

Tercera parte

Concepción ecosistémica y simulación de emisiones contaminantes en la ZMVM

Capítulo 6. Concepción ecosistémica, dinámica
estructural y simulación de emisiones
en la ZMVM.

Capítulo 6

Concepción ecosistémica, dinámica estructural y simulación de emisiones en la ZMVM

El análisis ecosistémico desarrollado en este capítulo presenta nuevas alternativas para el manejo de la calidad del aire en la ZMVM. Explora la relación endógena entre la estructura urbana y el sistema de generación de contaminantes, introduce los índices de entropía urbana y de mezcla de usos del suelo, estima elasticidades espaciales que ayudan a entender el rol del desarrollo urbano en la emisión de contaminantes, presenta un modelo de simulación de emisiones contaminantes de los viajes en automóvil, simula la generación de emisiones al 2020 y modela la calidad del aire para el mismo año, que resulta de la aplicación de algunas medidas propuestas en este PROAIRE.

6.1 Concepción ecosistémica de la generación de contaminantes atmosféricos

La Zona Metropolitana del Valle de México ha sido ampliamente descrita, medida y caracterizada para narrar la expansión de su área urbanizada, el tamaño y diversificación de su economía y los impactos ambientales asociados a las actividades de sus habitantes. Sin embargo, más allá de los diagnósticos descriptivos, la comprensión profunda del fenómeno metropolitano exige un análisis que integre los procesos fundamentales de la ZMVM con un enfoque sistémico y estructural.

El análisis de esta zona como un ecosistema espacial, abierto y complejo permite descubrir y entender las relaciones funcionales existentes entre las variables urbanas, económicas, ambientales, culturales y sociales. Así, la identificación de esas funciones es necesaria no sólo para ordenar y entender las maneras en la que una gran diversidad de procesos y variables de la ZMVM se relacionan, directa e indirectamente, sino para abrir una veta de creación de nuevos instrumentos de manejo y control de la calidad del aire que contribuyan, tanto al propósito de atender de raíz la generación simultánea de grupos de contaminantes, como a orientar el manejo integral de la calidad del aire hacia la obtención de cobeneficios en materia de productividad y competitividad metropolitanas.

En el marco de este programa, se entenderá por manejo ecosistémico al uso y aplicación de instrumentos y herramientas de análisis, planeación y gestión que relacionan endógenamente los diferentes aspectos que requiere la comprensión adecuada y completa del fenómeno de la calidad del aire en la ZMVM. Adicionalmente a los aspectos utilizados en el análisis convencional de la generación de contaminantes atmosféricos, como son los tecnológicos, los de calidad de los combustibles, el transporte, los de salud, los meteorológicos y los relativos a la físico-

química atmosférica, hay dos aspectos que no habían sido incluidos explícitamente y que resultan imprescindibles para completar la construcción de un enfoque ecosistémico de la gestión de la calidad del aire: la dimensión espacial de las actividades que generan la contaminación atmosférica y los fundamentos culturales de las mismas.

La dimensión espacial se refiere a la incorporación explícita de la estructura metropolitana, considerando aspectos físico-espaciales y funcionales. La dimensión cultural hace referencia a las formas de organización principalmente económicas y sociales que rigen y determinan las actividades cotidianas de los habitantes. Se trata de un conjunto de aspectos que contribuyen a dar identidad y personalidad propias a la ZMVM y que tienen que ver, por ejemplo, con los motivos específicos de realización de viajes; con las horas de entrada y salida de las actividades laborales, así como de atención a clientes y proveedores de todo tipo de entidades públicas y privadas; con la hora de comer y la hora de regresar al trabajo; con la logística familiar que determina quién o quiénes llevan o recogen a los niños de la escuela; con la cultura interna de las empresas privadas y las normas formales e informales del trabajo en oficinas; con la todavía escasa utilización de las tecnologías de comunicaciones que en países desarrollados ha permitido minimizar la presencia física de las personas en el intercambio de información, precios y servicios, y en la realización de trámites y reuniones de trabajo.

Los aspectos de referencia también dependen de los marcos jurídicos e institucionales que rigen las actividades cotidianas de los habitantes de la ZMVM, los cuales son reflejo, parte y consecuencia de la misma plataforma cultural. Todo ello es, en suma, el resultado de la interacción histórica de complejos procesos culturales, económicos y sociales que ayudan a explicar la forma funcional de un cierto tipo de actividades ubicadas en el corazón del planteamiento ecosistémico, a saber, las funciones de generación de emisiones contaminantes.

El mapa relacional (Mapa 6.1.1) es una representación general del ecosistema de generación de emisiones contaminantes, mismo que incluye las dimensiones mencionadas en los párrafos anteriores. El énfasis se ha puesto en el sistema de las fuentes móviles por la preponderancia que éste tiene en la emisión total de multicontaminantes atmosféricos, así como por lo importante de su participación en los costos económicos, ambientales y sociales del funcionamiento de la zona metropolitana.

En este contexto la identificación y especificación de las funciones que generan los viajes cotidianos desde los orígenes hacia los destinos dentro de la ZMVM es un aspecto toral del análisis del funcionamiento ecosistémico, por partida doble: primero, porque como puede verse en el mapa éstas dependen de una multitud de variables sobre las que es necesario empezar a incidir para lograr un manejo integral de la calidad del aire, y segundo, porque los patrones y las consecuencias de la generación espacial y temporal de viajes son determinantes críticos y estrictamente urbanos de los niveles de productividad y competitividad de la ZMVM.

Si bien el mapa representa un sistema de relaciones de orden general, se considera que éste es un nivel de análisis adecuado para iniciar los estudios y el desarrollo de las herramientas que permitan avanzar en la comprensión cada vez más clara y completa de la dinámica estructural del fenómeno metropolitano.

El mapa ecosistémico permite constatar que está constituido por las dimensiones que fueron mencionadas anteriormente como necesarias para abordar integralmente la generación de emisiones contaminantes. La parte tecnológica está representada por variables como las incluidas en las tecnologías de combustión y control de emisiones, así como las relativas a la eficiencia energética y a las edades del parque vehicular; se incluye también a la de calidad de los combustibles y al transporte, con variables como el tamaño y las edades del parque vehicular y la distribución modal de viajes; los aspectos económicos entran vía el ingreso per cápita, los precios relativos de los vehículos y los combustibles, así como con la consideración explícita de los costos sociales, ambientales y de oportunidad derivados del funcionamiento del sistema metropolitano; la salud ambiental está representada por los impactos de la contaminación sobre la población y los ecosistemas; la físico-química atmosférica y la meteorológica, son dimensiones que inciden de varias y complicadas maneras sobre los procesos de combustión y la formación de compuestos y gases en la cuenca atmosférica; la cultura ha sido incorporada en su acepción más amplia, como un sistema de valores, hábitos y creencias que controla y determina las decisiones y conductas de los habitantes, lo cual se manifiesta a través de un vasto panorama de aspectos como la arquitectura del marco jurídico e institucional y el diseño de los procesos y procedimientos laborales, entre muchas otras cosas; finalmente la dimensión espacial ha sido incorporada vía la distribución espacial de varios aspectos totales: los usos e intensidades de uso del suelo, las densidades de hogares y por lo tanto de la población, las densidades de empleos y las formas en las que la sociedad organiza sus actividades cotidianas.

Entropía urbana

El espacio no es económicamente neutro (Martínez, 1993), como tampoco lo es si se le aborda desde la óptica ambiental o social. Por ello los patrones de concentración y dispersión de las densidades mencionadas son aspectos críticos en la determinación de la entropía urbana y en el establecimiento de los niveles de eficiencias económicas, urbanas, ambientales y sociales con los que funciona el ecosistema metropolitano.

El concepto de entropía urbana que se ha utilizado para el análisis ecosistémico en este PROAIRE 2011-2020 permite medir a través de un índice el grado de concentración o dispersión de las densidades de población y empleo con un gradiente de valores que va del cero al uno. Matemáticamente, el concepto corresponde al de *entropía de Shannon* (Shanon, C.E., 1948) y su interpretación mantiene una analogía con la que tiene en termodinámica: a mayor entropía, mayor desorden urbano, más desperdicio energético y menos energía útil disponible. Este concepto es asimismo uno de los componentes del mapa conceptual propuesto, en el que se le relaciona con la mezcla de usos de suelo, con las eficiencias del sistema metropolitano y con las economías de aglomeración, de urbanización, de redes y de alcance.

El índice de entropía urbana ha sido calculado para datos de población, empleo, densidad de población y densidad de empleos a nivel de Área Geoestadística Básica (AGEB) para la ZMVM, y puede tomar valores que van de cero a uno¹. Cuando el valor calculado está próximo de cero, se tiene un patrón de alta concentración de las

¹ En el Anexo 1 se presentan las expresiones matemáticas empleadas. Se han utilizado datos de los AGEB incluidos en 27 municipios conurbados del Estado de México y en las 16 delegaciones del Distrito Federal.

variables utilizadas; cuando el valor se aproxima a uno, se trata de un patrón en el que las variables presentan valores similares, próximos o equiparables².

Tabla 6.1.1. Índices de entropía urbana calculados para la ZMVM

Población	Empleo	Densidad de población	Densidad de empleos
0.978	0.871	0.957	0.753

Fuente: Índices contruidos para este Proaire. Cálculos hechos con datos del INEGI.

Como se puede observar en la Tabla 6.1.1 los valores obtenidos son todos cercanos a uno, lo cual representa una estructura metropolitana altamente dispersa y extendida, con densidades homogéneas.

En términos de población y empleo, tomando en cuenta el enorme tamaño del área urbanizada, esto implica la conformación de una plataforma de orígenes y destinos que genera un número grande de viajes para el movimiento de personas y mercancías, con grandes distancias promedio de recorrido.

En términos de densidades de población y de empleo los valores obtenidos de los índices de entropía revelan una dispersión homogénea de las densidades consideradas, lo cual caracteriza a una estructura urbana de inmuebles bajos con poca intensidad de usos de suelo.

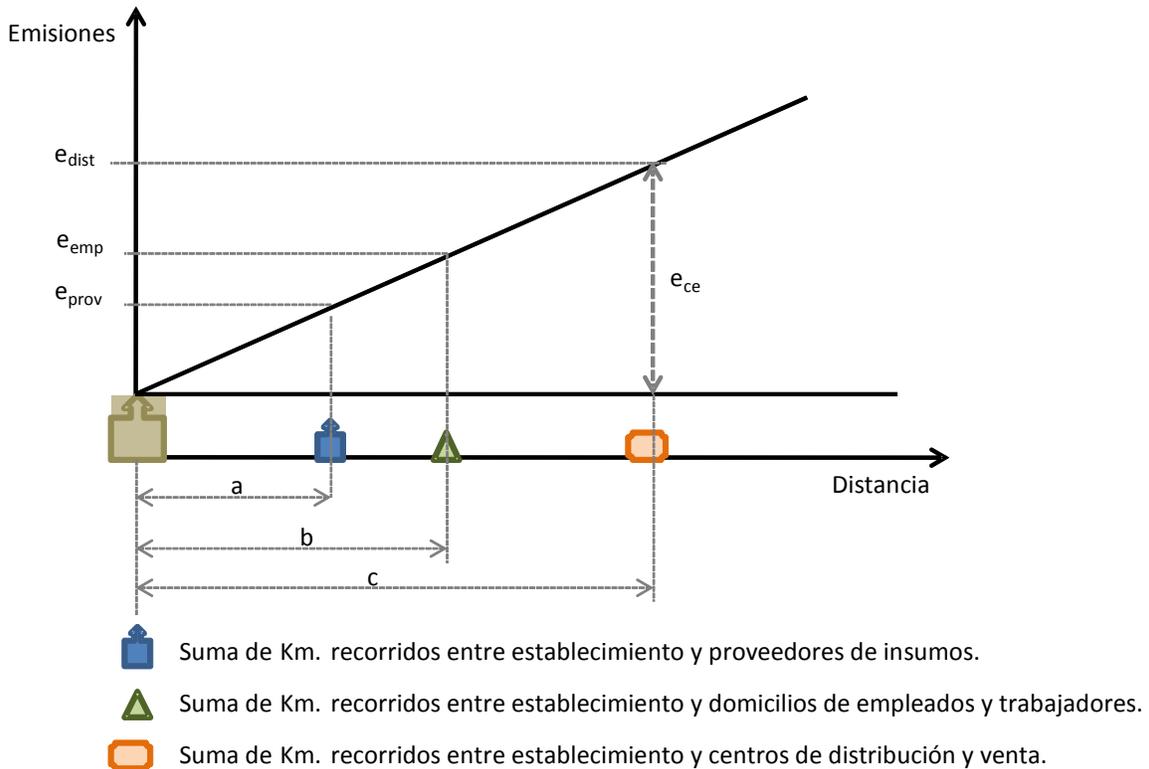
Estructura urbana y fuentes de emisión de contaminantes

Como se mencionó en la primera parte de este capítulo, la relación entre la estructura urbana y las fuentes de emisión de contaminantes puede ser directa o indirecta. Las gráficas siguientes (Gráficas 6.1.1 y 6.1.2) muestran de manera sencilla y esquemática la forma en la que se da este tipo de relaciones.

El ícono que se encuentra en el origen representa un establecimiento cuyos procesos internos generan la cantidad de emisiones representada por la altura del mismo; esas son las emisiones directas del establecimiento que salen por los puntos de emisión ubicados intramuros. Los tres íconos colocados sobre el eje horizontal representan las sumas de los kilómetros recorridos por los vehículos cuyos desplazamientos son estrictamente necesarios para la operación del establecimiento: aquellos realizados por los proveedores de los insumos, los recorridos por los empleados, trabajadores y clientes, y los necesarios para distribuir a los productos del establecimiento en centros logísticos y de venta. La gráfica muestra esquemáticamente cómo es que las emisiones generadas por los vehículos utilizados se van sumando a las emisiones generadas intramuros, de manera creciente y en función del total de kilómetros recorridos. El punto que se quiere resaltar es que el total de emisiones asociadas a la operación ordinaria del establecimiento se compone, en efecto, de dos tipos de fuentes: las fijas y las móviles.

² No se encontraron referencias internacionales comparables de índices de entropía urbana, por lo que los valores calculados servirán de autorreferencia para la ZMVM.

Gráfica 6.1.1. Componente espacial de las emisiones totales de una fuente fija

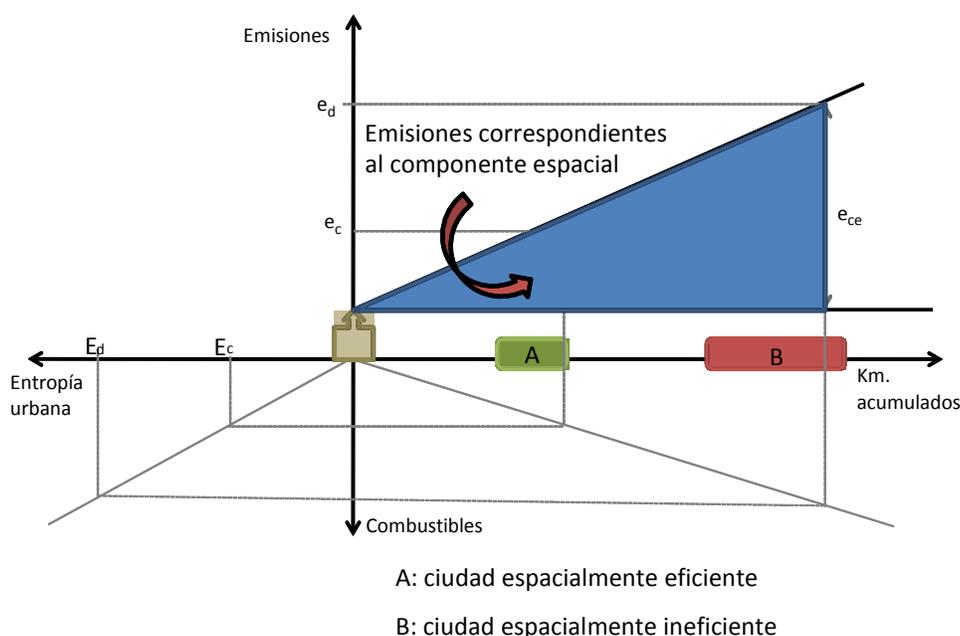


Si bien las emisiones generadas dentro de un establecimiento dependen de factores como la cantidad y calidad de los combustibles utilizados y las tecnologías tanto de los procesos como de control de emisiones, las provenientes de las fuentes móviles dependen de aspectos equivalentes y del total de kilómetros recorridos por los vehículos que contribuyen a la operación ordinaria del establecimiento. Esto último es lo que constituye el componente espacial de las emisiones del mismo, el cual corresponde al triángulo de color indicado en la Gráfica 6.1.2.

Nótese que el plano cartesiano ha sido ampliado para incluir un par de cuadrantes adicionales que sirven para medir volumen de combustibles y entropía urbana. En el eje de distancias se ha representado con un par de rectángulos la ubicación de dos ciudades hipotéticas con poblaciones y parque vehicular equivalentes. Su posición en el eje denota una diferencia estructural: la organización espacial de la ciudad A permite que la suma total de kilómetros recorridos necesarios para asegurar un cierto nivel de operación del establecimiento representado en el origen, es menor que la distancia total requerida por la ciudad B para los mismos parámetros de operación. Consecuentemente el nivel de emisiones del componente espacial de la ciudad mejor organizada es menor que el de la otra.

La proyección de las distancias recorridas hacia el radio del cuadrante inferior derecho permite medir el volumen de combustible utilizado en el eje vertical que apunta hacia abajo, lo cual permite a su vez hacer una proyección a través del segundo radio hacia el eje horizontal que apunta hacia la izquierda. La escala de este último eje mide el nivel de entropía urbana de ambas ciudades, en el sentido que ha sido explicado en párrafos anteriores.

Gráfica 6.1.2. Relación entre eficiencia espacial de actividades productivas, emisiones totales, consumo energético y entropía urbana



Una menor entropía urbana resulta, por ejemplo, de una mejor distribución espacial de las densidades de población y empleos, lo cual implica a su vez un menor consumo energético para franquear la fricción de las distancias que deben recorrerse de manera que se asegure el funcionamiento del ecosistema urbano. El punto que se quiere hacer notar es que una ciudad planeada para tener una estructura más eficiente, puede mantener un nivel dado de actividad, producción y empleo con menor consumo energético, lo cual se manifiesta través de menos emisiones y mayor calidad de vida. Este enfoque plantea además una ventana de oportunidades, de alto potencial, para la mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero.

Para probar la incidencia de la densidad de población sobre el número de kilómetros recorridos se estimó esta última variable contra el tamaño del parque vehicular y la densidad de población de 26 ciudades del mundo, incluida la ZMVM³. La estimación doble logarítmica resultó estadísticamente significativa para ambas variables (Tabla 6.1.2) habiéndose obtenido un valor de -0.3389 para la densidad y de 1.1785 para el tamaño del parque vehicular, valores que representan a las elasticidades correspondientes⁴.

La interpretación de las elasticidades permite conocer en qué porcentaje cambia, en promedio, el total de kilómetros recorridos en estas ciudades ante cambios dados en cada una de las dos variables explicativas. Por ejemplo, si se da un incremento del 10 por ciento en el número de automóviles, el kilometraje total recorrido aumenta en

³ Las ciudades, los datos y sus fuentes se presentan en el Anexo 2.

⁴ Se conoce como elasticidad a la magnitud adimensional del cambio generado en el valor de una función, como consecuencia del cambio observado en el valor de una de sus variables explicativas. Se trata de elasticidades de corto plazo porque éstas permanecen constantes para el período de análisis.

promedio un 11.7 por ciento; si se observa un incremento del 10 por ciento en la densidad poblacional, el número de kilómetros recorridos disminuye en promedio un 3.3 por ciento.

Tabla 6.1.2. Elasticidades de corto plazo del total de kilómetros recorridos con relación al tamaño del parque vehicular y la densidad de población. (Estimación hecha con datos de 26 ciudades de cuatro continentes)

Variable	Elasticidad estimada
Densidad de población en hab/km ²	-0.3389
Tamaño del parque vehicular (número de autos)	1.1785

Fuente: Elaborado con datos de 26 ciudades de varios países, 2010. Las ciudades y sus fuentes de información se presentan en el Anexo 2.

En la ZMVM el número de kilómetros recorridos es una cantidad muy grande y, como se comenta en varias secciones de este documento, los costos directos e indirectos de esos trayectos y los congestionamientos asociados son también de grandes proporciones.

Tanto la concepción ecosistémica como los ejemplos presentados ponen al descubierto la forma en la que los criterios de zonificación y asignación de los usos del suelo utilizados en la planeación del desarrollo urbano en México han contribuido a la construcción de una ZMVM caracterizada por una alta entropía urbana y que funciona con muy bajas eficiencias económicas, ambientales y sociales. La misma línea de análisis permite demostrar que este tipo de causas estructurales es un determinante del total de kilómetros recorridos, contribuye en la manutención de la baja productividad laboral y educativa, elimina las economías de aglomeración, atrofia las economías de red y de alcance en las redes de transporte, en las de suministro y drenaje de agua potable y en las de recolección, reciclaje y disposición de residuos, degradando con todo ello la competitividad metropolitana.

En las secciones siguientes se presentan los cálculos realizados para fundamentar la necesidad de cambiar los paradigmas de la planeación del desarrollo urbano, lo cual implica trascender la visión básicamente arquitectónica que la ha caracterizado para abordarla con una visión ecosistémica y funcional.

6.2 Dinámica estructural de la ZMVM

El análisis de la dinámica estructural de la ZMVM requiere de la identificación de patrones de atracción de los viajes que se realizan ordinariamente en la zona, los cuales obedecen a una variedad de motivos como los relacionados con el trabajo, el estudio, las visitas médicas, las compras o adquisición de bienes y servicios, la realización de trámites y las actividades sociales y de entretenimiento. La identificación de dichos patrones se llevó a cabo mediante la exploración de los datos de la Encuesta Origen-Destino 2007 (EOD_2007) realizada por el INEGI, para lo cual se utilizó la metodología LISA (Local Indicators of Spatial Association). Con esta metodología se pudieron identificar los siete principales centros atractores de viajes, los cuales se formaron por agrupación de AGEB. El criterio utilizado fue el de la identificación de aquellos AGEB-

destino de la ZMVM que tienen como característica una alta concentración de viajes y que son, al mismo tiempo, vecinos geográficos de otros AGEB con las mismas características.

Para el desarrollo de las bases de datos del PROAIRE se trabajó con los microdatos de la EOD_2007, lo cual permitió construir las matrices de origen-destino por AGEB tomando como marco georreferencial a la cartografía de las 16 delegaciones del Distrito Federal y de los 40 municipios conurbados del Estado de México que utilizó el INEGI⁵.

El uso de los microdatos permitió elaborar las matrices de viajes origen-destino entre los 5,256 AGEB con una clasificación que incluyó a 9 de los 10 propósitos que considera la encuesta original debido a que el propósito de regreso a casa no es un indicador de atracción de viajes. Los 9 motivos de viaje son: ir al trabajo, ir a estudiar, compras, llevar o recoger a alguien, social o diversión, relacionado con el trabajo, ir a comer, ir a hacer un trámite y otros.

Esta distribución simple de los viajes por destino muestra claramente que existe un patrón de concentración. Como se puede ver en el Mapa 6.2.1, el grupo de AGEB que tiene la característica de ser destino de viajes y tener un número de ellos por arriba del promedio, se concentra en ciertas regiones de la ZMVM. Las mayores concentraciones parecen localizarse en AGEB que conforman un corredor que va de Coyoacán hasta las delegaciones Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero; un grupo en Cuajimalpa y Huixquilucan; otro entre Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla y Atizapán de Zaragoza; y, finalmente otro grupo grande entre Cuautitlán Izcalli, Cuautitlán y Tultitlán. También se pueden observar otros casos donde no existe una clara concentración de AGEB y más bien se encuentran dispersos en las delegaciones o municipios de la ZMVM.

Estadística global de Moran y metodología LISA

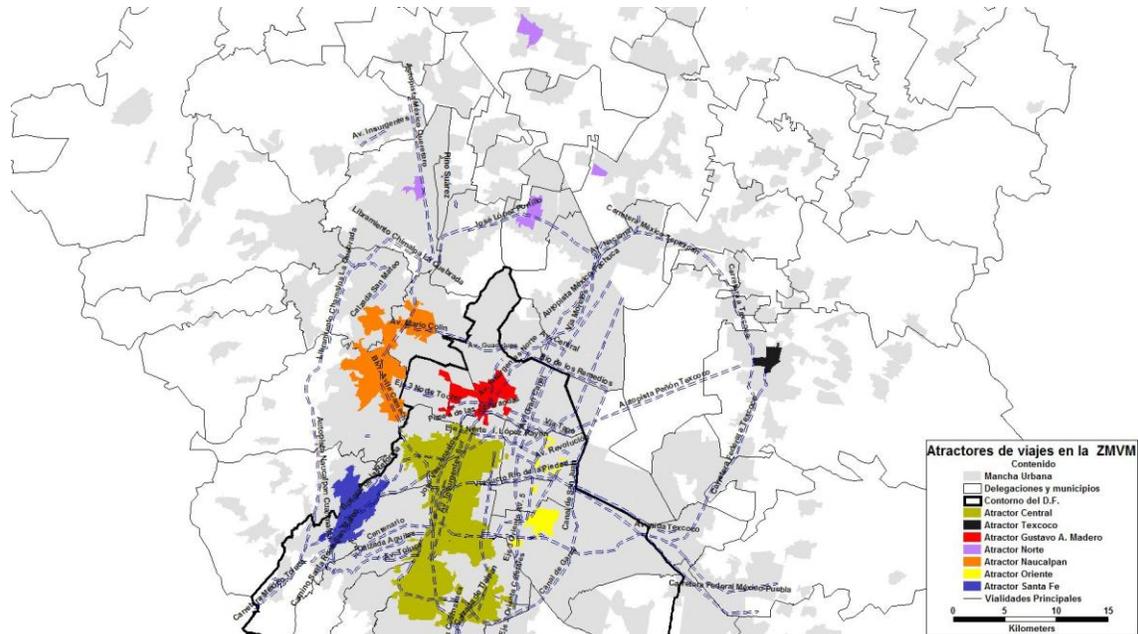
La metodología continuó con las etapas siguientes: 1) Se calculó el estadístico global de Moran para identificar si existe evidencia de autocorrelación espacial, es decir si los AGEB con valores similares de viajes por destino tienden a estar agrupados espacialmente; 2) Se utilizó la metodología LISA (Local Indicators of Spatial Association), con la cual se calcula el estadístico local de Moran y cada AGEB es comparado con todos sus vecinos, con el objetivo de identificar el tipo de asociación que tienen entre ellos.

En el caso en el que el AGEB está rodeado por otros con un número similar de viajes por destino, el estadístico local de Moran presenta valores positivos. En cambio, si el AGEB está rodeado por otros con características diferentes, entonces el estadístico presenta valores negativos; 3) Bajo el principio de incluir sólo las asociaciones estadísticamente significativas, se construyeron mapas que muestran cuatro tipos de asociaciones entre los AGEB: HH o alto-alto, que es el grupo de los AGEB que tienen la característica de atraer muchos viajes; LL o bajo-bajo, que es el grupo de los AGEB que tienen la característica de atraer pocos viajes; HL o alto-bajo, es el AGEB individual que atrae muchos viajes, pero está asociado con vecinos que generan pocos viajes; y por último,

⁵ El INEGI realizó la encuesta origen-destino de los viajes de los residentes de la Zona Metropolitana del Valle de México 2007 (EOD 2007) con la clasificación por distritos empleada en la EOD 94, con la idea de tener resultados que pudieran compararse. La EOD 2007 cubrió 16 delegaciones y 40 municipios conurbados del Estado de México, del total de 59 que se consideran en la ZMVM. El área de estudio se dividió en 156 distritos, 84 del D.F. y 72 del Estado de México, como resultado de la agrupación de 5,256 Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB).

los LH o bajo-alto, que son los AGEB que se caracterizan por atraer pocos viajes y tener vecinos que atraen muchos viajes. Se definieron a los atractores de viajes en la ZMVM, como aquellas regiones o aglomeraciones de AGEB que cumplen con ser HH a un nivel de significancia de 95% de acuerdo a la metodología LISA. Con ésta se identificaron 497 AGEB que conforman las siete regiones atractoras de viajes en autos más importantes de la ZMVM⁶ (Mapa 6.2.1).

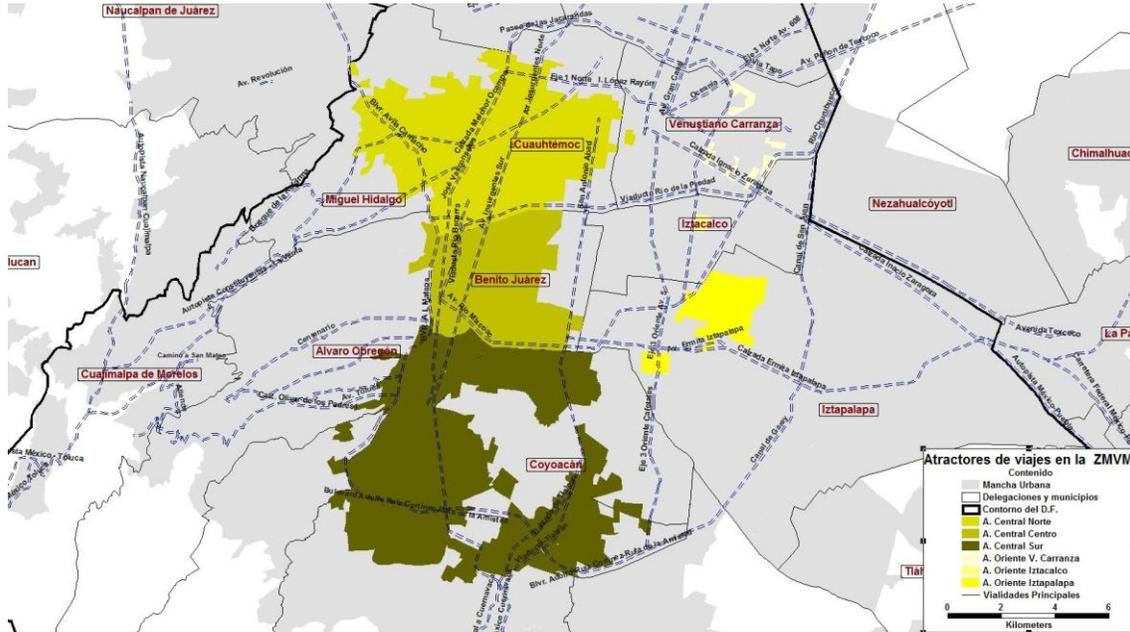
Mapa 6.2.1. Los siete atractores principales de la ZMVM y las vialidades principales



El sistema de atractores fue utilizado para dos propósitos principales, primero, como la plataforma basal del desarrollo del modelo de simulación de flujos vehiculares y emisión de contaminantes que se presenta más adelante, y segundo, para la construcción de las matrices de viajes que fueron utilizadas para la estimación de los modelos de econometría espacial que se presentan a continuación. El atractor central es mayor que los demás en tamaño y en importancia relativa, desde el punto de vista de la atracción metropolitana de viajes, por lo que fue necesario subdividirlo en tres secciones que permitieran explicar con mayor detalle tanto la dinámica de atracción de viajes externos como la relativa a los viajes internos. La subdivisión se muestra en el Mapa 6.2.2.

⁶ Estos AGEB representan el 9.5% del total de la ZMVM y atraen 1.6 millones de viajes que representan el 44.7% de todos los viajes por destino en la ZMVM.

Mapa 6.2.2. Las subdivisiones del Atractor Central (regiones norte, centro y sur), así como las subdivisiones del Atractor Oriente



Modelos de econometría espacial⁷

Siendo el tema de la zonificación y los usos del suelo en la ZMVM fundamental para el análisis ecosistémico desarrollado, fue necesario construir un índice y una variable, misma que fue utilizada en los modelos de econometría espacial, que pudieran medir tanto el nivel de la mezcla de usos del suelo como la diferencia de dicha mezcla entre los AGEB de la ZMVM. Para el cálculo del índice de mezcla de uso de suelo (MUS) se digitalizaron los usos del suelo de las 16 delegaciones del Distrito Federal y de 27 municipios conurbados del Estado de México⁸.

Cuando un AGEB concentra un solo uso de suelo el índice MUS tiende a cero y cuando la distribución entre los n usos de suelo es equitativa, el MUS tiende a 1. Los cuatro tipos de suelo utilizados son los definidos en los programas de desarrollo urbano (Tabla 6.2.1).

Los modelos de econometría espacial se estimaron mediante el método de panel con efectos fijos para cada uno de los motivos de viaje, usando como datos a los 3,959 AGEB origen y 847 AGEB destino que conforman los clústers atractores de la ZMVM. En cada uno de los casos la variable dependiente se expresó en términos de la probabilidad de realización de viajes por motivo, como función de un vector de variables explicativas que se categorizaron por tema: usos del suelo, economías de aglomeración, condiciones económicas y velocidad de desplazamiento entre orígenes y destinos.

⁷ Los modelos de econometría espacial se usan para encontrar y validar relaciones estadísticas que incluyen explícitamente variables de localización y de distancias entre orígenes y destinos.

⁸ La expresión matemática del índice se explica en el Anexo 3.

Tabla 6.2.1. Los cuatro tipos de suelo utilizados en el cálculo del índice de mezcla de usos del suelo

H	Habitacional	Zonas en las cuales predomina la habitación en forma individual o en conjunto de dos o más viviendas. Los usos complementarios son guarderías, jardín de niños, parques, canchas deportivas y casetas de vigilancia.
HC	Habitacional con comercio	Zonas en las cuales predominan las viviendas con comercio, consultorios, oficinas y talleres en planta baja.
HM	Habitacional mixto	Zonas en las cuales podrán existir inmuebles destinados a vivienda, comercio, oficinas, servicios e industria no contaminante.
HO	Habitacional con oficinas	Zonas en las cuales podrán existir inmuebles destinados a vivienda u oficinas. Se proponen principalmente a lo largo de ejes viales.

Elasticidades de la probabilidad de realizar viajes al trabajo y de regreso del trabajo, y con motivo diferente

La Tabla 6.2.2 se refiere a las elasticidades de corto plazo⁹ de la probabilidad de realizar viajes al trabajo y de regreso al trabajo para tres medios de transporte, a saber, automóvil particular, microbuses y autobuses. Las variables explicativas que han resultado estadísticamente significativas para al menos uno de los medios de transporte son las que aparecen en la primera columna de la tabla. Los valores numéricos de las elasticidades obtenidas se pueden leer en las columnas correspondientes a cada medio, seguidos por un comentario puntual que plantea una de las formas en las que se puede interpretar cada valor.

La primera variable explicativa mide el diferencial entre los índices de mezcla de usos de suelo (MUS) entre AGEB origen y destino, mismo que ha sido dividido entre la distancia aérea que separa los centroides de cada par de AGEB, al cuadrado. La lógica de la construcción de esta variable es, de facto, la misma que ha sido utilizada para las otras variables explicativas y consiste en la medición de la diferencia observada entre un par de variables relevantes para la función generadora de viajes, pero incorporando el principio de los modelos gravitacionales¹⁰.

En este primer caso el diferencial mide qué tanto se parecen o no las mezclas de usos permitidos del suelo en cada uno de los pares ordenados de AGEB, con el propósito de probar la hipótesis de que la plataforma vigente de usos del suelo es un factor generador de viajes largos. La lógica para interpretar el sentido de la variable explicativa es la siguiente: si la mezcla de usos permitidos del suelo del AGEB origen favorece la concentración de un solo uso, por ejemplo si como suele suceder en una proporción importante de los casos se favorece el uso habitacional, y la mezcla de usos del suelo del AGEB destino tiene una menor concentración del suelo mencionado,

⁹ Dado que las elasticidades son de hecho funciones diacrónicas, su estimación para el largo plazo queda como una línea abierta de investigación.

¹⁰ Estos modelos son análogos a los de la Física: la fuerza de atracción es directamente proporcional a la magnitud de la variable del numerador (las masas) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

entonces se espera que el flujo dominante de viajes al trabajo vaya del AGEB origen al AGEB destino. Si la comparación de las mezclas de usos permitidos del suelo indica lo contrario, se esperaría que el flujo dominante de viajes al trabajo opere en sentido inverso.

Si se incorpora el factor gravitacional, es decir si se incorpora explícitamente en el denominador la distancia entre ambos AGEB, el valor de la variable explicativa dependerá de la comparación entre las cantidades que aparecen en el numerador y el denominador. De esto se sigue que cuando lo que domina es el diferencial entre las estructuras de mezcla de usos del suelo (variable que está en el numerador) por encima del costo del trayecto representado por la distancia al cuadrado (que está en el denominador), entonces la probabilidad de realizar viajes al trabajo será mayor que si lo contrario sucediese. El análisis comparado de este tipo de elasticidades enriquece el diagnóstico estructural de la ZMVM.

Cuando la distancia entre un par de AGEB es muy grande el costo total del trayecto es muy alto. En los modelos gravitacionales esta cantidad va en el denominador elevada al cuadrado, lo que hace suponer que su influencia en la estimación estadística sea en muchos casos determinante para que el resultado tenga signo negativo. Esto último significaría que la probabilidad de hacer viajes al trabajo disminuye a medida que aumenta la distancia entre el AGEB origen y el AGEB destino. Pero este resultado se da sólo cuando la gente tiene oportunidad de elegir qué viajes hacer.

En la práctica, y muy particularmente en el caso de la ZMVM, la gente enfrenta una combinación de restricciones estructurales que restringen su elección a un conjunto muy limitado de opciones, mismo que acota y determina los efectos observados: por un lado, el predominio de AGEB con altas concentraciones de un uso de suelo hace que la distancia que separa al hogar del trabajo sea mayor que la deseable; por otro lado, el viaje al trabajo es considerado imprescindible, por lo que la gente no puede incluirlo en el paquete de viajes evitables o postergables. La combinación de estas restricciones hace que los resultados de las estimaciones que se comentan enseguida sean consistentes con la situación estructural de la ZMVM, y sustentan con datos reales los impactos económicos, ambientales y sociales de la estructura metropolitana.

Como se puede observar en la Tabla 6.2.2, en el caso del auto privado el valor obtenido de la elasticidad fue de 0.0358, en el caso del microbús fue de -0.0195 y para cuando los viajes se realizan en autobús, la elasticidad fue de -0.0325. Nótese en primer lugar que el signo algebraico es positivo para el auto y negativo para el transporte público, indicando con ello que el efecto de la variable gravitacional que compara las mezclas de usos del suelo opera en sentido contrario cuando se trata de auto privado o de transporte público.

Una primera lectura indica que cuando el signo es positivo se confirma la rigidez estructural, funcionalmente perversa, de la ZMVM. Es decir, la configuración actual de zonas y usos del suelo, caracterizada por la proliferación de usos monofuncionales de baja densidad poblacional, es un factor que genera más viajes y más largos a pesar del alto costo de los trayectos. Cuando el signo es positivo, los usuarios de automóviles realizan más viajes fuera de los AGEB de residencia a pesar del alto costo de los desplazamientos. Retomando el valor de esta elasticidad, se puede estimar que si se diera un cambio del 10% en promedio en la diferencia entre índices MUS de AGEB origen-destino, la probabilidad de incrementar el número de viajes al trabajo se incrementaría en 0.35.

Tabla 6.2.2. Elasticidades de corto plazo de la probabilidad de realizar viajes al trabajo y de regreso al trabajo

Variable	Viajes en automóvil	Viajes en microbuses	Viajes en autobús
	0.0358	- 0.0195	- 0.0325
Diferencia entre índices de mezcla de usos de suelo (MUS) en AGEB origen-destino	El signo positivo confirma la rigidez estructural de la ZMVM: la configuración actual de zonas y usos del suelo genera más viajes, más largos, a pesar del alto costo total.	El signo negativo refleja la dominancia del costo del transporte ocasionado a los estratos de menores ingresos por la estructura urbana. Aparece un efecto ingreso en viajes insustituibles.	Se confirma el efecto ingreso en los viajes al trabajo: a pesar de ser imprescindibles, los usuarios del transporte público no pueden pagar todos los que quisieran hacer.
	0.0024	- 0.0009	NRES
Diferencia entre densidad de hogares en suelo habitacional en AGEB origen-destino	El signo positivo es congruente con el efecto de expulsión de las zonas habitacionales y el estímulo al uso intensivo del auto, a pesar del costo total de los trayectos.	Una confirmación más del efecto ingreso en los viajes: las estructuras urbanas y de densidades de población impactan más a los estratos más pobres.	-
	- 0.0231	NRES	NRES
Diferencia entre densidades de empleo en suelo no hab. en AGEB origen-destino	El signo negativo es congruente con ubicación de empleos mejor pagados en edificios de oficinas (mayor densidad).	-	-
	NRES	- 0.0225	NRES
Diferencia del número de empleos entre AGEB origen-destino	-	El signo negativo es congruente con distribución de empleos menos remunerados en áreas de baja densidad (industria, almacenes, etc.).	-
	- 0.192	0.0296	NRES
Diferencia de salarios promedio entre AGEB origen-destino	El signo negativo indica que los estratos de mayores ingresos aprovechan el margen que tienen para escoger empleos mejor pagados y más cercanos a casa.	El signo positivo indica que la rigidez estructural de la ZMVM hace que las personas de ingresos bajos mantengan el trabajo aunque esté peor pagado que uno equivalente más cercano a casa.	-
	NRES	NRES	0.0248
Velocidad media del viaje entre AGEB origen-destino	-	-	La percepción de un viaje más rápido incide sólo en viajes largos, que son los realizados en autobús.

NRES: no resultó estadísticamente significativa.

Fuente: Elaborado para este PROAIRE con datos propios y del INEGI.
Ver ecuaciones en el Anexo 4.

Por el contrario, cuando el signo es negativo la lectura es que el costo del transporte domina la decisión de las personas de no hacer más viajes aún y cuando los viajes al trabajo sean considerados como imprescindibles, lo cual ocurre en los casos que se refieren a viajes en microbús y en autobús. La diferencia relevante entre las personas que usan automóvil y las que usan el transporte público en un país en vías de desarrollo como México, es el nivel de ingreso. Por ello es interesante notar que los resultados obtenidos confirman la existencia de un *efecto ingreso* agravado por razones estructurales, es decir, los efectos perversos de la estructura metropolitana castigan más a las personas de bajos ingresos que a las de altos ingresos.

Antes de continuar con la interpretación de los resultados que aparecen en la tabla, es conveniente anotar que éstos se obtuvieron mediante una estimación tipo panel con efectos fijos, a partir de datos propios obtenidos del análisis de respuestas asociadas a 3,959 AGEB origen y 647 AGEB destino de la EOD_2007 de la ZMVM, y que:

- Las variables de la ecuación estimada para viajes en automóvil están divididas por la distancia aérea, al cuadrado, entre centroides de AGEB origen y destino.
- Las variables de la ecuación estimada para viajes en colectivos están divididas por el tiempo de viaje, al cuadrado, entre AGEB origen y destino.
- La primera variable de la ecuación estimada para viajes en autobús está dividida por la distancia aérea, al cuadrado, entre centroides de AGEB origen y destino.

Continuando ahora con el segundo grupo de elasticidades, éste corresponde a la variable que mide el diferencial en las densidades de hogares ubicados en suelo habitacional entre AGEB origen y destino, la cual incluye asimismo el inverso de la distancia aérea que separa los centroides correspondientes, al cuadrado. La elasticidad estimada de corto plazo fue de 0.0024 para el caso de los viajes en auto y de -0.0009 para los viajes en microbús. El signo positivo para los viajes en auto es congruente con el efecto de expulsión de las zonas habitacionales y el estímulo estructural al uso intensivo del automóvil, en el entendido de que los propietarios de este tipo de vehículos pueden y deciden pagar el alto costo de los desplazamientos. Para los viajes en microbús la elasticidad tiene signo negativo, lo cual se puede interpretar como una confirmación más del efecto ingreso en los viajes al trabajo: la estructura urbana y la distribución de densidades de población se suman como factores de generación de viajes largos, lo cual golpea más a los estratos de menores ingresos porque el costo de los desplazamientos los obliga a prescindir de viajes que deberían de ser imprescindibles. No sobra decir que a pesar de que los propietarios de autos privados deciden pagar el costo total de los desplazamientos, éste acaba por plasmarse de alguna manera sobre el sistema de precios relativos de los bienes y servicios de la ZMVM, mermando su competitividad y reduciendo a través de costos y precios más altos la calidad de vida de sus habitantes.

En el caso de los viajes en autobús la no significancia desde el punto de vista estadístico implica que la diferencia en densidad de hogares no incide sobre la probabilidad de realización de viajes al trabajo. Una explicación plausible es que como la gente suele utilizar más el microbús para viajes cortos y el autobús para viajes largos, los factores que inciden sobre los viajes relacionados al trabajo entre AGEB lejanos no son lo suficientemente fuertes como para que se altere la probabilidad de realizar este tipo de desplazamientos.

Siguiendo el orden de las variables que aparecen en la tabla, continúan las que miden los diferenciales entre densidades de empleo, entre número de empleos y entre salarios promedio pagados en AGEB destino, todas multiplicadas por el inverso de la distancia aérea entre centroides de AGEB origen y destino, elevada al cuadrado; es el grupo de las variables que representan y comparan las condiciones económicas de los AGEB bajo el mismo enfoque gravitacional.

El valor estimado de la elasticidad asociada a la probabilidad de realizar viajes al trabajo respecto de la comparación entre densidades de empleo fue de -0.0231 , lo cual resulta congruente con los dos componentes de la variable. En primer lugar, porque el signo negativo indica que el número de viajes externos al trabajo disminuye cuando la densidad de empleos es mayor en el AGEB origen que en el destino; asimismo, el signo negativo también guarda congruencia con la lógica gravitacional que supone una reducción de viajes ante el incremento de los costos de transporte. En este caso el signo obtenido es igualmente consistente con el principio de las economías de aglomeración pues no hay elemento alguno de la estructura urbana que opere en contra del signo esperado.

En lo que se refiere a los diferenciales entre número de empleos entre AGEB origen y destino, la única elasticidad estadísticamente significativa fue la de los viajes en microbús, con un valor de -0.0225 . Llama la atención que de las elasticidades que miden comparaciones de empleo, la que mide las densidades fue significativa para los viajes en automóvil y la que mide número de empleos lo fue para los viajes realizados en microbús. Una interpretación plausible resalta las diferencias laborales y espaciales entre personas con diferentes niveles de responsabilidad e ingresos. Esto es, los obreros y trabajadores suelen laborar en talleres, establecimientos industriales, almacenes, bodegas y centros de distribución, los cuales se caracterizan por ocupar áreas mayores de baja densidad. Los empleados de entidades públicas y privadas, en general con mayores ingresos que los obreros del caso anterior, suelen trabajar en oficinas ubicadas en edificios que ocupan menos área en planta pero mayor intensidad de uso por metro cuadrado, es decir, más densas que los sitios mencionados anteriormente.

La siguiente variable mide la diferencia entre salarios pagados en AGEB destino y presenta, como en el caso de las variables de mezcla de usos del suelo y densidad de hogares, signos algebraicos encontrados cuando se trata de viajes en automóvil y de viajes en microbús. La elasticidad estimada en el caso del uso de autos fue de -0.192 y la correspondiente a los viajes en microbús fue de 0.0296 , lo cual indica que los estratos de ingresos más altos aprovechan el mayor margen de maniobra y las relaciones sociales y profesionales que tienen para ir escogiendo empleos mejor pagados y a menores distancias de su casa, mientras que los usuarios de transporte público, que son los de menores ingresos, se ven forzados a mantener el trabajo que ya tienen aunque éste esté peor pagado que uno equivalente que pudiera existir más cerca de casa.

Una explicación de este comportamiento aparentemente contraintuitivo es de nuevo la esgrimida algunos párrafos arriba, en el sentido de que las decisiones y los viajes realizados por las personas según las respuestas de la EOD_2007 confirman la baja eficiencia estructural y los efectos funcionalmente perversos de la ZMVM. Entre éstos se cuenta la necesidad de realizar largos y onerosos trayectos cotidianos al trabajo, los cuales en el caso de la gente de bajos ingresos se traducen como la aplicación de un sobrecosto forzoso de transporte. Desde la óptica de las políticas públicas esta situación se revela como una oportunidad para mejorar el poder adquisitivo de esos estratos, pues una reestructuración espacial de la ZMVM podría representar una reducción de la

participación de los costos de transporte en el ingreso familiar, lo cual es equivalente a un incremento neto del salario.

Tabla 6.2.3. Elasticidades de corto plazo de la probabilidad de realizar viajes con motivos distintos, en automóvil.
Estimación tipo panel con efectos fijos a partir de datos propios obtenidos del análisis de respuestas asociadas a 3,959 AGEB origen y 847 AGEB destino de la EOD_2007 de la ZMVM

Variable	Motivo declarado del viaje según EOD_2007					
	Estudio	Llevar a alguien	Compras	Trámite	Comer	Social
Diferencia entre MUS en AGEB OD	-0.0186	0.0304	NRES	NRES	0.0478	0.0271
Diferencia entre densidades de hogares en SH en AGEB OD	0.0027	NRES	0.0027	NRES	NRES	NRES
Diferencia entre densidades de servicios en SNH en AGEB OD/tiempo ²	NRES	NRES	NRES	0.0034	NRES	NRES
Diferencia entre número de empleos entre AGEB OD	NRES	-0.0397	NRES	NRES	-0.0479	-0.0287
Diferencia entre salarios promedio entre AGEB OD	NRES	NRES	NRES	NRES	NRES	-0.0314

NRES: no resultó estadísticamente significativa; SH: suelo habitacional; SNH: suelo no habitacional.

Fuente: Elaborado para este Proaire con datos propios y del INEGI.
 Ver ecuaciones en el Anexo 4.

Las interpretaciones de las elasticidades de la Tabla 6.2.3 son similares a las realizadas para la tabla anterior. Se observa por ejemplo como la estructura urbana reduce la probabilidad de viajes de estudio y aumenta la de realización de viajes para llevar a alguien, para comer, para ir de compras y para visitas sociales. Las lecturas de los otros resultados son similares.

Perspectivas de los modelos de econometría espacial

El análisis de econometría espacial desarrollado para este PROAIRE describe y mide, por primera vez, un conjunto de relaciones estructurales de la ZMVM y sus efectos en los procesos de generación de viajes, los cuales inciden a su vez y mediante una amplia variedad de caminos directos e indirectos, sobre el consumo energético, la entropía urbana, la emisión de contaminantes atmosféricos, la salud de la población y los ecosistemas, así como sobre la productividad de diversos actores y la competitividad de la zona metropolitana.

No obstante, abordar a la ZMVM como un ecosistema abierto ofrece márgenes y posibilidades de mejora en una multitud de frentes. En términos económicos, la aplicación de soluciones con visión ecosistémica permitiría aprovechar el potencial que ofrecen las economías de aglomeración, de escala, de redes y de alcance en una zona rica en oportunidades de aprovechamiento, además de avanzar en la reducción de los altos costos sociales de oportunidad derivados del desperdicio sistemático de recursos públicos anclados a la desorganización espacio-temporal de la ZMVM. Otra ventaja interesante de atacar este último aspecto sería el de la mitigación de la pérdida del poder adquisitivo de la población asociada al costo forzoso de transporte, así como la reducción de los costos totales de producción y de distribución de personas y mercancías, del consumo excesivo de combustibles, de oportunidad por transacciones comerciales no realizadas, y aquellos relacionados con la pérdida de productividad de las empresas y de competitividad de la ZMVM.

En lo que se refiere al aspecto social, un ecosistema metropolitano funcionando de manera más eficiente se reflejaría en una mejoría de la salud de la población y en la posibilidad de destinar más tiempo a actividades familiares, culturales, deportivas y sociales. Por otro lado, la flora y la fauna de la región también se verían beneficiadas.

La aplicación de un paquete de medidas como el que se propone en el Capítulo 8 de este documento permitiría avanzar no solamente en el control de los procesos de generación de contaminantes atmosféricos, sino también en la reducción del consumo excesivo de energía y en la disminución de la huella ecológica de la zona metropolitana.

En el frente ambiental, principal objetivo de este programa, el potencial para obtener cobeneficios a partir de un manejo ecosistémico de la ZMVM es alentador. De entrada es una manera de abordar una de las mayores preocupaciones de la comunidad científica internacional y de los gobiernos nacionales y locales, a saber, la constatación de la tendencia generalizada de migración continua desde las zonas rurales a las ciudades. Este fenómeno es un argumento que se esgrime sistemáticamente en los foros internacionales sobre cambio climático para alertar sobre las implicaciones que éste tiene en materia energética, de emisiones de gases y de compuestos de efecto invernadero, y como consecuencia de todo lo anterior sobre el calentamiento global.

Sin embargo, las estrategias y acciones de acción climática planteadas hasta ahora por las ciudades líderes se suelen limitar a los temas de energía (ahorro y uso eficiente de energía; aprovechamiento de energías renovables), transporte (promoción de transporte público y no motorizado), agua, residuos, medidas de adaptación, educación y comunicación ambiental.

Un faltante de la mayor importancia en la lista anterior es el paquete de medidas y acciones orientadas a la disminución de la entropía urbana, las cuales incluyen propuestas para la reestructuración espacial y funcional de la ZMVM, trabajar sobre la

ciudad construida y propiciar cambios culturales que vayan alineando a la sociedad hacia una cultura permanente de sustentabilidad urbana.

6.3 Modelo ecosistémico de simulación de emisiones

Como parte del análisis ecosistémico del fenómeno de la contaminación atmosférica en la ZMVM, se ha desarrollado una herramienta de simulación de escenarios que permite comprender mejor la relación existente entre algunos de los factores, variables y procesos que actúan simultáneamente sobre las funciones de generación de viajes. La herramienta es un modelo macroscópico de simulación de emisiones de fuentes móviles, con el que se pueden estimar las emisiones vehiculares de la ZMVM en función de las velocidades promedio y, por lo tanto, del tiempo de operación de los motores¹¹. El núcleo del modelo es la función de generación de viajes que aparece al centro del mapa ecosistémico.

El escenario basal se construyó a partir de los datos de la Encuesta Origen Destino 2007 (EOD_2007) elaborada por el INEGI¹² e incluye viajes para cada uno de los motivos utilizados en la encuesta y realizados en automóvil, microbús y autobuses.

El parque de automóviles y por lo tanto los factores de emisión se dividieron en dos categorías tecnológicas con base en el inventario de emisiones 2008 de la ZMVM, considerando que el 19% de los automóviles corresponde a modelos 1993 y anteriores y el 81% restante son vehículos modelo 1994 y posteriores. Las emisiones que se pueden estimar con la versión actual del modelo son COV, CO y NO_x, para lo cual se utilizan factores de emisión en función de la velocidad de circulación. Éstos fueron obtenidos a partir de ajustes estadísticos aplicados a una batería de resultados generados por el modelo Mobil 6.2, parametrizado con datos de la ZMVM.

La EOD_2007 cubrió las 16 delegaciones del Distrito Federal y 40 municipios conurbados del Estado de México. El área de estudio se dividió en 156 distritos, correspondiendo al Distrito Federal 84 de ellos y 72 al Estado de México, los cuales resultaron de la agrupación de 5,256 AGEB. Los distritos se corresponden con los utilizados en la EOD_1994.

Las principales razones que motivaron el desarrollo del análisis ecosistémico de la ZMVM desde la perspectiva de la emisión de contaminantes atmosféricos se resumen de la siguiente manera: primero, en la necesidad de identificar y especificar las principales relaciones funcionales existentes entre algunas de las variables y procesos que conforman el ecosistema metropolitano; y segundo, conocer más sobre la forma en la que los actores que cohabitan e interactúan en la ZMVM, perciben la realidad de su entorno y toman las decisiones que directa o indirectamente emiten contaminantes atmosféricos.

¹¹ El modelo desarrollado simula los principales patrones de flujos vehiculares en la ZMVM de manera agregada, haciendo uso del tipo de principios utilizados en la mecánica estadística. No es un modelo de simulación microscópica de tránsito.

¹² La EOD_2007 no indica en qué día de la semana se realizan los viajes, no incluye información de los viajes realizados en sábado y domingo, no contiene datos sobre el transporte de carga y tampoco contiene la información específica del número de vehículos del transporte público; en 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.

En ese contexto, se desarrolló un modelo de simulación que reconoce que las personas realizan viajes cotidianos respondiendo a varios motivos, que dichos motivos (y por lo tanto el número de viajes) pueden verse afectados por la materialización de elasticidades espaciales y socioeconómicas, que los viajes se realizan a lo largo de las 24 horas del día y que éstos se pueden realizar en automóvil, en microbús o en autobuses del transporte público. El modelo también reconoce que los vehículos considerados pueden transportar distinto número de pasajeros y que están categorizados en distintos estratos tecnológicos.

Los flujos vehiculares definidos con base en el sistema de atractores circulan a lo largo de un conjunto de troncales y ramales, por los que se mueven a velocidades variables que dependen de la densidad de las vialidades. Ésta depende a su vez del ancho de cada carril, del número de carriles, del tipo de vía, de la presencia de obstáculos a la circulación y del número de vehículos de diferentes tipos, que ingresan y salen de ésta por unidad de tiempo. La densidad más alta obliga al establecimiento de una velocidad mínima paramétrica promedio que puede ser de 5 Km/hora, mientras que la velocidad más alta dependerá de las condiciones de circulación presentes en un momento dado.

La modelación se desarrolló con un software especializado en el que se simulan escenarios regidos por ecuaciones diferenciales, con y sin retraso, con la presencia de variables de control. Esto permite simular la emisión observada de contaminantes en las condiciones actuales y la emisión que podría observarse con la aplicación de diversas combinaciones de políticas, medidas y acciones específicas¹³.

Para la construcción de los escenarios de simulación de emisiones se utilizan los insumos siguientes: primero, los modelos de econometría espacial que relacionan a las variables económicas y de uso de suelo con la generación de viajes por motivo, distribución modal y velocidades promedio, y segundo, un modelo económico-espacial que pronostica la demanda anual de empleos en la ZMVM para el período 2011-2020.

6.4 Modelo económico-espacial de la demanda de empleos en la ZMVM

Demanda espacial de empleos en la ZMVM

El modelo desarrollado para estimar la generación de viajes a lo largo del período 2011-2020 reconoce que la relación entre una tasa dada de crecimiento de la economía de la ZMVM y las emisiones contaminantes generadas por el parque vehicular, debe considerar la distribución espacial de los hogares y de las unidades económicas, así como sus respectivos volúmenes de producción. Este enfoque permite incluir los efectos de las restricciones vigentes en materia de uso e intensidad de usos del suelo, las cuales codeterminan el número de unidades económicas por AGEB. Este último incide a su vez en la generación de empleos, en los patrones de viajes al trabajo y de regreso a casa, en las intensidades espacio-temporales de uso del sistema vial, en los niveles de

¹³ El modelo fue desarrollado como parte del análisis ecosistémico de la ZMVM, para simular escenarios alternativos de generación de emisiones. Desde esa perspectiva los alcances fueron útiles para la comprensión del fenómeno objeto de estudio y para sustentar el enfoque ecosistémico propuesto. Sin embargo, el modelo está en una primera fase y su potencial alienta el desarrollo futuro de este tipo de herramientas para mejorar el diseño y gestión de las políticas de calidad del aire. En los Anexos 5 y 6 se describen la metodología y las ecuaciones básicas del modelo y se presentan los datos obtenidos para viajes en auto.

congestionamiento, en las velocidades promedio de circulación, en el consumo de combustibles y consecuentemente en la emisión de contaminantes atmosféricos.

Este planteamiento ecosistémico permite elaborar pronósticos más cercanos de la realidad que los obtenidos convencionalmente, en los que la generación de emisiones se suele estimar como una función lineal del crecimiento esperado de la actividad económica.

En este caso la generación de empleos en la ZMVM ha sido modelada a partir de una función espacial de demanda laboral, la cual es determinada a nivel AGEB por las variables siguientes: la población ocupada de trabajadores, la población ocupada de empleados, los salarios y sueldos de ambos, el monto de la producción bruta, el número de unidades económicas, la localización relativa de los hogares y de las empresas, así como los costos de transacción, que en este caso se refieren principalmente a los asociados a las distancias hogar-trabajo y a los tiempos de traslado. Dichos costos de transacción se incorporan al modelo por medio de una matriz de ponderaciones o rezagos espaciales, lo cual convierte al modelo en uno de tipo espacial dinámico.

Los resultados de la estimación (Tabla 6.4.1) muestran que la demanda de trabajadores por AGEB en la ZMVM depende negativamente de los sueldos que se pagan en el AGEB y positivamente de las otras dos variables utilizadas, a saber, el número de empresas localizadas en el mismo y la producción bruta correspondiente. Por el contrario, la demanda de empleados en la ZMVM depende positivamente de las tres variables: los salarios que se pagan en el AGEB, el número de empresas allí localizadas y la producción bruta del mismo.

Tabla 6.4.1. Elasticidades de largo plazo de las demandas de empleo de trabajadores y empleados en la ZMVM (Estimación realizada con datos de 4,979 AGEB de la ZMVM)

Modelo	Rezago espacial (WD) del empleo	Distribución de sueldos y salarios	Distribución de la producción	Distribución de unidades económicas
Modelo para trabajadores	0.55195	-0.85026	0.00039	0.38093
Modelo para empleados	0.58341	1.02266	0.00011	0.06865

Nota: WD es la matriz normalizada del inverso de la distancia euclídiana entre AGEB

Trabajadores: Son las personas ocupadas directamente en las actividades productivas de la unidad económica, así como el personal que participa en tareas auxiliares o de apoyo.

Empleados: Son las personas que laboraron para la unidad económica recibiendo un pago de manera regular por desempeñar trabajos de oficina, administración, contabilidad, actividades auxiliares y complementarias, así como labores ejecutivas, de planeación, organización, dirección y control.

Fuente: Estimación realizada para este PROAIRE con información propia y del INEGI. Censos económicos 2003.

Los resultados establecen que en el caso de la demanda de trabajadores el número de trabajadores contratado por las empresas en un AGEB, disminuye si los salarios solicitados por los trabajadores aumentan. También se obtuvo que la demanda de empleados depende positivamente de los sueldos, es decir, que el número de empleados contratado por las empresas aumenta a pesar de que los sueldos

aumenten. El resultado es aparentemente contraintuitivo, pero se explica con los argumentos siguientes.

En el caso de los trabajadores se deduce que al tratarse de mano de obra no especializada, de bajo costo y fácilmente sustituible, las empresas pueden ofrecer y mantener el salario de contratación; si los trabajadores solicitan mayores salarios, el número de contrataciones disminuye. Pero el caso de los empleados se entiende únicamente si se consideran los efectos de la distribución espacial de las densidades de población y empleos. Como se dijo en la Sección 6.2, la configuración actual de zonas y usos del suelo, caracterizada por una mayoría de usos monofuncionales de baja densidad poblacional, hace que haya más viajes al trabajo entre AGEB más distantes a pesar del alto costo de los trayectos. Esto implica que las empresas podrán contratar a los empleados que necesitan sólo si pueden ofrecer salarios más altos que compensen los costos de transporte, lo cual explica el resultado obtenido.

En ambos casos las demandas de trabajadores y de empleados tienen efectos positivos de externalidades y de aglomeración.

Pronóstico de crecimiento de la economía

En las últimas décadas la dinámica de la economía mexicana se ha caracterizado por una serie de ciclos económicos cada uno de los cuales ha tenido una duración promedio de cinco o seis años. Como se puede observar en la Gráfica 6.4.1, teniendo como referencia la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte el ciclo de la economía mexicana se ha ido sincronizando con el de la economía de los Estados Unidos, si bien la diferencia entre las amplitudes de las crestas y los valles sigue siendo muy grande debido a razones estructurales y a las marcadas diferencias en el manejo económico de ambos países. La economía de nuestro país tiene ciclos económicos mucho más cortos que los de la economía estadounidense y la magnitud de las crisis (que para México han ocurrido en los años 1982, 1986, 1994, 2001 y 2009) ha sido sistemáticamente mayor aquí que allá.

El análisis de estos ciclos ha sido tomado como base para construir un escenario anclado en variables estructurales que represente el comportamiento plausible de la economía mexicana para el período 2011-2020, el cual presenta una alta probabilidad de contar con un ciclo completo y con el inicio de otro, posiblemente en el año 2018. El ciclo económico en el que estamos inmersos tiene como preámbulo la severa crisis de 2009, en la que se ha alcanzado la tasa de decremento de la economía más alta de la historia moderna del país y que llegó a ser de -6.6 por ciento. En el año 2010 se inicia la etapa de recuperación, la cual podría prolongarse con altibajos a lo largo del período 2011-2016, para terminar con un ajuste económico en el año de 2017. Si bien existe una alta probabilidad de que el ajuste venga en 2017 como consecuencia de la sincronización observada con la economía de los Estados Unidos y de las características estructurales de la economía mexicana, dicho ajuste no necesariamente se ve como una crisis anunciada. El escenario anterior implica que el inicio de un nuevo ciclo económico empezaría a partir del 2018.

La estilización del ciclo económico descrito en el párrafo anterior fue la base para estimar el desempeño económico esperado de la ZMVM para el período 2011-2020, mismo que fue incorporado como insumo en el modelo de demanda laboral de manera que se pudieran tomar los incrementos anuales del número de empleos tanto de los empleados, que son los que utilizan principalmente el automóvil, como de los trabajadores, que son los que utilizan el transporte público, para relacionarlos con los

viajes totales esperados a lo largo del periodo de referencia. Como se explicó anteriormente, los cambios esperados en el número de viajes se utilizan en el modelo para simular los escenarios esperados de emisión de contaminantes.

Gráfica 6.4.1. Crecimiento económico de México y Estados Unidos



Fuente: Elaborada con información del INEGI y fuentes internacionales.

Las características generales de la dinámica económica esperada de la ZMVM se resumen en una tasa de crecimiento del 5.0 % en 2010, una tasa del 4.0 % para el 2011 y un crecimiento promedio de 3.8 % para todo el periodo que va de 2010 a 2020. Las tasas estimadas para cada uno de los años del período aparecen en las Tablas 6.4.2 y 6.4.3. Es importante aclarar que si bien el modelo de demanda laboral toma en cuenta la distribución espacial vigente de las unidades económicas de la ZMVM, lo cual es un factor fundamental del sistema de generación y atracción de viajes, el crecimiento económico esperado en cada uno de los AGEB de la ZMVM ha sido calculado mediante la aplicación homogénea de las mismas tasas anuales promedio mencionadas. El uso de tasas diferenciadas por AGEB o por sectores o giros de actividad económica, para diferenciar los potenciales de generación de empleos entre AGEB, y por lo tanto las diferencias en los patrones de atracción y generación de viajes, sería una extensión natural del modelo en simulaciones posteriores.

Pronóstico del comportamiento de la demanda laboral en la ZMVM

Con los supuestos mencionados en la sección anterior, se resolvió el modelo de simulación y pronóstico de la demanda laboral. Un primer dato a tomar en cuenta es que el número total estimado de empleos generados en la ZMVM en el año 2010 es de 65,643 y para el período que va desde el mismo 2010 hasta el 2020 el número promedio estimado de nuevos empleos rondará los 60,400 puestos anuales de trabajo. Un

segundo dato a tomar en cuenta es que (bajo el supuesto de que el valor de la producción crece a la misma tasa en todos los AGEB y no se realizan cambios estructurales en la organización económico-espacial de la ZMVM) los incrementos en la demanda de empleo se concentrarán en los AGEB que se encuentran fuera de los clústers atractores de viajes definidos en secciones anteriores. Esto es, de los 60,400 nuevos empleos anuales promedio que se esperan para el periodo de 2010-2020, alrededor de 4,000 se localizarán en los clústers atractores y el resto en las cuencas de los mismos (Tablas 6.4.2 y 6.4.3).

Tabla 6.4.2. Escenarios de crecimiento económico y empleos adicionales en clústers y cuencas de la ZMVM

Año	Crecimiento económico nacional (tasas porcentuales)	Empleos adicionales en toda la ZMVM	Empleos adicionales en clústers de la ZMVM	Empleos adicionales en cuencas de la ZMVM
2010	5.0	65,643	4,379	61,264
2011	4.0	54,451	3,622	50,819
2012	3.6	52,016	3,470	48,546
2013	4.5	66,823	4,458	62,366
2014	2.3	36,002	2,402	33,600
2015	3.5	56,049	3,739	52,310
2016	4.7	77,260	5,154	72,107
2017	1.5	25,817	1,722	24,094
2018	3.4	59,395	3,962	55,433
2019	4.1	74,059	4,940	69,119
2020	5.2	97,779	6,522	91,257

Tabla 6.4.3. Escenarios de crecimiento económico y empleos adicionales de empleados y trabajadores en la ZMVM

Año	Crecimiento económico nacional (tasas porcentuales)	Empleos adicionales en toda la ZMVM	Empleos adicionales (empleados)	Empleos adicionales (trabajadores)
2010	5.0	65,643	14,681	50,962
2011	4.0	54,451	12,178	42,273
2012	3.6	52,016	11,633	40,383
2013	4.5	66,823	14,945	51,878
2014	2.3	36,002	8,052	27,950
2015	3.5	56,049	12,535	43,514
2016	4.7	77,260	17,279	59,981
2017	1.5	25,817	5,774	20,043
2018	3.4	59,395	13,284	46,111
2019	4.1	74,059	16,563	57,496
2020	5.2	97,779	21,868	75,911

Si bien en principio los resultados del modelo pudieran parecer contraintuitivos, una posible explicación de este fenómeno surge del análisis de la dinámica estructural presentada anteriormente y que se refiere a los impedimentos formales e informales de la planeación urbana vigente para aprovechar las economías de aglomeración, de redes y de alcance del binomio infraestructura urbana-unidades económicas. Esto es, si las restricciones existentes en materia de uso e intensidad de usos del suelo se

mantienen, a pesar de los cambios de fondo recomendados, éstas harían que las nuevas unidades económicas y por lo tanto los nuevos empleos se sigan distribuyendo extensivamente de manera dispersa y con bajas densidades en la ZMVM, lo cual apuntaría en la dirección exactamente contraria a lo que se requiere para reducir la entropía urbana y apuntalar un ecosistema urbano que sea ambiental, económica y socialmente más eficiente.

Cuando los datos obtenidos por el modelo de estimación de la demanda laboral se arreglan de manera que los empleos de aquellas personas que usan principalmente el automóvil queden separados de los destinados a los trabajadores, que son los que se mueven en microbuses y autobuses, el promedio esperado de 60,400 nuevos empleos anuales se reparte entre 13,400 para empleados y 47,000 para trabajadores. Esto significa que 13,400 empleos generarán viajes en auto para ir al trabajo y 47,000 harán lo propio en transporte público. Si bien en números absolutos estas cifras pueden no parecer exorbitantes si se les compara con los números ya existentes de empleos y viajes asociados, el dimensionamiento de sus impactos debe hacerse en el marco de la relación que hay entre dos sistemas: por un lado, el que conjuga a la infraestructura urbana y de transporte, y por el otro el de generación de viajes de la ZMVM.

Actualmente el número de viajes rebasa la capacidad del sistema de infraestructura y transporte si se le juzga desde el punto de vista de los congestionamientos y los costos económicos, ambientales y sociales asociados, los cuales se materializan en los tiempos destinados al transporte cotidiano, la pérdida de productividad y competitividad, y los efectos sobre la salud.

En este contexto, el punto que se quiere resaltar es el hecho de que las tasas de crecimiento de la capacidad en el primer sistema, y de generación de viajes en el segundo, se mueven a velocidades diferentes; la segunda es de hecho mucho más alta que la primera. Visto en perspectiva y asumiendo que las condiciones estructurales no cambien sustancialmente, el crecimiento en el número de empleos nuevos ampliará todavía más la distancia entre la capacidad del sistema urbano y de transporte, por un lado, y el de generación de viajes por el otro. Esto se dará básicamente por dos vías: primero, porque la inercia observada hará que el déficit en capacidad se siga arrastrando; y segundo, porque el sistema de generación de viajes se alimenta de varios factores. Uno es que la creación de nuevos empleos tiene efectos multiplicadores sobre el número de viajes, porque un empleo más en la familia representa un ingreso adicional del que se toma una parte para transportar a uno o más miembros de la familia, a una o más actividades diferentes; otro factor es el crecimiento natural de la población de la ZMVM y sus propios efectos multiplicadores de viajes. Las relaciones de este modelo con el fenómeno de la inmigración queda como una línea abierta de investigación, pues requiere ampliar el modelo a uno que incluya la economía nacional.

6.5 Simulación de las emisiones generadas en el período 2010-2020

Los resultados obtenidos con los modelos descritos hasta ahora fueron incorporados al modelo de simulación para proyectar la generación de emisiones en el periodo 2010-2020. Como se explicó anteriormente, esta herramienta es un modelo macroscópico de simulación de emisiones de fuentes móviles con el que se pueden estimar las emisiones vehiculares de la ZMVM en función de las velocidades promedio y, por lo tanto, del tiempo de operación de los motores. En el contexto de la construcción del escenario 2010-2020 esto significa que la cantidad de emisiones vehiculares, manteniendo

constantes variables como la mezcla vigente de tecnologías automotrices y la calidad presente de las gasolinas, dependerá en última instancia no tanto de los kilómetros recorridos sino del tiempo de operación de los motores.

Es importante volver a insistir sobre las bondades y las limitaciones del modelo desarrollado, con el propósito de ubicar correctamente su utilidad como herramienta de planeación y diseño de políticas públicas y evitar que se sobredimensionen las expectativas asociadas. La inmensa dimensión y complejidad de la ZMVM hace imposible, por el momento, contar con un modelo microscópico de generación de emisiones. Esto es, un modelo que contenga a detalle la traza vial, los sistemas de semaforización y señalización, las obstrucciones formales e informales a la circulación, etc. y que simule además la circulación de la totalidad del parque vehicular. Ante esta imposibilidad, se optó por desarrollar el modelo macroscópico mencionado que simula las emisiones vehiculares de tres contaminantes criterio (CO, COV y NO_x) con base en el esquema de clústers atractores de viajes en automóvil desarrollado a partir de los resultados de la Encuesta Origen Destino 2007. Este modelo simula los principales patrones de viajes por motivos¹⁴ a lo largo de una traza vial virtual que conecta a los clústers atractores con sus cuencas respectivas. El modelo simula una parte suficientemente representativa de los viajes en automóvil y sus emisiones correspondientes, lo cual se aprovechó para escalar los resultados que se presentan a nivel de toda la ZMVM.

Entre las bondades de esta herramienta están el poder simular escenarios de viajes y emisiones con base en cambios predeterminados de variables que inciden sobre la generación de viajes por diferentes motivos. Por ejemplo, se puede simular la generación de emisiones resultante de un cambio en los índices de mezcla de usos del suelo, en donde la lógica indica que si una nueva distribución de los usos permitidos del suelo reduce las necesidades de desplazamiento y acorta los viajes imprescindibles, la nueva distribución espacio-temporal de las densidades vehiculares provocará mayores velocidades promedio y menores emisiones acumuladas. Entre las limitaciones del modelo se cuentan las relativas al nivel de agregación que lo define como macroscópico y al hecho de representar una parte significativa, más no la totalidad, de los viajes registrados en la EOD_2007 para la ZMVM.

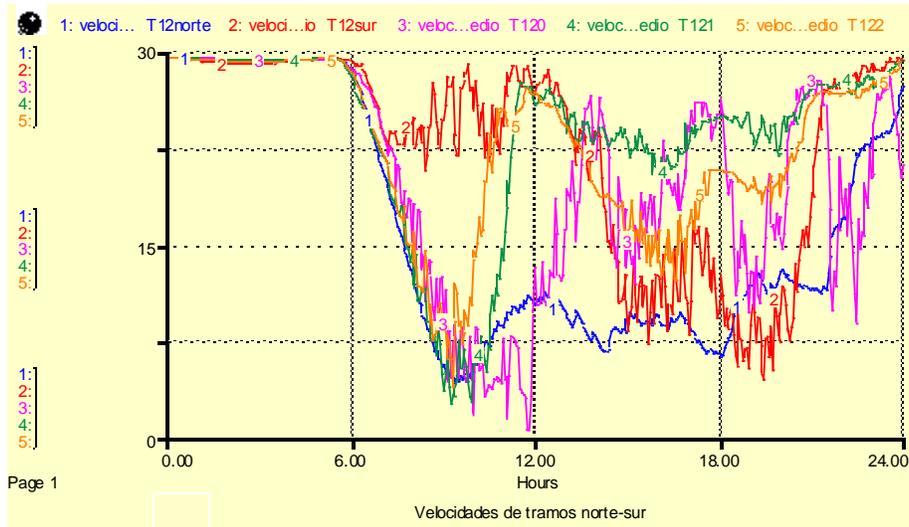
El modelo fue calibrado para que simule adecuadamente las emisiones reportadas en el Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM 2008, en particular las relativas a los autos privados. Los valores reportados en dicho inventario, en toneladas anuales, son: 638,104 de CO; 90,653 de COV y 60,662 de NO_x. Las gráficas siguientes corresponden al escenario base del modelo, mismo que está calibrado para que los viajes de automóviles registrados en la EOD_2007 generen las mismas cantidades de emisiones que las reportadas en el inventario. En la Gráfica 6.5.1 se pueden observar las velocidades promedio de cinco troncales, esto es rutas por las que circulan los autos que van y vienen entre los clústers atractores y sus cuencas respectivas, a lo largo de 24 horas. En este caso se trata de promedios anuales de velocidad para cada hora del día, en vialidades usadas en dirección norte-sur.

La Gráfica 6.5.1 indica claramente cómo a partir de las 6 de la mañana las velocidades promedio empiezan a caer. Las diferencias entre troncales se deben a las variaciones en la densidad vehicular, que proviene del número de autos en cada troncal, lo que

¹⁴ Los motivos de viajes tomados en cuenta con base en la EOD_2007 son: trabajo y relacionados con el trabajo, estudio, sociales, compras, llevar a alguien, trámites, comer, regreso a casa y otros.

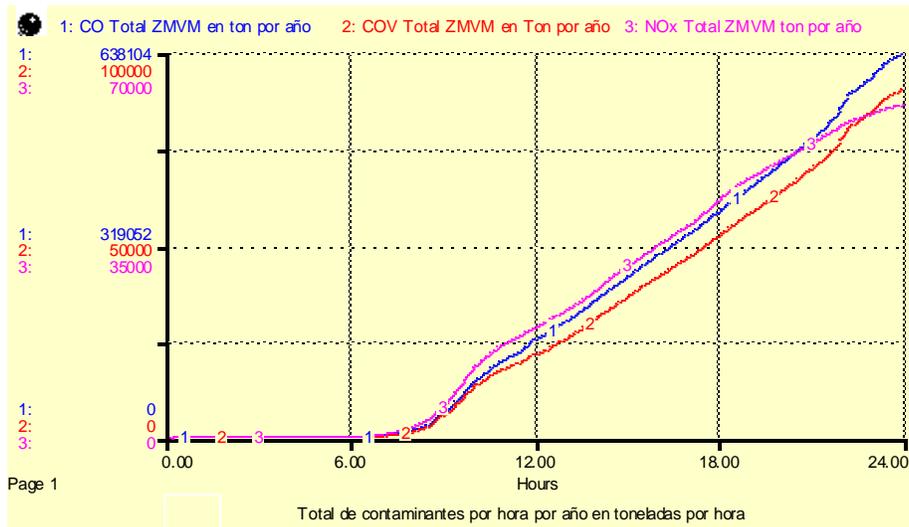
determina la velocidad promedio. Si como parte de las políticas públicas de los próximos años se aplicara una medida que lograra que un número significativo de personas distribuyera la hora de salida de su casa en una franja más amplia en la mañana, se observaría que las densidades vehiculares no crecerían tanto a esas horas y las velocidades promedio en estos troncales no presentarían una caída tan pronunciada a partir de las 6 de la mañana.

Gráfica 6.5.1. Velocidades promedio de circulación en cinco troncales, dirección norte-sur. Escenario base



La Gráfica 6.5.2 presenta las emisiones acumuladas a lo largo de las 24 horas del día, de la misma manera que las velocidades de la gráfica anterior. Es decir, son las emisiones anuales en la forma en que éstas se van acumulando en cada hora del día, hasta llegar a las 24 horas, momento en el que se llega a los valores reportados en el inventario de emisiones 2008.

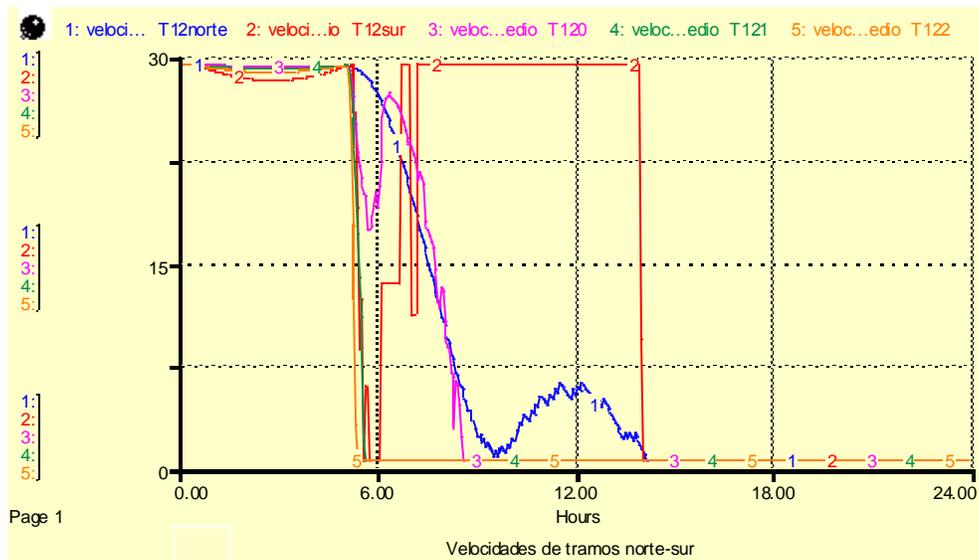
Gráfica 6.5.2. Emisiones anuales acumuladas por hora de CO, COV y NO_x. Escenario base (escalas modificadas para facilitar lectura)



Las escalas están calculadas de manera que los valores de cada uno de los tres contaminantes criterio se pueda leer claramente en la Gráfica 6.5.4. Los acumulados anuales en toneladas son: 638,104 de CO; 90,653 de COV y 60,662 de NO_x.

Un primer escenario de simulación es el representado por las Gráficas 6.5.3 y 6.5.4, las cuales presentan los promedios de las velocidades de circulación y las emisiones acumuladas por hora para todo el período 2010-2020. Para esta simulación se tomaron en cuenta los pronósticos de empleo para la ZMVM obtenidos del modelo de demanda laboral, mismos que indican un total de 163,000 empleos para usuarios del automóvil y 517,000 para trabajadores o usuarios del transporte público.

Gráfica 6.5.3. Velocidades promedio de circulación en cinco troncales, en dirección norte-sur. Escenario que considera la generación de empleos estimada para el período 2010-2020 sin medidas de mitigación

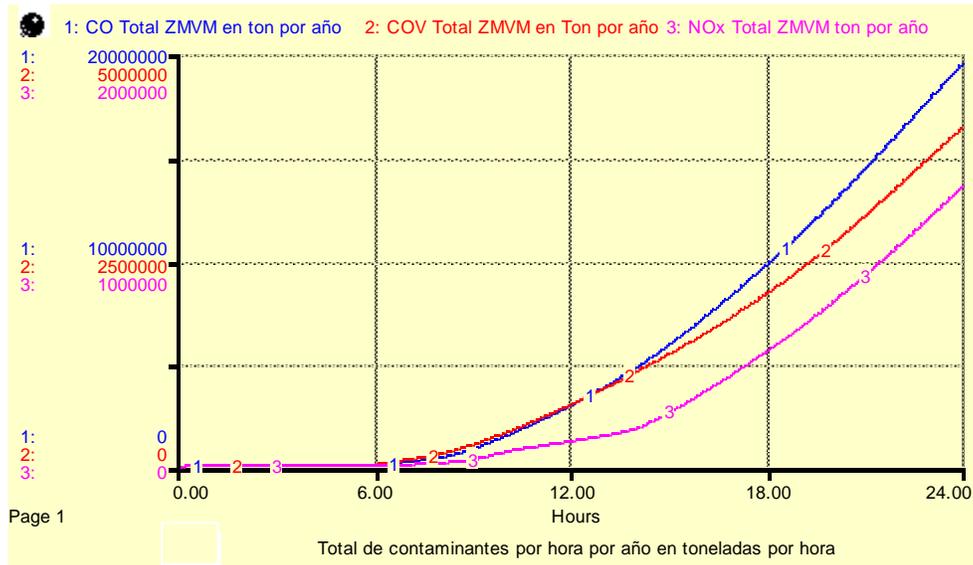


Es conveniente hacer algunas observaciones sobre la interpretación de los resultados. En primer lugar, se asume que para este escenario tendencial no se hacen cambios estructurales que modifiquen ni la capacidad ni los troncales de la traza vial existente; y en segundo lugar se asume que las variables que pueden influir en el número de viajes se mantienen en sus valores actuales. Si bien más adelante se presentan algunos escenarios que incluyen los posibles efectos derivados de la aplicación de alguna medida que incide sobre la generación de viajes, es interesante observar el impacto aislado del crecimiento esperado de empleos en la emisión de contaminantes. Resulta claro que la traza vial se ve rebasada por la generación de viajes y las vialidades presentan una velocidad mínima de circulación, la cual ha sido parametrizada en este modelo con un valor de 5 Km/hr.

La Gráfica 6.5.4 muestra el impacto esperado en emisiones para todo el período 2010-2020 bajo los mismos supuestos, esto es, considerando el total esperado de empleos sin aplicación de medidas de mitigación de viajes. Se observa que el crecimiento acumulado de emisiones, si se le compara con los valores anuales reportados en el

inventario 2008, es del orden del 277 % para el CO, del 410 % para los COV y del 202 % para el caso de los NO_x.

Gráfica 6.5.4. Emisiones anuales acumuladas por hora de CO, COV y NO_x. Escenario que considera la generación de empleos estimada para el período 2010-2020 sin medidas de mitigación



A estas alturas un cuestionamiento pertinente es saber qué efectos se pueden lograr en términos de reducción de emisiones, ante los cambios propiciados por la aplicación de algunas medidas de cambio estructural. Éstas se refieren al tipo de aspectos representados en el mapa ecosistémico como parte de los determinantes del sistema de generación de viajes, mismos que incluyen variables como los usos del suelo y aquellos aspectos culturales tanto de la población como de las organizaciones públicas y privadas que inciden y moldean las necesidades de desplazamiento. Las medidas propuestas desde esta perspectiva están agrupadas en una estrategia que pretende reducir el consumo energético estructural de la ZMVM.

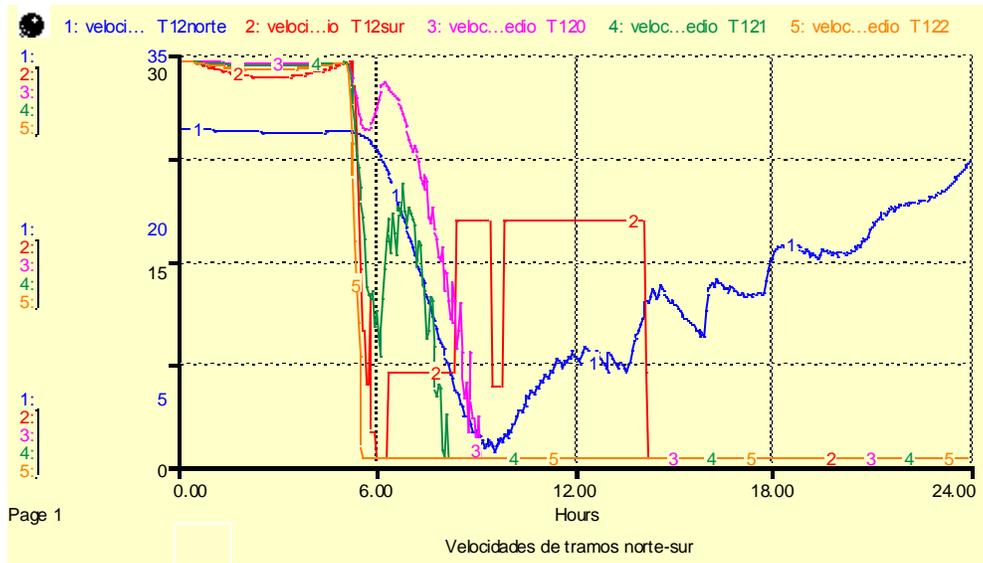
Para poder simular un escenario con cambio estructural recurrimos a las elasticidades espaciales estimadas econométricamente y que indican la respuesta en la probabilidad de realización de viajes cuando se cambia una de las variables explicativas. Se presenta enseguida un ejercicio de simulación usando la diferencia en índices de mezcla de usos del suelo entre AGEB origen y AGEB destino. Para ello se usa el valor de la elasticidad estimada en un ejercicio de modificación de los usos del suelo, para estimar el cambio en el número de viajes en auto y consecuentemente el cambio esperado en emisiones.

Si se asume, a manera de ejemplo, un cambio del 11 % en el valor promedio de los índices de mezcla de usos del suelo en el sentido de favorecer una distribución que aumenta la mezcla de usos y reduce las áreas monofuncionales, y se aplica la elasticidad obtenida de 0.0358 (que aparece en la Tabla 6.2.2) a un total de 6'278,824 viajes diarios en automóvil (EOD_2007), se obtiene una reducción de 28,000 viajes por día. Esto es, asumiendo que todas las otras variables consideradas en la batería de modelos se mantienen constantes, un cambio estructural que modifique la mezcla

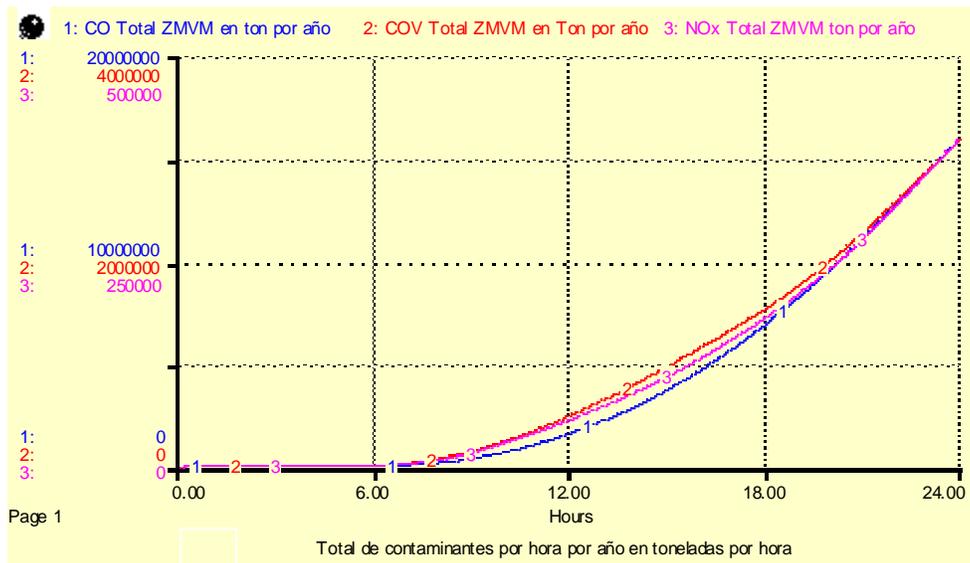
promedio de usos del suelo en el sentido descrito propiciaría una reducción de viajes en esa cantidad. Si se simula el efecto de esa reducción para el período 2010-2020, específicamente en el caso ya considerado que incluye la generación de nuevos empleos, las velocidades promedio de circulación y las emisiones asociadas se comportarían como lo indican las Gráficas 6.5.5 y 6.5.6.

Gráfica 6.5.5. Velocidades promedio de circulación en cinco troncales, dirección norte-sur.

Escenario que considera la generación de empleos estimada para el período 2010-2020 y cambio favorable en los índices de mezcla de usos de suelo



Gráfica 6.5.6. Emisiones anuales acumuladas por hora de CO, COV y NOx.
Escenario que considera la generación de empleos estimada para el período 2010-2020 y cambio favorable en los índices de mezcla de usos de suelo



Las emisiones totales, si se les compara con los incrementos obtenidos en el escenario que consideraba la creación de nuevos empleos sin medida de mitigación, disminuyen de la manera siguiente: para el CO, pasan de un incremento del 277% respecto de lo reportado en el inventario 2008 a un incremento del 228%, esto es, 49 puntos porcentuales menos; para los COV, pasan de un 410 % de incremento a un 320%, es decir 90 puntos porcentuales menos; y para los NO_x se pasa de un incremento del 202% a uno bastante menor del 60%. Como puede observarse, este tipo de cambios estructurales apuntan en la dirección deseable para ir reduciendo la entropía urbana, el consumo energético y las emisiones contaminantes de la ZMVM de forma duradera.

6.6 Reducción estimada de emisiones y mejora de la calidad del aire con medidas convencionales

Como se mencionó en la primera parte de este capítulo, se incluyen en este apartado los cálculos de reducción de emisiones para el período 2011-2020, hechos bajo el supuesto de aplicación de algunas de las medidas propuestas en este PROAIRE, mismas que se presentan en el Capítulo 8. Nótese cómo la combinación de estas medidas identificadas como convencionales con las de tipo estructural o de segunda generación que se derivan del enfoque ecosistémico (como la utilizada para la simulación presentada en la sección anterior) presenta un potencial de reducción de emisiones de una magnitud muy importante.

Tabla 6.6.1. Estimación de la reducción de emisiones obtenida con la aplicación de medidas seleccionadas (ton/año)

#	Medida	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	NO _x	COV	Tóxicos	CO ₂
1	Homologar los procedimientos y criterios de verificación de los vehículos con placas federales y locales.	548	459	26,220	2,765	2,745	374	728,542
2	Fortalecimiento del programa de sustitución de convertidores catalíticos.	NA	NA	3,177	382	421	79	NA
3	Modernización del programa de detección y retiro de vehículos ostensiblemente contaminantes.	165	135	14,641	2,242	1,385	317	226,830
4	Promover el uso de vehículos híbridos y eléctricos para uso particular, de transporte público y de carga.	19	15	2,945	360	230	42	34,352
5	Modernización y homologación del Programa de Verificación Vehicular.	12	6	17,643	666	2,613	602	72,014
6	Renovación de vehículos a diesel con la sustitución de motores y adaptación de sistemas de control de emisiones.	64	54	557	55	43	5	18,757
7	Renovación de las flotas vehiculares de transporte de pasajeros de baja, mediana y alta capacidad.	60	39	73,082	10,763	9,257	1,297	168,127

#	Medida	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	NO _x	COV	Tóxicos	CO ₂
8	Promover el uso de combustibles menos contaminantes en vehículos de transporte público de pasajeros y de carga.	26	10	39,595	715	96	24	79,059
9	Promover el uso de combustibles gaseosos en establecimientos industriales y de servicios.	73	52	204	1,050	21	NE	985,165
10	Modernizar la flota vehicular del servicio de limpia.	51	43	1,040	217	113	43	10,193
11	Impulso de los programas de autorregulación para las empresas de transporte con flotas de vehículos a diesel.	51	44	1,138	856	210	29	84,372
12	Promover la instalación estratégica de bases para taxis en el Distrito Federal.	41	22	42,808	4,724	3,231	984	493,091
13	Regulación de la circulación de vehículos de carga en rutas seleccionadas.	748	622	77,961	4,926	4,547	707	658,863
14	Fomentar la utilización del transporte escolar en la ZMVM.	31	8	8,820	709	733	204	470,958
15	Promoción del uso de la bicicleta como medio alternativo de transporte no contaminante.	12	6	7,431	704	1,094	237	132,138
16	Establecimiento de metas de reducción de emisiones para la industria y los servicios.	1,608	NE	NE	NE	72,068	NE	NE
17	Aplicación de programas de reducción de gases de efecto invernadero en establecimientos industriales y de servicios.	29	29	76	577	17	NE	977,995
18	Actualización de las normas de emisión de partículas sólidas en la industria y desarrollar las correspondientes para el control de compuestos orgánicos volátiles.	NE	NE	NA	NA	21,102	NE	NA
19	Operación de la Línea 12 del METRO.	10	5	7,217	672	968	246	124,512
20	Operación de líneas de tren suburbano.	6	3	4,931	450	656	163	83,001
21	Incrementar el número de las rutas de METROBUS Y MEXIBUS.	4	2	4,676	916	1,437	56	161,325
	TOTAL	3,558	1,554	334,162	33,749	122,987	5,409	5'509,294

Nota: La memoria de cálculo para la construcción de esta tabla se encuentra en el Anexo 7.

NA: No es aplicable; NE: No estimado

Con el propósito de conocer cuáles pueden ser los beneficios en la calidad del aire con la aplicación de las medidas seleccionadas y presentadas en la Tabla 6.6.1 se realizaron simulaciones utilizando el modelo Multi-Scale Climate Chemistry Model (MCCM), el cual

permite relacionar las concentraciones de ozono en la atmósfera con las emisiones de la región (SMA- GDF, 2010). Para esto, se establecieron los tres escenarios siguientes:

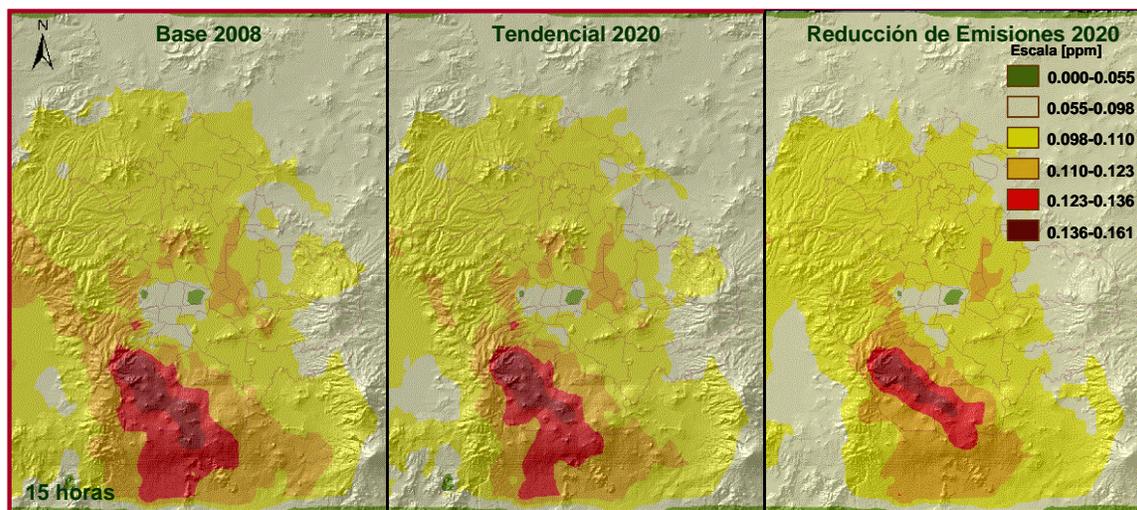
- Caso base 2008: En este escenario se incluyen las emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM del año 2008.
- Tendencial 2020: En este escenario se incluye la proyección de las emisiones del año 2008 hacia el año 2020.
- Reducción de emisiones 2020: En este escenario, se resta la reducción estimada de emisiones de las 21 medidas de la Tabla 6.6.1 al escenario tendencial 2020.

El periodo de modelación del 15 al 21 de abril de 2008 se determinó con análisis de clústers, empleando las variables meteorológicas de humedad relativa, temperatura y viento. El día elegido para hacer el análisis de la modelación fue el 21 de abril, el cual mostró concentraciones de ozono típicas para dicho período. Los mapas de concentraciones de ozono se compararon para las 15:00 y 16:00 horas del 21 de abril, debido a que en esta hora se han alcanzado concentraciones que han activado el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

A continuación se presentan los resultados de la modelación fotoquímica para las 15:00 horas del 21 de abril de 2008. En el análisis de estos resultados se comparan las concentraciones de ozono bajo las condiciones de emisión del caso base (CB), el escenario tendencial con las emisiones proyectadas al año 2020 (TEN20) y el escenario en el cual se consideró la aplicación de medidas de reducción de emisiones en el año 2020 (RED20). Ver Anexo 8.

Se observa en el Mapa 6.6.1 un incremento en la concentración máxima de ozono del año 2008 al año 2020 (0.148 ppm a 0.153 ppm), y una disminución en la concentración máxima de ozono de 0.153 ppm (TEN20) a 0.147 ppm (RED20), al aplicar las reducciones de emisiones en el año 2020.

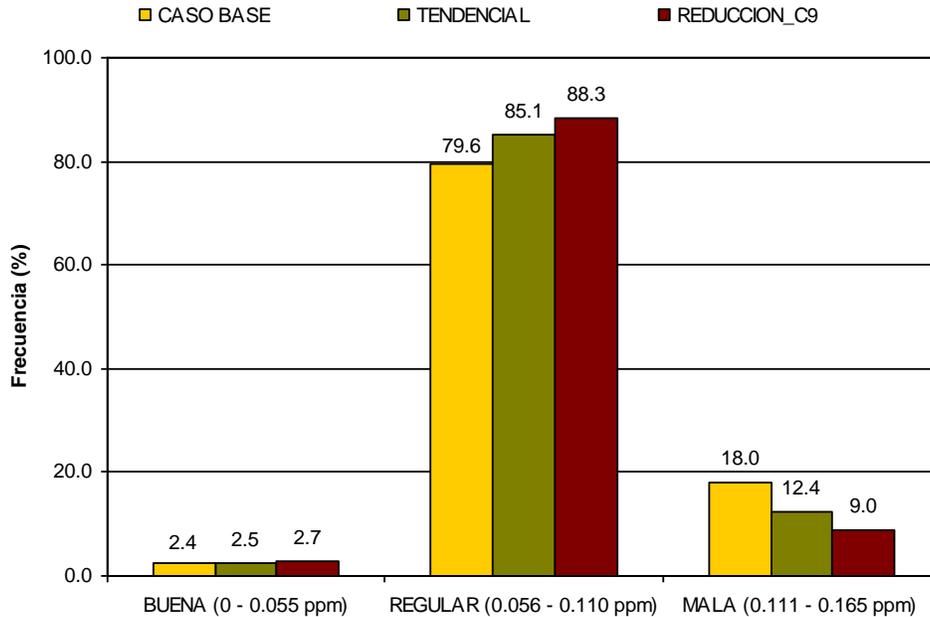
Mapa 6.6.1. Visualización de las concentraciones de ozono a las 15 horas para los escenarios: Base 2008, Tendencial 2020 y Reducción de emisiones 2020



Es importante resaltar que al comparar en el año 2020 los escenarios TEN20 vs. RED20, se aprecia que la región afectada por concentraciones superiores a la norma de ozono (0.11 ppm) disminuyen con la reducción de emisiones por las medidas seleccionadas que se presentan en la Tabla 6.6.1. Es por ello que el mapa muestra una menor área de tonos anaranjados y rojizos, misma que representa concentraciones de ozono superiores a la norma.

Lo anterior se muestra mejor en la Gráfica 6.6.1 en donde se observa que las concentraciones de ozono por debajo de la norma aumentan en un 7 por ciento en el 2020 (TEN20) respecto a lo estimado para el 2008 (CB); y al aplicar medidas de control en el 2020 (RED20 vs. TEN20), la cobertura con concentraciones por debajo de la norma se incrementa otro 4 por ciento. Es decir que en la ZMVM en el año 2020 la implementación de acciones para el control de emisiones favorecería la ampliación de la cobertura geográfica con calidad del aire regular y buena, aún en la hora en que normalmente se presenta la máxima concentración de ozono.

Gráfica 6.6.1. Distribución de frecuencias de las concentraciones de ozono a las 15 horas

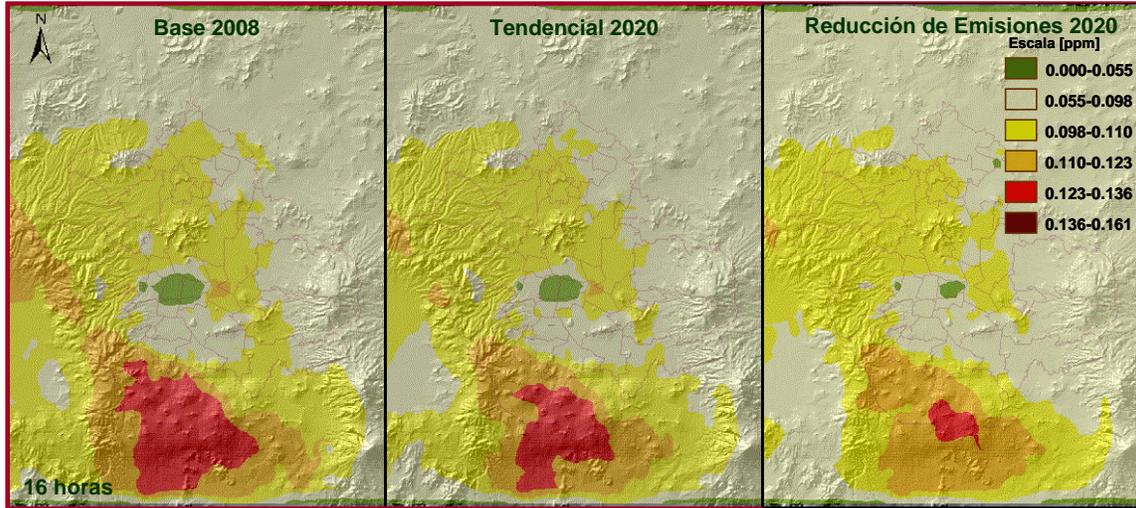


El modelo indica que si se aplican las medidas de reducción de emisiones en comento al año 2020, se reduciría en un 50 % el área geográfica con mala calidad del aire. O bien, el área con calidad del aire buena y regular se ampliaría respecto del caso base en 1,512 Km² si se aplicaran las medidas propuestas de control de emisiones.

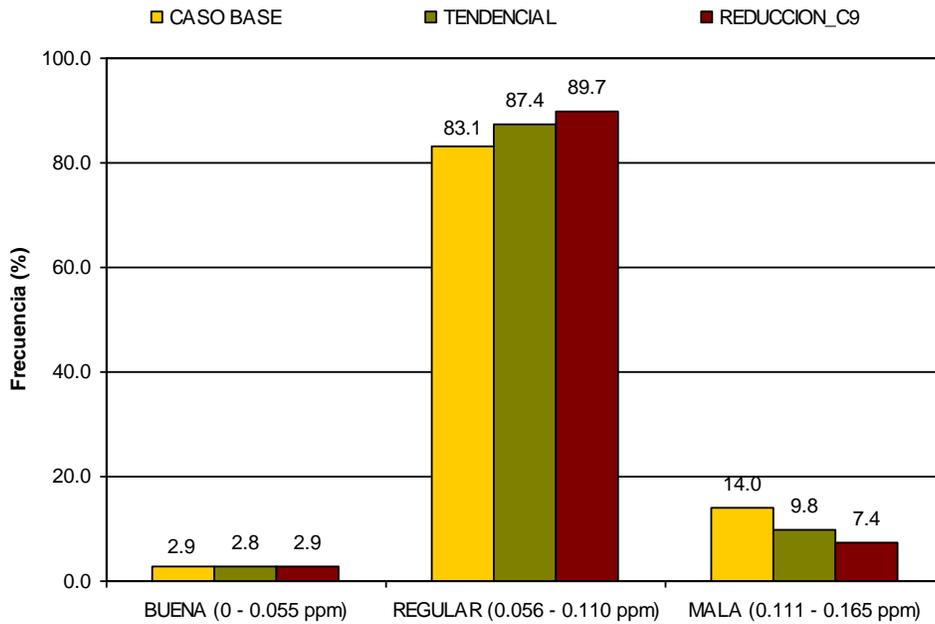
La comparación de escenarios a las 16:00 hrs. se da en un momento en el que las concentraciones han empezado a disminuir. El Mapa 6.6.2 muestra que en el año 2020 se estima una mayor disminución en las concentraciones de ozono que en el año 2008, pues éstas pasaron de 0.137 ppm en 2008 a 0.131 en 2020. La aplicación de medidas de reducción de emisiones en el año 2020 permitiría que la concentración máxima de ozono a ésta hora bajara a 0.126 ppm (RED20).

Finalmente, en la Gráfica 6.6.2 se muestra que las concentraciones de ozono menores al valor de la norma, aumentarían su presencia ó cobertura geográfica en 8%. Esto implica que la calidad el aire regular y buena amplíe su cobertura en 1,120 Km².

Mapa 6.6.2 Visualización de las concentraciones de ozono a las 16 horas para los escenarios: Base 2008, Tendencial 2020 y Reducción de emisiones 2020



Gráfica 6.6.2 Distribución de frecuencias de las concentraciones de ozono a las 16 horas



6.7 Conclusiones

Como conclusiones de estos ejercicios de modelación se pueden mencionar las siguientes:

- Las medidas tradicionales aplicadas hasta ahora siguen presentando márgenes de efectividad para reducir la frecuencia con la que se dan concentraciones de ozono por arriba de la NOM correspondiente.
- La aplicación de medidas de tipo estructural que permitan disminuir el número de kilómetros recorridos en la ZMVM, el consumo de combustibles y las emisiones contaminantes asociadas, se revelan ahora como una opción oportuna y de alto potencial para continuar avanzando en la mejora de la calidad del aire de la ZMVM.
- Esto requiere de la aplicación decidida y completa del conjunto de medidas de este PROAIRE 2011-2020, que garantice el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas de protección a la salud de la población por exposición a contaminantes del aire.