

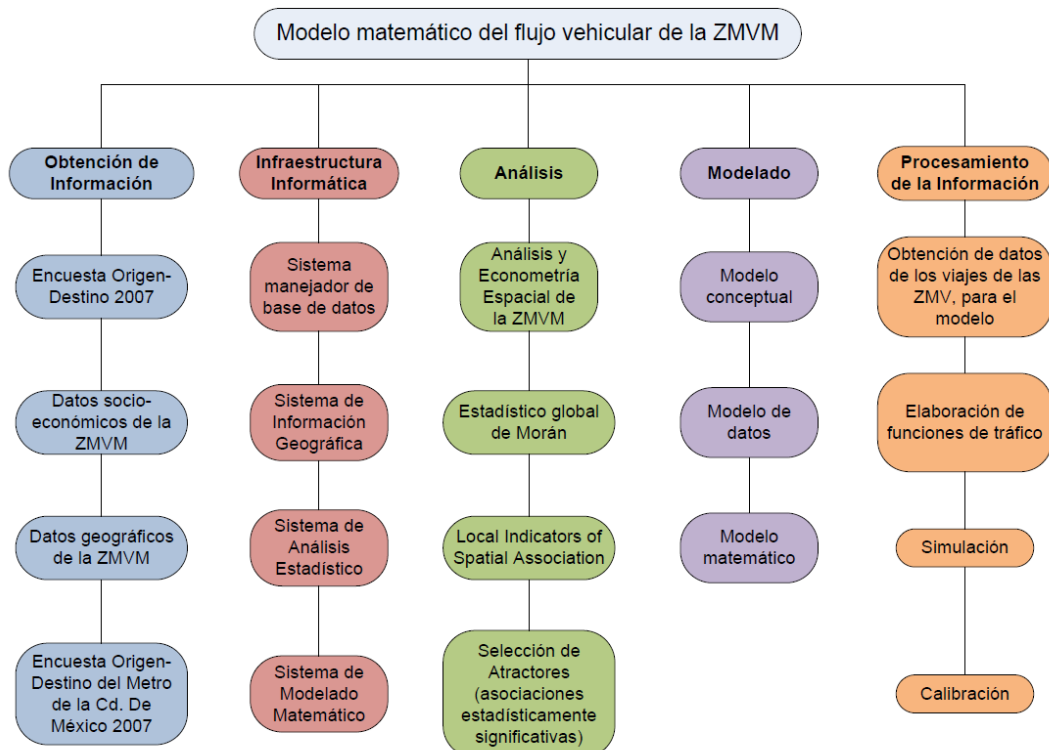
Anexo 5. Modelo de simulación de flujos vehiculares y emisiones de la ZMVM

Construcción y análisis de bases de datos

Los alcances del modelo se circunscribieron a la información presentada en la Encuesta Origen-Destino 2007 de la ZMVM (EOD_2007) elaborada por el INEGI. Esta información se refiere solamente a un día laboral, no cuenta con información específica del día de la semana en el que se realizó cada uno de los viajes registrados, no incluye información de los viajes realizados en sábados y domingos, no contiene datos sobre el transporte de carga, no incluye información específica del número de vehículos del transporte público y para el caso de los viajes efectuados en varios modos de transporte, no cuenta con el detalle suficiente para conocer los datos de los puntos intermedios de un viaje completo.

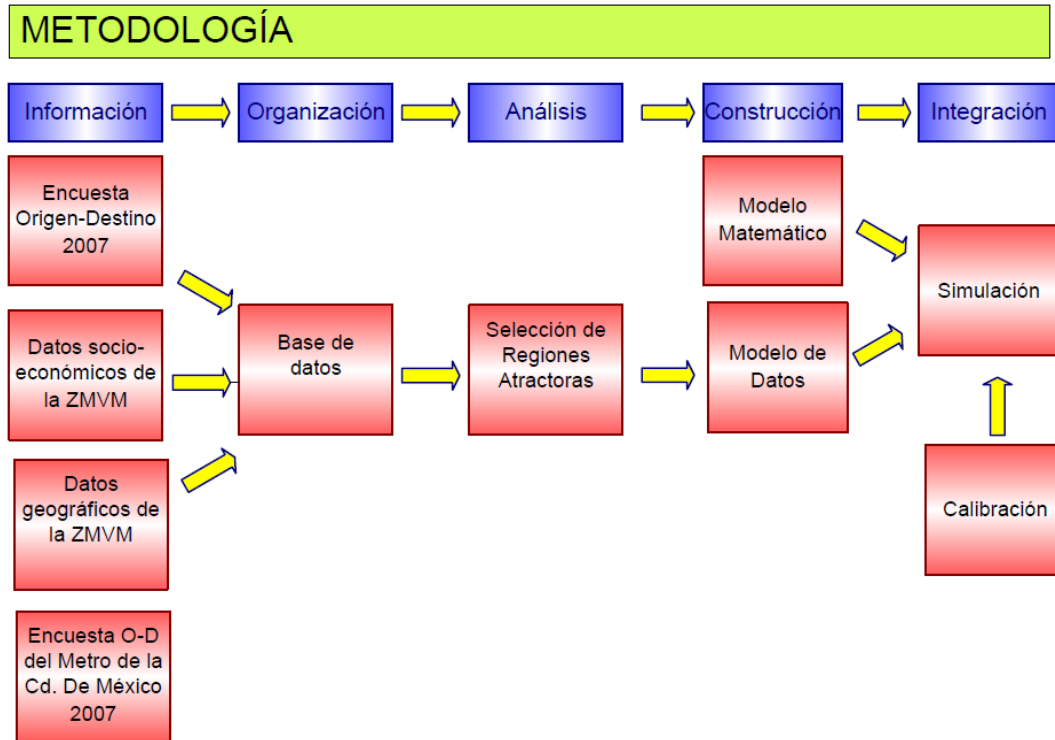
Se inició con los análisis de los viajes origen-destino reportados en la EOD_2007 así como de la información socio-económica y urbana a nivel de cada AGEB (áreas geográficas de estadística básica, definidas por el INEGI). Posteriormente se procesó la información de la EOD_2007 para identificar regiones atractoras de viajes en automóvil al interior de la ZMVM. Para ello se siguió la estructura desglosada de trabajo en el siguiente esquema, utilizando la técnica conocida como estructura de desglose de trabajo (conocida en inglés como Work Breakdown Structure, WBS) lo cual se presenta en el diagrama siguiente:

Diagrama 1



En lo que se refiere a la metodología específica para la construcción del modelo matemático de flujos vehiculares, ésta se ilustra en el siguiente diagrama:

Diagrama 2



La EOD_2007 presenta resultados del número de viajes/persona originados en cada una de las denominadas sobre el territorio que conforma a la ZMVM. Asimismo, la información del número de viajes/persona es complementada con información acerca del motivo o propósito de dichos viajes, el modo de transporte utilizado, el destino de los mismos, así como los horarios en los cuales se llevan a cabo.

Según el motivo o propósito que origina los viajes, éstos son clasificados como: "ir al trabajo", "ir a la escuela", "ir de compras", "llevar o recoger a alguien", "actividades sociales o de diversión", "viajes relacionados con el trabajo", "ir a comer", "realizar trámites", "otros no relacionados con los anteriores" y, finalmente, "regreso a casa".

De todos estos tipos de viajes, y como consecuencia del análisis realizado para la identificación de zonas atractoras de viajes, resultó necesario considerar a uno de ellos como un caso especial. Se trata de los viajes de "regreso a casa" en virtud de que el regreso a casa no es propiamente un indicador de atracción de viajes sino un viaje obligado como resultado de cualquiera de los otros motivos.

Los viajes se clasifican también según el modo de transporte utilizado para efectuarlos: automóvil, taxi, transporte colectivo (Microbuses, RTP, Metro, Trolebús, Metrobús, etc.), motocicleta y la bicicleta. A su vez, los viajes pueden ser unimodales, en los que se utiliza un solo modo de transporte, y, multimodales o mixtos, en los que se utilizan dos o más modos de transporte distintos.

La metodología para identificar las agrupaciones de AGEB que cumplen con los criterios de ser zonas altamente atractoras de viajes siguió los pasos siguientes:

1) Se usó el estadístico global de Moran para identificar si existe evidencia de autocorrelación espacial, es decir si los AGEB con valores similares de viajes por destino tienden a estar agrupadas espacialmente;

2) Se utilizó la metodología LISA (Local Indicators of Spatial Association), mediante la cual el estadístico local de Moran es calculado a nivel de AGEB y comparado con todos los de sus vecinos, con el objetivo de identificar el tipo de asociación que tienen entre ellos. Cuando un AGEB está rodeado por otros AGEB que tienen un número similar de viajes por destino, el estadístico local de Moran presenta valores positivos. Por el contrario, si el AGEB está rodeado por otros con número de viajes muy diferentes, entonces el estadístico presenta valores negativos;

3) Bajo el criterio de incluir únicamente asociaciones estadísticamente diferentes de cero, se construyeron mapas que muestran cuatro tipos de asociaciones entre los AGEB: HH (high-high o alto-alto), que es el grupo de AGEB que tienen la característica de atraer muchos viajes y estar rodeados de AGEB que también atraen muchos viajes; LL (low-low o bajo-bajo), es el grupo de AGEB que tienen la característica de atraer pocos viajes y estar rodeados de AGEB que también atraen pocos viajes; HL (high-low o alto-bajo), es el AGEB individual que atrae muchos viajes, pero que está asociado con vecinos que generan pocos viajes; y, por último, los LH (low-high o bajo-alto), que son AGEB que se caracterizan por atraer pocos viajes y tener vecinos que atraen muchos viajes.

Para la construcción de este modelo, se estableció que los principales atractores de viajes en la ZMVM serían aquellas regiones o aglomeraciones de AGEB que cumplieran con ser HH a un nivel de significancia del 95%, de acuerdo a la metodología LISA.

El INEGI llevó a cabo la EOD_2007 de los viajes de los residentes de la ZMVM utilizando la clasificación por distritos empleada en la primera encuesta Origen-Destino que se realizó en el año 1994, con la idea de tener resultados que pudiesen compararse. La EOD_2007 cubrió 16 delegaciones del Distrito Federal, así como 40 municipios conurbados del Estado de México. El área de estudio se dividió en 156 distritos, siendo del Distrito Federal 84 de ellos y 72 del Estado de México, como resultado de la agrupación de 5,256 AGEB.

En primera instancia se trabajó con la clasificación por distritos presentada en la EOD_2007 y posteriormente se trabajó con los microdatos de la encuesta para generar las bases de datos de los viajes origen-destino, así como las matrices de viajes origen-destino entre los 5,256 AGEB, considerando los mismos propósitos y modos de viaje de la EOD_2007, tomando como marco de referencia la cartografía de las 16 delegaciones del Distrito Federal y 40 municipios del Estado de México.

Las matrices de viajes origen-destino se construyeron para nueve de los diez propósitos que considera la EOD_2007, en virtud de que, como ya se mencionó anteriormente, el propósito "regreso a casa" no es un indicador de atracción de viajes.

Con la metodología LISA se identificaron 497 AGEB que conforman siete regiones atractoras de viajes en automóvil en la ZMVM. Estos AGEB representan el 9.5% del total de AGEB y tienen como destino 1.6 millones de viajes, es decir, el 44.7% de todos los viajes por destino en la ZMVM.

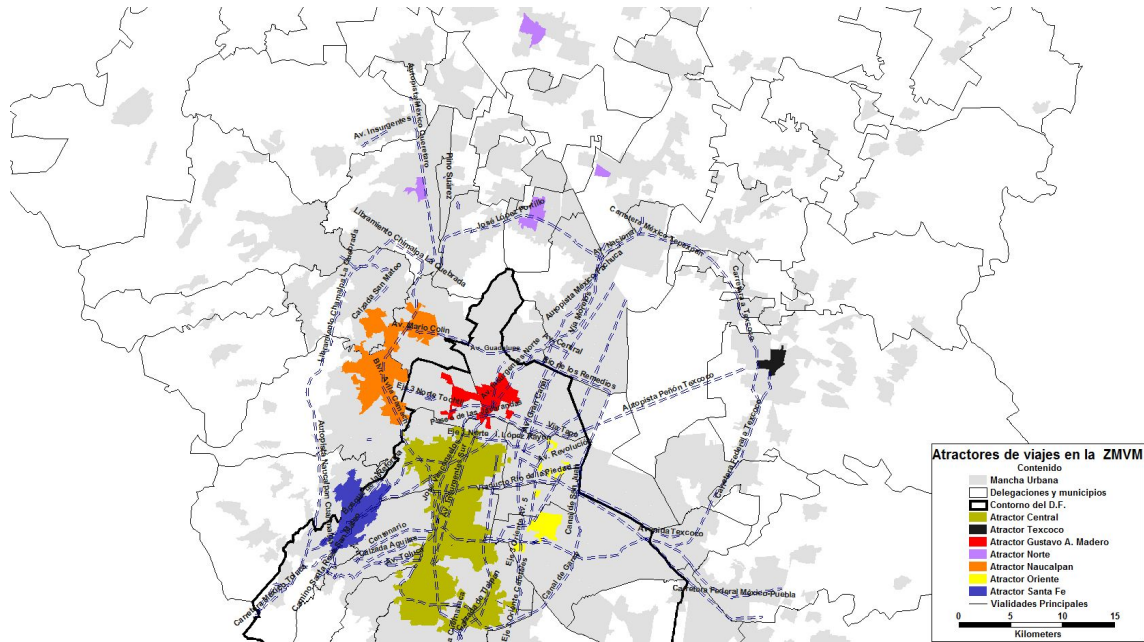
Las regiones atractoras de viajes en automóvil por destino y orden de importancia aparecen en la tabla siguiente:

Tabla 1

1	Atractor Central: Se conforma con 318 AGEB de las delegaciones de Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Álvaro Obregón, Coyoacán, Magdalena Contreras, Tlalpan y un AGEB de Venustiano Carranza. El atractor central es el más importante debido a que concentra el 28.8% de todos los viajes de la ZMVM.
2	Atractor Naucalpan: Incluye 74 AGEB de los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla de Baz, Atizapán de Zaragoza y un AGEB de Azcapotzalco. Es el segundo atractor, por concentrar el 6.6% de todos los viajes.
3	Atractor Gustavo A. Madero: Contiene 42 AGEB de las delegaciones Gustavo A. Madero, Azcapotzalco y dos AGEB de la Cuauhtémoc. El atractor GAM concentra 2.7% de todos los viajes.
4	Atractor Santa Fe: Está conformado por 20 AGEB de las delegaciones Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón, Cuajimalpa y del municipio de Huixquilucan. Al atractor Santa Fe se dirigen el 2.2% de todos los viajes.
5	Atractor Oriente: Tiene 18 AGEB de las delegaciones Venustiano Carranza, Iztacalco e Iztapalapa. Este atractor se conforma en realidad por tres grupos de AGEB para cada delegación, pero que en términos geográficos son relativos cercanos. Este atractor concentra 1.6% de todos los viajes.
6	Atractor Norte: Contiene 14 AGEB de municipios de Cuautitlán Izcalli, Zumpango, Tecámac y Coacalco de Berriozábal. Este atractor no tiene la típica conformación de los otros atractores y lo que los une es simplemente su posición al norte de los atractores principales. Este conjunto de atractores concentran 1.3% de todos los viajes.
7	Atractor Texcoco: Es un atractor singular debido a que se conforma con AGEB de un solo municipio. En Texcoco se atrae solamente el 0.5% de todos los viajes por destino en la ZMVM.

Las principales vialidades que comunican a estos atractores con su entorno y entre sí, fueron mapeadas, como se observa en el Mapa 1:

Mapa 1



Para efectos de este trabajo, se identificaron las zonas norte y sur que envuelven a cada atractor para obtener, a partir de las bases de datos de la EOD_2007, todos aquellos viajes originados en estas zonas que se dirigen hacia cada uno de los atractores; estas zonas se denominaron las cuencas de los atractores.

El Atractor Central aglutina el mayor número de viajes de todos los atractores y para simplificación en el análisis, fue subdividido en regiones Norte, Centro y Sur. Por otro lado, el Atractor Oriente, que geográficamente está formado por tres zonas disconexas, fue subdividido en tres subatractores que, de norte a sur son: Venustiano Carranza, Iztacalco e Iztapalapa.

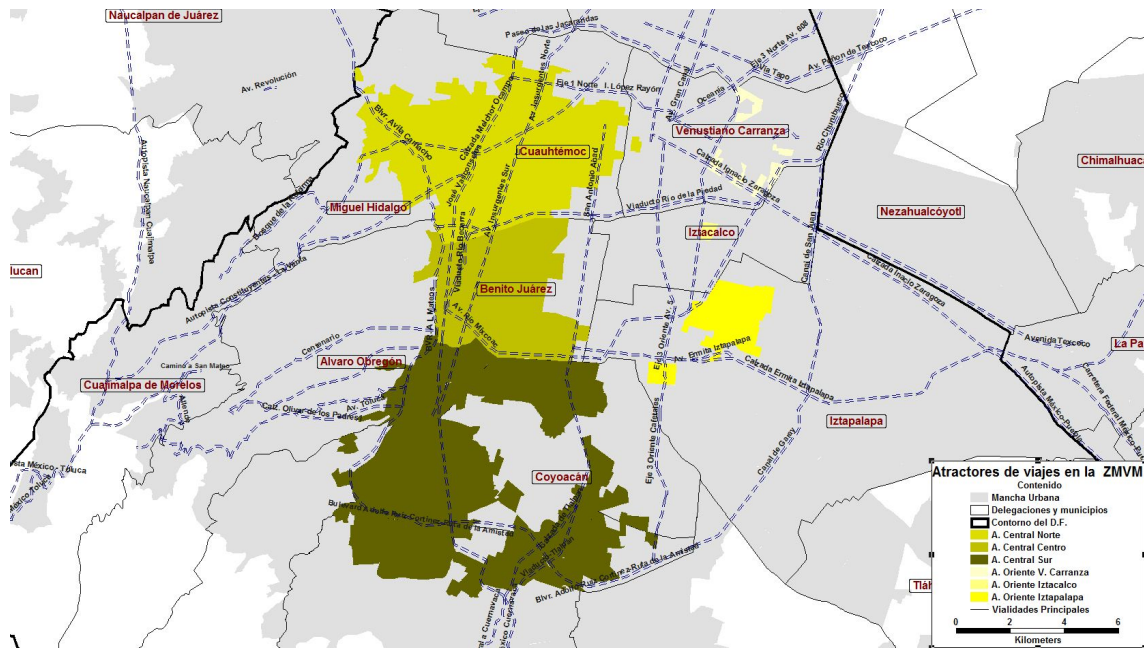
Con ello, se obtuvo un "universo" formado por los siguientes once clústers atractores:

Tabla 2

1a	Atractor Central Norte
1b	Atractor Central Centro
1c	Atractor Central Sur
2	Atractor Naucalpan
3	Atractor Gustavo A. Madero
4	Atractor Santa Fe
5a	Atractor Oriente – Venustiano Carranza
5b	Atractor Oriente – Iztacalco
5c	Atractor Oriente – Iztapalapa
6	Atractor Norte
7	Atractor Texcoco

El mapa siguiente muestra los componentes de los atractores central y oriente.

Mapa 2



Es necesario aclarar que, aunque el Atractor Norte tiene características geográficas similares a las del Atractor Oriente, no se consideró necesario subdividirlo para su análisis, en virtud de que el número de viajes que concluyen en él es comparativamente menor y, por tanto, su análisis como una unidad no representa mayor complejidad.

Ahora bien, al incluir en el análisis la información referente a viajes efectuados en los demás modos de transporte, en particular, el transporte colectivo, así como los viajes efectuados por los vehículos de transporte de carga, se encontró que los atractores identificados para viajes en automóvil son también atractores de un número significativo de estos otros tipos de viajes, por lo que se tomó la decisión de utilizar estos atractores como los objetos de estudio del modelo, tomando en cuenta los efectos del transporte colectivo y de carga en los flujos vehiculares hacia estos atractores como factores adicionales parametrizados en el modelo.

Aquí es importante apuntar que los viajes/persona en medios de transporte colectivo tienen un carácter diferente a los viajes efectuados en automóvil, en el sentido de que aquéllos no tienen realmente un destino final fijo, ya que los vehículos de transporte colectivo viajan continuamente a lo largo de sus respectivas rutas, sin un destino final que no sea sus respectivas "terminales". Por ello, este tipo de viajes se introduce de manera paramétrica en los flujos vehiculares del modelo.

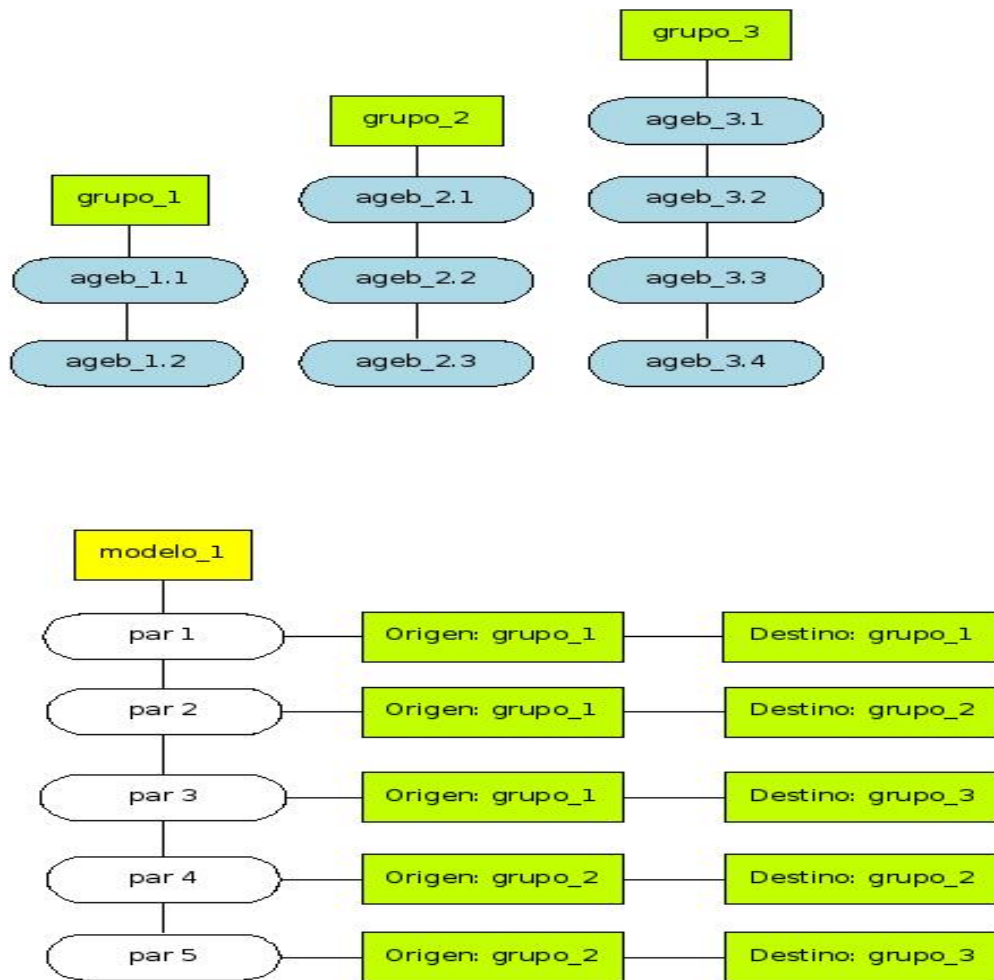
Para utilizar los resultados de la EOD_2007 se reprodujo el esquema de la base de datos de la misma, definido originalmente por las entidades: "hogares", "viviendas", "residentes", "viajes", "discapacitados" y "vehículos". Se procedió a validar la información mediante la comparación de las cifras reportadas en la matriz de viajes por distrito de la EOD_2007 para lo cual, conjuntamente con la SETRAVI, se tuvo que completar la lista de los AGEB que componen cada distrito.

Para los fines de este PROAIRE las entidades "residentes" y "viajes" que contienen los datos del lugar de origen y el destino de los viajes, se concentraron en una entidad modificada de "viajes origen-destino", la cual constituye el núcleo de análisis.

Alrededor del núcleo se crearon dos entidades principales: "modelo" y "grupo". La finalidad de un "grupo" es asociar mediante un solo identificador una región formada por un conjunto de AGEB, para simplificar el análisis de los viajes internos y externos a dicha región. La entidad "modelo" se estableció para asociarle las combinaciones necesarias de viajes producidos entre pares de grupos origen-destino.

En el Diagrama 3 se muestra a manera de ejemplo el esquema de tres grupos con sus AGEB, así como un modelo formado con 5 pares de grupos origen-destino.

Diagrama 3



El procesamiento de la información inicia con la definición de cada grupo y la carga de los AGEB que aglutina; posteriormente se define cada modelo y se le asocian todos los pares necesarios de grupos origen-destino; finalmente el modelo se recorre en forma automatizada para generar los viajes de cada par de grupos origen-destino. La cantidad de viajes, hora, modo de viaje y motivo se obtienen de la intersección de los

conjuntos de AGEB del grupo origen o destino con los AGEB de la entidad núcleo "viajes origen-destino".

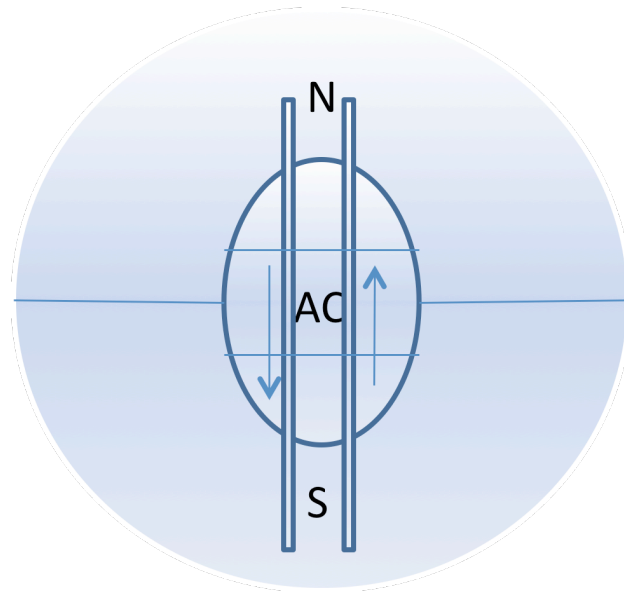
Los resultados contienen la información de cada hora a lo largo del día, en dos formas: número de viajes-persona o número de vehículos. El número de vehículos del servicio público se estima empleando el total de viajes-persona y considerando la proporción de ocupación promedio del tipo de transporte que se trate, durante las horas pico y normales a lo largo del día.

Las herramientas informáticas empleadas para llevar a cabo el análisis antes descrito son del tipo "Open Source": Linux, Kate de KDE, Dia, PostgreSQL, Shell Bash y Perl básicamente.

Modelo de simulación de flujos vehiculares y emisiones de la ZMVM

El modelo de simulación de los flujos vehiculares y emisiones de la ZMVM fue construido a partir de la estructura de clústers atractores de viajes en automóvil generada para este PROAIRE a partir del análisis de la Encuesta Origen-Destino 2007 (EOD_2007). La ZMVM fue dividida en tres grandes secciones: la parte externa norte (N), la parte externa sur (S) y el principal clúster atractor. La simulación de los flujos vehiculares entre estas 3 grandes zonas usa dos troncales, una en dirección sur-norte (T_1) y otra en dirección norte-sur (T_2); el atractor central (AC) fue dividido en tres subzonas, como se ilustra en el diagrama 1:

Diagrama 4



Los vehículos pueden ir de la región S a la:

- Región N cruzando por AC
- Región sur del AC
- Región central del AC
- Región norte del AC

Análogamente pueden ir de la región N a la:

- Región S cruzando por AC
- Región norte del AC
- Región central del AC
- Región sur del AC

También pueden ir de cada una de las regiones que constituyen el atractor central a cualquier otra.

El modelo asume que la velocidad promedio de los vehículos circulando depende de la densidad de vehicular, y cuando hay condiciones de "flujo libre", se respetan los límites de velocidad indicados en el reglamento de tránsito. Se consideran velocidades promedio por cada tramo troncal en dependencia de la hipótesis anterior y la cantidad de vehículos que entran por motivos específicos, codificados según la Encuesta Origen-Destino 2007 por los motivos ya mencionados anteriormente.

Cada grupo de viajes por motivo se descompone en "ráfagas" de autos que entran al sistema vial a lo largo de las 24 horas del día, con base en la ecuación de pulsos siguiente:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n A_{a_i, b_i} \sin\left(\frac{\pi(t - a_i)}{b_i - a_i}\right) (H_{a_i}(t) - H_{b_i}(t))$$

En donde:

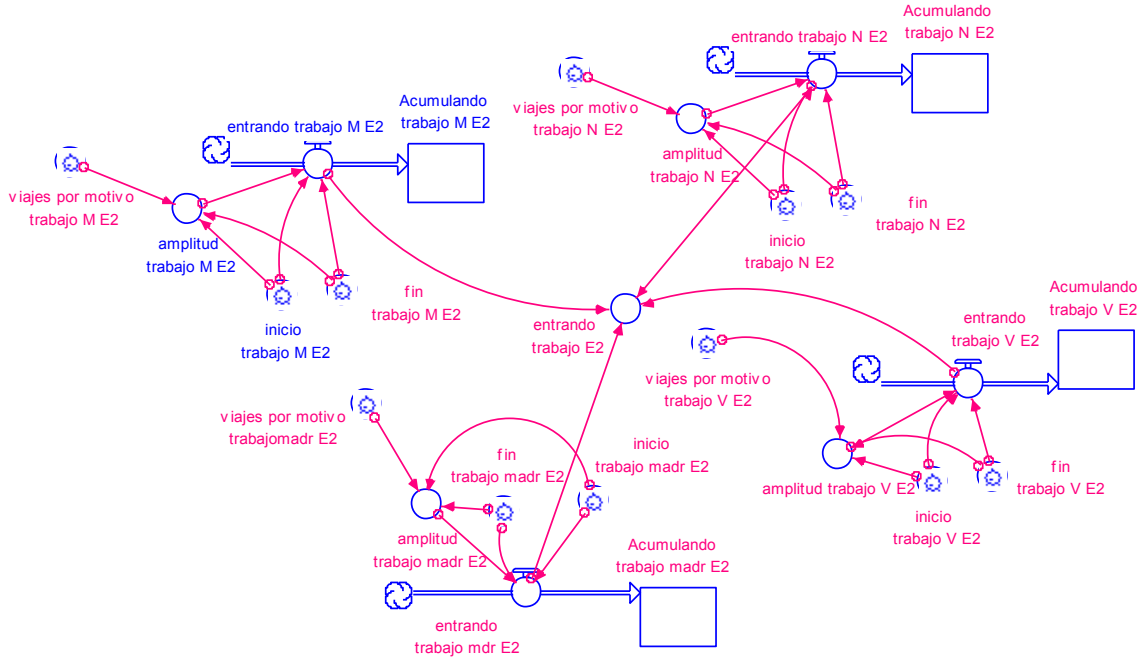
A_{a_i, b_i} son constantes que denotan la intensidad de la racha;

a_i, b_i corresponden a las horas de inicio y fin de la ráfagas, respectivamente;

$H_{a_i}(t), H_{b_i}(t)$ son las funciones de Heaviside asociadas a a_i, b_i .

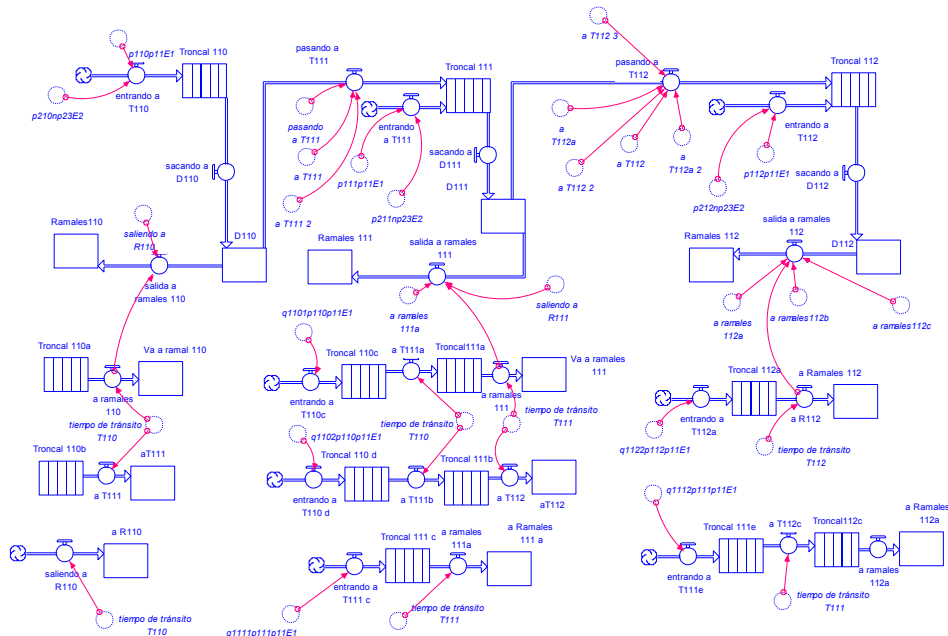
Se usaron los datos de la EOD_2007 para ajustar las componentes (ráfagas) de las funciones generadoras de viajes para que éstas reprodujeran lo observado. En el Diagrama 5 se muestra un mapa relacional que representa las ecuaciones de una parte de la función generadora de viajes al trabajo. Las otras funciones fueron construidas de manera análoga.

Diagrama 5



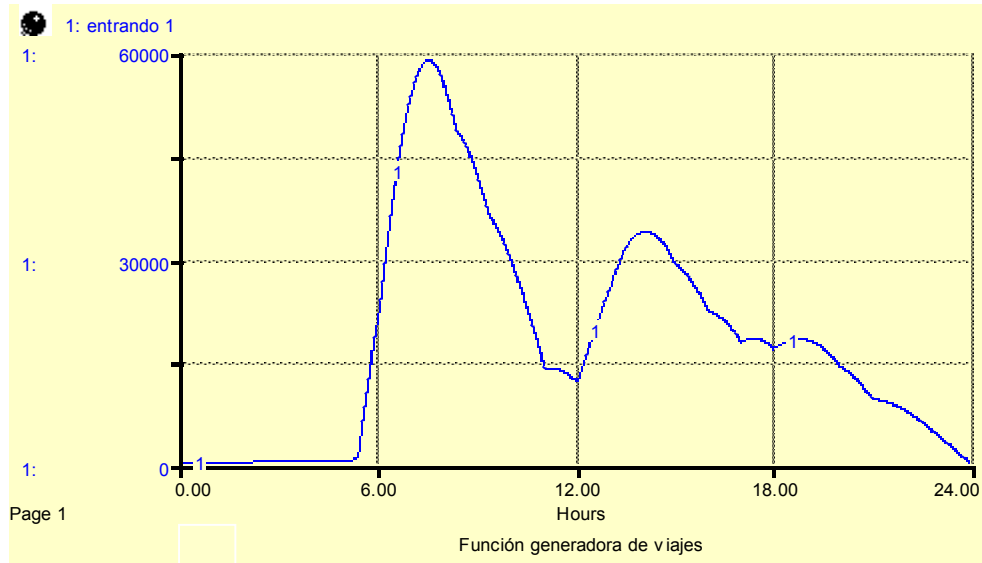
La entrada simultánea de autos al sistema vial complica la construcción del modelo, pues hay que tomar en cuenta el área ocupada por cada auto, las distancias entre autos, la generación de colas, la capacidad del sistema vial y muchas otras variables. El Diagrama 6 muestra, a manera de ejemplo, otra sección del mapa que relaciona las ecuaciones simultáneas.

Diagrama 6



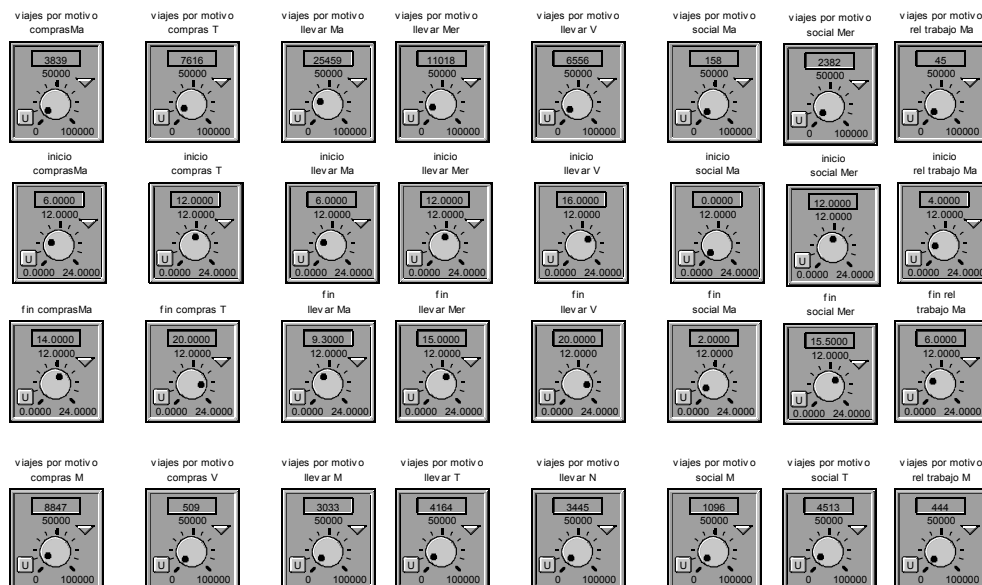
La Gráfica 1 es un ejemplo de cómo estas funciones generadoras simulan el número de viajes para cada motivo, a lo largo de las 24 horas.

Gráfica 1



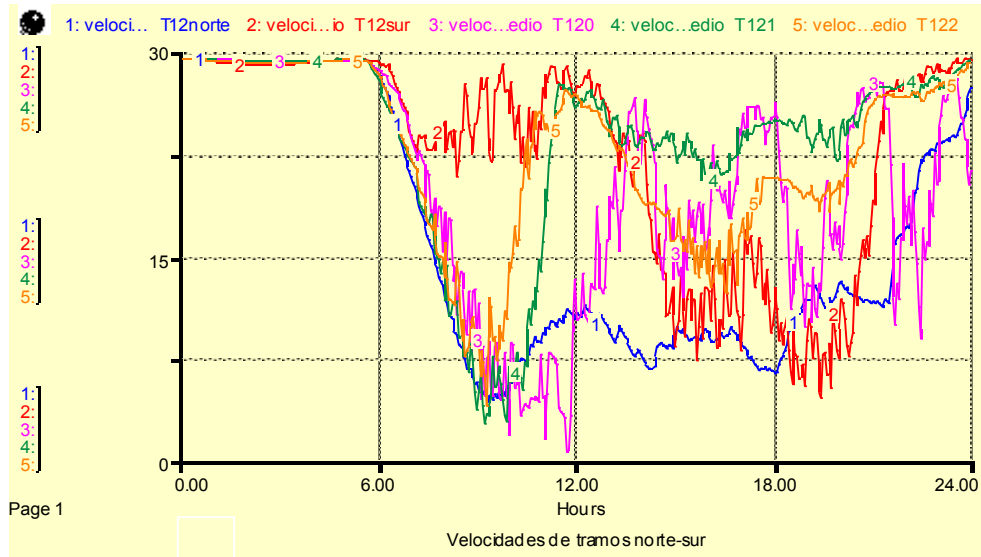
Estas funciones generadoras de viajes son las que van dosificando, conforme a los datos de la EOD_2007, la salida de autos desde cada uno de los AGEB origen hacia los AGEB atractores de viajes en automóvil. Tanto el número de autos como las horas de salida van determinando las densidades vehiculares en la red vial, lo cual determina las velocidades promedio de circulación. La Imagen 1 muestra una sección del tablero de control, en donde aparecen los potenciómetros que se usan para determinar el número de autos que sale de cada grupo de AGEB, por motivo de viaje, y las horas de inicio y terminación de las ráfagas correspondientes.

Imagen 1



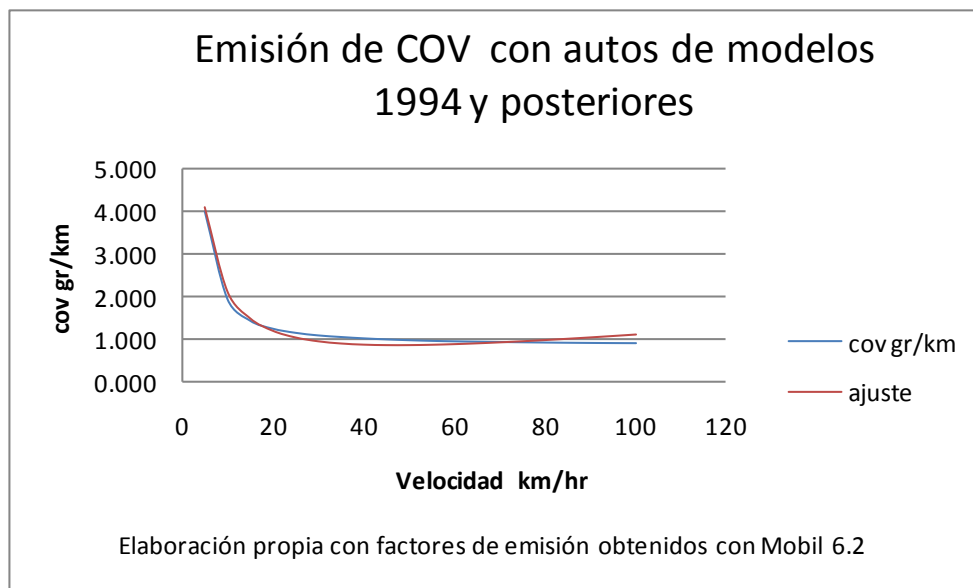
La Gráfica 2 es un ejemplo de cómo se ven las velocidades promedio en cinco de las troncales.

Gráfica 2



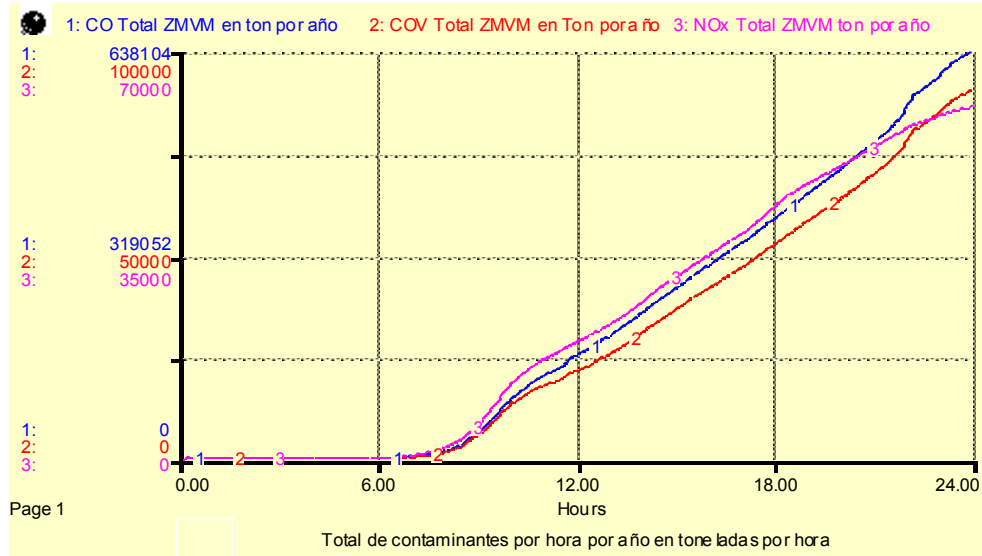
Para el cálculo de las emisiones contaminantes generadas por la operación de los motores se utilizaron factores de emisión obtenidos a partir del modelo Mobile 6.2, calibrado para la ZMVM. El Mobile 6.2 se corrió para diferentes velocidades promedio, desde 5 hasta 100 km/h, y con los factores generados se obtuvieron las ecuaciones de ajuste que fueron incorporadas al modelo de simulación, de manera que se pudieran calcular las emisiones en función de la velocidad. La Gráfica 3 muestra la curva de una de las ecuaciones de ajuste obtenidas a partir de los datos del Mobile 6.2.

Gráfica 3



El parque vehicular se dividió en dos, antes y después de 1994, para considerar el cambio tecnológico en el control de emisiones. De esta manera el modelo puede estimar las emisiones generadas de COV, CO y NOx por unidad de tiempo, por tramo troncal. La Gráfica 4 presenta la acumulación de estos contaminantes a lo largo de las 24 horas del día, en un año, para toda la ZMVM. Nótese que las escalas han sido modificadas para facilitar la lectura.

Gráfica 4



Este modelo es una herramienta que permite estimar los efectos en cascada de cambios paramétricos y estructurales en las funciones de generación de viajes. Se desarrolló para el PROAIRE 2011-2020 y ofrece un potencial importante de desarrollo.