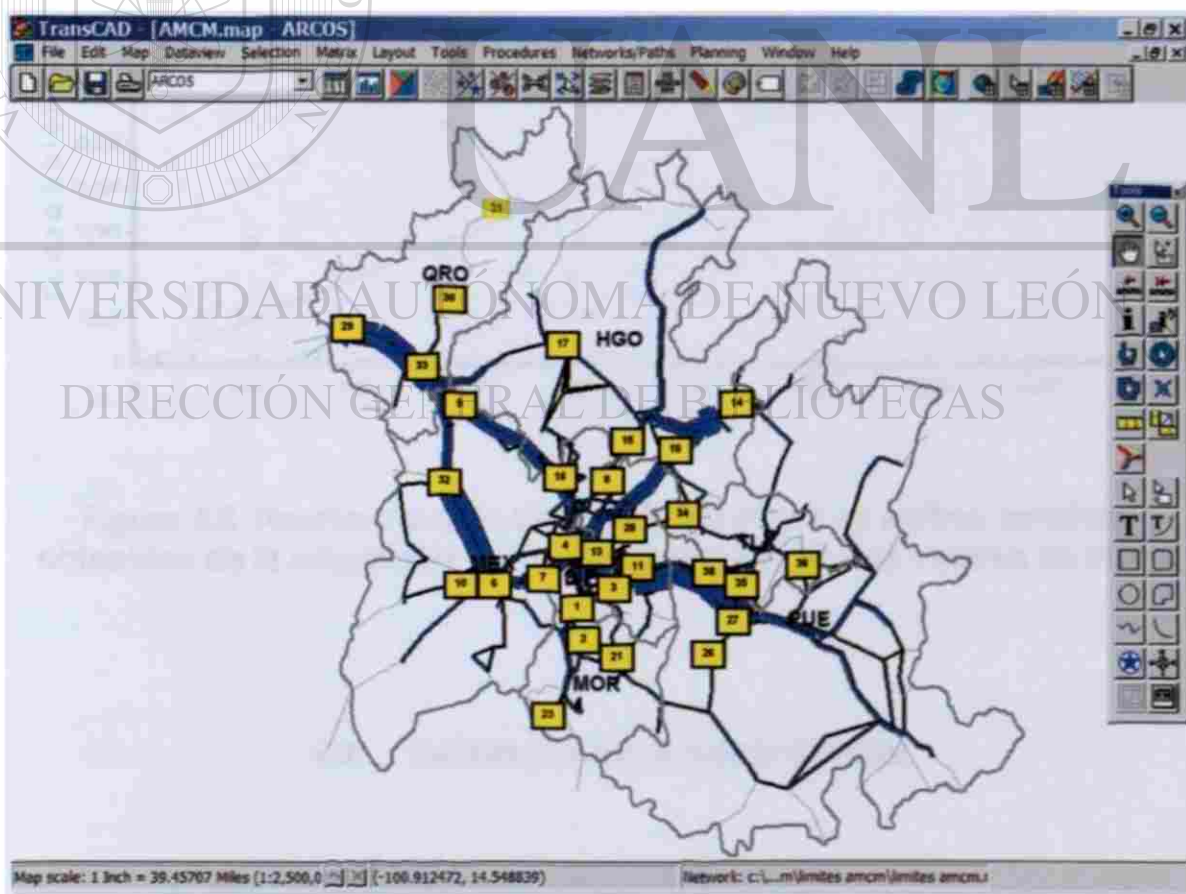


Figura 4.5 Representación gráfica de los flujos resultantes de la asignación de la matriz semilla.

La Figura 4.6 muestra una gráfica que compara los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación de la matriz semilla, contra los valores de aforo (TDPA) seleccionados, para los 38 sitios marcados en recuadros amarillos en la Figura 4.5. Como es evidente en la figura, los valores de flujo asignado son en general muy diferentes a los flujos reales (aforos). Un dato relevante obtenido de este análisis es que los flujos asignados resultaron, en promedio, un 54% de los reales.

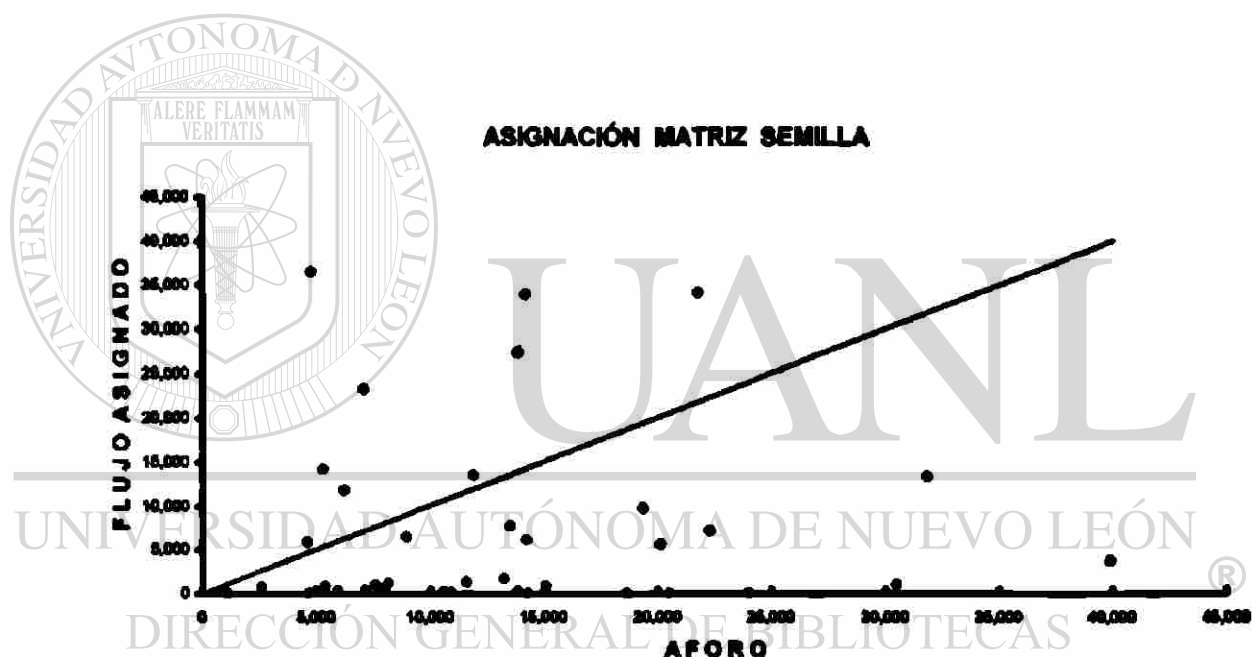


Figura 4.6 Representación gráfica de los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación de la matriz semilla, Vs. los valores de aforo.

4.2 Calibración de la Matriz Semilla

Mediante el procedimiento del TransCAD que resuelve el SPME, se ajustó la matriz semilla para que en una asignación tipo SUE, dicha matriz reprodujese los aforos considerados.

La Figura 4.7 muestra, en una representación gráfica, los 75 pares O-D con mayor flujo en ambos sentidos (con flujo en ambos sentidos superior a 1,000 vehículos). El flujo vehicular para todos los pares O-D se muestra en el Anexo C. Cabe señalar que el flujo total en ambos sentidos de los 75 pares en la Figura 4.7 (408,564 vehículos) representa el 68.23% del flujo contenido en toda la matriz ajustada (595,850 vehículos).

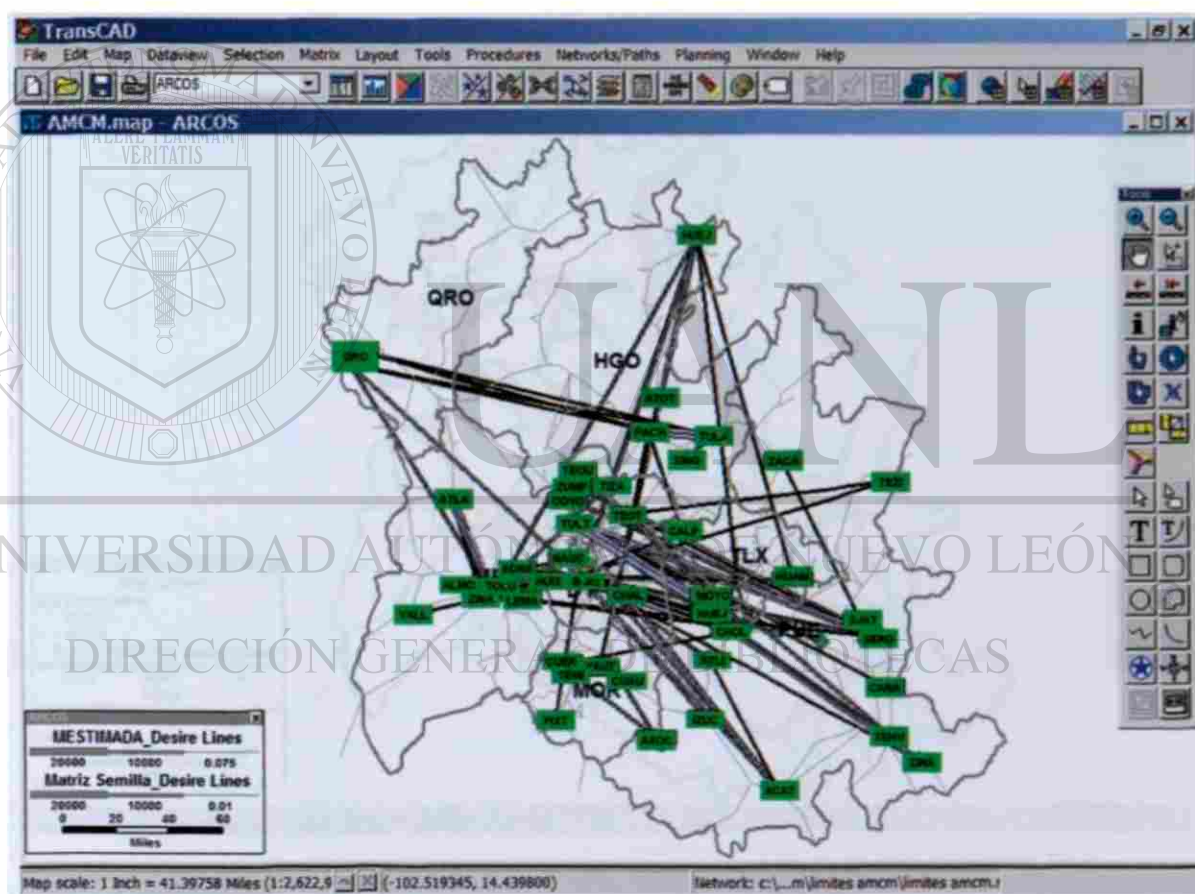


Figura 4.7 Representación en TransCAD de los 75 pares O-D con mayor flujo vehicular en ambos sentidos, obtenidos de la matriz estimada.

Como resultado de realizar la asignación tipo SUE de la matriz calibrada, sobre la red considerada, se obtuvo la Figura 4.8, en la cual se muestran los flujos asignados en todos los arcos.

Como puede observarse en la figura, los flujos de mayor magnitud resultantes de la asignación de la matriz estimada, al igual que cómo se obtuvo de la asignación de la matriz semilla, se generan por las autopistas México-Querétaro, México-Puebla, México-Pachuca, México-Toluca, Toluca-Atacomulco y Atacomulco-Palmillas.

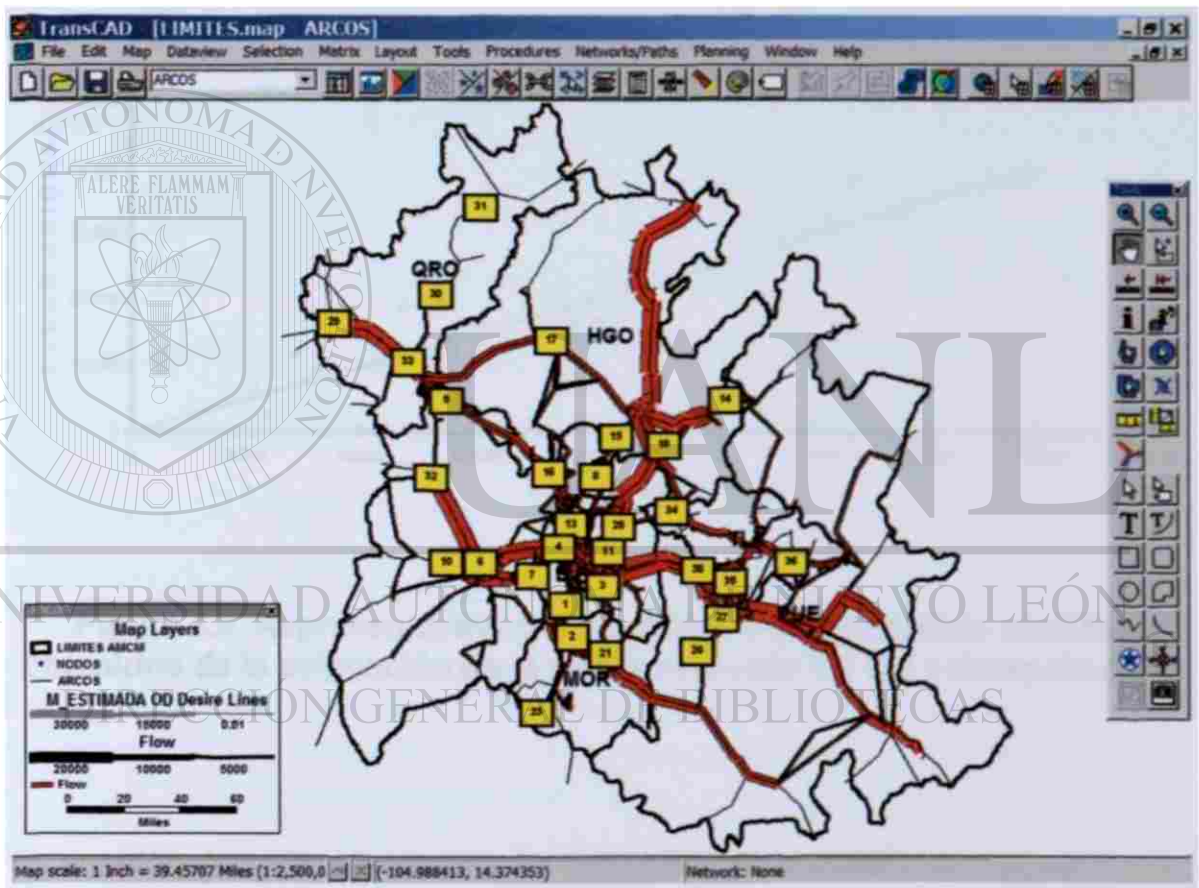


Figura 4.8 Representación gráfica de los flujos resultantes de la asignación de la matriz estimada.

Finalmente, la Figura 4.9 compara los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación calibrada, contra los valores de TDPA en los 38 sitios considerados. Como es evidente en esta figura, después de la calibración de la matriz semilla,

los valores asignados contra los reales en los 38 sitios considerados son muy similares, mejorando la correlación entre ambos parámetros anteriores (entre los flujos asignados y los reales) y escalándose los flujos asignados (96%) hasta alcanzar valores similares a los de los flujos reales.

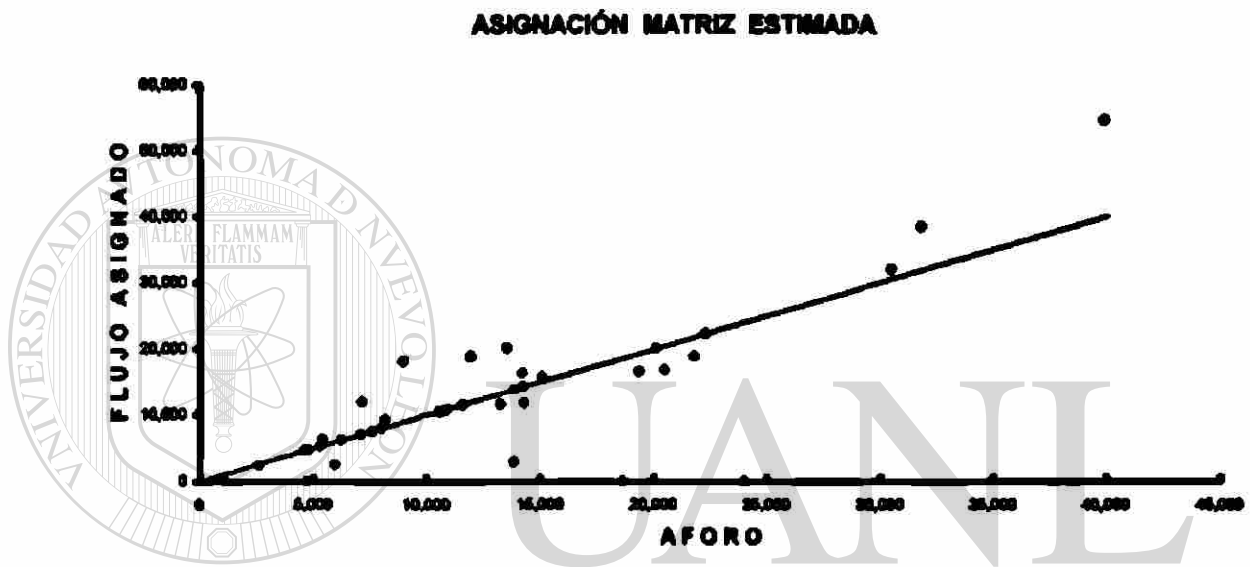


Figura 4.9 Representación gráfica de los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación de la matriz estimada Vs. los valores de aforo.

Lo anterior ejemplifica las bondades del SPME en el modelo de asignación tipo SUE, para calibrar matrices O-D en problemas reales.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la estimación de matrices O-D a partir de aforos vehiculares es de considerable importancia en la planeación de los sistemas de transporte.

Utilizando los métodos de estimación de matrices a partir de aforos vehiculares, pueden estimarse a menudo modelos de tránsito más baratos y más fáciles que con los estudios O-D que son más extensos y costosos.

En este trabajo se han descrito algunos métodos para estimar matrices de viajes a partir de aforos vehiculares. Dichos métodos pueden ocuparse de aforos con inconsistencias e incertidumbres, pudiendo ser implementados con cualquier método de asignación, incluso con el método de asignación "Equilibrio del Usuario Estocástico" (SUE). Si ocurren aforos inconsistentes, éstos no afectarán seriamente los resultados como en muchos otros métodos de estimación de matrices.

El primer método, SPME, es el más fácil de implementar, pero tiene una naturaleza más heurística que el segundo método, MPME. El MPME utiliza todos los aforos, a lo largo de todas las rutas, entre cada par de zonas para la

estimación; mientras que SPME sólo utiliza los aforos a lo largo del camino óptimo. En estudios de casos prácticos, esto significa que MPME converge más fácilmente que SPME y que las soluciones dan mejores ajustes para los aforos y estimaciones más razonables para las matrices. Sin embargo, en ambos métodos se obtienen mejoras significativas, comparadas con la matriz semilla. Esto se da particularmente en el caso de redes donde ocurren a menudo elecciones múltiples de rutas, como en la mayoría de las áreas urbanas.

El principal aspecto a considerar para los planificadores, es que ambos métodos son bastante fáciles de llevar a cabo y convergen dentro de tiempos de cálculo razonables. Esto se ha logrado construyendo los métodos sobre supuestos y mecánicas bastante simples, en lugar de formularlos como programas matemáticos. SPME es más simple de implementar, debido a que puede utilizarse con los diferentes métodos de asignación.

Tanto SPME , como MPME dependen del modelo de la matriz semilla (si hay menos aforos que en los elementos de la matriz, como normalmente es el caso), pero ambos métodos pueden alterar dicho modelo significativamente para lograr el mejor ajuste con los aforos. Ésta es una ventaja en los análisis de bajo presupuesto, donde una matriz existente (a menudo antigua) debe ser actualizada para ser la base para estimar un nuevo modelo de tránsito, a fin de utilizarla como matriz pivote en el modelo o para ser utilizada directamente en la estimación de flujos para nuevos caminos.

Este trabajo muestra una metodología que se recomienda para generar mejores estimaciones de la demanda de transporte entre las diferentes zonas de un área determinada de estudio. La metodología mostrada es sencilla y por lo mismo fácil de utilizar en problemas reales, que suelen ser de tamaño considerable.

Se recomienda lograr mayores avances en trabajos futuros explorando la aplicación de métodos que mejoren la calidad de las estimaciones (p. ej. MPME), con niveles similares de versatilidad en la obtención de las soluciones.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REFERENCIAS

Capítulo 1

1. Caliper Corporation, "Manual del Usuario TransCAD 4.5".
2. Trabajo Práctico Publicado en Internet "Estimación de la Demanda en Redes" http://www.fi.uba.ar/materias/6808/6808_Contenidos.htm.
3. Manual Normativo SEDESOL, Tomo II "Manual de Conceptos y Lineamiento para la Planeación del Transporte Urbano", Programa de Asistencia Técnica en Transporte Urbano para las Ciudades Medias Mexicanas.
4. Box Paul C. y Joseph C. Oppenlander, "Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito"; Capítulo 9 Estudios de Origen y Destino; 4ª Edición.
5. Louis J. Pignataro; "Traffic Engineering: Theory and Practice"; Capítulo 5 Origin and Destination Studies.
6. Radalat Egües Guido (1964), "Manual de Ingeniería de Tránsito", Capítulo XXV Estudios de Origen y Destino; Chicago, Illinois.
7. Ministerio del Transporte "Manual para Estudios de Origen y Destino de Transporte de Pasajeros y Mixto en Áreas Municipales, Distritales y Metropolitanas" <http://www.mintransporte.gov.co/Servicios/Biblioteca/documentos/Documentos.htm> Bogotá, Colombia 2001.
8. Wilson, A.G. (1970), "Entropy in Urban and Regional Modelling"; Londres, Plon.
9. Novaes, A.G. (1982), "Model em Planejamento Urbano, regional e de Transportes"; Sao Paulo, Brasil.
10. Sheffi, Y. (1985) "Urban Transportation Networks". Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
11. Sheffi, Y. and Powell, W.B. (1982) "An algorithm, for the Equilibrium Assignment Problem with Random Link Times". Networks 12, 191-207.

12. INRO Consultants (2000), "Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium, (EMME/2)", "Strategic Transportation Analysis (STAN)". Montreal, Canada.
13. ESRI (2002), "ArcINFO GIS: Manual del Usuario".
14. Publicación en Internet, "Del Nodo a la Red, Problemas de Movilidad en la Ciudad de México y Soluciones Integrales"
<http://www.segundonivel.df.gob.mx/dvial/delnudoalared.htm>

Capítulo 2

15. Ortúzar, J. de D. and Willumsen, L.G. (1990) "Modelling Transport". John Wiley & Sons, Chichester.
 16. Sheffi, Y. (1985), "Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods". Prentice-Hall, Inc.
 17. Robillard, P. (1975) "Estimating the O-D Matrix from Observed Link Volumes". Transportation Research, 9(2/3), 123-8.
 18. Willumsen, L.G. (1978) "Estimation of an O-D Matrix from Traffic Counts: a Review". Working Paper 99, Institute for Transport Studies, University of Leeds.
-
19. Lamond, B. and Stewart, N.F. (1981) "Bregman's Balancing Method". Transportation Research, 15B (4), 239-48.
 20. Nielsen (1994) "A New Method for Estimating Trip Matrixes from Traffic Counts". Preprints Seventh International Conference on Travel Behaviour, Valle Nevado, June 1994, Chile.

Capítulo 3

21. Tamin, O.Z. and Willumsen, L.G. (1989) "Transport Demand Model Estimation from Traffic Counts". Transportation 16, 3-26.
22. Yang, H., Ida, Y. and Sasaki, T. (1994) "The Equilibrium-Based Origin-Destination Matrix Estimation Problem". Transportation Research 28B, 23-33.
23. Sherali, H.D., Sivanandan, R. And Hobeika, A.G. (1994) "A linear programming approach for Synthesising Origin-Destination Trip Tables from Link Traffic Counts". Transportation Research 28B, 213-233.

24. Willumsen, L.G. (1981) "Simplified Transport Models Based on Traffic Counts". *Transportation* 10, 257-278.
25. Ben-Akiva, M. and Morikawa, T. (1989) "Data Fusion Methods and their Applications to Origin-Destination Trip Tables". In *Work Conference on Transport Research* (eds.), Transport Policy, Management and Technology Towards 2001, Western Periodicals Co., Ventura, CA.
26. Ben-Akiva, M. (1987) "Methods to Combine Different Data Sources and Estimate Origin-Destination Matrices". In N.H. Gartner and N.H.M. Wilson (eds.), *Transportation and Traffic Theory*, Elsevier Science, London.
27. Publicación en Internet, "Algoritmos de caminos más cortos entre nodos" <http://www.ants.dif.um.es/asignaturas/redes/tema3/tema3.htm>
28. Yang, H., Sasaki T., Ida, Y. and Asakura, Y. (1992) "Estimation of Origin-Destination Matrices from Traffic Counts on Congested Networks". *Transportation Research* 26B, 417-434.
29. Dial, R.B. (1971) 2A "Probabilistic Multipath Traffic Assignment Algorithm which Obviates Path Enumeration". *Transportation Research* 5, 81-111.
30. Daganzo, C.F. and Sheffi, Y. (1977) "On Stochastic Models of Traffic Assignment". *Transportation Science* 11, 253-274.
-
31. Sheffi, Y. and Powell, W.B. (1981) "A Comparison of Stochastic and Deterministic Traffic assignment Over congested Networks". *Transportation Research* 15B, 53-64.
32. Nielsen, O.A. (1996) "Do Stochastic Traffic Assignment models Consider Differences in Road Users' Utility functions?" *Proceedings 24th European Transport Forum*, Brunel University, September 1996, UK.
33. Van Vuren, T. (1994) "The Trouble with SUE Stochastic Assignment Options in Practice". *Proceedings 22nd European Transport Forum*, University of Warwick, September 1994, UK.
34. Slavin, H. (1996) "An Integrated, Dynamic Approach to Travel Demand Forecasting". *Transportation* 23, 313-350.
35. Caliper (1996) "Travel Demand Modelling with TransCAD 3.0". Caliper Corporation, Newton.
36. Van Zuylen, H.J. and Willumsen, L.G. (1980) "The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts". *Transportation Research* 14B, 281-293.

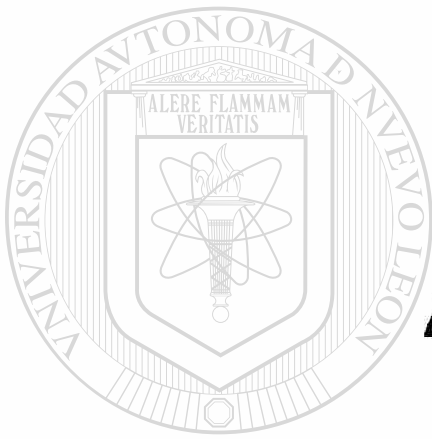
Capítulo 4

37. Centeno Saad, Agustín G. (2003), "Modelo de Asignación Intermodal-Multiproducto para las Operaciones de Carga Terrestre por Autotransporte y Ferrocarril en la República Mexicana", Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres, en la Universidad Autónoma de Chihuahua (U.A.CH.), Chihuahua, Chih.
38. Parra Torres, Mario A. (2003), "Desarrollo de un Modelo de Asignación Multimodal para el Análisis de los Flujos Vehiculares de Libramiento o Acceso al Área Metropolitana de la Ciudad de México", Borrador de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Tránsito, en la Universidad Autónoma de Nuevo León (U.A.N.L.), San Nicolás de los Garza, N. L.
39. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección de Servicios Técnicos, "Estudio de Datos Viales 2004".
40. Gutiérrez Hernández, José L., Mendoza Díaz, Alberto, "Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional, Análisis Estadístico de la información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 2002". Publicación Técnica No.31, Instituto Mexicano del Transporte (I.M.T.), Sanfandila, Qro., 2003.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ANEXO A



ALGORITMOS

DE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

CAMINO ÓPTIMO

®

Algoritmo de Dijkstra

También llamado *algoritmo de caminos mínimos*, es un algoritmo para la determinación del camino más corto que une dos vértices (nodos) en un grafo (red) con peso (valor numérico) no negativo, dirigido (dígrafos) y etiquetado (cada arista o arco tiene asociada una etiqueta o valor de cierto tipo).

La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice de origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto que lleva al vértice de destino, se detiene el algoritmo. El *algoritmo* es el siguiente:

Paso 0: Iniciación

Sea el conjunto de nodos P que es el conjunto de nodos a los cuales ya sabemos las distancias mínimas.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Sea 1 el nodo elegido para hallar su árbol divergente:

$$P = \{1\}, D_1 = 0 \text{ (distancia al nodo } 1 \text{ desde el nodo } 1)$$

$$D_j = d_{1j}, \forall j \neq 1 \text{ (distancia al nodo } 1 \text{ desde el nodo } j, \text{ si hay camino directo } D_j \text{ es la } d_{1j} \text{ de ese enlace y si no hay camino directo } D_j = \infty, \text{ ya que entonces } d_{1j} = \infty)$$

Paso 1: Encontrar el nodo más cercano a $\{1\}$ y que no pertenezca a P

Es decir, encontrar:

$$i \notin P \text{ tal que } D_i = \min D_j, \forall j, \text{ que no pertenezca a } P.$$

$P = P \cup \{i\}$ (se incluye el nodo más cercano en P); si P contiene todos los nodos, PARAR (algoritmo completo)

Paso 2: Actualización de etiquetas

Es decir, encontrar los nuevos $D_j, \forall j \notin P$:

$$D_i = \min [D_j, D_i + d_{ij}]$$

Después de esto, ir al Paso 1, es decir, D_j expresa la mínima distancia del nodo 1 al nodo j a través de los nodos de P .

En cada iteración se encuentra la distancia mínima de un nodo al nodo origen.

La complejidad por cada nodo es del orden de N^2 operaciones. Si queremos distancias a todos los nodos la complejidad es del orden de N^3 operaciones.

Este algoritmo es de gran importancia debido a que es uno de los algoritmos más sencillos y eficientes para la resolución de problemas de camino más corto que hacen de él uno de los más relevantes en la teoría de grafos.

Algoritmo Floyd-Warshall

- Obtiene la mejor ruta entre todo par de nodos.
- Trabaja con la matriz D inicializada con las distancias directas entre todo par de nodos, permitiendo la presencia de arcos de peso negativo.
- La iteración se produce sobre nodos Intermedios, es decir, para todo elemento de la matriz se prueba si lo mejor para ir de i a j es a través de un nodo intermedio elegido o como estaba anteriormente, y esto se prueba con todos los nodos de la red. Una vez probados todos los nodos de la red como nodos intermedios, la matriz resultante da la mejor distancia entre todo par de nodos.

Es decir el algoritmo es el siguiente:

- **Iniciación**

$$D_{ij}^{(0)} = d_{ij}$$

D_{ij} es la matriz de distancias. d_{ij} es la distancia del enlace entre el nodo i y el nodo j .

- **Iteración**

Para $n = 0, 1 \dots, N-1$

$$D_{ij}^{(n+1)} = \min \left[D_{ij}^{(n)}, D_{i(k+1)}^{(n)} + D_{(k+1)j}^{(n)} \right]$$

- Empezando con el nodo 1 como intermedio ($n=0$), se prueba con todos los nodos como nodos intermedios, el último es con el nodo N como nodo intermedio ($n = N-1$), y así se van hallando las distancias mínimas.
- La última matriz es la matriz de distancias buscada, ya que se han probado todos los nodos intermedios.
- El algoritmo da sólo la menor distancia; se debe manejar información adicional para encontrar tablas de encaminamiento.
- Hasta no hallar la última matriz no se encuentran las distancias mínimas.
- Presenta una complejidad del orden de N^3 mayor que la de Dijkstra.

El inconveniente de este algoritmo radica en que los ciclos de peso negativos están prohibidos, a pesar de que resuelvan el problema en cuestión.

Algoritmo de Bellman-Ford

- Soluciona el problema de la ruta más corta o camino mínimo desde un nodo origen, de un modo más general que el Algoritmo de Dijkstra, ya que permite valores negativos en los arcos.
- Encuentra la mínima distancia de un nodo dado al resto de los nodos, y si se lleva información adicional, proporciona las tablas de encaminamiento.
- Itera sobre el número de saltos, h , es decir, se busca el mejor camino, el de distancia más corta, con la restricción de llegar al destino en un número de saltos h (número de iteraciones).
- No encuentra las mejores rutas hasta que el algoritmo no se ha ejecutado por completo.
- Tiene una complejidad del orden de N^3 por cada nodo que se realiza el algoritmo, es decir, un orden mayor que *Dijkstra*, pero su funcionamiento es parecido a un funcionamiento de vector de distancias, ya que conocemos a los vecinos a través de los vecinos (con la información que un nodo recibe de sus vecinos, puede estimar cuales son los caminos óptimos).

El algoritmo es el siguiente:

- **Iniciación**

$$D_i^{(0)} = \infty \quad \forall_i \neq 1$$

$$D_1^{(0)} = 0$$

Lo anterior nos indica que, con cero saltos todos los nodos distan del nodo 1 infinito, salvo él mismo que dista cero.

- **Iteración**

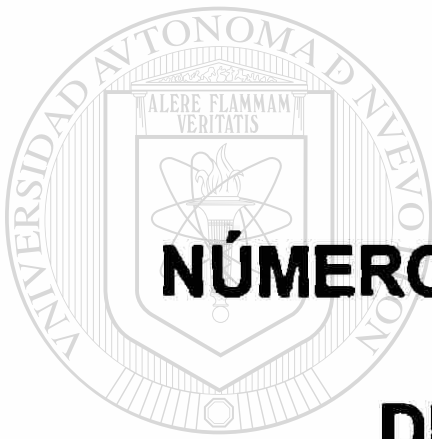
$$D_i^{(h+1)} = \min_j [D_j^{(h)} + d_{ij}] \quad \forall_i \neq 1$$

$D_j^{(h)}$ Mejor distancia del nodo 1 al nodo j con la restricción de h saltos.

OBSERVACIONES:

- Este algoritmo funciona en teoría, pero tiene un gran problema en la práctica: aunque converge en la respuesta correcta, puede hacerlo de forma lentamente.
- En particular, reacciona con rapidez a las buenas noticias, pero con lentitud ante las malas.

ANEXO B



NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE CENTROIDES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

No.	Localidad	Entidad Federativa	N.º Controlde
1	TLALPAN	DF	1
2	ALVARO OBREGON	DF	2
3	GUSTAVO ADOLFO	DF	3
4	AZCAPOTZLAC	DF	4
5	MIGUEL HIDALGO	DF	6
6	CUALHTEMOC	DF	6
7	VENUSTIANO CARRANZA	DF	7
8	CUAJIMALPA	DF	8
9	BENITO JUAREZ	DF	9
10	IZTACALCO	DF	10
11	COYOACAN	DF	11
12	IZTAPALAPA	DF	12
13	MAGDALENA CONTRERAS	DF	13
14	XOCHIMILCO	DF	14
15	TLAHUAC	DF	15
16	MILPA ALTA	DF	16
17	HUEJUTLA	HGO	64
18	ZIMAPAN	HGO	68
19	CADEREYTA	ORO	100
20	EZEQUIEL MONTES	ORO	105
21	QUERETARO	ORO	109
22	TEQUISQUIAPAN	ORO	124
23	EL PUEBLITO	ORO	127
24	PEDRO ESCOBEDO	ORO	131
25	IXMQUILPAN	HGO	134
26	SAN JUAN DEL RIO	ORO	141
27	HUICHAPAN	HGO	144
28	TENANGO DE DORIA	HGO	146
29	XICOTEPEC DE JUAREZ	PUE	149
30	ATOTONILCO	HGO	153
31	ACTOPAN	HGO	158
32	PROGRESO DE ALVARO OBREGON	HGO	163
33	MIXQUIAHUAL	HGO	165
34	HUAUCHINANG	PUE	168
35	TEZONTEPEC	HGO	169
36	AMEALCO	ORO	170
37	PACHUCA	HGO	168
38	TULANCINGO	HGO	197
39	ACULCO	MEX	201
40	PACHUQUILLA	HGO	203
41	TULA DE ALLENDE	HGO	218
42	CUAUTEPEC	HGO	221
43	ATOTONILCO DE TULA	HGO	223
44	SINGUILUCAN	HGO	227
45	APAXCO	MEX	229
46	ZACATLAN	PUE	230
47	JILOTEPEC	MEX	234
48	TEPEJI DE OCAMPO	HGO	235
49	TEQUIXQUIAC	MEX	236
50	TEZIUTLAN	PUE	246
51	TIZAYUCA	HGO	250
52	HUEHUETOCA	MEX	255
53	ZUMPANGO	MEX	261
54	ZITLALTEPEC	MEX	262
55	ATLACOMULCO	MEX	268
56	CIUDAD SAHAGUN	HGO	271
57	COYOTEPEC	MEX	276
58	TEOLOYUCAN	MEX	283
59	LOS REYES	MEX	285
60	APAN	HGO	286
61	TEPOTZOTLAN	MEX	284
62	MELCHOR OCAMPO	MEX	299
63	TEOTIHUACAN	MEX	301
64	SAN MARTIN	MEX	303
65	TULTEPEC	MEX	306

No.	Localidad	Entidad Federativa	Id. Controlado
66	CUAUTITLAN DE ROMERO RUBIO	MEX	311
67	SAN PABLO D	MEX	312
68	TLAXCALANCINGO	PUE	314
69	TEYAHUALCO	MEX	315
70	TULTITLAN	MEX	319
71	CUAUTITLAN IZCALLI	MEX	320
72	FUENTES	MEX	326
73	COACALCO	MEX	328
74	TEPEXPAN	MEX	333
75	VILLA NICOLAS	MEX	334
76	ECATEPEC	MEX	344
77	BUENAVISTA	MEX	348
78	CALPULALPAN	TLX	356
79	CIUDAD LOPEZ MATEOS	MEX	375
80	CHICONCUAC	MEX	378
81	TLAZALA	MEX	380
82	TLALNEPANTL	MEX	387
83	TEXCOCO	MEX	401
84	SANCTORUM	TLX	415
85	LIBRES	PUE	421
86	NAUCALPAN	MEX	438
87	COATLINCHAN	MEX	445
88	APIZACO	TLX	462
89	CHIMALHUACA	MEX	478
90	CHICOLOAPAN	MEX	479
91	NEZAHUALCOYOTL	MEX	494
92	XONACATLAN	MEX	496
93	HUIXQUILUCA	MEX	531
94	LOS REYES	MEX	532
95	ALMOLOYA DE JUAREZ	MEX	534
96	SAN PABLO A	MEX	547
97	HUAMANTLA	TLX	560
98	CUAPIAXTLA	TLX	578
99	TLAXCALA	TLX	579
100	SAN MATEO	MEX	585
101	IXTAPALUCA	MEX	590
102	SAN MARTIN	PUE	613
103	LERMA	MEX	629
104	TOLUCA	MEX	637
105	ZINACANTEPE	MEX	645
106	XICO	MEX	646
107	CHALCO	MEX	647
108	OCOYOACAC	MEX	648
109	SANTA MARIA	PUE	657
110	SAN MATEO ATENCO	MEX	662
111	METEPEC	MEX	676
112	SAN RAFAEL	MEX	689
113	CAPULHUAC	MEX	707
114	VALLE DE BRAVO	MEX	709
115	HUEJOTZINGO	PUE	712
116	SANTIAGO TIANGUSTENCO	MEX	714
117	SAN SALVADOR	PUE	717
118	CALIMAYA	MEX	723
119	AMECAMECA	MEX	726
120	ACAJETE	PUE	730
121	COATEPEC DE LAS BATEAS	MEX	732
122	SAN JUAN ATENCO	PUE	733
123	TENANGO	MEX	747
124	PUEBLA	PUE	757
125	CHOLULA	PUE	760
126	SAN ANDRES	PUE	767
127	AMOZOC	PUE	776
128	OZUMBA	MEX	783
129	CIUDAD SERDAN	PUE	786
130	TEMASCALTEPEC	MEX	790

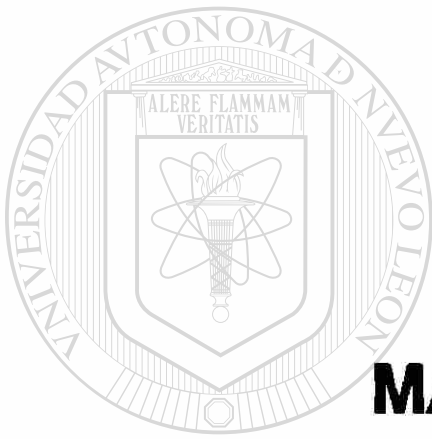
No.	Localidad	Entidad Federativa	Id. Centroide
131	ACATZINGO	PUE	794
132	TEPEACA	PUE	798
133	VILLA GUERRERO	MEX	810
134	TENANCINGO	MEX	815
135	ATLIXCO	PUE	822
136	COATEPEC HARINAS	MEX	825
137	CUERNAVACA	MOR	828
138	TECAMACHALCO	PUE	828
139	TEJUPILCO	MEX	844
140	JUTEPEC	MOR	845
141	YAUTEPEC	MOR	846
142	TEMIXCO	MOR	854
143	EMILIANO ZAPATA	MOR	859
144	IXTAPAN DE LA SAL	MEX	860
145	CUAUTLA	MOR	863
146	CAÑADA MORELOS	PUE	872
147	CIUDAD AYALA	MOR	874
148	SANTA ROSA	MOR	881
149	XOXOCOTLA	MOR	886
150	ZACATEPEC	MOR	900
151	TLAQUILTECA	MOR	903
152	JOJUTLA	MOR	906
153	PUENTE DE IXTLA	MOR	907
154	IZUCAR DE MATAMOROS	PUE	910
155	TEHUACAN	PUE	920
156	AXOCHIAPAN	MOR	924
157	SAN JUAN DXHUATEPEC	PUE	926
158	ATEXCAL	PUE	929
159	AJALPAN	PUE	930
160	ZINACATEPEC	PUE	934
161	ACATLAN	PUE	942



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ANEXO C



MATRIZ SEMILLA

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CENTRON	CENTROS	FLUJO
757	0	20,854
197	198	11,959
198	197	11,913
0	127	10,239
0	197	10,143
299	637	9,539
197	0	9,142
637	299	9,039
907	907	8,785
127	0	5,647
637	637	5,103
613	757	5,010
788	0	4,908
0	299	4,794
613	712	4,395
757	613	4,333
637	127	4,237
934	0	4,009
712	613	3,946
299	0	3,736
127	637	3,593
299	299	3,306
109	637	3,246
149	0	3,080
637	0	2,946
0	637	2,927
579	0	2,877
637	109	2,764
0	149	2,748
0	907	2,718
299	634	2,508
64	0	2,446
0	84	2,415
613	0	2,130
907	0	2,128
498	637	1,998
637	498	1,871
634	299	1,816
436	637	1,766
249	0	1,692
613	780	1,687
780	613	1,545
637	498	1,479
757	127	1,466
109	0	1,433
0	709	1,409
0	109	1,379
197	227	1,378
0	198	1,361
780	0	1,249
227	197	1,236
141	144	1,232
64	637	1,230
0	796	1,203
144	141	1,199
198	0	1,184
498	0	1,182
757	109	1,094
0	757	1,072
757	637	1,064
993	629	1,059
144	109	1,041
198	198	1,036
629	993	1,025
637	64	1,019
788	613	916
127	757	902
0	170	895
109	144	886
109	198	878
613	230	864
0	780	847

CENTRON	CENTROS	FLUJO
201	637	613
198	109	612
637	201	798
109	757	770
972	0	769
620	0	739
709	0	724
788	127	670
757	64	661
829	907	603
0	498	649
230	0	644
637	319	640
0	230	627
127	198	606
198	127	599
907	629	595
757	907	556
934	127	544
637	387	542
733	613	529
788	637	529
127	796	526
757	629	518
319	637	516
646	653	508
653	646	508
907	757	507
629	757	504
436	498	499
144	127	484
498	436	473
788	109	471
387	637	469
712	0	468
436	907	463
0	712	439
127	934	412
757	647	406
127	144	406
198	198	401
127	907	400
757	344	399
907	436	390
141	198	382
0	246	361
934	109	366
637	907	366
844	637	366
109	197	362
198	141	342
844	0	334
198	198	332
757	7	330
0	291	329
127	197	323
64	757	322
401	197	321
170	0	319
629	127	313
198	149	311
907	127	308
109	796	307
344	197	307
622	0	307
934	637	307
757	942	300
271	197	293
0	644	285
109	934	284
637	170	278
197	127	276

CENTRON	CENTROS	FLUJO
109	907	272
109	194	270
183	0	269
616	127	266
197	757	265
64	198	261
757	613	261
197	109	259
579	127	258
197	301	258
201	0	255
0	198	254
149	127	254
149	198	252
197	299	252
227	198	252
246	127	250
637	197	250
934	634	247
146	0	246
299	197	246
141	637	243
198	0	242
613	622	242
757	436	242
197	401	240
757	367	240
907	637	240
942	757	239
796	197	238
492	0	237
637	709	237
198	227	236
709	637	234
127	629	232
907	109	230
127	579	229
134	109	228
757	197	221
144	637	220
197	637	217
380	637	217
109	634	216
301	637	216
0	934	214
109	637	214
146	198	211
127	246	210
637	141	210
579	712	208
613	757	207
246	109	200
198	64	196
127	149	190
198	149	190
198	223	190
653	624	190
197	344	189
0	629	188
910	0	188
109	246	187
395	198	186
579	757	186
629	0	186
579	109	184
0	144	183
299	723	182
622	613	182
0	198	181
637	344	181
0	146	180
170	637	180

CENTON	CENTOS	FLUJO
637	334	180
9	629	178
197	290	174
637	788	172
884	646	171
227	9	169
301	197	168
127	918	164
201	298	164
663	907	162
344	637	160
629	637	160
637	144	160
9	227	158
197	366	157
787	319	157
644	907	156
298	201	154
679	637	152
109	579	151
787	401	150
248	637	149
398	197	149
679	64	149
109	626	148
436	127	148
787	787	148
189	197	146
260	197	144
9	622	142
189	144	142
637	100	142
907	663	141
127	634	140
334	637	138
189	788	136
197	189	136
9	942	136
637	629	136
910	942	134
634	127	132
266	634	131
144	9	130
637	301	129
733	787	127
622	942	126
390	496	126
127	134	123
712	733	122
672	637	122
629	9	121
672	127	121
64	907	118
301	9	118
684	924	116
149	637	117
712	579	117
127	436	116
496	298	116
900	663	116
942	910	116
942	9	116
197	271	114
787	189	114
436	629	113
934	189	113
234	637	112
900	900	111
924	907	110
637	787	109
626	109	109
9	221	108

CENTON	CENTOS	FLUJO
189	230	167
216	127	166
134	127	166
378	197	166
218	109	164
994	344	164
144	166	163
189	109	163
201	144	163
366	9	163
864	638	162
436	298	161
298	496	160
199	127	99
637	934	98
9	223	97
613	7	97
9	141	96
141	994	96
637	631	96
141	787	96
221	9	96
637	234	96
788	344	94
637	149	93
149	109	92
197	679	91
280	127	91
733	712	91
788	626	91
634	201	89
64	197	89
109	216	89
134	141	89
141	134	89
462	127	89
690	9	89
613	647	89
94	629	86
109	149	84
634	109	84
197	334	83
629	496	83
907	64	83
127	398	81
787	100	81
144	201	80
201	634	80
298	127	80
216	197	78
788	367	79
109	298	78
787	141	78
127	672	78
134	197	76
616	109	76
616	298	76
64	679	76
994	7	76
934	367	76
127	216	74
311	637	74
9	301	73
141	9	73
788	166	73
788	787	73
934	64	73
127	298	72
197	478	72
109	280	71
197	216	71
646	663	71

CENTON	CENTOS	FLUJO
250	109	70
298	436	70
298	880	76
197	134	69
298	127	69
661	637	69
626	788	69
197	64	67
209	197	67
301	496	67
100	9	66
127	189	66
367	167	66
109	616	66
679	760	66
787	679	66
634	647	66
189	629	64
189	760	64
298	629	64
303	197	64
613	637	64
637	401	64
646	637	64
163	189	63
672	109	63
189	787	62
787	709	62
230	189	61
637	189	61
626	167	61
127	250	60
712	626	60
646	787	60
109	189	60
189	637	60
401	149	60
787	787	60
788	319	60
907	644	60
189	240	58
298	616	60
462	109	59
610	127	60
626	934	60
229	197	57
934	319	57
934	626	57
942	622	57
679	230	60
788	166	60
646	907	60
9	306	60
667	329	60
788	7	60
679	637	64
788	141	64
109	672	63
127	462	63
679	344	63
788	907	63
626	942	63
127	629	62
787	733	62
787	646	62
610	109	62
626	298	62
234	496	61
344	127	61
679	626	61
787	712	61
626	64	61

CENTOM	CENTOS	PLUJO
144	84	80
197	308	80
318	488	80
712	787	80
733	9	80
907	288	80
907	788	80
934	438	80
127	344	48
141	218	48
188	221	48
438	301	48
482	187	48
637	248	48
647	187	48
712	787	48
780	637	48
788	907	48
84	144	48
227	188	48
934	141	48
934	787	48
934	907	48
288	907	47
328	637	47
637	844	47
733	733	47
848	848	47
907	924	47
84	934	48
148	401	48
248	187	48
401	188	48
723	288	48
733	780	48
787	311	48
848	9	48
907	934	48
924	9	48
188	227	48
187	141	48
9	100	44
188	187	44
301	127	44
613	934	44
787	783	44
828	848	44
131	144	48
188	188	48
201	188	48
578	7	48
9	848	42
9	924	42
187	838	42
344	188	42
482	712	42
488	234	42
708	438	42
942	942	42
248	188	41
344	148	41
628	127	41
787	822	41
228	637	40
482	84	40
578	647	40
613	127	40
637	311	40
788	401	40
100	787	38
141	788	38
318	628	38

CENTOM	CENTOS	PLUJO
401	637	38
723	637	38
787	288	38
787	328	38
778	9	38
84	188	38
288	637	38
288	708	38
708	288	38
712	637	38
834	401	38
131	188	37
188	478	37
188	201	37
227	227	37
284	637	37
387	488	37
788	84	37
883	888	37
872	913	37
187	907	38
187	934	38
248	84	38
387	828	38
637	828	38
127	387	38
188	188	38
288	787	38
878	438	38
637	872	38
708	188	38
788	647	38
838	9	38
881	883	38
942	828	38
84	401	34
127	401	34
281	187	34
401	127	34
438	170	34
613	778	34
628	288	34
682	637	34
678	288	34
733	230	34
787	9	34
788	878	34
828	148	34
828	878	34
883	881	34
920	127	34
934	187	34
9	883	38
84	127	38
188	84	38
188	482	38
187	208	38
787	787	38
880	907	38
920	637	38
84	248	32
127	883	32
187	482	32
218	141	32
280	787	32
308	637	32
613	188	32
628	188	32
637	284	32
678	9	32
787	834	32

CENTOM	CENTOS	PLUJO
788	438	32
844	838	32
884	813	32
842	907	32
188	712	31
148	828	31
188	127	31
187	728	31
248	7	31
288	84	31
488	818	31
687	878	31
712	482	31
787	884	31
818	637	31
84	628	30
188	127	30
187	788	30
438	708	30
708	787	30
787	844	30
844	288	30
883	942	30
880	828	30
127	188	28
127	828	28
141	187	28
144	170	28
144	844	28
148	787	28
248	344	28
288	188	28
288	144	28
401	84	28
488	387	28
613	344	28
687	712	28
637	728	28
920	344	28
9	878	28
9	920	28
188	188	28
188	844	28
188	907	28
288	828	28
328	187	28
344	828	28
613	872	28
708	127	28
818	708	28
872	344	28
907	187	28
924	848	28
934	288	28
221	188	27
318	187	27
488	881	27
687	878	27
637	882	27
780	188	27
788	828	27
920	188	27
84	218	28
188	788	28
188	188	28
187	281	28
238	127	28
438	828	28
613	84	28
613	387	28
613	438	28
848	9	28

CENTON	CENTOS	FLUJO
820	84	26
127	84	26
199	141	26
193	197	26
246	319	26
299	246	26
395	227	26
397	127	26
579	397	26
579	907	26
613	825	26
629	319	26
637	218	26
757	218	26
883	883	26
824	757	26
96	109	24
127	496	24
127	709	24
199	301	24
197	223	24
197	847	24
613	246	24
828	709	24
907	942	24
924	825	24
942	127	24
9	872	23
109	709	23
127	96	23
127	196	23
127	299	23
149	907	23
186	634	23
197	319	23
209	9	23
227	149	23
246	436	23
271	186	23
319	127	23
344	84	23
344	496	23
401	227	23
682	9	23
799	942	23
829	637	23
829	844	23
9	236	22
109	127	22
127	319	22
141	199	22
170	144	22
197	397	22
218	637	22
230	127	22
236	299	22
236	637	22
634	141	22
682	127	22
714	127	22
757	712	22
776	613	22
829	613	22
883	845	22
900	845	22
907	144	22
907	579	22
109	344	21
127	109	21
127	301	21
144	197	21
149	344	21

CENTON	CENTOS	FLUJO
199	344	21
199	401	21
199	299	21
246	647	21
249	829	21
301	186	21
439	676	21
482	637	21
489	344	21
613	753	21
709	684	21
794	9	21
854	907	21
872	84	21
872	319	21
820	401	21
9	776	20
109	199	20
127	149	20
149	219	20
199	199	20
197	196	20
249	397	20
301	199	20
401	199	20
439	197	20
534	170	20
613	910	20
637	199	20
679	127	20
679	439	20
712	199	20
729	9	20
757	799	20
799	127	20
799	712	20
845	825	20
890	299	20
907	149	20
9	757	19
84	799	19
109	920	19
127	799	19
141	246	19
144	709	19
199	637	19
197	246	19
218	84	19
227	149	19
227	223	19
246	907	19
299	397	19
344	199	19
499	127	19
629	397	19
733	757	19
799	934	19
829	829	19
844	127	19
844	757	19
893	854	19
872	907	19
907	890	19
9	729	18
84	299	18
84	634	18
199	199	18
127	193	18
127	890	18
134	84	18
149	227	18
236	144	18

CENTON	CENTOS	FLUJO
246	709	19
299	344	19
299	799	19
344	230	19
399	301	19
439	544	19
439	684	19
482	7	19
613	629	19
629	84	19
709	616	19
709	907	19
799	733	19
799	799	19
799	9	19
844	439	19
890	127	19
872	299	19
872	825	19
907	799	19
920	847	19
7	197	17
84	344	17
84	482	17
109	89	17
127	844	17
149	141	17
183	127	17
199	197	17
199	199	17
246	401	17
397	676	17
401	799	17
439	723	17
613	799	17
637	299	17
709	199	17
799	439	17
799	299	17
799	197	17
799	942	17
829	246	17
900	924	17
907	199	17
920	613	17
934	799	17
9	682	16
109	149	16
109	163	16
109	496	16
127	613	16
127	610	16
127	942	16
141	679	16
183	227	16
197	376	16
219	149	16
299	199	16
299	844	16
344	109	16
344	227	16
482	757	16
613	319	16
637	7	16
637	396	16
637	920	16
647	637	16
709	397	16
726	712	16
757	883	16
799	326	16
822	757	16

CENTON	CENTOS	FLUJO
665	669	16
672	438	16
7	127	16
84	883	16
86	127	16
127	712	16
166	637	16
168	227	16
168	828	16
170	438	16
167	163	16
167	613	16
344	288	16
378	366	16
380	829	16
578	167	16
613	167	16
629	531	16
637	534	16
767	148	16
767	482	16
767	478	16
767	900	16
767	910	16
788	708	16
844	934	16
883	127	16
872	367	16
834	708	16
934	788	16
108	610	14
108	888	14
127	714	14
168	637	14
166	108	14
166	288	14
170	534	14
166	334	14
167	163	14
167	221	14
218	168	14
236	8	14
246	712	14
246	942	14
266	319	14
268	127	14
401	108	14
401	288	14
534	166	14
613	613	14
613	942	14
637	229	14
637	266	14
637	363	14
637	942	14
662	438	14
767	170	14
788	783	14
815	64	14
822	934	14
830	767	14
807	708	14
807	672	14
820	828	14
834	218	14
942	883	14
64	368	13
100	166	13
108	166	13
108	230	13
163	401	13
168	64	13

CENTON	CENTOS	FLUJO
167	66	13
227	168	13
230	108	13
230	366	13
280	141	13
280	166	13
280	788	13
286	637	13
288	672	13
288	108	13
288	168	13
319	288	13
367	708	13
438	201	13
462	230	13
534	8	13
637	482	13
647	788	13
738	578	13
780	344	13
788	844	13
826	166	13
826	438	13
826	712	13
846	788	13
883	637	13
872	141	13
7	288	12
8	534	12
64	134	12
64	288	12
64	515	12
85	637	12
108	236	12
108	288	12
108	613	12
141	629	12
144	288	12
170	826	12
186	301	12
188	401	12
167	144	12
167	148	12
201	934	12
230	227	12
230	344	12
288	301	12
288	401	12
288	678	12
271	230	12
318	148	12
367	288	12
401	163	12
578	141	12
578	822	12
578	883	12
613	788	12
637	780	12
647	64	12
708	167	12
712	166	12
726	438	12
767	230	12
780	108	12
810	708	12
826	168	12
844	108	12
906	907	12
907	246	12
942	288	12
108	366	11
108	401	11

CENTON	CENTOS	FLUJO
108	438	11
127	230	11
127	847	11
144	160	11
144	788	11
148	301	11
148	366	11
166	344	11
166	708	11
167	236	11
201	167	11
223	637	11
227	301	11
227	401	11
228	148	11
281	148	11
281	637	11
286	64	11
271	227	11
301	367	11
318	8	11
318	678	11
378	148	11
378	168	11
367	64	11
367	168	11
438	534	11
438	882	11
488	301	11
678	288	11
613	401	11
613	788	11
646	438	11
647	148	11
712	844	11
714	637	11
738	822	11
788	629	11
788	767	11
822	7	11
826	288	11
826	788	11
826	672	11
844	788	11
884	900	11
883	167	11
881	767	11
807	401	11
807	646	11
910	613	11
920	167	11
920	318	11
934	170	11
984	311	11
984	883	11
8	208	10
8	788	10
8	616	10
108	907	10
127	127	10
127	882	10
127	822	10
127	826	10
134	148	10
134	637	10
141	163	10
141	534	10
144	534	10
148	230	10
153	301	10
163	141	10
178	684	10

CENTRO	CENTROS	FLUJO
186	712	10
197	197	10
197	438	10
201	709	10
220	197	10
226	197	10
226	148	10
265	197	10
319	301	10
344	709	10
344	789	10
375	220	10
482	647	10
482	789	10
486	324	10
534	438	10
534	637	10
534	709	10
637	124	10
637	134	10
637	848	10
637	800	10
637	883	10
647	712	10
647	757	10
578	387	10
709	84	10
709	319	10
709	579	10
709	828	10
712	246	10
714	288	10
787	900	10
787	908	10
788	144	10
788	248	10
822	127	10
828	170	10
828	401	10
844	144	10
845	9	10
845	757	10
846	934	10
883	757	10
883	934	10
872	7	10
872	197	10
872	401	10
920	7	10
920	907	10
934	328	10
934	934	10
942	780	10
9	318	9
84	189	9
84	227	9
96	9	9
127	186	9
127	234	9
134	9	9
145	189	9
148	301	9
148	189	9
189	189	9
189	223	9
189	197	9
189	189	9
170	907	9
189	388	9
189	828	9
197	7	9
197	709	9

CENTRO	CENTROS	FLUJO
187	920	9
227	344	9
230	84	9
230	301	9
236	187	9
246	288	9
301	109	9
301	319	9
309	189	9
314	828	9
388	189	9
375	637	9
387	188	9
482	780	9
486	629	9
531	127	9
579	319	9
579	789	9
579	910	9
613	907	9
647	828	9
678	246	9
709	144	9
712	84	9
714	109	9
717	9	9
787	280	9
787	301	9
788	319	9
787	828	9
788	100	9
788	301	9
828	824	9
844	84	9
883	9	9
872	789	9
872	984	9
907	613	9
920	387	9
942	789	9
9	908	9
84	84	9
84	438	9
84	780	9
84	844	9
84	920	9
100	197	9
100	482	9
106	687	9
109	707	9
127	7	9
127	288	9
141	148	9
141	188	9
141	280	9
141	482	9
141	828	9
144	907	9
189	148	9
189	789	9
189	388	9
170	815	9
189	189	9
189	271	9
187	189	9
187	572	9
201	815	9
227	163	9
227	280	9
227	789	9
234	288	9
246	613	9

CENTRO	CENTROS	FLUJO
248	780	8
280	289	8
288	189	8
288	228	8
288	825	8
288	928	8
271	188	8
288	188	8
308	187	8
319	607	8
333	127	8
334	728	8
344	148	8
388	378	8
378	228	8
387	8	8
401	223	8
401	230	8
401	712	8
421	127	8
438	109	8
438	227	8
482	100	8
486	188	8
534	84	8
579	109	8
613	311	8
629	141	8
629	284	8
629	789	8
637	223	8
637	281	8
637	647	8
637	828	8
646	288	8
647	127	8
647	188	8
682	108	8
678	109	8
712	388	8
712	847	8
712	789	8
757	303	8
757	478	8
757	789	8
780	7	8
780	387	8
787	780	8
788	280	8
788	311	8
788	488	8
788	789	8
788	848	8
789	288	8
810	288	8
815	9	8
828	141	8
844	188	8
848	401	8
880	109	8
880	438	8
883	84	8
883	109	8
872	100	8
907	201	8
920	438	8
924	127	8
984	280	8
984	301	8
9	308	7
84	141	7
84	188	7

CENTON	CENTOS	FLUJO
84	847	7
100	894	7
100	183	7
108	890	7
134	288	7
144	218	7
148	108	7
148	388	7
148	84	7
148	227	7
148	281	7
148	844	7
188	218	7
188	108	7
188	288	7
188	844	7
187	148	7
187	328	7
187	712	7
187	883	7
218	144	7
218	807	7
238	84	7
248	141	7
248	308	7
248	787	7
280	148	7
280	188	7
271	84	7
311	818	7
311	807	7
328	488	7
344	301	7
388	837	7
387	148	7
418	813	7
418	712	7
438	842	7
488	7	7
488	401	7
831	828	7
831	723	7
834	834	7
880	7	7
878	728	7
887	230	7
887	818	7
847	807	7
878	318	7
708	788	7
712	7	7
712	872	7
712	884	7
728	318	7
728	334	7
787	223	7
787	248	7
787	284	7
787	788	7
788	482	7
788	787	7
788	218	7
788	284	7
784	127	7
810	84	7
818	438	7
822	837	7
822	828	7
828	8	7
828	820	7
828	842	7
848	828	7

CENTON	CENTOS	FLUJO
848	884	7
884	883	7
883	844	7
888	788	7
884	144	7
884	828	7
884	884	7
884	810	7
842	188	7
7	887	8
8	8	8
8	134	8
8	344	8
8	878	8
8	828	8
8	884	8
84	318	8
84	488	8
84	888	8
100	880	8
108	882	8
108	714	8
108	828	8
124	787	8
127	201	8
127	281	8
127	878	8
127	728	8
127	828	8
184	201	8
141	188	8
141	288	8
141	807	8
148	807	8
148	847	8
148	888	8
183	108	8
188	818	8
188	787	8
188	144	8
188	127	8
170	288	8
188	134	8
188	218	8
188	288	8
188	813	8
188	847	8
187	888	8
187	788	8
201	488	8
201	807	8
218	788	8
221	84	8
221	227	8
227	84	8
227	127	8
227	384	8
227	837	8
230	280	8
230	847	8
238	188	8
280	8	8
281	127	8
288	178	8
288	388	8
288	810	8
288	828	8
288	141	8
301	108	8
301	148	8
301	227	8
381	248	8

CENTON	CENTOS	FLUJO
301	288	8
301	788	8
384	488	8
344	248	8
388	401	8
388	787	8
388	788	8
388	127	8
401	144	8
401	248	8
401	388	8
438	144	8
438	818	8
482	141	8
482	884	8
488	108	8
488	201	8
534	344	8
878	788	8
818	188	8
818	728	8
828	344	8
828	834	8
887	88	8
837	227	8
887	388	8
847	230	8
882	788	8
878	201	8
788	201	8
788	810	8
788	828	8
712	127	8
712	788	8
714	187	8
728	127	8
738	188	8
787	188	8
787	388	8
788	847	8
788	828	8
788	828	8
788	127	8
818	108	8
828	813	8
828	888	8
828	837	8
844	344	8
844	534	8
844	844	8
848	842	8
883	883	8
888	881	8
887	141	8
810	884	8
820	712	8
820	787	8
824	438	8
824	884	8
842	822	8
842	818	8
8	828	8
8	888	8
84	148	8
84	238	8
84	301	8
84	788	8
84	888	8
84	872	8
88	187	8
108	144	8

CENTON	CENTOS	FLUJO
100	788	8
108	221	8
109	318	8
109	387	8
109	880	8
127	784	8
134	100	8
134	788	8
141	84	8
141	88	8
141	188	8
144	131	8
144	238	8
144	787	8
144	884	8
148	401	8
148	134	8
148	188	8
148	288	8
148	378	8
148	478	8
183	280	8
183	344	8
183	828	8
188	127	8
188	141	8
188	7	8
188	141	8
188	308	8
188	134	8
188	131	8
188	488	8
188	822	8
187	188	8
187	333	8
201	248	8
201	787	8
209	188	8
221	188	8
227	221	8
230	248	8
238	148	8
248	280	8
288	148	8
288	148	8
301	148	8
301	203	8
301	280	8
301	488	8
303	248	8
311	628	8
318	723	8
318	818	8
328	878	8
334	127	8
334	818	8
334	878	8
344	8	8
388	301	8
388	438	8
401	787	8
401	822	8
401	807	8
418	8	8
438	84	8
438	148	8
438	712	8
488	187	8
881	387	8
881	488	8
881	882	8
878	401	8

CENTON	CENTOS	FLUJO
878	813	8
880	787	8
813	218	8
847	8	8
882	387	8
878	807	8
708	230	8
708	883	8
712	230	8
723	387	8
787	144	8
787	201	8
787	728	8
780	223	8
780	401	8
780	418	8
780	728	8
787	878	8
787	728	8
788	187	8
788	482	8
788	883	8
788	813	8
818	234	8
822	733	8
828	438	8
828	837	8
844	708	8
848	837	8
880	8	8
880	837	8
872	188	8
880	807	8
887	100	8
887	318	8
810	248	8
820	141	8
828	787	8
884	148	8
884	238	8
884	288	8
884	844	8
842	878	8
842	887	8
8	7	4
8	88	4
8	728	4
84	223	4
84	387	4
84	813	4
88	807	4
100	127	4
100	238	4
100	303	4
100	818	4
100	828	4
108	884	4
108	818	4
108	234	4
108	880	4
108	847	4
108	878	4
108	780	4
108	842	4
127	188	4
127	227	4
127	331	4
127	848	4
127	848	4
127	828	4
141	387	4
144	438	4

CENTON	CENTOS	FLUJO
144	878	4
148	84	4
148	280	4
148	271	4
148	787	4
148	223	4
148	238	4
148	708	4
188	8	4
188	148	4
188	230	4
188	708	4
883	148	4
188	188	4
188	141	4
170	488	4
170	788	4
188	108	4
188	183	4
188	170	4
188	878	4
188	728	4
188	820	4
188	842	4
187	230	4
187	714	4
187	828	4
201	127	4
201	218	4
201	238	4
201	438	4
201	828	4
201	880	4
203	344	4
203	401	4
218	188	4
218	834	4
218	712	4
218	787	4
221	280	4
221	344	4
227	141	4
227	478	4
228	813	4
230	387	4
230	837	4
234	127	4
234	301	4
234	828	4
238	234	4
238	708	4
248	144	4
248	188	4
248	878	4
248	728	4
248	788	4
280	882	4
280	884	4
288	7	4
288	141	4
288	230	4
288	234	4
288	333	4
288	378	4
288	478	4
288	878	4
288	848	4
288	882	4
288	714	4
288	883	4
271	148	4
271	203	4

CENTONI	CENTONES	PLUJO
288	8	4
288	787	4
284	723	4
301	834	4
308	221	4
305	8	4
305	148	4
311	678	4
318	64	4
318	188	4
318	708	4
318	780	4
328	64	4
338	187	4
334	882	4
344	188	4
344	283	4
344	318	4
388	188	4
388	230	4
378	108	4
378	227	4
378	488	4
380	8	4
380	288	4
401	8	4
401	148	4
401	708	4
401	834	4
418	187	4
418	787	4
438	824	4
482	344	4
482	788	4
482	807	4
478	837	4
488	141	4
488	328	4
834	844	4
880	127	4
880	787	4
878	301	4
880	712	4
813	831	4
828	248	4
837	108	4
837	813	4
837	822	4
837	824	4
848	127	4
847	780	4
882	288	4
878	334	4
707	127	4
707	288	4
708	218	4
708	401	4
708	834	4
708	714	4
708	872	4
712	418	4
712	880	4
714	230	4
714	788	4
728	788	4
787	230	4
787	238	4
787	831	4
787	884	4
780	787	4
780	828	4
787	188	4

CENTONI	CENTONES	PLUJO
778	837	4
788	170	4
788	281	4
788	238	4
788	308	4
788	818	4
780	84	4
784	787	4
788	108	4
788	787	4
810	180	4
810	170	4
818	141	4
818	170	4
818	281	4
822	84	4
822	108	4
822	438	4
822	847	4
822	828	4
828	144	4
828	788	4
828	884	4
828	887	4
844	141	4
844	187	4
844	318	4
848	878	4
848	788	4
884	808	4
883	148	4
883	708	4
872	144	4
872	478	4
872	847	4
881	828	4
880	8	4
880	880	4
887	170	4
887	227	4
887	822	4
887	828	4
820	188	4
820	218	4
820	288	4
820	308	4
820	311	4
834	148	4
834	388	4
834	834	4
834	712	4
834	780	4
834	848	4
842	170	4
842	227	4
842	828	4
7	188	3
7	842	3
8	188	3
8	401	3
84	188	3
84	221	3
84	271	3
84	308	3
88	141	3
180	301	3
188	188	3
188	281	3
188	227	3
188	271	3
188	388	3
188	784	3

CENTONI	CENTONES	PLUJO
134	227	3
141	148	3
141	344	3
141	488	3
141	872	3
144	872	3
148	344	3
148	388	3
148	478	3
148	813	3
148	7	3
148	187	3
148	308	3
148	334	3
148	438	3
148	712	3
148	788	3
183	148	3
183	188	3
183	248	3
183	388	3
183	828	3
188	108	3
188	387	3
188	227	3
188	787	3
188	188	3
188	187	3
188	288	3
188	334	3
188	787	3
188	148	3
188	228	3
170	134	3
188	388	3
187	288	3
187	488	3
187	780	3
288	188	3
221	100	3
221	883	3
223	8	3
223	188	3
223	187	3
227	230	3
227	288	3
227	388	3
227	387	3
230	188	3
230	401	3
230	828	3
234	311	3
238	787	3
238	887	3
248	188	3
248	348	3
248	311	3
280	170	3
280	230	3
280	844	3
288	488	3
288	134	3
271	148	3
278	288	3
288	230	3
284	227	3
284	488	3
284	882	3
301	84	3
301	344	3
301	401	3
301	831	3

CENTOMI	CENTDES	FLUJO
303	230	3
303	788	3
306	031	3
311	187	3
319	344	3
319	682	3
328	168	3
333	637	3
335	828	3
334	8	3
334	227	3
334	629	3
344	613	3
344	780	3
366	188	3
366	280	3
366	303	3
366	712	3
378	188	3
380	319	3
380	676	3
387	108	3
387	144	3
387	221	3
387	787	3
387	780	3
387	934	3
401	141	3
401	628	3
438	148	3
438	318	3
438	787	3
482	148	3
482	248	3
482	401	3
488	787	3
488	788	3
488	907	3
534	144	3
534	629	3
534	907	3
580	712	3
578	188	3
578	248	3
578	311	3
578	328	3
578	787	3
578	788	3
578	788	3
578	848	3
613	141	3
628	328	3
628	334	3
628	872	3
637	148	3
637	183	3
637	378	3
646	334	3
646	387	3
647	108	3
647	934	3
647	942	3
682	787	3
708	281	3
712	148	3
712	187	3
712	488	3
712	780	3
723	187	3
730	8	3
733	127	3
738	778	3

CENTOMI	CENTDES	FLUJO
783	834	3
787	88	3
787	488	3
787	848	3
788	218	3
788	388	3
788	880	3
788	708	3
788	712	3
787	7	3
778	318	3
778	738	3
788	388	3
788	848	3
788	854	3
788	872	3
784	108	3
788	127	3
788	141	3
815	218	3
822	678	3
822	822	3
822	848	3
822	907	3
825	187	3
825	334	3
828	482	3
828	647	3
828	188	3
844	148	3
844	284	3
844	488	3
846	728	3
846	788	3
846	848	3
848	108	3
864	787	3
864	848	3
864	881	3
863	783	3
872	230	3
872	708	3
872	712	3
872	787	3
881	848	3
907	188	3
907	230	3
907	808	3
910	188	3
910	807	3
920	238	3
920	708	3
920	844	3
924	788	3
930	842	3
934	134	3
934	183	3
934	388	3
934	678	3
942	64	3
942	647	3
942	788	3
942	828	3
7	8	2
7	108	2
7	148	2
7	488	2
7	708	2
7	712	2
7	723	2
8	188	2
8	218	2

CENTOMI	CENTDES	FLUJO
8	234	2
8	238	2
8	328	2
8	387	2
8	631	2
8	730	2
8	738	2
8	788	2
8	780	2
8	828	2
8	830	2
84	148	2
84	183	2
84	201	2
84	288	2
84	848	2
84	714	2
84	717	2
84	810	2
84	828	2
84	828	2
84	842	2
88	148	2
88	534	2
88	788	2
88	880	2
100	134	2
100	280	2
100	288	2
100	488	2
100	534	2
100	578	2
100	707	2
100	844	2
100	842	2
108	301	2
108	333	2
108	378	2
108	648	2
108	648	2
108	723	2
108	828	2
108	910	2
108	924	2
108	930	2
124	141	2
124	187	2
124	634	2
124	637	2
124	844	2
127	221	2
127	228	2
127	308	2
127	378	2
127	380	2
127	578	2
127	707	2
127	788	2
127	780	2
127	808	2
131	134	2
131	187	2
131	248	2
131	482	2
131	578	2
131	637	2
131	788	2
131	834	2
134	183	2
134	301	2
134	834	2
141	127	2

CENTRON	CENTROS	FLUJO
141	163	2
141	170	2
141	223	2
141	301	2
141	822	2
141	844	2
141	893	2
144	7	2
144	106	2
144	163	2
144	227	2
144	401	2
144	828	2
144	890	2
146	96	2
146	127	2
146	134	2
146	208	2
146	246	2
146	853	2
146	894	2
146	169	2
146	170	2
146	230	2
146	246	2
146	728	2
146	820	2
146	894	2
163	7	2
163	141	2
163	163	2
163	203	2
163	223	2
163	303	2
163	394	2
163	679	2
163	468	2
163	679	2
163	757	2
163	894	2
166	84	2
166	146	2
166	757	2
166	134	2
166	168	2
166	166	2
166	203	2
166	223	2
166	230	2
166	271	2
166	378	2
166	367	2
166	712	2
166	728	2
166	9	2
166	84	2
166	907	2
170	216	2
170	246	2
170	280	2
170	368	2
170	682	2
170	678	2
170	723	2
170	757	2
170	810	2
186	228	2
186	234	2
186	236	2
186	367	2
186	476	2
186	682	2

CENTRON	CENTROS	FLUJO
186	767	2
186	872	2
187	236	2
187	288	2
187	306	2
187	678	2
187	844	2
187	900	2
201	134	2
201	201	2
201	280	2
201	281	2
201	288	2
201	319	2
201	628	2
201	648	2
201	678	2
201	714	2
201	763	2
201	780	2
201	810	2
201	826	2
201	844	2
201	863	2
201	826	2
203	227	2
203	288	2
203	301	2
203	334	2
203	728	2
203	757	2
218	9	2
218	100	2
218	221	2
218	230	2
218	334	2
218	367	2
218	826	2
221	134	2
221	503	2
221	319	2
221	367	2
221	401	2
223	144	2
223	246	2
227	106	2
227	246	2
227	303	2
227	328	2
227	438	2
227	757	2
227	907	2
229	186	2
229	227	2
229	438	2
230	134	2
230	271	2
230	438	2
230	580	2
230	613	2
230	712	2
230	728	2
234	144	2
234	186	2
234	187	2
234	201	2
234	438	2
236	127	2
236	634	2
236	637	2
236	786	2
236	141	2

CENTRON	CENTROS	FLUJO
236	170	2
236	634	2
236	757	2
246	146	2
246	227	2
246	230	2
246	236	2
246	462	2
246	478	2
246	890	2
246	786	2
246	788	2
246	822	2
246	844	2
246	854	2
260	106	2
260	188	2
260	201	2
260	223	2
260	227	2
260	246	2
260	634	2
260	816	2
260	907	2
261	108	2
261	168	2
261	221	2
261	301	2
266	183	2
266	227	2
266	280	2
266	278	2
266	328	2
266	847	2
266	780	2
266	780	2
266	854	2
266	824	2
271	127	2
271	183	2
271	246	2
271	401	2
271	786	2
271	820	2
286	280	2
286	301	2
286	678	2
286	822	2
294	186	2
294	187	2
294	201	2
301	183	2
301	201	2
301	216	2
301	223	2
301	234	2
301	613	2
301	786	2
303	146	2
303	108	2
303	268	2
303	301	2
306	127	2
306	186	2
311	84	2
311	127	2
311	246	2
311	268	2
311	344	2
318	246	2
318	757	2
318	786	2

CENTON	CENTOS	FLUJO
319	825	2
328	170	2
328	230	2
328	288	2
328	828	2
333	170	2
333	709	2
334	288	2
334	301	2
334	834	2
334	709	2
334	714	2
334	825	2
344	100	2
344	170	2
344	201	2
344	218	2
344	882	2
344	787	2
344	778	2
388	134	2
388	149	2
388	288	2
388	344	2
388	879	2
388	822	2
388	807	2
378	127	2
378	145	2
378	288	2
378	847	2
378	788	2
378	815	2
380	109	2
380	882	2
380	844	2
380	883	2
387	141	2
387	170	2
387	234	2
387	301	2
387	712	2
387	815	2
387	828	2
387	844	2
387	880	2
387	807	2
401	100	2
401	170	2
401	201	2
401	203	2
401	485	2
401	780	2
401	845	2
418	288	2
421	8	2
438	8	2
438	141	2
482	144	2
482	170	2
482	288	2
482	387	2
482	438	2
482	613	2
482	828	2
478	127	2
478	188	2
478	187	2
488	170	2
488	879	2
488	878	2
488	709	2

CENTON	CENTOS	FLUJO
488	828	2
488	828	2
831	8	2
831	201	2
831	788	2
831	828	2
834	100	2
834	124	2
834	218	2
834	238	2
834	280	2
834	387	2
834	834	2
880	84	2
880	188	2
880	218	2
880	344	2
880	837	2
880	780	2
880	783	2
878	201	2
878	482	2
878	478	2
878	831	2
878	882	2
878	844	2
878	884	2
878	942	2
880	288	2
880	787	2
880	788	2
813	148	2
813	223	2
813	271	2
813	301	2
813	478	2
813	878	2
813	880	2
813	882	2
813	784	2
813	883	2
828	188	2
828	234	2
828	401	2
828	883	2
837	131	2
837	188	2
837	388	2
837	714	2
837	728	2
837	788	2
837	828	2
837	848	2
837	884	2
837	910	2
848	108	2
848	328	2
848	401	2
848	709	2
847	188	2
847	288	2
847	878	2
847	708	2
847	848	2
848	108	2
848	127	2
848	201	2
848	288	2
882	310	2
882	334	2
882	709	2
882	787	2

CENTON	CENTOS	FLUJO
878	124	2
878	381	2
709	7	2
709	148	2
709	170	2
709	223	2
708	248	2
708	284	2
708	311	2
708	334	2
708	344	2
708	488	2
708	878	2
708	780	2
712	188	2
712	401	2
712	728	2
712	730	2
712	830	2
712	842	2
714	84	2
714	144	2
714	148	2
714	170	2
714	318	2
714	488	2
714	807	2
728	84	2
728	108	2
728	141	2
728	284	2
728	488	2
728	187	2
728	230	2
728	787	2
728	780	2
728	787	2
728	848	2
728	907	2
730	230	2
730	807	2
733	318	2
733	482	2
733	847	2
733	882	2
733	820	2
787	227	2
787	234	2
787	388	2
787	828	2
787	828	2
787	820	2
780	84	2
780	100	2
780	134	2
780	188	2
780	230	2
780	288	2
780	328	2
780	780	2
780	778	2
780	788	2
780	788	2
780	784	2
780	822	2
780	872	2
780	834	2
787	108	2
787	387	2
787	828	2
787	837	2
787	778	2

CENTRO	CENTROS	FLUJO
149	100	1
149	963	1
149	268	1
149	271	1
149	311	1
149	319	1
149	387	1
149	486	1
149	890	1
149	928	1
149	900	1
153	84	1
153	124	1
153	144	1
153	168	1
153	218	1
153	238	1
153	285	1
153	847	1
153	942	1
169	900	1
169	201	1
169	248	1
163	8	1
163	84	1
163	148	1
163	193	1
163	248	1
165	188	1
168	84	1
168	144	1
168	148	1
168	149	1
168	235	1
168	248	1
168	281	1
168	311	1
168	478	1
168	813	1
168	847	1
168	714	1
168	883	1
168	934	1
168	148	1
169	168	1
169	201	1
170	108	1
170	482	1
170	842	1
185	185	1
188	203	1
188	235	1
188	319	1
188	482	1
188	880	1
188	798	1
188	848	1
187	100	1
187	201	1
187	229	1
187	284	1
187	416	1
187	532	1
187	723	1
187	733	1
187	822	1
187	848	1
187	910	1
187	924	1
187	942	1
201	712	1
201	738	1

CENTRO	CENTROS	FLUJO
203	223	1
203	230	1
203	788	1
203	828	1
218	148	1
218	188	1
218	170	1
218	201	1
218	223	1
218	248	1
218	708	1
218	800	1
221	127	1
221	218	1
221	388	1
221	438	1
221	807	1
221	884	1
223	148	1
223	486	1
223	780	1
227	188	1
227	284	1
227	834	1
228	84	1
228	109	1
228	134	1
228	144	1
228	203	1
228	878	1
228	709	1
228	880	1
230	7	1
230	100	1
230	201	1
230	218	1
230	230	1
230	288	1
230	334	1
230	478	1
230	579	1
230	708	1
230	780	1
230	804	1
234	109	1
234	387	1
234	880	1
236	84	1
236	223	1
236	227	1
236	303	1
236	344	1
236	438	1
236	834	1
248	148	1
248	183	1
248	201	1
248	203	1
248	218	1
248	281	1
248	288	1
248	301	1
248	334	1
248	714	1
248	800	1
280	221	1
280	878	1
280	787	1
288	828	1
281	223	1
281	486	1
281	708	1

CENTRO	CENTROS	FLUJO
281	788	1
288	218	1
288	712	1
271	8	1
271	108	1
271	221	1
271	223	1
271	847	1
278	84	1
278	788	1
288	221	1
288	788	1
284	807	1
288	807	1
301	7	1
301	221	1
301	878	1
303	188	1
303	223	1
303	837	1
308	847	1
308	878	1
318	108	1
318	141	1
318	221	1
318	318	1
318	380	1
318	834	1
318	712	1
318	784	1
318	828	1
318	880	1
328	127	1
328	301	1
328	828	1
328	883	1
333	488	1
344	834	1
344	712	1
344	883	1
344	907	1
358	141	1
358	148	1
358	183	1
358	221	1
358	387	1
358	482	1
358	813	1
358	828	1
358	848	1
378	401	1
380	170	1
387	183	1
387	223	1
387	248	1
387	828	1
387	848	1
387	908	1
387	924	1
401	188	1
418	248	1
438	248	1
438	344	1
438	780	1
438	828	1
482	188	1
482	778	1
482	880	1
482	942	1
478	108	1
478	787	1
478	780	1

CENTORI	CENTORES	FLUJO
479	144	1
488	934	1
531	197	1
531	208	1
531	438	1
531	579	1
534	148	1
534	248	1
534	785	1
534	883	1
580	197	1
580	613	1
580	647	1
580	822	1
579	303	1
579	900	1
579	906	1
579	934	1
580	84	1
580	197	1
580	438	1
580	780	1
613	198	1
613	303	1
613	305	1
613	328	1
613	482	1
613	730	1
613	844	1
628	280	1
637	238	1
637	788	1
637	784	1
637	810	1
637	908	1
645	319	1
645	344	1
647	248	1
652	197	1
652	344	1
678	197	1
678	284	1
678	485	1
678	822	1
689	148	1
707	9	1
709	199	1
709	229	1
709	280	1
709	682	1
709	842	1
712	188	1
712	189	1
712	319	1
712	600	1
712	657	1
712	682	1
712	709	1
712	717	1
712	828	1
712	807	1
714	9	1
714	183	1
714	185	1
723	305	1
723	344	1
723	682	1
728	842	1
733	109	1
733	828	1
757	189	1
757	415	1

CENTORI	CENTORES	FLUJO
757	534	1
757	714	1
757	784	1
757	880	1
757	872	1
757	930	1
780	248	1
780	288	1
780	308	1
780	717	1
780	807	1
780	924	1
787	201	1
787	482	1
787	787	1
787	788	1
787	908	1
787	920	1
778	281	1
778	787	1
778	828	1
783	149	1
783	787	1
783	859	1
783	824	1
788	188	1
788	188	1
788	678	1
788	723	1
788	798	1
788	900	1
790	438	1
794	230	1
794	613	1
794	842	1
798	235	1
798	637	1
798	728	1
798	787	1
798	783	1
798	788	1
798	798	1
798	859	1
798	900	1
798	924	1
810	134	1
815	788	1
822	183	1
822	188	1
822	188	1
822	230	1
822	301	1
822	387	1
822	401	1
822	482	1
822	712	1
822	783	1
822	798	1
822	844	1
825	144	1
828	188	1
828	218	1
828	230	1
828	488	1
828	728	1
828	780	1
828	891	1
828	908	1
828	127	1
828	189	1
828	822	1
828	844	1

CENTORI	CENTORES	FLUJO
828	810	1
828	824	1
844	218	1
844	229	1
844	248	1
844	579	1
844	883	1
844	924	1
845	148	1
845	197	1
845	401	1
845	572	1
845	884	1
848	84	1
848	127	1
848	301	1
848	647	1
848	728	1
848	788	1
848	854	1
848	891	1
848	900	1
848	903	1
848	920	1
854	637	1
854	678	1
854	788	1
854	844	1
854	903	1
880	148	1
880	197	1
880	788	1
880	883	1
880	934	1
883	100	1
883	188	1
883	188	1
883	248	1
883	301	1
883	328	1
883	344	1
883	488	1
883	578	1
883	788	1
883	880	1
883	874	1
883	810	1
872	248	1
872	531	1
872	578	1
872	738	1
872	822	1
872	884	1
872	883	1
872	908	1
872	942	1
874	883	1
874	872	1
891	9	1
898	828	1
900	84	1
900	98	1
900	148	1
900	845	1
900	920	1
903	828	1
903	848	1
903	883	1
903	907	1
908	9	1
907	188	1
907	188	1

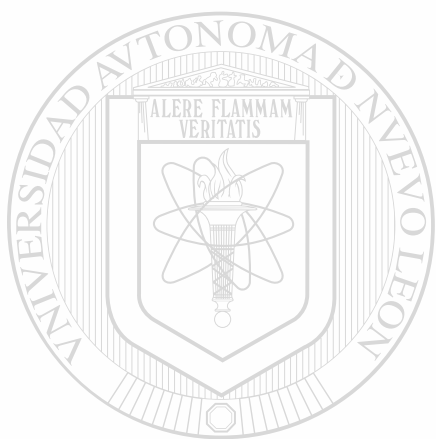
CENTROS	CENTROS	PLUJO
907	238	1
907	368	1
907	482	1
907	498	1
907	629	1
907	678	1
907	714	1
907	728	1
907	891	1
907	900	1
907	928	1
910	7	1
910	149	1
910	401	1
910	757	1
910	798	1
910	822	1
910	848	1
910	883	1
910	924	1
910	930	1
920	188	1
920	230	1
920	306	1
920	678	1
920	728	1
920	864	1
920	924	1
920	942	1
924	84	1
924	109	1
924	189	1
924	401	1
924	942	1
928	9	1
929	780	1
930	109	1
930	757	1
930	822	1
930	907	1
930	910	1
934	96	1
934	188	1
934	203	1
934	223	1
934	333	1
934	580	1
934	714	1
934	728	1
934	815	1
934	942	1
942	109	1
942	141	1
942	149	1
942	189	1
942	230	1
942	319	1
942	712	1
942	728	1
942	787	1
942	848	1
942	920	1
942	934	1
	SUMA =	330,340

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

GENERAL DE BIBLIOTECAS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



