



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS DE  
POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE  
CARGA URBANO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTORA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA DE SISTEMAS - ORIENTACIÓN TRANSPORTE

PRESENTA:

LILIANA LUCÍA LYONS BARRERA

TUTORA:

DRA. ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS

2012

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Ricardo Aceves García

Secretario: Dr. Juan Pablo Antún Callaba

1er. Vocal: Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas

2do. Vocal: Dr. Luis Chías Becerril

3er. Vocal: Dr. Dartois Girald Laurent Yves Georges

México D.F., Diciembre de 2012

TUTOR DE TESIS

**DRA. ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS**

---

*A la memoria de mis padres Carmenza y Ariel,  
aunque ya no están presentes sé que comparten conmigo este logro,  
gracias por darme la vida, por su ejemplo de fortaleza y amor*

## **AGRADECIMIENTOS**

**La autora expresa sus agradecimientos a:**

***Las instituciones que me apoyaron durante los estudios de doctorado:***

Universidad Nacional Autónoma de México  
Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Campo de Conocimiento en Ingeniería de Sistemas  
Instituto de Ingeniería. Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – CONACYT –. Beca para realizar estudios de doctorado

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Profesores de la Unidad Académica de Vías y Transporte

***Las personas que me aportaron sus conocimientos, brindaron apoyo y entusiasmo para la culminación de esta investigación:***

Dra. Angélica Lozano Cuevas, directora de mis estudios doctorales por su guía permanente, aporte de conocimientos y ejemplo de dedicación y responsabilidad.

Dr. Ricardo Aceves García y Dr. Juan Pablo Antún Callaba, miembros del comité tutorial por su apoyo, guía y asesoría.

Dr. Laurent Dartois y Dr. Luis Chías Becerril, miembros del jurado por sus aportes en la revisión final del trabajo doctoral.

Maestro Alejandro Guzmán Castro, por su permanente colaboración para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A todos los compañeros del Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales por su solidaridad y amistad.

***A las instituciones, empresas y personas que colaboraron en la consecución de información para el desarrollo de esta investigación:***

Asociación Nacional del Transporte Privado de México –ANTP–, sus directivos y empresas asociadas

***A mis hermanos Ariel y Mauricio y, a mi tía Lucía Barrera por estar siempre cerca a pesar de la distancia y en momentos tan difíciles de nuestra vida***

***A Guillermo Hidalgo Estrada por su apoyo, comprensión y amor en esta etapa de nuestro camino***

***A mis amigas y amigos en México por su hospitalidad y, a mis amigas y amigos en Colombia por tenerme siempre presente en sus pensamientos***

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación doctoral es el desarrollo de un proceso metodológico fundamentado en modelación de redes para evaluar los impactos en el tráfico y en las emisiones de contaminantes locales ( $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ ) que pueden tener las políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas, y su aplicación a un estudio de caso en la Zona Metropolitana del Valle de México-ZMVM-.

Para el desarrollo de la propuesta metodológica se parte de su aplicación al estudio de caso en la ZMVM, para deducir a partir del proceso de evaluación realizado en esta zona, la metodología de evaluación de políticas públicas para áreas urbanas con características similares a ésta.

La metodología se desarrolla en nueve pasos, partiendo de la obtención y preparación de la información de oferta, demanda y de modelos de emisiones para el área de estudio. La segunda etapa incluye el diseño de los métodos para la obtención de la información sobre las reacciones de los transportistas ante las políticas a evaluar, a partir de lo cual se formulan los escenarios de evaluación. La tercera y cuarta etapa incluyen la modificación de las matrices origen-destino y de las diferentes redes de transporte requeridas para la modelación de los escenarios base y los escenarios de evaluación de las políticas. En la quinta etapa se estiman los factores de emisiones de contaminantes para la zona de estudio.

En el sexto paso, se realiza la definición de las herramientas para la modelación de los flujos de tráfico para cada escenario y se estiman los flujos de vehículos tanto para el escenario base como para los escenarios de evaluación, de la política a evaluar. En la etapa siete se estiman las emisiones de contaminantes con base en las salidas del modelo de asignación y; en la etapa ocho, a partir de los resultados de la modelación de redes y de emisiones se obtienen los indicadores de evaluación para todos los escenarios, para finalmente en la etapa nueve, realizar la comparación y evaluación de las políticas bajo análisis.

Los resultados obtenidos con la metodología antes descrita y aplicada al estudio de caso en la ZMVM, muestran la efectividad de la misma para la estimación de indicadores para la evaluación de los impactos en el desempeño del tráfico, la congestión y las emisiones de contaminantes locales en grandes zonas urbanas, ante la aplicación de políticas de restricción a vehículos de carga. Los valores de los indicadores para los escenarios pueden ser soporte en el proceso de análisis y de toma de decisiones para la formulación de estas y otras políticas en contextos similares, bajo determinados supuestos.

Los resultados de la aplicación de la metodología a la evaluación de la política de restricción a los camiones pesados por ventanas de tiempo en los principales accesos a la ZMVM, indican que se obtienen impactos más favorables tanto en congestión como en emisiones de contaminantes en la red, si los transportistas ponen en marcha simultáneamente diferentes cambios operativos para los camiones pesados, lo cual además representa un escenario apegado a la realidad. La combinación de cambios en los recorridos de rutas y en los tamaños de vehículos, y cambios de horario de operación hacia la hora valle, generan mejores indicadores en cuanto a kilómetros recorridos y tiempos de viaje para camiones y en las emisiones de contaminantes, lo que es mejorado un poco si además existe la política complementaria de mejoramiento de la red vial.

## ABSTRACT

The main objective of this research is to develop a methodology based on network models for evaluating the effects and impacts on traffic and local pollutant emissions ( $\text{NO}_x$  and CO), generated from freight transport public policies implemented in urban areas, and apply this methodology to a case study in the Metropolitan Zone of Mexico City-MZMC.

The methodology was developed from the analysis of a case study in the MZMC. The methodology allows the assessment of urban freight transportation public policies for urban areas as the MZMC.

The methodology is performed in nine steps: the first step includes the processing of information on transport supply and demand, and emission factors, for the study area. The second step comprises the interview's process to obtain carrier's reactions against the selected policies; interviews results are used for the definition of scenarios. In the third and fourth steps, origin-destination matrices and networks required for modeling process are modified. In the fifth step, pollutant emission factors for study zone are estimated.

In the sixth step, the network model is defined and flows for each scenario are estimated, for the base scenario and generated scenarios. In step seven, pollutant emissions are estimated, based on the network model outputs and; in step eight, based on modeling results of vehicle flows and emissions, assessing indicators for each scenario are obtained. Finally in step nine, a comparison between scenarios is done in order to select the best scenarios and then the policies assessment.

The results from methodology application to the case study show that it is effective to estimate indicators for assessing impacts on traffic congestion and local emissions in large urban areas and then assess public policies related to urban freight transport. These indicators for each scenario can support the decision making process on public policies, in similar urban contexts under certain assumptions.

The case study assessment, time windows restrictions for heavy trucks on main entrance/exit roads in the Metropolitan Zone of Mexico City, shows that this policy has better impact on total network congestion and local emissions when different operational options for trucks are applied simultaneously from carriers, which also corresponds to a realistic situation. The combination between changes on truck's paths and truck's size, and changes of operational schedules to off-peak hour, results in better traffic indicators (total traveled kilometers and total travel times) and local pollutant emissions from trucks, which can be improved a little when a complementary network improvement policy is applied.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	I
RESUMEN.....	V
ABSTRACT .....	VI
CONTENIDO .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2.1 Impactos del Transporte Urbano de Carga .....	3
1.2.2 Importancia de la Evaluación Ex -ante de Políticas Públicas Aplicadas al Transporte Urbano de Carga .....	5
1.2.3 Impactos en la Calidad del Aire Generados por el Transporte Urbano de Carga .....	6
1.2.4 Impactos del Transporte de Carga en la Zona Metropolitana del Valle de México.....	7
1.3 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	8
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO DE TESIS .....	8
<b>2 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EL TRANSPORTE URBANO DE CARGA .....</b>	<b>10</b>
2.1 PRINCIPALES POLÍTICAS PÚBLICAS EN EL ÁMBITO DEL TRANSPORTE URBANO DE CARGA.....	10
2.1.1 Políticas para Promover el uso Eficiente de la Infraestructura Vial .....	10
2.1.2 Políticas para la Reducción del Impacto Ambiental .....	11
2.1.3 Políticas para Disminuir el Número de Desplazamientos y de Kilómetros Recorridos por los Vehículos de Carga.....	11
2.1.4 Políticas para Incentivar la Eficiencia de los Transportistas de Carga Urbana.....	12
2.1.5 Políticas Específicas para Reducción de Emisiones de Contaminantes.....	13
2.2 PRINCIPALES POLÍTICAS PÚBLICAS EN LAS CIUDADES EN DESARROLLO .....	13
2.3 CONCEPTO DE PLANEACIÓN Y EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DEL TRANSPORTE URBANO DE CARGA .....	15
2.4 DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS EN EL ÁMBITO DEL TRANSPORTE DE CARGA.....	18
2.5 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EL TRANSPORTE DE CARGA EN LA ZMVM.....	20
2.6 POSIBLES NUEVAS POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EL TRANSPORTE DE CARGA EN LA ZMVM .....	25
2.6.1 Definición de Horarios o Ventanas de Tiempo para Acceso de Vehículos de Carga a Zonas Urbanas .....	26
2.6.2 Definición de Zonas Ambientales (BestUFS, 2008).....	27
2.6.3 Establecimiento de Corredores de Carga y Rutas para Camiones (BestUFS, 2007) .....	28
2.6.4 Fomento del uso de Combustibles Alternativos y de Vehículos con Bajas Emisiones de Carbono ..	29
2.6.5 Cobro de Tasas o Cuotas por Uso de Vías.....	30

<b>3</b>	<b>OBTENCIÓN DE LAS RESPUESTAS OPERATIVAS DE LOS PROPIETARIOS ANTE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS.....</b>	<b>31</b>
3.1	ESTADO DEL ARTE SOBRE METODOLOGÍAS PARA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN ESTUDIOS DE EFECTOS DE POLÍTICAS.....	31
3.2	REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA LA ZMVM SOBRE TRANSPORTE DE CARGA.....	32
3.2.1	Definición de Categorías de Análisis para los Vehículos de Carga.....	32
3.2.2	Clasificación de los Vehículos de Carga para la ZMVM.....	33
3.2.3	Resultados del Análisis de la Base de Datos de Vehículos de Carga.....	35
3.2.4	Clasificación de los vehículos por tamaño.....	36
3.2.5	Análisis de los Tamaños de Flota.....	37
3.3	DISEÑO DEL MÉTODO DE MUESTREO.....	38
3.3.1	Objetivo de las Entrevistas.....	38
3.3.2	Definición de Variables.....	38
3.3.3	Fuentes de Información.....	40
3.3.4	Método de Recolección de Datos.....	40
3.3.5	Diseño de la Muestra.....	40
3.3.6	Desarrollo de las entrevistas.....	44
3.4	PROCESAMIENTO Y RESULTADOS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA EN LAS ENTREVISTAS.....	44
3.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS ENTREVISTAS.....	46
3.5.1	Resultados Estandarizados de las Estimaciones.....	53
3.6	RESULTADOS DEL SONDEO DE OPINIÓN REALIZADO EN 2012 A LOS GERENTES DE OPERACIONES.....	57
<b>4</b>	<b>MARCO TEÓRICO PARA LA MODELACIÓN DE ESCENARIOS.....</b>	<b>59</b>
4.1	MODELOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO.....	59
4.1.1	Asignación Mediante Curvas de Distribución o Reparto.....	61
4.1.2	Asignación para Ruta Mínima, Comúnmente Llamada “Todo o Nada”.....	61
4.1.3	Asignación Estocástica.....	61
4.1.4	Asignación con Restricción de Capacidad.....	62
4.1.5	Asignación de Equilibrio.....	63
4.1.6	Asignación de Equilibrio Multi-Clase (Multi-Vehículo).....	66
4.2	MODELOS PARA ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EMISIONES.....	70
4.2.1	Modelo MOBILE5-México (Radian International, 1997; E.R.G., 2000).....	71
4.3	Metodología Básica para la Estimación de Emisiones del Modelo <i>MOBILE</i> .....	72
4.4	Tipos de Vehículos del Modelo <i>MOBILE</i> .....	75
4.5	Cálculo de los <i>KRV</i> a partir de Modelos de Tráfico.....	77
4.6	Factores de Emisión para la ZMVM.....	77
<b>5</b>	<b>DEFINICIÓN DE ESCENARIOS PARA EVALUACIÓN DE POLÍTICAS EN LA ZMVM.....</b>	<b>80</b>
5.1	ANTECEDENTES DE LAS ACCIONES APLICADAS AL TRANSPORTE DE CARGA EN LA ZMVM.....	80
5.2	INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS ESCENARIOS.....	82
5.2.1	Demanda de Viajes.....	82
5.2.2	Redes de Transporte.....	83
5.2.3	Factores de emisiones de contaminantes locales.....	84
5.3	DEFINICIÓN DE LOS GRUPOS DE ESCENARIOS.....	85

5.3.1	Grupo 1: Escenarios Base.....	86
5.3.2	Grupo 2: Escenarios que Evalúan una Sola Opción Operativa ante la Restricción por Ventanas de Tiempo .....	86
5.3.3	Grupo 3: Escenarios que Evalúan Restricciones por Ventanas de Tiempo y el Mejoramiento de la Red .....	91
5.3.4	Grupo 4: Escenarios que Evalúan Simultáneamente Varias Opciones Operativas ante la Restricción por Ventanas de Tiempo.....	92
5.4	PROCESO DE ASIGNACIÓN MULTI-VEHÍCULO Y DE OBTENCIÓN DE LOS INDICADORES DE EVALUACIÓN .....	97
<b>6</b>	<b>RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE ESCENARIOS.....</b>	<b>101</b>
6.1	RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE CADA ESCENARIO .....	101
6.2	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS .....	102
6.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE ESCENARIOS.....	103
6.3.1	Escenario 2.0 - Cambio de Recorridos .....	104
6.3.2	Escenario 2.1 - Cambio de Tamaño de Vehículos.....	106
6.3.3	Escenarios 2.2A - Cambio de Horario de Operación.....	106
6.3.4	Escenarios 2.3 - Uso de Centros de Consolidación .....	108
6.3.5	Escenarios 3.1A y 3.1B - Cambio de Horario de Operación junto con Mejoramiento de Vialidades .....	108
6.3.6	Escenarios 4.A y 4.B: Evaluación Simultánea de Varias Opciones Operativas ante la Restricción por Ventanas de Tiempo.....	109
6.4	CONCLUSIONES ADICIONALES DE LA EVALUACIÓN DE ESCENARIOS .....	117
<b>7</b>	<b>METODOLOGÍA PARA EVALUAR POLÍTICAS PÚBLICAS APLICADAS AL TRANSPORTE DE CARGA EN ZONAS URBANAS .....</b>	<b>119</b>
7.1	INFORMACIÓN BÁSICA PARA APLICAR LA METODOLOGÍA.....	119
7.2	ETAPAS DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA .....	121
7.2.1	Paso 1: Preparación de la Información Básica.....	121
7.2.2	Paso 2: Definición de los Escenarios para Representar las Políticas a Evaluar .....	122
7.2.3	Paso 3: Definición de las Matrices para la Modelación Multi-Vehículo .....	124
7.2.4	Paso 4: Definición de las Redes para la Modelación Multi-Vehículo de cada Escenario.....	125
7.2.5	Paso 5: Estimación de los Factores de Emisiones .....	126
7.2.6	Paso 6: Estimación de los flujos por tipo de vehículo .....	126
7.2.7	Paso 7: Obtención de los Indicadores de Evaluación de Tráfico para cada Escenario .....	127
7.2.8	Paso 8: Estimación de los Indicadores de Emisiones de Contaminantes Locales NO <sub>x</sub> y CO .....	127
7.2.9	Paso 9: Comparación de Escenarios .....	128
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>130</b>
8.1	CONCLUSIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA POLÍTICA DE VENTANAS DE TIEMPO A VEHÍCULOS DE CARGA EN LA ZMVM.....	130
8.2	CONCLUSIONES SOBRE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS EN LA ZMVM.....	132
8.3	CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS APLICADAS AL TRANSPORTE DE CARGA EN ZONAS URBANAS .....	133
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>134</b>
	<b>ANEXO 1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS ENTREVISTAS .....</b>	<b>139</b>
1.	EJEMPLO DE CÁLCULO PARA EL ESTRATO 1 .....	139

2. RESULTADOS PARA LOS ESTRATOS DE VEHICULOS MUY CHICO, CHICO, MEDIANO Y GRANDE.....	143
3. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DEL ERROR ESTANDAR DE LAS PROPORCIONES ESTIMADAS.....	152
4. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE PROPORCIONES PARA EL TOTAL DE LA POBLACIÓN.....	153
<b>ANEXO 2. MODELOS PARA ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EMISIONES .....</b>	<b>155</b>
1. IMPACTOS GENERADOS POR LOS VEHÍCULOS DE CARGA.....	155
2. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES DE LOS VEHÍCULOS DE CARGA.....	158
3. EL MODELO <i>MOBILE</i> .....	160

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1. MEDIDAS RECOMENDADAS PARA EL TRANSPORTE URBANO DE CARGA EN CIUDADES EN DESARROLLO .....	14
TABLA 2-2 RECOMENDACIONES PARA EL TRANSPORTE URBANO DE CARGA ANTES DEL 2006 .....	16
TABLA 2-3 RECOMENDACIONES PARA EL TRANSPORTE URBANO DE CARGA DESDE 2006 .....	16
TABLA 2-4 VIALIDADES CON RESTRICCIONES PARA EL TRANSPORTE DE CARGA EN LA ZMVM .....	21
TABLA 2-5. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS AMBIENTALES.....	27
TABLA 2-6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ZONAS AMBIENTALES .....	28
TABLA 3-1. CLASIFICACIÓN VEHÍCULOS DE CARGA POR TAMAÑO .....	33
TABLA 3-2. PRINCIPALES VEHÍCULOS DE TAMAÑO MUY CHICO .....	33
TABLA 3-3. PRINCIPALES VEHÍCULOS DE TAMAÑO CHICO .....	34
TABLA 3-4. PRINCIPALES VEHÍCULOS DE TAMAÑO MEDIANO .....	34
TABLA 3-5. PRINCIPALES VEHÍCULOS DE TAMAÑO GRANDE .....	35
TABLA 3-6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS DE VEHÍCULOS DE CARGA EN LA ZMVM.....	36
TABLA 3-7. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE LOS VEHÍCULOS DE CARGA (*).....	36
TABLA 3-8. CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE LOS VEHÍCULOS DE CARGA DEL PADRÓN FEDERAL.....	37
TABLA 3-9. CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE LA FLOTA .....	37
TABLA 3-10. DEFINICIÓN DE VARIABLES .....	39
TABLA 3-11. ESTRATIFICACIÓN DE VEHÍCULOS DE CARGA .....	41
TABLA 3-12. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA POR ESTRATO ( $N_H$ ).....	42
TABLA 3-13. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA DE CONGLOMERADOS.....	43
TABLA 3-14. MUESTRA SELECCIONADA .....	43
TABLA 3-15 PROPORCIONES ESTIMADAS POR ESTRATO Y PARA EL TOTAL DE LA POBLACIÓN .....	45
TABLA 3-16 PORCENTAJES DE VEHÍCULOS POR TAMAÑO ZMVM.....	53
TABLA 3-17. PROPORCIONES ESTANDARIZADAS Y TOTAL DE VEHÍCULOS AFECTADOS POR LA POLÍTICA DE RESTRICCIÓN DE ACCESO POR VENTANAS DE TIEMPO .....	54
TABLA 3-18 PROPORCIONES ESTANDARIZADAS Y TOTAL DE VEHÍCULOS AFECTADOS POR LA POLÍTICA DE RESTRICCIÓN DE CARGA Y DESCARGA POR VENTANAS DE TIEMPO.....	55
TABLA 3-19 PROPORCIONES ESTANDARIZADAS Y TOTAL DE VEHÍCULOS AFECTADOS POR LA POLÍTICA DE RESTRICCIÓN DE ACCESO Y VENTANAS DE TIEMPO DE LOS CLIENTES .....	55
TABLA 3-20 PROPORCIONES ESTANDARIZADAS Y TOTAL DE VEHÍCULOS AFECTADOS POR LA POLÍTICA DE ZONAS AMBIENTALES .....	55
TABLA 3-21 PROPORCIONES ESTANDARIZADAS Y TOTAL DE VEHÍCULOS AFECTADOS POR LA POLÍTICA DE CORREDORES DE CARGA .....	56
TABLA 3-22 PROPORCIONES ESTANDARIZADAS Y TOTAL DE VEHÍCULOS AFECTADOS POR LA POLÍTICA DE COBRO DE CUOTAS.....	56
TABLA 3-23 PROPORCIONES ESTANDARIZADAS Y TOTAL DE VEHÍCULOS AFECTADOS POR LA POLÍTICA DE USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.....	56
TABLA 4-1 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS MODELOS DE ASIGNACIÓN.....	60
TABLA 4-2 ALGORITMOS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE EQUILIBRIO DEL USUARIO.....	66
TABLA 4-3 DEFINICIÓN DE HIDROCARBUROS.....	72
TABLA 5-1 DISTRIBUCIÓN DE VIAJES DE VEHÍCULOS EN LA ZMVM-PERÍODO PICO DE LA MAÑANA .....	83
TABLA 5-2 NUEVA MATRIZ O-D -PERÍODO PICO DE LA MAÑANA PARA LOS ESCENARIOS DEL GRUPO 4 .....	95
TABLA 6-1 INDICADORES OBTENIDOS A PARTIR DEL PROCESO DE ASIGNACIÓN MULTI-VEHÍCULO.....	102
TABLA 6-2 RESULTADOS PARA COMPARACIÓN DE ESCENARIOS.....	103
TABLA 6-3 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS 1.1A Y 2.0 .....	106
TABLA 6-4 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS 2.0 Y 2.1 .....	106
TABLA 6-5 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS 2.2A Y 2.2B.....	108
TABLA 6-6 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS 2.2 Y 3.1 .....	109
TABLA 6-7 COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS DEL GRUPO 4 .....	110
ANEXO 1	
TABLA 1 TABULACIÓN DE LAS RESPUESTAS. VEHÍCULOS ESTRATO 1, MUY CHICO .....	140
TABLA 2 PROPORCIÓN DE VEHÍCULOS DE LA MUESTRA DEL ESTRATO 1 CON RESPUESTA AFIRMATIVA .....	140
TABLA 3 CÁLCULO DEL ERROR ESTÁNDAR PARA LA PROPORCIÓN ESTIMADA DEL ESTRATO 1 .....	141

TABLA 4 PROPORCIÓN ESTIMADA DEL TOTAL DE VEHÍCULOS DEL ESTRATO 1.....	142
TABLA 5 RESULTADOS PARA EL ESTRATO MUY CHICO.....	144
TABLA 6 RESULTADOS PARA EL ESTRATO CHICO.....	146
TABLA 7 RESULTADOS PARA EL ESTRATO MEDIANO.....	148
TABLA 8 RESULTADOS PARA EL ESTRATO GRANDE.....	150
TABLA 9 ESTIMACIÓN DEL ERROR ESTÁNDAR DE LAS PROPORCIONES ESTIMADAS.....	152
TABLA 10 ESTIMACIÓN DE LAS PROPORCIONES PARA EL TOTAL DE LA POBLACIÓN.....	154

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 ACTORES Y ENTORNO DEL TRANSPORTE URBANO DE CARGA .....	4
FIGURA 1-2. CONTRIBUCIÓN DE EMISIONES DE VEHÍCULOS POR TIPO DE USO Y ENTIDAD .....	7
FIGURA 2-1 POLÍTICAS PÚBLICAS EN EL TRANSPORTE URBANO DE CARGA (TUC) .....	19
FIGURA 3-1. RESULTADOS RESTRICCIÓN DE HORARIOS DE ACCESO POR TAMAÑO DEL VEHÍCULO .....	47
FIGURA 3-2. RESULTADOS RESTRICCIÓN VENTANAS DE TIEMPO PARA CARGA/DESCARGA POR TAMAÑO DEL VEHÍCULO.....	48
FIGURA 3-3. RESULTADOS RESTRICCIÓN DE HORARIO DE CIRCULACIÓN JUNTO CON VENTANAS DE TIEMPO DEL CLIENTE.....	49
FIGURA 3-4. RESULTADOS ESTABLECIMIENTO DE ZONAS AMBIENTALES POR TAMAÑO DEL VEHÍCULO .....	50
FIGURA 3-5. RESULTADOS CORREDORES DE CARGA SUGERIDOS POR TAMAÑO DEL VEHÍCULO .....	51
FIGURA 3-6. RESULTADOS COBRO DE CUOTAS POR USO DE VÍAS POR TAMAÑO DEL VEHÍCULO .....	52
FIGURA 3-7. RESULTADOS USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS POR TAMAÑO DEL VEHÍCULO.....	53
FIGURA 4-1 DIAGRAMA DE FLUJO DE CÁLCULO DE FACTORES DE EMISIÓN .....	74
FIGURA 4-2 CORRESPONDENCIA DE LOS ESTÁNDARES DE EMISIÓN DE MÉXICO CON LAS CLASES VEHICULARES DEL MODELO <i>MOBILE</i> .....	76
FIGURA 4-3. FACTORES DE EMISIÓN DE NO <sub>x</sub> EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD.....	78
FIGURA 4-4. FACTORES DE EMISIÓN DE NO <sub>x</sub> (VEHÍCULOS A GASOLINA).....	79
FIGURA 4-5. FACTORES DE EMISIÓN DE CO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD .....	79
FIGURA 5-1. LÍNEAS DE DESEO DE VIAJE. PARTE CENTRAL ZMVM .....	83
FIGURA 5-2. RED VIAL PRINCIPAL Y RED DE CARGA - ZMVM.....	84
FIGURA 5-6 ACCESOS RESTRINGIDOS EN LA ZMVM.....	87
FIGURA 5-7. PROPORCIONES DE VEHÍCULOS -ESCENARIO 2.1 .....	88
FIGURA 5-8. PROPORCIONES DE VEHÍCULOS -ESCENARIOS 2.2A Y 2.2B.....	89
FIGURA 5-9. PROPORCIONES DE VEHÍCULOS -ESCENARIO 2.3.....	90
FIGURA 5-10. VIALIDADES MEJORADAS ZMVM .....	91
FIGURA 5-11. GRUPO 4 DE ESCENARIOS: COMBINACIÓN DE OPCIONES OPERACIONALES .....	93
FIGURA 5-12. GRUPO 4 DE ESCENARIOS-UBICACIÓN CENTROS LOGÍSTICOS.....	94
FIGURA 5-13. ESCENARIOS 4.3A Y 4.3B: COMBINACIÓN DE OPCIONES OPERACIONALES SIN CENTROS DE CONSOLIDACIÓN .....	97
FIGURA 5-14.PROCESO DE ASIGNACIÓN MULTI-VEHÍCULO PARA CADA ESCENARIO.....	98
FIGURA 6-1 COMPARACIÓN ESCENARIOS 1.1A Y 2.0 - RED DE CARGA: FLUJOS TOTALES .....	104
FIGURA 6-2 COMPARACIÓN ESCENARIOS 1.1A Y 2.0 - RED DE CARGA: CAMIONES PESADOS.....	105
FIGURA 6-3 COMPARACIÓN ESCENARIOS 1.1B Y 2.2B - RED DE CARGA: FLUJOS TOTALES.....	107
FIGURA 6-4 COMPARACIÓN ESCENARIOS 1.1B Y 2.2B - RED DE CARGA: FLUJOS DE CAMIONES PESADOS.....	107
FIGURA 6-5 COMPARACIÓN ESCENARIOS 1.1A, 4.2A Y 4.3A- RED DE CARGA: FLUJOS DE CAMIONES PESADOS .	113
FIGURA 6-6 DETALLE COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS 1.1A, 4.2A Y 4.3A-PARA FLUJOS DE CAMIONES PESADOS Y CHICOS .....	114
FIGURA 6-7 DETALLE COMPARACIÓN ESCENARIOS 4.2A Y 4.3A PARA FLUJOS DE CAMIONES PESADOS Y CHICOS .....	115
FIGURA 6-8 COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS 1.1B, 4.2B Y 4.3B- RED DE CARGA: FLUJOS TOTALES .....	116
FIGURA 6-9 COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS 1.1B, 4.2B Y 4.3B- RED DE CARGA: FLUJOS DE CAMIONES PESADOS .....	117
FIGURA 7-1. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS APLICADAS A VEHÍCULOS DE CARGA EN ZONAS URBANAS .....	129
ANEXO 2	
FIGURA 1. PROCESOS DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN VEHÍCULOS AUTOMOTORES.....	156
FIGURA 2. TASAS DE EMISIÓN BÁSICAS HIPOTÉTICAS .....	161
FIGURA 3 DIAGRAMA DE FLUJO DE CÁLCULO DE FACTORES DE EMISIÓN.....	163

## 1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de la logística urbana es asegurar el desempeño eficiente del proceso de suministro de mercancías en las áreas urbanas. El transporte de carga hace parte de la cadena de suministro compartiendo la infraestructura vial y urbana con los vehículos de pasajeros y con los diferentes usuarios del sistema. Es innegable el aporte del transporte de carga al desarrollo de la economía urbana, sin embargo esta actividad genera una serie de impactos no deseables en el entorno urbano tales como la congestión de tráfico, emisiones de contaminantes, accidentes y ruido.

Ante estos impactos negativos, generalmente las autoridades responden con acciones restrictivas a los vehículos de carga, muchas veces sin estimar previamente las consecuencias de estas decisiones sobre el sistema económico y de transporte urbano. Si bien es cierto, que corresponde al Estado la regulación de las actividades del transporte para generar equilibrio y equidad con respecto a los impactos que afectan a la sociedad en general, sus decisiones deberían estar soportadas en procesos de planeación y evaluación de las alternativas para alcanzar la efectividad esperada.

La metodología generada en esta investigación doctoral hace un aporte importante para apoyar la toma de decisiones en materia de políticas públicas que afecten al transporte de carga en zonas urbanas, mediante el desarrollo de un proceso metodológico de evaluación, fundamentado en herramientas de modelación de redes de tráfico y en modelación de emisiones de contaminantes locales.

Para el desarrollo de la propuesta metodológica se parte de su aplicación un estudio de caso en la Zona Metropolitana del Valle de México-ZMVM-, para deducir a partir del proceso de evaluación realizado en esta zona, la metodología de evaluación de políticas públicas para áreas urbanas con características similares a ésta.

La evaluación de los resultados obtenidos con la propuesta metodológica en el estudio de caso muestra la efectividad de la misma para la estimación de indicadores claros y concisos sobre los impactos en el desempeño del tráfico, la congestión y las emisiones de contaminantes locales, ante la aplicación de políticas de restricción a vehículos de carga en zonas urbanas, lo cual sirve de base para el proceso de análisis y toma de decisiones en la formulación de éstas y otras políticas en contextos similares bajo determinados supuestos.

Como resultado de la evaluación de las políticas de restricción a los camiones de carga en la zona de estudio se encuentra que ante este tipo de acciones por parte de las autoridades, los transportistas pueden tomar varias opciones para hacer frente a las prohibiciones, tales como cambiar los recorridos, reemplazar camiones grandes por vehículos más chicos, o modificar sus horarios de operación. De acuerdo con las estimaciones realizadas para los escenarios evaluados, estos cambios generan diversos impactos en el tráfico y en las emisiones de contaminantes locales sobre la red de análisis, y los mejores indicadores de evaluación pueden surgir de la combinación de diferentes respuestas operativas de los transportistas, lo cual no es previsible ni cuantificable sin un proceso previo de evaluación de alternativas como el realizado para este estudio de caso.

La revisión del estado del arte realizada dentro del proceso investigativo muestra que existe aún un camino muy extenso por recorrer en materia de investigación sobre el análisis del impacto de políticas y medidas de mitigación que son puestas en marcha ante problemas evidentes de congestión y de contaminación ambiental generados en parte por el transporte de carga, particularmente en las áreas urbanas de países en desarrollo, en donde se hace necesario responder a tales problemas con recursos limitados en forma rápida y efectiva. El proceso metodológico propuesto, que incluye como etapa

fundamental el involucrar a los empresarios del sector en la toma de decisiones, así como la información recolectada para el estudio de caso analizado, pueden servir de base para continuar con otras investigaciones sobre impactos del transporte urbano de carga no solo sobre el tráfico y las emisiones locales en redes sino en temas como el impacto en los costos de operación para los operadores y otro tipo de emisiones de contaminantes ambientales.

El documento de tesis que a continuación se presenta desarrolla en cinco capítulos la aplicación de la metodología al estudio de caso en la ZMVM, para finalmente concluir en el último capítulo con la propuesta metodológica objeto de esta investigación.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de la investigación es el desarrollo de un proceso metodológico fundamentado en modelación de redes para evaluar los impactos, en el tráfico y en las emisiones de contaminantes locales ( $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ ), que pueden tener las políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas, y su aplicación a un estudio de caso en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Los objetivos específicos de la investigación son los siguientes:

- Realizar un análisis de las políticas públicas aplicadas a nivel internacional para mitigar el impacto del Transporte Urbano de Carga –TUC–, con el fin seleccionar aquéllas más relevantes que sean susceptibles de modelación en una red de transporte y aplicables al estudio de caso en la ZMVM.
- Identificar los tipos de emisiones de contaminantes generados por el TUC, definir las variables involucradas en su medición, los criterios para su cuantificación y analizar el marco conceptual de los modelos para estimación de emisiones de contaminantes locales en México.
- Diseñar el método de recolección de información que permita identificar y cuantificar las modificaciones en las operaciones del transporte de carga que llevarían a cabo las empresas como respuesta a las políticas públicas.
- Generar diferentes grupos de escenarios de políticas públicas que combinen los tipos de modificaciones en las operaciones del TUC, para su análisis mediante modelos de asignación de tráfico multi-vehículo y de emisiones de contaminantes en la red vial de la ZMVM para los períodos pico y valle.
- Estimar el impacto en la congestión de tráfico y en las emisiones de contaminantes locales de la red vial en estudio a la hora pico y a la hora valle para los grupos de escenarios evaluados a partir de los resultados de flujos vehiculares, velocidades, kilómetros y tiempos de recorrido de los vehículos en la red, obtenidos de la asignación de tráfico para el sistema de TUC en la ZMVM.
- Estimar los impactos en cuanto a emisiones de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) para los grupos de escenarios evaluados a partir de los resultados de la asignación de tráfico en la ZMVM.
- Definir indicadores a partir de los resultados de modelación para la comparación de los escenarios analizados en cada grupo y seleccionar los mejores escenarios de los grupos conformados, de acuerdo con los indicadores propuestos.

- Proponer con base en el desarrollo de la investigación, el procedimiento para evaluar los impactos en el tráfico y en las emisiones de contaminantes locales que pueden tener las políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas con determinadas características, estableciendo los supuestos requeridos para su aplicación a otras zonas urbanas.

## 1.2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Se presentan a continuación los principales elementos que se tuvieron en cuenta para definir el problema de investigación, a partir de los cuales se estableció la hipótesis general de la investigación, que sirvió como marco general y directriz para el desarrollo de la metodología propuesta en este documento de tesis.

### 1.2.1 Impactos del Transporte Urbano de Carga

De acuerdo con Ogden (1992), abordar el análisis del sistema de transporte de carga y sus impactos es complejo y heterogéneo, debido básicamente a la multiplicidad de actores involucrados y como consecuencia de ello a las diversas percepciones de “el problema” a analizar. Este autor sugiere categorizar en tres áreas principales este análisis:

- Aspectos de desarrollo económico y su relación con el transporte de carga.
- Conceptos de eficiencia en el movimiento de carga.
- Minimización de los impactos adversos del transporte de carga.

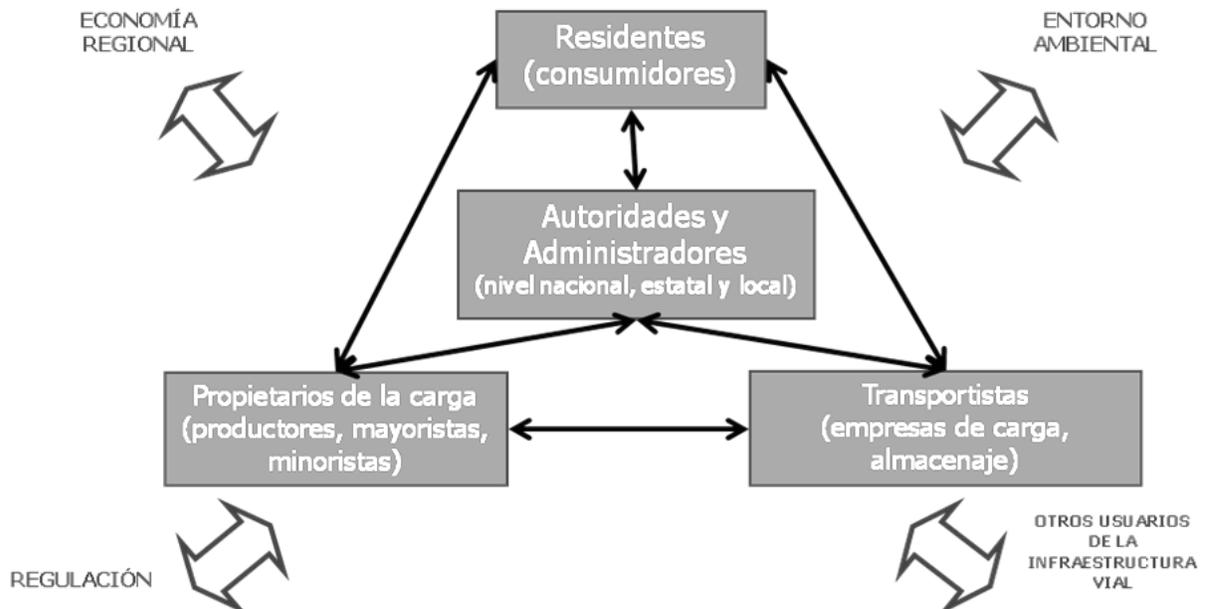
Estas áreas también son incluidas por otro investigador del tema (Taniguchi 2002, 2007) como factores clave a analizar en las zonas urbanas, para lo cual propone un nuevo concepto denominado “*City Logistics*”, el cual define la logística urbana o de ciudades como:

“El proceso para la optimización de las actividades de logística y transporte en áreas urbanas por parte de las empresas privadas, con el soporte de sistemas avanzados de información, considerando el sistema de tráfico, la congestión, la seguridad y los ahorros energéticos dentro del marco de la economía de mercado” (Taniguchi, 2002).

Dentro de la logística urbana, la exigencia de mayor competitividad a las industrias para poder cumplir con los plazos y con la calidad en las entregas, ha obligado a replantear los modelos de distribución urbana de mercancías, para reducir inventarios y almacenaje, y a que se desarrollen infraestructuras y servicios de distribución, transporte y logística de mayor calidad para cubrir un mayor número de pedidos hacia más destinos, en el menor tiempo posible, con la consecuente afectación sobre el sistema de transporte urbano, en donde los flujos de carga hacen parte de este complejo sistema que debe ser compartido con el flujo urbano de pasajeros (Comi, 2005).

La logística urbana incluye diversas actividades de transporte de carga asociadas a la cadena de suministro tales como producción, distribución y comercialización, lo cual convierte su análisis en un complejo sistema en el que participan múltiples actores. Los principales actores de la logística urbana son los clientes, ya sean éstos los dueños de la carga (productores o mayoristas) o los receptores de la misma (minoristas o consumidores finales), quienes generan y demandan operaciones de transporte desde y hacia sus almacenes, puntos de venta, comercios, oficinas y hogares. En el estudio de la

logística urbana se debe involucrar a todos los actores del proceso del movimiento de carga mencionados, así como también a las autoridades, administradores del sistema, transportistas, a los otros usuarios del sistema de transporte no involucrados con la carga y por supuesto a la sociedad en general. Adicionalmente, el entorno en el que se desarrolla el proceso logístico urbano debe ser el marco de análisis del sistema, el cual incluye principalmente a la economía regional, a la infraestructura y servicios del transporte y las condiciones ambientales y legales (regulación) del entorno (ver Figura 1-1).



Fuente: adaptado de "Innovations in Freight Transport". Taniguchi (2002)

**Figura 1-1 Actores y Entorno del Transporte Urbano de Carga**

Las actividades del transporte de carga generan una serie de costos económicos, sociales y ambientales, que no son cubiertos por los prestadores del servicio: son las denominadas externalidades, definidas como el costo impuesto a alguien que no está directamente implicado en el movimiento de carga pero que se ve afectado por el mismo, como es el caso de la congestión, la contaminación del aire o el ruido producidos por la operación de los vehículos de carga (Ogden, 1992). Dependiendo del punto de vista del actor analizado los costos pueden variar, por ejemplo, los costos de inversión, operación y almacenamiento son costos directos para los dueños de la carga o para los transportistas; mientras que el tiempo de viaje y los costos por accidentes son pérdidas (costos negativos) para otros actores involucrados, la comunidad (BestUFS.NET, 2006a). Donde existan costos externos que no son responsabilidad del sector privado o donde exista la probabilidad de que éstos no sean incorporados a la economía de mercado, se requiere la intervención del estado para lograr la equidad social.

Teniendo en cuenta lo anterior, la implementación de políticas tendientes a reducir el costo social del movimiento de carga es un compromiso del Estado, de tal forma que se logre simultáneamente el objetivo de un nivel mínimo de afectación a la sociedad junto con el cumplimiento de los requerimientos de carga que ésta demanda. El gobierno debe internalizar los costos externos y proteger al público de las externalidades negativas (Ogden, 1992).

### 1.2.2 Importancia de la Evaluación Ex -ante de Políticas Públicas Aplicadas al Transporte Urbano de Carga

El transporte urbano de carga es una actividad fundamental para el desarrollo económico de los centros urbanos. Corresponde al Estado definir el marco normativo y social para que esta actividad pueda darse en condiciones de equidad para cada una de las partes involucradas. Tanto el sector privado como el gubernamental tienen importantes papeles que cumplir para lograr la provisión de la infraestructura requerida para los servicios de transporte de carga, bajo estándares de calidad y seguridad, con criterios de eficiencia y sostenibilidad ambiental.

El objetivo de la logística urbana es asegurar un desempeño eficiente del transporte urbano de carga y del proceso de suministro de mercancías en las áreas urbanas, para lo cual es deseable minimizar los costos internos de la operación del transporte, los costos externos del transporte y los costos sociales para la comunidad. Un sistema eficiente de transporte urbano contribuye al desarrollo de la economía y el empleo regional o nacional, especialmente para apoyar a las empresas comerciales y hacer los sectores económicos más competitivos (BestUFS.NET, 2006a).

Las autoridades encargadas de la gestión y administración de los sistemas de transporte urbano requieren de herramientas que les permitan tomar decisiones acertadas y oportunas para afrontar este reto. Lo anterior puede ser alcanzado mediante las políticas públicas aplicadas al transporte y en particular al transporte de carga en zonas urbanas.

Una política pública de transporte se puede definir como un grupo de objetivos y metas, así como las acciones que se derivan de ellos para mejorar las condiciones de operación del transporte, sus procesos y mitigar los impactos negativos, como parte de una política general, ya sea ésta municipal, regional o estatal (BestUFS.NET, 2006a).

La implementación inmediata de las medidas sobre el sistema de transporte de carga, fundamentadas en las políticas propuestas por el Estado no son suficientes por sí mismas para asegurar el éxito del objetivo propuesto, se hace necesario analizar y estimar previamente los efectos de la aplicación de tales políticas públicas sobre el sistema de transporte en general con el fin de valorar y evaluar su efectividad como parte del proceso de planificación. Una herramienta fundamental para este proceso de evaluación es la modelación, la cual permite estimar ex ante los impactos de las políticas sobre el sistema de transporte urbano.

Contar con una herramienta confiable para la evaluación ex ante es la clave en la toma de decisiones que se ocupan de la elección de medidas para el transporte de carga; varios estudios han demostrado que las mejores soluciones provienen de la combinación de varias de estas medidas (Filippi *et al.*, 2010). Los modelos deben describir el comportamiento de los principales actores, incorporando las actividades de los dueños de la carga como son los volúmenes en movimiento, las operaciones de carga y descarga de las mercancías, el flujo de tráfico sobre las vías urbanas tanto de vehículos de carga como de pasajeros y, a partir de la modelación, calcular el costo de las actividades logísticas, la congestión, las emisiones de contaminantes y los niveles de ruido, entre otros (Taniguchi, 2002).

Generalmente las políticas públicas para mitigar el impacto del transporte de carga son de tipo restrictivo no ofreciendo alternativas a los transportistas y a los dueños de la carga, quienes reaccionan en forma diversa ante esta situación (Quak, 2006). Ejemplos de estas medidas son las prohibiciones de circulación en ciertas zonas o vialidades, la designación de horarios para carga y descarga en la vía pública, las limitaciones de peso vehicular en ciertas vías, el uso de carriles exclusivos, o las ventanas de tiempo para recepción y entrega de mercancías. Sin embargo y a pesar del crecimiento de la

investigación en distribución urbana y logística, se ha realizado poco trabajo con respecto al efecto que puedan tener estas políticas y medidas impuestas al movimiento de carga, y sobre la respuesta de los transportistas y de los dueños de la carga a éstas, y de sus efectos e impactos en la operación, en los costos y en el medio ambiente (Quak, 2006).

### 1.2.3 Impactos en la Calidad del Aire Generados por el Transporte Urbano de Carga

Aunque los avances en los sistemas logísticos, que incluyen como parte fundamental de la cadena de suministro al transporte de carga, han producido beneficios en términos de eficiencia y productividad tanto para las industrias como para los consumidores, también han generado efectos adversos. Diversas investigaciones y estudios coinciden en que estos impactos adversos están dados por el incremento en los niveles de tráfico y congestión; problemas de accesibilidad; impactos negativos al medio ambiente como ruido, contaminación del aire y vibraciones; alto consumo de energía y combustibles, así como accidentes relacionados con los vehículos de carga (Taniguchi, 2002; OECD, 2003; Janic, 2007).

De los efectos antes mencionados, el impacto en la calidad del aire es el aspecto que mayor interés ha generado en la investigación reciente, debido a que contribuye de manera importante<sup>1</sup> a las emisiones globales de contaminantes así como a la contaminación local del aire y a la reducción de la calidad del medio ambiente en general en las áreas urbanas. Según el último reporte de la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA, 2011), en América del Norte el transporte ocupa el segundo lugar entre los sectores que más contribuyen a las emisiones de CO<sub>2</sub> (el primero corresponde a la electricidad). En cuanto a las emisiones del transporte de carga, las emisiones de CO<sub>2</sub> representaron el 7.8% de las emisiones totales de Estados Unidos en el año 2008 y el 8% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en Canadá para el año 2007. En México, según este mismo informe, el sector transporte en su totalidad generó el 18% de las emisiones totales en 2002.

Según las proyecciones de la CCA, las emisiones del transporte de carga seguirán elevando su participación frente a las del transporte de pasajeros en los tres países mencionados, sin embargo, la mayor parte de los estudios metropolitanos de contaminación del aire por fuentes móviles enfatizan el análisis para vehículos de pasajeros, con mínima atención al papel del movimiento urbano de carga, además de que se conoce muy poco sobre la distribución espacial de estas emisiones (Kanaroglou, 2008).

El transporte de carga en camiones en términos de tonelada-kilómetro y vehículo-kilómetro ha crecido proporcionalmente más que el producto interno bruto en algunos países. El desarrollo de la logística es causa de este crecimiento, dado que los dueños de la carga prefieren alta flexibilidad y control en los movimientos de la carga en la cadena de suministro (Rothengatten, 2003), por esto la escogencia modal en varios países ha cambiado hacia las carreteras (que conectan y en el caso de México muchas veces atraviesan las áreas urbanas), generando retos a las autoridades de planificación para reducir las emisiones generadas por el incremento del transporte de carga en estas vías. Las emisiones del transporte han aumentado de manera constante en Norteamérica durante los últimos 40 años y su crecimiento más acelerado se registra en México (CCA, 2011).

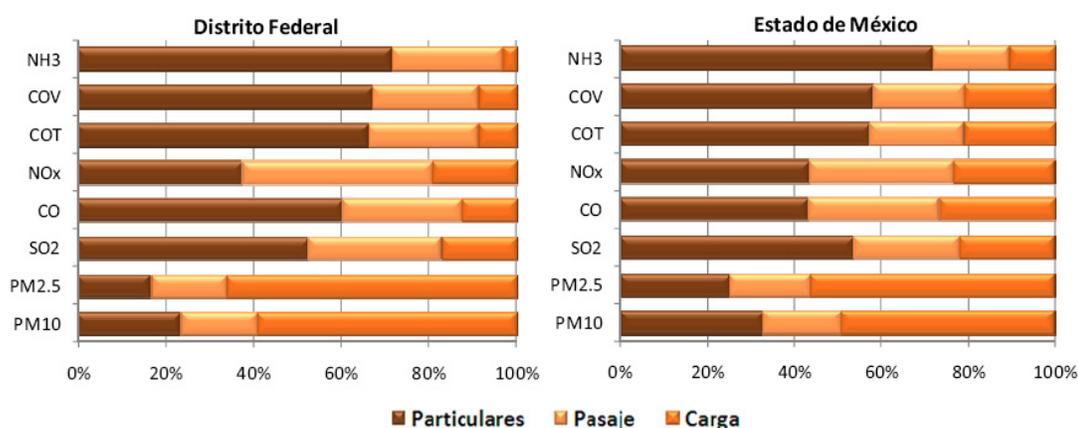
---

<sup>1</sup> El transporte (en todos sus modos, incluido el de pasajeros) es de los sectores que más contribuyen a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la mayoría de los países: representó el 23% (mundial) y el 30% (naciones de la OCDE) de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la quema de combustibles fósiles en 2007. (CCA, 2011)

### 1.2.4 Impactos del Transporte de Carga en la Zona Metropolitana del Valle de México

En México existen estudios integrales sobre emisiones anuales de contaminantes en áreas urbanas (inventarios de emisiones<sup>2</sup>) que estiman las emisiones por tipo de fuente: puntuales, de área, móviles y fuentes naturales. Actualmente se cuenta con inventarios para varias zonas urbanas, entre ellas la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

Para el año 2008, de acuerdo con el último inventario de emisiones de fuentes móviles para la ZMVM (SMA-GDF, 2010), las emisiones de los vehículos de carga (que representan el 7% del total de vehículos) son las que se aprecian en la Figura 1-2, en donde se observa que estos vehículos aportan el 55% de las partículas suspendidas de tamaño  $PM_{10}$  y el 62% de las de tamaño  $PM_{2.5}$ ; respecto a los precursores de ozono, participan con el 21% de los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y el 14% de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)<sup>3</sup>.



Fuente: Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM – 2008. (SMA-GDF, 2010)

**Figura 1-2. Contribución de Emisiones de Vehículos por Tipo de Uso y Entidad**

De acuerdo con el análisis que incluye el Inventario de Emisiones mencionado, se afirma que:

“...el constante crecimiento de la población en la ZMVM, ha ocasionado que la oferta de los servicios también se vaya incrementando, dando como resultado una mayor movilización de mercancías para satisfacer la demanda de la población. Se ha observado que los vehículos de carga han reducido sus velocidades y han aumentado la longitud del viaje, por lo cual sus emisiones son cada vez mayores.” (SMA-GDF, 2010).

Pese a la anterior afirmación, durante la revisión bibliográfica de este trabajo de investigación no se encontraron estudios integrales para la ZMVM en donde se trate particularmente el impacto del transporte urbano de carga, tanto en la congestión como en las emisiones, ni sobre los efectos de

<sup>2</sup> “El inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento para la gestión de la calidad del aire. Permite conocer los diferentes tipos de fuentes emisoras de contaminantes, así como los tipos de contaminantes que emite cada una de ellas. Están integrados por fuentes de punto (industrias), fuentes de área (comercios, servicios, casas habitación), fuentes móviles (vehículos particulares, taxis, camiones de carga, autobuses, etc.) y fuentes naturales (erosión de suelo y emisiones biogénicas)” (SEMARNAT, 2008).

<sup>3</sup> Compuestos Orgánicos Volátiles (COV): son hidrocarburos emitidos a la atmósfera generalmente por fuentes de combustión o de evaporación. Los COV son importantes precursores de la formación de ozono, así como precursores de partículas secundarias (Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999).

algunas políticas de restricción aplicadas al transporte urbano de carga. En el “Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México” (Lozano *et al.*, 2006a, b, c y d), realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la Comisión Ambiental Metropolitana, se abordó el tema como impacto global (en los segmentos de la red vial principal utilizada para el transporte de carga) de las emisiones de algunos contaminantes.

### **1.3 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

Con el propósito de mitigar los efectos adversos del transporte de carga mencionados en párrafos anteriores, las autoridades diseñan políticas públicas a partir de las cuales se expiden normas y reglamentos generalmente restrictivos para los vehículos de carga. Según la revisión bibliográfica realizada, existe poca investigación con respecto al efecto que puedan tener estas políticas y medidas en la operación, en los costos y en el medio ambiente. El análisis de los efectos e impactos que las políticas públicas tienen sobre el transporte de carga en zonas urbanas, fundamentado en modelos de redes de transporte, no ha sido estudiado en forma amplia, existen algunos estudios de caso particulares para algunas ciudades (Filippi *et al.*, 2010; Buliung, 2008; Quak, 2006), por lo que esta investigación hace aportaciones importantes para esta área del conocimiento.

Las cifras muestran que las emisiones de contaminantes provenientes de las actividades del transporte de carga tienen una participación importante dentro de las emisiones totales en las zonas urbanas, por lo cual es fundamental que el Estado regule esta actividad en búsqueda de la equidad social y ambiental. Sin embargo, se requiere que la implementación de las medidas sobre el sistema de transporte de carga esté precedida por estudios y evaluaciones que permitan estimar los posibles impactos de estas políticas sobre los diversos actores del sistema de transporte urbano.

La hipótesis inicial sobre la cual se fundamentó esta investigación es la comprobación de si las restricciones impuestas por las políticas públicas a los vehículos de carga en zonas urbanas generan una reducción en los niveles de congestión y en las emisiones totales de contaminantes. La prueba de esta hipótesis se basó en un proceso fundamentado en modelos de flujo en redes y aplicado a un estudio de caso en la Zona Metropolitana del Valle de México.

### **1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO DE TESIS**

El documento que se presenta a continuación está conformado por siete capítulos, en los cuales se presentan los resultados de esta investigación doctoral, partiendo de este primer capítulo introductorio en donde se plantean los objetivos de la investigación, los antecedentes que generaron la hipótesis de investigación así como el planteamiento del problema a abordar.

En el Capítulo 2 se presenta el resumen sobre las políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas de diferentes países industrializados y en países en desarrollo, así como también los enfoques de diferentes investigadores sobre cómo se han realizado las evaluaciones de las políticas del transporte urbano de carga en diferentes entornos urbanos. Este capítulo incluye también un resumen sobre el marco conceptual para la formulación de políticas, así como la revisión sobre la normatividad vigente en la Zona Metropolitana del Valle de México relacionada con medidas que afectan al transporte de carga. Con base en la revisión realizada en este capítulo, se definen al final del mismo las políticas que pueden ser aplicadas en la ZMVM.

En el Capítulo 3, se explica tanto el proceso como los resultados de las entrevistas realizadas para conocer las respuestas operativas de los propietarios de los vehículos de carga de la ZMVM ante la implementación de las políticas públicas seleccionadas en el capítulo anterior. Se presentan la identificación de las variables de medición, el diseño de la muestra a partir de la población de vehículos y de propietarios en la zona de estudio y, la selección final de las empresas entrevistadas. El procesamiento estadístico detallado para la obtención de las estimaciones de las respuestas se presenta en el Anexo 1.

El Capítulo 4 contiene la revisión del estado del arte realizada para conformar el marco teórico de los tipos de modelos de redes y de factores de emisiones de contaminantes que fueron seleccionados para el proceso de evaluación de escenarios.

Una vez definida en el Capítulo 2 la política de restricción por ventanas de tiempo como la política a evaluar para la ZMVM, y teniendo en cuenta los resultados de las entrevistas analizados en el Capítulo 3, se presenta en el Capítulo 5 el procedimiento desarrollado para la selección y definición de los escenarios de evaluación. Inicialmente se hace un resumen de los antecedentes de las acciones que se han llevado a cabo recientemente en la ZMVM relacionadas con el transporte de carga, para entender el contexto de la política seleccionada, para posteriormente entrar en el detalle de la información y definición de quince escenarios de evaluación.

En el Capítulo 6 se realiza el análisis de los resultados de la evaluación de los escenarios, el cual se basa en los resultados gráficos y numéricos de la asignación de tráfico multi-vehículo, así como en el cálculo de los indicadores de evaluación tanto de desempeño operacional (tiempos y recorridos) como en los de emisiones de contaminantes locales ( $\text{NO}_x$  y CO).

El Capítulo 7 contiene la descripción de las etapas de la metodología propuesta en desarrollo de esta investigación doctoral para la evaluación de políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas.

Finalmente, se presentan las conclusiones generales de la investigación junto con las referencias bibliográficas del documento.

## 2 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EL TRANSPORTE URBANO DE CARGA

En este capítulo se presenta el estado del arte sobre las políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas de diferentes países industrializados, las medidas más comúnmente aplicadas en países en desarrollo, así como también los enfoques de diferentes investigadores sobre cómo se han realizado las evaluaciones de las políticas del transporte urbano de carga en diferentes entornos urbanos.

Como marco de referencia, se incluye la definición de política pública en el contexto del transporte, un resumen sobre el marco conceptual para la formulación de políticas y la revisión sobre la normatividad vigente en la Zona Metropolitana del Valle de México relacionada con medidas que afectan al transporte de carga, puesto que no existe como tal una política integral en el tema.

Con base en la revisión realizada en este capítulo, se definen también aquellas políticas que pueden ser aplicadas de acuerdo con el contexto urbano y de planeación actual en la ZMVM, y cuya evaluación pueda ser realizada con modelos de redes.

### 2.1 PRINCIPALES POLÍTICAS PÚBLICAS EN EL ÁMBITO DEL TRANSPORTE URBANO DE CARGA

De acuerdo con la revisión bibliográfica, existen múltiples y diversas medidas en el mundo asociadas a la mitigación de los impactos generados por el transporte de carga en las zonas urbanas, sin embargo no siempre se encuentran enmarcadas dentro de una política oficial. El resumen que se presenta a continuación corresponde a políticas contenidas dentro de programas, planes o investigaciones específicas para el transporte de carga, tales como: en Europa, el programa “*Best Urban Freight Solutions*” (BestUFS, 2005, 2006, 2007 y 2008); el plan “*Transport for London, 2007*” y las investigaciones de Hans Quak, 2007. En Japón, la investigaciones del grupo de Eiichi Taniguchi (2002, 1999) y finalmente las propuestas por Ogden en 1992.

La clasificación utilizada corresponde a criterios de los documentos *BestUFS* antes mencionados así como a la clasificación de algunas de las estrategias del “*London Freight Plan 2007*”. En esta clasificación se incluyeron las políticas propuestas por los otros autores de la revisión del estado del arte en esta materia.

Las medidas utilizadas en países en desarrollo para mitigar el impacto del transporte de carga se presentan en el numeral 2.2, teniendo en cuenta que existen diferencias en cuanto a contextos de aplicación y en cuanto a niveles de avance en planeación de sistemas urbanos de carga con respecto a los países industrializados.

#### 2.1.1 Políticas para Promover el uso Eficiente de la Infraestructura Vial

Las políticas para promover el uso eficiente de la infraestructura vial son medidas dirigidas a optimizar el uso de la infraestructura cuando no es posible aumentar el espacio en las vías públicas y a minimizar los impactos negativos de las actividades de carga en las comunidades locales. También incluyen acciones para que las empresas de transporte optimicen su eficiencia operacional

y de esta forma logren reducir la congestión del tráfico generada por operaciones de carga en zonas con limitación de espacio o en áreas congestionadas.

Las acciones encaminadas a un mejor uso de la infraestructura vial son:

- Definición de zonas para carga/descarga en las vías.
- Construcción de muelles para manejo de carga en calles estratégicas.
- Utilización de barreras físicas para acceso restringido a vehículos de carga, tales como postes retráctiles para dar paso solo a vehículos autorizados.
- Posibilidad de contar con sitios de almacenaje a corto plazo.
- Construcción de ayudas para el trasbordo de mercancías, como rampas mecánicas.
- Manejo de señalización adecuada para los conductores.
- Establecimiento de carriles para uso exclusivo de camiones.

Para las empresas y transportistas:

- Uso de telemática para el transporte urbano de mercancías (tecnologías avanzadas de información y de comunicación) tales como:
  - Paneles con mensajes que transmiten información en tiempo real.
  - Bases de información y mapas para facilitar el transporte urbano de mercancías.

Las autoridades también pueden promover la optimización en el uso de la infraestructura permitiendo entregas nocturnas o en horarios no pico.

### **2.1.2 Políticas para la Reducción del Impacto Ambiental**

En la categoría de políticas para la reducción del impacto ambiental, se incluyen medidas para la minimización de los impactos sociales y ambientales causados por los vehículos de carga, procurando cumplir con los estándares ambientales, las regulaciones y los objetivos de reducción de emisiones de contaminantes; entre éstas se encuentran:

- Contar con una normatividad común y simplificada sobre peso, tamaño y características de fabricación de los vehículos.
- Establecer normas específicas sobre emisiones de contaminantes para vehículos de carga.
- Definir normas de horario para acceso de vehículos y para carga/descarga de mercancías.
- Permitir entregas nocturnas, unido a normas sobre emisiones de control de ruido.
- Definir zonas ambientales, entendidas como aquellas áreas en la que sólo pueden entrar vehículos que cumplan ciertos criterios de emisiones de contaminantes, lo cual se une al fomento del uso de vehículos ecológicos.

### **2.1.3 Políticas para Disminuir el Número de Desplazamientos y de Kilómetros Recorridos por los Vehículos de Carga**

Las políticas para disminuir el número de desplazamientos y de kilómetros recorridos por los vehículos de carga son medidas que recomiendan y en muchos casos obligan a los conductores de vehículos de carga a reducir el número de viajes y también evitan que transiten por lugares

inadecuados o sensibles como las zonas altamente congestionadas o las zonas residenciales. También buscan asegurar que la carga se mueva eficientemente reduciendo viajes innecesarios, minimizando distancias de viaje y maximizando el volumen de carga movilizado.

Se incluyen acciones de tipo fiscal como las tasas; de reglamentación como los corredores de carga; o de organización logística como las plataformas urbanas y centros de consolidación:

- Cobro de tasas de circulación en corredores o zonas específicas.
- Establecimiento de rutas para camiones y corredores de carga, definidos como rutas específicas para el uso de camiones, las cuales pueden ser del tipo “sugerida” u obligatoria. Las rutas “sugeridas” son sistemas de vías que se hacen atractivos para uso de camiones, mientras que las rutas obligatorias corresponden a un sistema en el cual existen prohibiciones legales a los camiones para usar vías que no sean designadas para ellos.
- Prohibiciones de circulación: son estrategias locales para rutas o zonas, y algunas veces regionales que restringen el paso de vehículos de carga. Pueden incluir señalización, diseño geométrico restringido para camiones (horizontal y vertical) y uso de carriles exclusivos. Estas medidas también pueden ser aplicadas sólo a ciertas horas del día.
- Organización de áreas de reparto de proximidad con plataformas urbanas de transbordo, en las que personal especializado proporciona asistencia para el tramo final del envío.
- Localización y adecuación de centros de consolidación urbanos y terminales de carga considerando los usos del suelo, la accesibilidad y otras opciones que involucren el medio ambiente y la comunidad.
- Uso de telemática en el transporte urbano de mercancías: señalización en tiempo real; información y mapas para el transporte urbano de mercancías.

Merecen especial atención las denominadas Ventanas de Tiempo (“*time windows*”), en donde se hace uso de restricciones de acceso por períodos, lo cual obliga a realizar actividades de distribución en un periodo específico del día; pueden ser aplicadas para acceso a zonas, vías o para realizar operaciones de la carga en períodos específicos.

#### **2.1.4 Políticas para Incentivar la Eficiencia de los Transportistas de Carga Urbana**

Las políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas de carga urbana están enfocadas a cumplir con estándares laborales y regulaciones del transporte con el fin de lograr un mejor desempeño de los transportistas, así como también para reconocer el cumplimiento de los estándares ambientales y promover mejores prácticas para hacer más eficiente el consumo de combustibles con recompensas a los operadores que alcancen dichos estándares (“Credenciales de operadores sostenibles” y “*benchmark*” de operadores).

Algunas de las acciones que buscan este objetivo son las siguientes:

- Promoción del uso de combustibles alternativos y de vehículos de baja producción de carbono.
- Creación de una interfase de información de transporte de carga entre autoridades y operadores.
- Facilitación de sistemas de transporte de carga cooperativos, en los cuales un grupo de transportistas de carga operan juntos los vehículos de carga, los terminales o los sistemas de información para reducir costos de recolección y envío de mercancías, y dar mayor nivel de servicio a los clientes. El grupo de transportistas se une para hacer más eficiente el transporte de la carga y reducir el número de camiones, lo cual reduce costos de transporte e impacto ambiental.

- Control a los factores de carga: son iniciativas novedosas que buscan incentivar el uso eficiente de la capacidad de carga de los camiones, ofreciendo ventajas de operación a aquellos transportistas que cumplan con factores de carga superiores al 60%.

### **2.1.5 Políticas Específicas para Reducción de Emisiones de Contaminantes**

Dada la importancia de las emisiones de contaminantes, se plantean políticas específicas para reducción de emisiones generadas por el transporte de carga, tales como:

- Cobro de tasas o cuotas por uso de vías.
- Cambio modal (uso de modos diferentes a las carreteras, como vías fluviales o ferroviarias).
- Acciones para hacer más eficiente la distribución de mercancías: centros logísticos, sistemas de información.
- Entregas en horarios no pico y nocturnos.
- Consolidación de carga para algunos sectores específicos: construcción, materiales para oficinas, alimentos, etc.
- Uso de combustibles alternativos y de vehículos con baja emisión de carbono.

En la sección 2.6 se ampliará la descripción de aquellas políticas que fueron seleccionadas para la siguiente etapa de la investigación, cuyos criterios de selección fueron su aplicabilidad al contexto de la zona del estudio de caso y la factibilidad de ser modeladas en un sistema de redes de transporte.

## **2.2 PRINCIPALES POLÍTICAS PÚBLICAS EN LAS CIUDADES EN DESARROLLO**

Las medidas recomendadas para mitigar el impacto del transporte de carga en el documento desarrollado por la Agencia Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ), “Transporte Urbano de Carga para Ciudades en Desarrollo-Módulo 1g” (G.I.Z., 2011) no difieren en gran medida de las acciones descritas en el numeral 2.1 de este capítulo, referidas a países industrializados. La principal recomendación del estudio mencionado en relación con la aplicabilidad de las medidas exitosas en otros países es la adaptación y evaluación de éstas para utilizarlas en cada zona urbana en particular.

El movimiento de carga en las ciudades de los países industrializados se encuentra asociado a tendencias diferentes a las que generalmente se encuentran en las zonas urbanas de los países en desarrollo. En estos últimos, fenómenos como la alta densidad poblacional o el incremento acelerado de la población urbana son comunes, así como el rezago en el desarrollo de la infraestructura de transporte y sus servicios. Además se caracterizan por la diversidad del parque vehicular tanto en tecnología como en edad, la fragmentación de las industrias y de sus cadenas productivas, y la existencia de sectores informales en la cadena de distribución (ventas ambulantes, uso de vehículos inadecuados) (G.I.Z, 2011). Dado lo anterior, las medidas exitosas en países industrializados no necesariamente son modelos apropiados para estos contextos urbanos; es necesario evaluar individualmente las medidas y adaptarlas a las condiciones del sistema de transporte local.

A diferencia de las ciudades en Europa, donde la planeación del transporte de carga se ha dirigido a la preservación de centros históricos o a la protección de los residentes ante la contaminación ambiental (emisiones, vibraciones y ruido), las medidas para el transporte de carga en las ciudades

de países en desarrollo se han concentrado principalmente en acciones para la reducción de la congestión; generalmente son reactivas, es decir, se implementan ante la necesidad de resolver un problema urgente y pueden ser menos sofisticadas que las utilizadas en otros contextos. Sin embargo, algunas áreas metropolitanas como Manila o Bangkok las cuales tienen más de treinta años de experiencia en políticas de carga, han implementado terminales públicas para transporte de carga e impuesto prohibiciones a los camiones, para reducir la congestión durante las horas pico (G.I.Z, 2011).

La implementación de medidas debe tener en cuenta el patrón de desarrollo de cada ciudad y el punto de partida en cuanto a políticas y planeación del transporte de carga en la zona urbana, ya que esto define el plazo de ejecución: corto (hasta un año), mediano (entre uno y cinco años) o largo plazo (mayor a 5 años). Las medidas básicas recomendadas y categorizadas de acuerdo con el actor principal que las puede liderar, se muestran en la Tabla 2-1:

**Tabla 2-1. Medidas Recomendadas para el Transporte Urbano de Carga en Ciudades en Desarrollo**

<b>ACTOR PRINCIPAL</b>	<b>CATEGORÍA</b>	<b>MEDIDAS</b>	<b>HORIZONTE</b>
Gobierno Local	Gestión de tráfico	Restricciones de acceso	Corto
		Cuotas por uso de vías	Mediano
		Control y fiscalización	Corto
		Gestión del espacio	Corto-mediano
	Ingeniería de tráfico	Zonas de carga y gestión de tráfico local	Corto-mediano
		Zonas de descarga en alrededores	Mediano
Planeación urbana	Planes integrales	Mediano-largo	
Gobierno Nacional/Estatal	Política nacional de desarrollo	Marco legal, políticas económicas y de planificación del territorio	Mediano-largo
	Política ambiental	Estándares de emisiones	Corto-largo
		Impuestos y tasas selectivas	Corto-largo
		Régimen de verificación de vehículos	Mediano-largo
Política del sector transporte	Regulación de impuestos, tarifas y licencias	Mediano-largo	
Sector privado	Mejorar la eficiencia logística	Consolidación de carga	Mediano-largo
		Mejorar eficiencia en distribución y diseño de las rutas	Corto-mediano
		Proveedores de logística zonales	Largo
		Tecnologías de información	Largo

Fuente: Adaptado de “Transporte Urbano de Carga para Ciudades en Desarrollo-Módulo 1g” (G.I.Z., 2011)

Aunque las soluciones de corto plazo pueden proporcionar cierto alivio en los impactos generados por el transporte de carga, se requiere una política con visión sistémica sobre desarrollo urbano, usos del suelo y planeación del territorio para lograr una adecuada planeación de los sistemas urbanos de carga. Sin embargo, como se mencionó en párrafos anteriores las ciudades en desarrollo se caracterizan por acciones reactivas ante los problemas urgentes y los procesos de evaluación para medir la posible efectividad de la medida o la consulta con los actores involucrados, así como el monitoreo y evaluación posterior muchas veces son inexistentes.

### 2.3 CONCEPTO DE PLANEACIÓN Y EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DEL TRANSPORTE URBANO DE CARGA

La evolución de los conceptos de la planeación del transporte de carga urbano ha estado asociada al desarrollo de las zonas urbanas y al desarrollo tecnológico de los sistemas de distribución de carga. La urbanización implica un gran número de personas aglomeradas en un área generalmente alejada de las fuentes primarias de alimentos, de las materias primas para la industria, de los mercados para estas industrias y de los lugares para disponer de los desechos. Estas zonas urbanas requieren de un flujo continuo y confiable de bienes hacia ellas y dentro de las mismas (Ogden, 1992).

En las tres últimas décadas ha habido una evolución en los sistemas de distribución de carga como consecuencia de la transformación de los sistemas logísticos generados por la industria, en respuesta al proceso de globalización, que involucra tanto los procesos de intercambio económico mundial como los sistemas de transporte que soportan los flujos de mercancías que éstos propician (Lyons, 2007).

Los sistemas de transporte Justo a Tiempo (JIT) son un ejemplo de estos nuevos requerimientos del transporte de carga que demandan una eficiente y efectiva respuesta del sistema de transporte dentro de un área urbana, para cumplir con los términos de tiempo y calidad en las entregas. Sin embargo, esta percepción de eficiencia por parte de algunos de los actores involucrados en este proceso, como lo son las industrias y sus clientes, se contrapone a la percepción que pueden tener otros actores como la sociedad civil y las autoridades, que ven un problema en el incremento de vehículos de carga circulando en las vías urbanas y generando congestión, aumento en los niveles de ruido y contaminación del aire y otros impactos negativos (Taniguchi, 2002).

Esta múltiple y diversa percepción de los impactos tanto positivos como negativos del transporte urbano de carga requiere de una planeación integral por parte de las autoridades, con la participación de los sectores público y privado, para afrontar los problemas en forma coordinada y con resultados eficaces. Este planteamiento fue propuesto por Ogden (1992) y retomado por Taniguchi (2002) bajo el término logística urbana o “*City Logistics*”.

A partir de la revisión del estado del arte, fueron identificadas dos etapas en la investigación sobre planeación y evaluación de los impactos de la actividad del transporte de carga. Una primera etapa antes del 2006, donde varios autores de libros (ver Tabla 2-2) proponen evaluaciones integrales al sistema de transporte de carga, con una visión global de los impactos de esta actividad e involucran los recientes conceptos de logística urbana tales como: sistemas de información avanzados, terminales públicas de carga y regulación de los sistemas de carga, para obtener mayor eficiencia, menor congestión de tráfico y menores impactos ambientales.

En una segunda etapa, a partir del 2006 (ver Tabla 2-3), se hace énfasis en la evaluación de las políticas y medidas de logística urbana aplicadas al transporte de carga y principalmente en la valoración de sus efectos sobre el sistema de transporte, involucrando conceptos de modelación para estimar los impactos (Nakamura *et al*, 2008; Quak y De Koster, 2007); sin embargo, se continúa con las evaluaciones posteriores a la implementación de las medidas, hasta que Filippi *et al*, en 2010 proponen una metodología para la evaluación ex ante, con aplicación a un estudio de caso en el centro de Roma.

**Tabla 2-2 Recomendaciones para el Transporte Urbano de Carga antes del 2006**

AUTOR	AÑO	TEMA
Taniguchi E., Thompson R.G.	2002	<i>“Innovations in freight transport”</i> La logística urbana introduce aspectos relativamente nuevos para el proceso de planeación, tales como: el incremento en los niveles de congestión, los impactos ambientales y la conservación de energía. Se propone ampliar la investigación en áreas tales como la modelación de sistemas urbanos de transporte de carga; la evaluación y benchmarking de escenarios de logística urbana; nuevas técnicas de planeación y mejora en las técnicas de recolección de datos para modelación.
Taniguchi E., Thompson R.G.	2006	<i>“Recent Advances in City Logistics”</i> . Presenta un resumen de la modelación en transporte de carga y cómo ha evolucionado su enfoque. Se concluye que los modelos desarrollados para carga no están integrados con otros componentes de la movilidad urbana, como son los movimientos de pasajeros.
Taniguchi E., Noritake M., Yamada T., Izumitani T.	1999	<i>“Optimal size and location planning of public logistics terminals”</i> Metodología para estimar el tamaño óptimo, la localización y los impactos de centros logísticos con la introducción en el uso de sistemas avanzados de información del transporte para la planificación de las rutas e itinerarios de distribución.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-3 Recomendaciones para el Transporte Urbano de Carga desde 2006**

AUTOR	AÑO	TEMA
Holguín-Veras J., Torres C.A., Xuegang B.	2011	<i>“On the comparative performance of urban delivery vehicle classes”</i> Analizan los efectos en los costos sociales generados por una política de cambio de los camiones de carga grandes por camiones pequeños en la zona urbana de Oakland-California. El artículo muestra que una consecuencia de esta sustitución puede ser el aumento en los kilómetros recorridos, la cual es mayor al efecto en la reducción del costo social.
Filippi F., Nuzzolo A., Comi A., Delle Site P.	2010	<i>“Ex-ante assessment of urban freight transport policies”</i> Proponen una metodología para la evaluación ex ante de políticas (enfocado a emisiones de contaminantes). La aplicación de la metodología en el área central de Roma muestra que un centro de distribución urbano de mercancías puede ser más efectivo para reducir las externalidades ambientales, que las políticas basadas en la renovación de parque vehicular.
Holguín-Veras J.	2010	<i>“The truth, the myths and the possible in freight road pricing in congested urban areas”</i> Revisión de algunas políticas en EE.UU. Se concluye que la distribución en horarios no-pico y nocturnos requiere de políticas integrales dirigidas a los receptores de la carga y a los transportistas.

AUTOR	AÑO	TEMA
Quak H.J., Van Duinb J.H.R.	2010	<p><i>“The influence of road pricing on physical distribution in urban areas”</i></p> <p>Se analizan los probables efectos en los costos de la distribución logística generados por la futura política propuesta de cobro por uso de vías (kilómetros recorridos) en áreas urbanas de Holanda.</p>
Nakamura Y., Taniguchi E., Yamada T., Ando N.	2008	<p><i>“A macroscopic traffic simulator for evaluating measures for heavy vehicles”</i></p> <p>Analizan el efecto de medidas sobre el tráfico y las emisiones para el transporte urbano de carga (específicamente la prohibición de vehículos de carga sobre un corredor en Osaka) mediante simulación macroscópica, encontrando que el tiempo total de viaje y las emisiones disminuyen en el corredor con prohibición a la circulación de camiones pero se incrementa en la red total.</p>
Quak H.J., De Koster M.B.M.	2007	<p><i>“Exploring retailers’ sensitivity to local sustainability policies”</i></p> <p>Analizan el impacto de políticas de ventanas de tiempo en la distribución de carga, encontrando que las ventanas de tiempo tienen un impacto negativo en el medio ambiente y en los costos para los minoristas. Ellos presentan un estudio de caso en Holanda y encuentran que las ventanas de tiempo incrementan las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y las emisiones locales de PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> y CO.</p>
Best Urban Freight Solutions- (BESTUFS). Comisión Europea (D.G. Transporte y Energía)	2000 a 2008	<p>El proyecto BESTUFS incluye diversos documentos enfocados a identificar, describir y difundir las mejores prácticas, criterios de éxito y soluciones a los problemas originados por el transporte urbano de mercancías en Europa.</p>
Quak H.	2006	<p><i>“Distribution strategies under urban freight policy pressure”</i></p> <p>Trata de responder la pregunta: ¿Cuáles acciones son más efectivas para mejorar el desempeño de la distribución de carga en los mercados de las áreas urbanas, bajo la presión de las políticas públicas?</p> <p>El artículo desarrolla la combinación de dos tipos de medidas: ventanas de tiempo y restricciones a la capacidad de los vehículos, para un estudio de caso de una compañía de distribución de un minorista. El autor evalúa y compara a través de modelación de los diversos escenarios, el efecto de estas respuestas (acciones del empresario ante las políticas), en términos de desempeño operacional de los vehículos (kilómetros recorridos, número de vehículos, número de envíos, factores de carga, número de viajes, etc.), desempeño financiero (costos de transporte, de manejo y de inventarios) y efectos al medio ambiente (emisiones de CO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>).</p>

Fuente: Elaboración propia

## 2.4 DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS EN EL ÁMBITO DEL TRANSPORTE DE CARGA

Una política pública de transporte se puede definir como un grupo de objetivos y metas, así como las acciones que se derivan de éstos para mejorar las condiciones de operación del transporte, sus procesos y mitigar los impactos negativos, como parte de una política general, ya sea ésta municipal, regional o estatal (BestUFS.NET, 2006a).

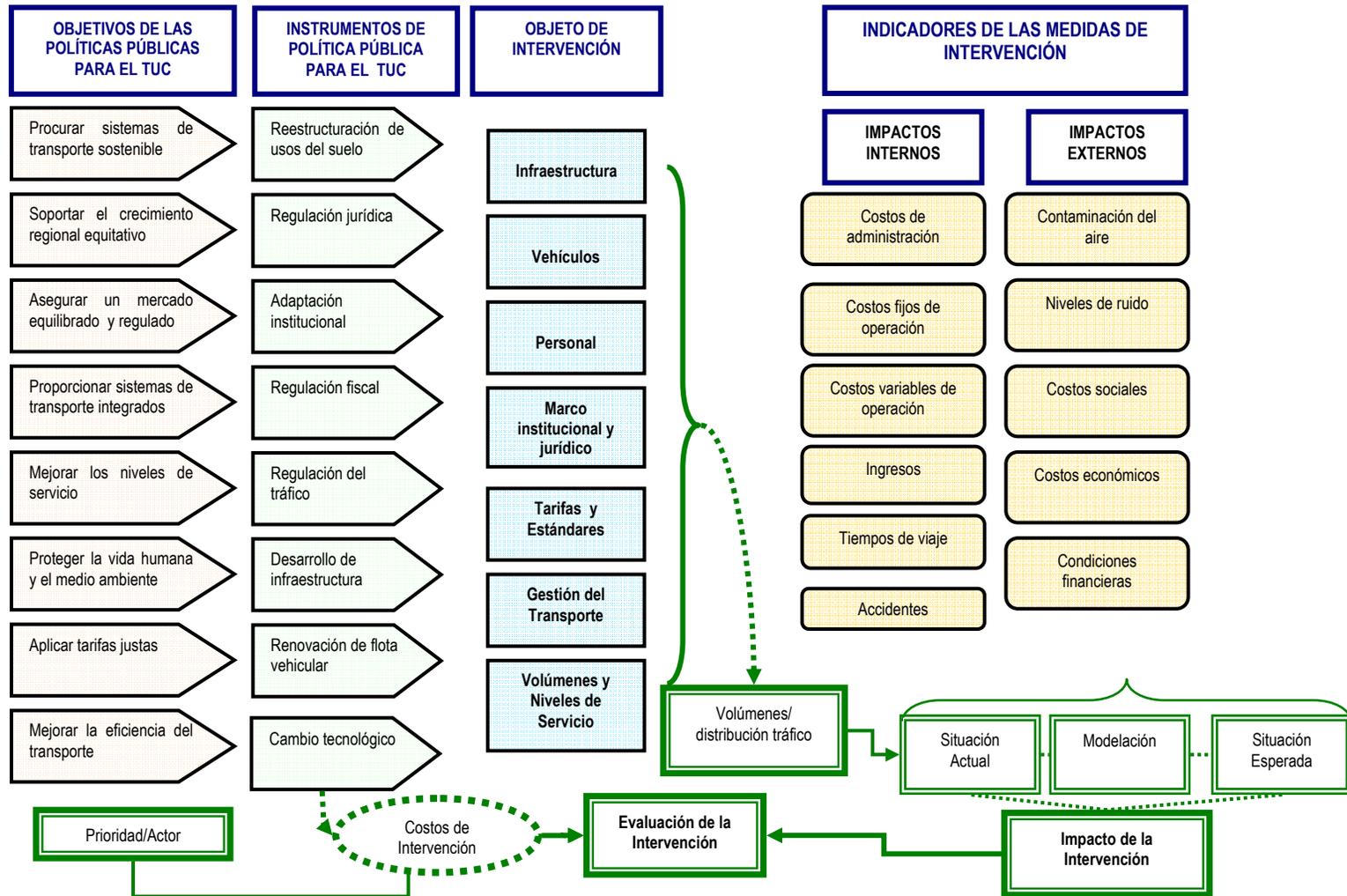
Las políticas de transporte son puestas en marcha a través de los instrumentos de política pública que a su vez utilizan una serie de acciones e intervenciones para alcanzar los objetivos.

En la Figura 2-1 se describe el proceso de formulación de las políticas públicas basado en “*Best Urban Solutions II. D5.2. Quantification of Urban Freight Transport Effects II*”. (BestUFS.NET, 2006), el cual inicia con la formulación de los objetivos y metas, los cuales se llevan a cabo mediante la aplicación de instrumentos de política tales como:

- La regulación de usos del suelo.
- La adaptación institucional para el logro de los objetivos.
- El desarrollo de la infraestructura requerida para el buen funcionamiento del sistema de transporte.
- Instrumentos específicos para las políticas ambientales como: la renovación de la flota o el fomento del cambio tecnológico en todos los procesos de la actividad del transporte urbano de carga.

Los objetos de intervención se definen en la cuarta columna, y a partir de éstos se diseñan los indicadores para medir la eficiencia de la aplicación de las políticas. Es muy importante en este proceso contar con herramientas que permitan evaluar ex ante la implementación de las acciones para valorar el impacto que tendrán en los volúmenes de tráfico y en general en el comportamiento del sistema de Transporte Urbano de Carga –TUC–.

Figura 2-1 Políticas Públicas en el Transporte Urbano de Carga (TUC)



Fuente: adaptado de "Best Urban Solutions II. D5.2. Quantification of Urban Freight Transport Effects II". BESTUFS.NET (2006)

## 2.5 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EL TRANSPORTE DE CARGA EN LA ZMVM

Para la Zona Metropolitana del Valle de México no existe una política integral para la mitigación de impactos del transporte de carga, solo se encuentra reglamentado un programa específico para la zona central del Distrito Federal denominado “Regulación del Transporte de Carga en el Centro Histórico de la Ciudad de México” que abarca el denominado perímetro “A” de esta zona (aproximadamente 15 cuadras a la redonda) y que prohíbe la circulación de los vehículos de carga mayores a 3.5 toneladas, en cualquiera de sus modalidades, en el horario comprendido entre las 7:00 y las 22:00 horas.

Varias de las medidas que han afectado el transporte de carga en algunas zonas y corredores, son consecuencia de diferentes acciones dentro de programas que conforman otras políticas con objetivos diversos (por ejemplo, los sistemas de carriles exclusivos para autobuses) pero que al ser puestas en marcha, afectan la circulación de los vehículos de carga y muchas veces restringen su paso por corredores que tradicionalmente han sido utilizados en forma intensiva por este tipo de vehículos.

Tal es el caso del programa de los Corredores Cero Emisiones, cuyo objetivo de acuerdo con la norma que lo establece es el siguiente:

“Se justifica el establecimiento del Corredor de Transporte Público de Pasajeros Eléctrico Cero Emisiones en el Eje Central Lázaro Cárdenas, con la finalidad de promover el desarrollo sustentable, eficiente y optimizar la capacidad de la red vial, reordenar el transporte público de pasajeros, reducir los tiempos de traslado de los pasajeros, disminuir la emisión de partículas contaminantes y en general, mejorar la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México.”(Gaceta Oficial del Distrito Federal-20 de julio de 2009).

Sin embargo, se reglamenta en otro documento como parte de esta medida dirigida específicamente al transporte de pasajeros, la prohibición a la circulación de vehículos de carga:

“...Artículo Segundo. Queda prohibida la circulación a los vehículos de carga mayores a 3.5 toneladas, así como aquellas unidades con una longitud mayor a 7.5 metros, en un horario comprendido de las 06:00 a las 23:00 hrs., en cualquiera de sus modalidades en el Eje Central, Lázaro Cárdenas, en el tramo comprendido entre Circuito Interior Río Churubusco a Circuito Interior Río Consulado. (Gaceta Oficial del Distrito Federal-17 de octubre de 2008).

Algo similar ocurre para el programa de corredores con carriles exclusivos para autobuses o Metrobus; aunque la normatividad no hace explícita la prohibición a la circulación de vehículos de carga en los carriles no confinados, existe una reglamentación anterior<sup>4</sup> que prohíbe su paso en ciertos horarios por las vialidades de las delegaciones Benito Juárez y Cuauhtémoc que son cruzadas por varias líneas de Metrobus, generando de hecho la prohibición a la circulación de vehículos de carga; además las adecuaciones a la infraestructura para estas vías diseñadas para vehículos de pasajeros, dificultan el paso de camiones de gran tamaño.

En Tabla 2-4 se resume la reglamentación vigente para vehículos de carga en la ZMVM:

<sup>4</sup> Gaceta Oficial del Distrito Federal - 24-07-1989

Tabla 2-4 Vialidades con Restricciones para el Transporte de Carga en la ZMVM

PROGRAMA	VIALIDAD	TRAMO CON PROHIBICIÓN VEHÍCULOS DE CARGA	HORARIO RESTRICCIÓN	TIPO VEHÍCULOS RESTRINGIDOS	EXENCIONES	NORMATIVIDAD
Corredores Cero Emisiones	Eje Central Lázaro Cárdenas	Circuito Interior Río Churubusco a Circuito Interior Río Consulado	6:00 a 23:00	>3.5 ton >7.5 mts	Vehículos conocidos como de “3.5 toneladas” y con longitud < 7.5 metros. Emergencia: bomberos, policía, ambulancia y grúas, entre otros. De servicios: Luz y Fuerza, recolección de basura, gas, paquetería, mensajería y traslado de valores, así como revolventoras y equipo de bombeo de concreto para la construcción. Transporte de productos frescos y perecederos (productos naturales o preparados que precisen conservación en condiciones de temperatura regulada o que tengan una duración máxima de 30 días) y transporte refrigerado	Aviso: 17-10-2008 Operación: 01-08-2009
	Eje 2 - 2A Sur: Metro Chapultepec - Metro Velódromo	Ninguno				Aviso 11-11-2010
Corredores Metrobus	L1. Av. Insurgentes	Confinamiento de Indios Verdes-Dr. Gálvez- El Caminero	Todo el día	Todos		Avisos 01-10- 2004 y 06-07-2007
	28.1 Km	Carriles no confinados en Delegaciones Benito Juárez y Cuauhtémoc (de Eje 2 Norte a Eje 8 Sur)	7:01 a 10:30 14:01-16:30 18:01-22:00	>3.5 ton		Gaceta 24-07-1989

PROGRAMA	VIALIDAD	TRAMO CON PROHIBICIÓN VEHÍCULOS DE CARGA	HORARIO RESTRICCIÓN	TIPO VEHÍCULOS RESTRINGIDOS	EXENCIONES	NORMATIVIDAD
	L2. Eje 4S (*ver ruta total abajo)	Carriles confinados Eje 4 Sur	Todo el día	Todos		Aviso 23-06- 2008
	20 Km	Carriles no confinados en Delegaciones Benito Juárez y Cuauhtémoc (de Eje 2 Oriente- Insurgentes)	7:01 a 10:30 14:01-16:30 18:01-22:00	>3.5 ton		Gaceta 24-07-1989
	L3. Eje 1 Poniente 17 Km	Carriles confinados en: Eje 1 Poniente (Cuauhtémoc), Eje 1 Poniente (Calzada Vallejo), Eje 1 Poniente (Prolongación Guerrero), Eje 1 Poniente (Guerrero), Puente de Alvarado, Balderas, Av. Chapultepec-Dr. Río de la Loza, Eje 1 Poniente (Cuauhtémoc hasta interceptar Eje 4 Sur)	Todo el día	Todos		Aviso 23-11-2009
		Carriles no confinados en Delegaciones Benito Juárez y Cuauhtémoc (de Eje 2 Norte a Eje 4 Sur)	7:01 a 10:30 14:01-16:30 18:01-22:00	>3.5 ton		Gaceta 24-07-1989
	L4. Buenavista - Centro Histórico – San Lázaro -Aeropuerto 28 km	Origen en la intersección del Eje 1 Norte (Mosqueta) y la Avenida Insurgentes (Buenavista); y destino en la intersección de Eje 3 Oriente (Eduardo Molina) y Calzada Ignacio Zaragoza (San Lázaro), con una ampliación al Aeropuerto de la Ciudad de México.				Gaceta 29-04-2011

PROGRAMA	VIALIDAD	TRAMO CON PROHIBICIÓN VEHÍCULOS DE CARGA	HORARIO RESTRICCIÓN	TIPO VEHÍCULOS RESTRINGIDOS	EXENCIONES	NORMATIVIDAD
Centro Histórico	Perímetro “A” del Centro Histórico de la Ciudad de México		7:00-22:00	>3.5 ton	<p>Vehículos conocidos como de “3.5 Toneladas” y unidades con una longitud no mayor a 7.5 metros, y los vehículos de cualquier modalidad que presten los siguientes servicios:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emergencia, dentro de los que se encuentran: los de bomberos, policía, ambulancia, entre otros.</li> <li>• De servicios: Luz y Fuerza, recolección de basura, gas, paquetería, mensajería, de traslado de valores, así como revolvedoras y equipo de bombeo de concreto para la construcción.</li> <li>• Transporte de productos frescos y perecederos, los cuales son aquellos productos naturales o preparados que precisen conservación en condiciones de temperatura regulada o que tengan una duración máxima de 30 días y transporte refrigerado.</li> </ul>	Gaceta 19-06-2008
Otras Vialidades	Periférico y Viaducto	Carriles centrales	Todos	Todos		Reglamento de Tránsito 2009. Capítulo IV, Art. 24
	Circuito Interior		7:01-20:59	>3.5 ton		01-03-1981

(\*)Línea 2 Metrobús: Eje 4 Sur:

En sentido Oriente:

1. Avenida Jalisco, desde su intersección con Avenida Parque Lira, hasta su intersección con el Eje 4 Sur (Benjamín Franklin).
2. Eje 4 Sur, desde su intersección con el Circuito Interior (Av. Revolución), hasta su intersección con Canal de San Juan (Anillo Periférico Oriente).

3. Canal de San Juan (Anillo Periférico), desde su intersección con Eje 4 Sur (Canal de Tezontle), hasta su intersección con Calzada Ignacio Zaragoza (lateral del paso a desnivel).
4. Calzada General Ignacio Zaragoza, desde su intersección con Canal de San Juan (Anillo Periférico), hasta su intersección con Avenida Telecomunicaciones.
5. Ingreso al Centro de Transferencia Modal Tepalcates (entre Av. Tepalcates y General Antonio de León).

En sentido Poniente:

1. General Antonio de León, desde su intersección con Calzada General Ignacio Zaragoza, hasta su intersección con Constitución de Apatzingan.
2. Constitución de Apatzingan, desde su intersección con General Antonio de León, hasta su intersección con Canal de San Juan (Anillo Periférico).
3. Canal de San Juan (Anillo Periférico), desde su intersección con Constitución de Apatzingan hasta su intersección con Ferrocarril de Río Frío (Eje 3 Sur).
4. Eje 3 Sur, desde su intersección con Canal de San Juan (Anillo Periférico), hasta su intersección con Avenida Javier Rojo Gómez (Eje 5 Oriente).
5. Avenida Javier Rojo Gómez, desde su intersección con Eje 3 Sur (Ferrocarril de Río Frío), hasta su intersección con Eje 4 Sur (San Rafael Atlixco).
6. Eje 4 Sur, desde su intersección con Avenida Javier Rojo Gómez, hasta su intersección con Avenida Patriotismo.
7. Eje 3 Sur, en el tramo comprendido desde su intersección con Avenida Patriotismo, hasta su intersección con el Circuito Interior (José Vasconcelos).
8. Vicente Eguía, desde su intersección con el Circuito Interior (José Vasconcelos); hasta su intersección con Avenida Parque Lira.
9. Avenida Parque Lira, desde su intersección con Eje 4 Sur (Vicente Eguía), hasta su intersección con calle Iturbe.

Fuente: Elaboración propia con base en la reglamentación de la columna “Normatividad”

## **2.6 POSIBLES NUEVAS POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EL TRANSPORTE DE CARGA EN LA ZMVM**

La revisión del estado del arte en materia de políticas aplicadas al transporte de carga en diferentes contextos permite tener una visión general de qué tipo de políticas se están implementando en el mundo, cuáles medidas se utilizan para buscar el logro del objetivo de la política y a partir de ello tener criterios para seleccionar las políticas factibles de modelación en el contexto del área de estudio de esta investigación.

Esta revisión también permitió establecer que la aplicabilidad de una política o medida a un determinado contexto urbano debe estar precedida de un análisis del entorno urbano y de planificación, dado que no existen políticas o medidas universales para el transporte urbano de carga, más aún en las ciudades en desarrollo en donde algunos conceptos de desarrollo urbano y ordenamiento territorial son incipientes o inexistentes.

Como se mencionó antes, a diferencia de las ciudades en Europa, donde la planeación del transporte de carga se ha dirigido a la preservación de centros históricos o a la protección de los residentes ante la contaminación ambiental, las medidas para el transporte de carga en las ciudades de países en desarrollo, incluyendo a la Ciudad de México y su área metropolitana se concentran principalmente en acciones para la reducción de la congestión.

La revisión de la reglamentación vigente en la ZMVM con respecto al transporte de carga permite concluir que no existe una política integral con respecto al transporte de carga. De acuerdo con algunas reuniones con las autoridades de la ciudad sobre el tema de esta investigación, existe la posibilidad que en el corto plazo se comiencen a poner en marcha restricciones a los camiones de carga sobre algunas vialidades que presentan altos niveles de congestión en los periodos pico, razón por la cual este criterio se tendrá en cuenta al momento de seleccionar las políticas para evaluación.

Finalmente, con base en la anterior revisión de políticas aplicadas en diferentes contextos fueron seleccionadas las políticas que se consideran como susceptibles de ser evaluadas mediante modelación de redes de transporte y que adicionalmente puedan ser aplicadas al contexto del estudio de caso mexicano. Así mismo, para su selección se tuvo en cuenta que el objetivo de la política fuese la mitigación la congestión y las emisiones de contaminantes.

Teniendo en cuenta los objetivos de esta investigación, fueron pre-seleccionadas cinco tipos de políticas, de las cuales finalmente fue seleccionada una para realizar el proceso completo de evaluación aplicando la metodología desarrollada en esta investigación, la política de restricciones de acceso a los vehículos de carga por ventanas de tiempo. Ésta es una política que puede ser puesta en marcha para la ZMVM en el corto plazo y los resultados de esta investigación podrán aportar información para la toma de decisiones.

A continuación se amplía la descripción de las políticas pre-seleccionadas, con énfasis en la política seleccionada para aplicar la metodología propuesta.

### 2.6.1 Definición de Horarios o Ventanas de Tiempo para Acceso de Vehículos de Carga a Zonas Urbanas

La política de definición de horarios o ventanas de tiempo para acceso de vehículos de carga a zonas urbanas, se considera como una estrategia para la reducción del impacto ambiental de los vehículos de carga en las áreas urbanas. Existen dos formas de imponer regulaciones horarias a los vehículos de carga en un área urbana, a través de regulaciones horarias o ventanas de tiempo al acceso de vehículos o con regulaciones horarias a la descarga de vehículos.

#### – Regulaciones horarias o Ventanas de Tiempo para el Acceso (BestUFS, 2007)

Las regulaciones horarias al acceso de transporte urbano de carga son las más importantes y las más utilizadas. Pueden ser implementadas para evitar que los vehículos entren en una calle o área a determinadas horas del día, pueden ser impuestas a todos los vehículos o sólo a los vehículos de carga, o solamente a vehículos de carga de cierto tamaño o peso.

Se establecen generalmente en calles o áreas muy sensibles al tráfico pesado. Los ejemplos incluyen:

- Áreas de comercio peatonales: normalmente ningún vehículo puede entrar a estas áreas durante las horas comerciales.
- Calles residenciales: los vehículos de carga que sobrepasan cierto peso o tamaño quedan excluidos de una calle o área urbana por la noche para evitar molestias, o durante el día por ejemplo, cerca de los colegios para evitar accidentes.
- Áreas urbanas completas: en algunas ciudades europeas, se imponen prohibiciones a los vehículos de carga durante todo el fin de semana.
- La restricción horaria de camiones grandes ha sido también una de las medidas más comunes en países en desarrollo debido a las limitaciones de vialidades y a la congestión. Un ejemplo es la restricción en Manila (Filipinas) que comenzó en 1978 restringiendo el paso a camiones de más de 4.5 toneladas en las once vías arterias principales desde las 6 de la mañana hasta las 9 de la noche. Diez vías adicionales tienen restricciones durante la hora pico aunque existen rutas alternas para llegar al puerto. (GIZ, 2011).

#### – Ventanas de Tiempo

Las ventanas de tiempo (*time windows*) utilizan restricciones de acceso por períodos, lo cual obliga a realizar actividades de distribución en un periodo específico del día. Estas ventanas pueden ser establecidas por la autoridad local o en algunos casos por los receptores de la carga (mayoristas). Se pueden aplicar para acceso a zonas, vías o para realizar operaciones de la carga en períodos específicos.

El objetivo de las ventanas de tiempo es mejorar el ambiente de compra en las áreas comerciales mediante la reducción de los impactos causados por grandes vehículos, tales como obstrucción visual, intimidación, infracciones a la seguridad, vibraciones y ruido, y para separar a los portadores de carga del público que compra. (Quak y De Koster, 2007).

## 2.6.2 Definición de Zonas Ambientales (BestUFS, 2008)

Una “Zona Ambiental” (EZ, del término en inglés *Environmental Zone*) es un área geográfica en la que la circulación vehicular está restringida a vehículos que cumplen determinados criterios de emisiones, por lo cual una EZ puede conducir a mejoras en la calidad del aire. Las EZ se implementan en los lugares donde la contaminación del aire ha alcanzado niveles que son peligrosos para la salud pública y pueden aplicarse sólo para camiones de carga, un grupo de vehículos motorizados o a la totalidad de vehículos que ingresan a la zona.

En la Tabla 2-5 se presentan las principales características de las EZ en Europa.

**Tabla 2-5. Principales Características de las Zonas Ambientales**

Características de las EZ	Aplicación actual en Europa
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mejorar los estándares ambientales en la zona en la cual se aplican.</li> <li>– Reducir las emisiones de contaminantes y mejorar la calidad del aire.</li> <li>– Pueden contribuir a mejorar otros problemas ambientales como el ruido y a mejorar la seguridad vial.</li> </ul>
Tamaño del área cubierta	Existen zonas ambientales en un amplio rango, desde centros históricos de pequeñas poblaciones (Ej.: Bolonia, 3.2 km <sup>2</sup> ) hasta grandes ciudades (Ej.: Londres, 1.580 km <sup>2</sup> )
Tipos de vehículos con restricción de acceso a la zona	Todas las zonas europeas restringen el acceso a camiones de carga con peso superior a 3.5 toneladas. Con excepción de Holanda, todas tienen restricción a buses y vagones; la zona ambiental de Londres también excluye vanes (mayores a 1.2 toneladas en vacío) y minibuses de más de 8 pasajeros; la zona de Alemania cubre todos los vehículos con excepción de motocicletas e Italia restringe todo tipo de vehículos.
Estándares de emisión de una EZ	La mayor parte de los estándares de emisiones de los vehículos de carga en las EZ europeas se rigen por la norma Euro2. En Londres se exige la norma Euro3, mientras que en Italia para vehículos con motor diesel se pide la norma Euro2 y para vehículos de motores con derivados del petróleo la norma Euro1.
Controles	El control a los vehículos puede ser: manual, con sistemas de registro y calcomanías en los parabrisas verificadas manualmente por la policía o, control automático: utilizando cámaras móviles y fijas con reconocimiento automático de números de placa y cotejo del registro de matrícula.
Multas impuestas a los vehículos que no cumplen con la EZ	Varía desde 40 euros (y un punto en el registro nacional de multas) en Alemania, hasta 1,250 euros en Londres.

Fuente: adaptado de “*Environmental Zones in European Cities: Accommodating the needs of passenger and freight transport in cities*”, *Best Urban Freight Solutions-BESTUFS.net*, (2008)

Las EZ pueden tener ventajas tanto desde el punto de vista ambiental como económico, sin embargo, otros actores del sistema de carga urbano pueden percibir también desventajas en su utilización. Las principales ventajas y desventajas se presentan en la Tabla 2-6.

En el caso de las ciudades de países en desarrollo, existen ejemplos en donde la restricción de los tamaños vehiculares en ciertas zonas no han tenido el efecto esperado, en lugar de desarrollarse

estructuras logísticas urbanas más eficientes, los vehículos de distribución pequeños se utilizan para el transporte de larga distancia todo el tiempo desde el origen hasta el destino en área central. En Seúl (Corea), se ha incrementado el número de hombres-camión como consecuencia de la restricción a camiones grandes (Deblanc, 2010 en GIZ, 2011).

**Tabla 2-6 Ventajas y Desventajas de las Zonas Ambientales**

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mejorar la calidad del aire, incluyendo todos los contaminantes (no solo NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>).</li> <li>– Progreso en el logro de los límites ambientales en la región.</li> <li>– Ambiente atractivo para las empresas y la gente en general.</li> <li>– Beneficios en seguridad por la introducción de flota vehicular reciente.</li> <li>– Beneficios económicos para el sector de manufactura de filtros y equipos de control de emisiones para vehículos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Impacto económico fuerte para transportistas con vehículos especializados: (refrigerados, vagones).</li> <li>– Impacto fuerte para pequeñas empresas transportistas.</li> <li>– Impacto a los sectores de mayoristas, comercios y compañías de construcción.</li> </ul>

Fuente: adaptado de “*Environmental Zones in European Cities: Accommodating the needs of passenger and freight transport in cities*”, *Best Urban Freight Solutions*-BESTUFS.net, (2008)

### 2.6.3 Establecimiento de Corredores de Carga y Rutas para Camiones (BestUFS, 2007)

La estrategia del establecimiento de corredores de carga y rutas para camiones hace parte de las políticas cuyo objetivo principal es la disminución del número de desplazamientos y de kilómetros recorridos por los vehículos de carga dentro del área urbana. Las autoridades pueden recomendar u obligar a los conductores de vehículos de mercancías a utilizar ciertas rutas (corredores de carga), para evitar que transiten por lugares inadecuados o sensibles. Las rutas recomendadas no requieren mayor intervención, mientras que las rutas obligatorias (que prohíben a los camiones usar las rutas no señaladas) sí lo requieren y, por tanto, su implementación y gestión es más compleja y costosa.

Todos los actores que tengan responsabilidad en la gestión del área urbana y en la industria del transporte de mercancías deberían estar implicados en la selección de estas rutas y corredores.

Los diferentes tipos de rutas de camiones pueden ser:

- Rutas estratégicas o corredores de carga: usan las carreteras principales para largos desplazamientos o vías principales dentro de áreas urbanas.
- Rutas de distribución zonal: con vías que unen rutas estratégicas y que proporcionan una ruta desde una vía principal hasta un área específica.
- Rutas de acceso local: calles que permiten el acceso a sectores concretos.

Las rutas de camiones deben contar con las siguientes características:

- Contener las vías principales del área y las conexiones entre ellas.
- Recorrer los lugares con mayor demanda de transporte de mercancías.

- Evitar zonas de usos de suelo sensibles, como áreas residenciales, o con gran afluencia de peatones.

Las carreteras utilizadas como corredores de carga deben tener:

- Buen mantenimiento.
- Ancho suficiente para operación de vehículos pesados.
- Ausencia de curvas o giros cerrados
- Pendientes moderadas o sin pendiente.
- Suficiente visibilidad.
- Puentes que soporten vehículos pesados.
- Señalización suficiente y clara.

En el área metropolitana de Bangkok el objetivo es prohibir el tráfico de vehículos por el centro y otras áreas sensibles de la ciudad, para lo cual se han construido tres terminales de camiones en las afueras del área urbana junto con rutas circunvalares para los camiones. La prohibición a la circulación sobre los anillos internos de la ciudad se espera que induzca el uso intensivo de las terminales públicas para camiones y el uso de las rutas circunvalares (Pomlaktong, 2010 en GIZ, 2011).

#### 2.6.4 Fomento del uso de Combustibles Alternativos y de Vehículos con Bajas Emisiones de Carbono

La estrategia de fomento del uso de combustibles alternativos y de vehículos con bajas emisiones de carbono, busca incentivar la eficiencia ambiental de la industria del transporte urbano de carga, a través de la introducción de vehículos que utilicen tecnologías amigables al medio ambiente (*Environmental Friend Vehicles-EFV*) tales como:

- Combustibles alternativos: incluyen LPG<sup>5</sup>, CNG<sup>6</sup>, biocombustibles<sup>7</sup> y tecnología del hidrógeno<sup>8</sup>.
- Vehículos eléctricos e híbridos (combinación de combustibles tradicionales y electricidad).

En Alemania, desde 2007 hay restricciones vehiculares en áreas con altos niveles de material particulado fino, son las denominadas “zonas verdes ambientales” en donde sólo los vehículos con el distintivo que informa que cumplen con el estándar de emisiones pueden ingresar a las zonas verdes (GIZ, 2011).

---

<sup>5</sup> Liquefied petroleum gas

<sup>6</sup> Compressed natural gas

<sup>7</sup> Actualmente hay dos formas principales de biocombustibles: el etanol, hecho a través de fermentación básica de plantas con almidón o azúcar, y el FAME (Fatty Acid Methyl Esters, Ésteres metilos grasos ácidos) que convierte aceite vegetal en un combustible tipo diesel por medio del proceso de transesterificación. Fuente: [http://www.shell.com.mx/home/content/mex/innovation/alternative\\_energy/biofuels](http://www.shell.com.mx/home/content/mex/innovation/alternative_energy/biofuels)

<sup>8</sup> La forma más común de producir hidrógeno es a partir del gas natural usando el proceso de reformar el vapor, que consiste en que a altas temperaturas (700–1100°C) y en presencia de un catalizador con base metal (níquel) el vapor reacciona con metano para convertir ese metano en hidrógeno y carbono. El hidrógeno también puede ser producido por electrólisis del agua, donde se usa electricidad y un catalizador para separar el hidrógeno del oxígeno. Fuente: *ibid.*

### 2.6.5 Cobro de Tasas o Cuotas por Uso de Vías

La fijación de tasas por uso de vías puede incluirse como estrategia dentro de políticas cuyos objetivos son (European Commission, 2008):

- Influir en el comportamiento de los usuarios para mejorar la eficiencia del sistema de transporte en términos de reducción de los impactos ambientales del tráfico o por reducción de la congestión.
- Generar ingresos para financiamiento de infraestructura nueva, o ampliación y modernización de ésta o para cubrir los costos de gestión, operación y mantenimiento.
- Fomentar la equidad mediante la distribución de los ingresos, a través de estrategias como “el que contamina paga”.

La estrategia de cobro de cuota para los vehículos de carga por ingreso a la zona urbana ha sido incorporada por el “*London Freight Plan 2007*” en forma específica para lograr la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la afectación de la demanda de transporte hacia y en el centro de la ciudad.

### **3 OBTENCIÓN DE LAS RESPUESTAS OPERATIVAS DE LOS PROPIETARIOS ANTE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS**

En este capítulo se presenta el proceso llevado a cabo para conocer las respuestas operativas de los propietarios de los vehículos de carga de la ZMVM ante la implementación de las políticas públicas seleccionadas en el capítulo anterior.

En una primera parte se resume el estado del arte sobre los tipos de herramientas para toma de información en este tipo de investigaciones relacionadas con impactos de política en el sistema de transporte urbano y sobre cómo estimar las reacciones de los actores implicados en estas decisiones.

Una vez definida la “entrevista” como el método apropiado para la toma de información, se presenta la identificación de las variables de medición con base en las políticas seleccionadas, el diseño de la muestra a partir de la población de vehículos y de propietarios de camiones de carga en la zona de estudio y, la selección final de las empresas entrevistadas. El procesamiento estadístico detallado para la obtención de las estimaciones de las respuestas se presenta en el Anexo 1 del documento.

Este capítulo incluye los resultados de la expansión de los resultados a la población de estudio, el análisis de éstos y la obtención de las proporciones de respuestas de los vehículos de diferente tamaño ante las políticas propuestas.

Al finalizar este capítulo se presentan también las principales conclusiones del sondeo de opinión realizado posteriormente a las entrevistas, a algunos gerentes de operación y logística de empresas de transporte de carga, el cual tuvo como objetivo obtener información complementaria para la conformación final de los escenarios de evaluación.

#### **3.1 ESTADO DEL ARTE SOBRE METODOLOGÍAS PARA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN ESTUDIOS DE EFECTOS DE POLÍTICAS**

A partir de la revisión del estado del arte sobre investigaciones recientes de efectos de políticas en el sistema urbano de carga y los tipos de herramientas utilizados para obtener la información de las actitudes y respuestas de las empresas del sector transporte, se encuentra que varios autores (Puckett y Hensher , 2008; Hunt y Stefan , 2007; Hensher y Golob, 1999) coinciden en el uso de entrevistas a los actores directamente implicados en la toma de decisiones de las empresas del sector. La entrevista permite explicar y entender las opiniones de los empresarios, y tenerlas en cuenta en la elaboración de las políticas que reflejen mejor las complejas y diversas necesidades del mercado de la industria del transporte de carga (Hensher y Golob, 1999).

En las investigaciones citadas se utilizaron entrevistas, la variación se da en el tipo de método para llenar el formulario, el cual puede ser mediante entrevista directa, por teléfono o utilizando un formato electrónico con verificación telefónica posterior.

Para el estudio de caso de esta investigación, se considera que la entrevista directa a los gerentes implicados en la toma de decisiones sobre operaciones de transporte y distribución es el método más efectivo para obtener la información sobre el efecto de las políticas seleccionadas.

Las entrevistas se realizaron a los gerentes o directores de transporte (o vehículos), de distribución, de logística, o de operaciones de las empresas e industrias que realizan transporte urbano de carga en la ZMVM. La obtención de la información sobre estas empresas y sus vehículos se explica en los siguientes apartados.

### **3.2 REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA LA ZMVM SOBRE TRANSPORTE DE CARGA**

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México realizó en el año 2006 el “Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México”, (Lozano *et al*, 2006a, b, c y d), cuya información primaria (año 2006) fue la base para esta etapa de la investigación, específicamente en lo relacionado con los vehículos que intervienen en el transporte de carga en la zona, cuyos registros se encuentran en los siguientes padrones de vehículos comerciales de transporte de carga: Padrón Mercantil Privado del Distrito Federal, Padrón Particular del Estado de México y el Padrón Público Federal.

Los padrones mencionados contienen los datos del registro inicial del vehículo sin ningún procesamiento, por lo que se requirió previamente para esta investigación su unificación para el posterior análisis.

El total de registros provenientes de los padrones mencionados es de 571,608 vehículos discriminados así:

- Padrón mercantil privado del Distrito Federal: 268,711 filas x 12 columnas.
- Padrón particular Estado de México: 221,036 filas x 15 columnas.
- Padrón público federal: 80,861 filas x 10 columnas.

Los anteriores datos tienen diferentes formatos de origen (en Excel y en archivos de texto delimitados por comas), con tamaños, formatos y número de columnas que difieren según la fuente, por lo cual se requirió un trabajo extenso para su unificación. Adicionalmente, se requería contar en esta etapa de la investigación con información confiable sobre los propietarios de vehículos; con la identificación del tipo y tamaño del vehículo, definidos por los registros de marca y línea, datos que desafortunadamente no venían digitados en forma unificada, por lo cual se hizo necesario revisar detalladamente cada uno de los 571,608 registros.

El resultado de esta exhaustiva tarea fue la verificación, corrección y unificación de los archivos originales para crear la base de datos “Carga\_Unificado” con el programa SQL<sup>9</sup>, lo cual permitió continuar el análisis de la información de vehículos de carga que se presenta a continuación.

#### **3.2.1 Definición de Categorías de Análisis para los Vehículos de Carga**

Con el fin de realizar el diseño del tamaño de la muestra, se requiere hacer inicialmente el análisis de la población de estudio, la cual está conformada por los vehículos de las empresas e industrias que realizan transporte de carga en la ZMVM.

---

<sup>9</sup> SQL es el acrónimo de Lenguaje de Consultas Estructurado (*Structured Query Language*)

Uno de los objetivos de la toma de información es conocer el comportamiento operacional de vehículos de diferente tamaño ante las diversas políticas a evaluar, por lo que se decidió estratificar la población de estudio por tamaño del vehículo.

Para la definición de los estratos por tamaño de vehículo se tomaron como base los criterios del “Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México. Tomo 1: Oferta y demanda del transporte de carga en la ZMVM”, (Lozano *et al*, 2006b), en donde se analiza la flota vehicular según su capacidad de carga. Para esta investigación se requirió desagregar aún más la clasificación de los vehículos por su tamaño, por lo cual las categorías del estudio mencionado se modificaron, separando los vehículos con capacidad de hasta 3.5 toneladas en dos categorías adicionales (muy chico y chico), según se muestra en la Tabla 3-1:

**Tabla 3-1. Clasificación Vehículos de Carga por Tamaño**

TAMAÑO	CAPACIDAD (Toneladas)	TIPOS DE VEHÍCULOS
Muy chico	1.5	Camionetas
Chico	1.5 – 3.5	Camionetas, camiones unitarios
Mediano	3.6 – 8.5	Camiones unitarios, camiones articulados
Grande	> 8.5	Camiones articulados, tractocamiones

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Clasificación de los Vehículos de Carga para la ZMVM

La categorización de los vehículos por tamaño se realizó a partir de la información de las columnas “marca” y “línea” para el caso de los padrones del Distrito Federal y del Estado de México, y para el padrón Federal, se utilizó la información de la columna “clase”.

Como resultado de lo anterior, se clasificaron todos los vehículos de la base de datos “Carga\_Unificado” según los tamaños definidos en la Tabla 3-1, y se generaron bases de datos adicionales con información complementaria del vehículo como fotografías y páginas web de la empresa fabricante.

Como ejemplo de lo anterior, las Tabla 3-2, Tabla 3-3, Tabla 3-4 y Tabla 3-5 presentan el total de vehículos por categoría de los vehículos de carga más comunes en la zona de estudio:

**Tabla 3-2. Principales Vehículos de Tamaño Muy chico**

MARCA	LINEA	TOTAL	VEHÍCULOS TIPO
FORD	F150	27,239	 Fuente: <a href="http://www.ford.com.mx/home.asp">http://www.ford.com.mx/home.asp</a>
CHEVROLET	C15 6Y8C	18,120	
NISSAN	PICK UP	17,581	
NISSAN	CHASIS	12,625	
NISSAN	CAMIONETA	12,602	 Volkswagen 522 Panel
VOLKSWAGEN	CAMIONETA	9,803	
DODGE	D150	9,423	
FORD	RANGER	9,321	
FORD	F250	7,464	
VOLKSWAGEN	COMBI	7,316	

MARCA	LINEA	TOTAL	VEHÍCULOS TIPO
NISSAN	ESTACAS	7,312	
FORD	F100	5,768	
FORD	F200	5,683	
VOLKSWAGEN	522 PANEL	4,243	
CHEVROLET	C20	3,717	
NISSAN	CHASIS LARGO	3,291	
NISSAN	ICHI VAN	3,125	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-3. Principales Vehículos de Tamaño Chico**

MARCA	LINEA	TOTAL	VEHÍCULOS TIPO
FORD	F350	49,869	
CHEVROLET	C35	19,927	
CHEVROLET	VANETTE	4,057	
CHEVROLET	PANEL 30	3,149	
CHEVROLET	C350	2,825	
DODGE	RAM3500	2,705	
CHEVROLET	C60/65	1,429	
CHEVROLET	R36003	1,225	
FORD	VANETTE	1,011	
FORD	P350	577	
CHEVROLET	P30	319	
CHEVROLET	CHASIS CABINA	270	
CHRYSLER	RAM3500	258	
CHEVROLET	ESTACAS	227	
CHEVROLET	CHASIS	218	
CHEVROLET	C300	215	
NISSAN	CHASIS KING CAB	150	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-4. Principales Vehículos de Tamaño Mediano**

MARCA	LINEA	TOTAL	VEHÍCULOS TIPO
DODGE	D350	14,668	
FORD	F600	10,975	
DODGE	D600	5,762	
DINA	CHASIS CABINA	4,237	
FORD	CAJA CERRADA	3,106	Fuente: <a href="http://www.mercadolibre.com.mx">http://www.mercadolibre.com.mx</a>
MERCEDES BENZ	CAMION	2,851	
FORD	F450	2,495	
DODGE	RAM4000	2,421	
DINA	ESTACAS	2,293	
CHEVROLET	KODIAK	2,135	
DINA	REDILAS	2,101	
DINA	CAJA CERRADA	1,818	

MARCA	LINEA	TOTAL	VEHÍCULOS TIPO
FORD	ESTACAS	1,493	DINA-Redilas  Fuente: <a href="http://www.mercadolibre.com.mx">http://www.mercadolibre.com.mx</a>
FORD	REDILAS	1,300	
CHEVROLET	CAJA CERRADA	1,234	
DINA	CAMION	1,188	
DODGE	CAJA CERRADA	1,167	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-5. Principales Vehículos de Tamaño Grande**

MARCA	LINEA	TOTAL	VEHÍCULOS TIPO
KENWORTH	TRACTOR	9,582	Kenworth Tractor  Fuente: <a href="http://www.kenworth.com">http://www.kenworth.com</a>
MERCEDES BENZ	CHASIS CABINA	3,593	
FREIGHTLINER	TRACTOR	3,180	
DINA	TRACTOR	2,690	
INTERNATIONAL	TRACTOR	1,908	
FAMSA	TRACTOR	1,557	Famsa  Fuente: <a href="http://www.mercadolibre.com.mx">http://www.mercadolibre.com.mx</a>
KENWORTH	T	1,452	
FORD	F700	1,402	
FRUEHAUF (*)	CAJA CERRADA	1,261	
VOLVO	TRACTOR	1,216	
LUFKIN (*)	CAJA CERRADA	975	Ford F-700  Fuente: <a href="http://www.mercadolibre.com.mx">http://www.mercadolibre.com.mx</a>
FAMSA	CHASIS CABINA	948	
FRUEHAUF (*)	TANQUE	888	
UTILITY (*)	CAJA CERRADA	820	
FRUEHAUF (*)	PLATAFORMA	779	
KENWORTH	500	726	Fuente: <a href="http://www.mercadolibre.com.mx">http://www.mercadolibre.com.mx</a>
WABASH NATIONAL CORP (*)	CAJA CERRADA	635	

(\*) Marca del remolque

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 Resultados del Análisis de la Base de Datos de Vehículos de Carga

Una vez realizado el procesamiento de la información de los padrones de carga, se encontró que sobre el total de registros, el 51.1% de los vehículos cuenta con información sobre el propietario del vehículo. Para la definición del tamaño de la muestra éste es el valor que se toma como población, dado que para la selección de los vehículos a encuestar se requiere conocer el nombre de la persona o empresa a la cual pertenecen.

Se excluyen de estos cálculos los 80,861 registros del padrón Federal, los cuales no tienen identificado el propietario, aunque cuentan con información que permite su clasificación por tamaño.

Por otra parte, de los registros que cuentan con información de propietario, 63.5% están distribuidos entre 27,274 propietarios, el restante 36.5% está distribuido en empresas que son propietarias de 10

a 4,000 vehículos (ver Tabla 3-6 y Tabla 3-9). La información presentada corresponde a la original de los Padrones vehiculares del 2004, la cual posteriormente es proyectada al año 2010.

**Tabla 3-6. Resultados del Análisis de la Base de Datos de Vehículos de Carga en la ZMVM**

<b>Total registros de vehículos con información</b>	<b>570,680</b>	<b>100%</b>
Registros sin información de propietario (D.F. y Edo. México)	195,762	34.3%
Registros Padrón Federal	80,861	14.2%
<b>Total registros de vehículos con información de propietario</b>	<b>294,057</b>	<b>51.5%</b>
<b>Total registros de vehículos con información de propietario</b>	<b>294,057</b>	<b>100%</b>
Total registros de vehículos con propietario diferente	186,706	63.5%
Total registros de vehículos con propietario unitario	107,351	36.5%
<b>Total registros de vehículos con información de propietario y Clasificación por tamaño (Población N)</b>	<b>193,782</b>	<b>34%</b>

Fuente: Elaboración propia, con base en: Padrón mercantil privado del Distrito Federal, Padrón particular Estado de México, Padrón público federal, 2004

### 3.2.4 Clasificación de los vehículos por tamaño

Fueron obtenidos 193,782 vehículos de carga con información de propietario y tamaño, los cuales corresponden al 34% del total de registros. La clasificación de estos vehículos se muestra en la Tabla 3-7.

El padrón federal contiene información de los vehículos de carga clasificados en forma similar a la norma NOM-012-SCT-2-2008 (SCT, 2008), pero sólo se identifican si son camiones unitarios C2 o C3, tractocamiones T3 y en algunos casos el tipo y marca del remolque, todos ellos de más de 3.5 toneladas de capacidad. Dado lo anterior, para cada registro de vehículo fue necesario tomar como criterio adicional para su clasificación como vehículo mediano o grande, las columnas “marca”, “línea” y “clase\_tipo” (ver ejemplos en las Tabla 3-4 y Tabla 3-5), obteniendo los resultados de la Tabla 3-8.

**Tabla 3-7. Resultados de la Clasificación por Tamaño de los Vehículos de Carga (\*)**

TAMAÑO	VEHICULOS	%	TOTAL PROPIETARIOS
MUY CHICO	102,126	52.7%	54,145
CHICO	48,032	24.8%	25,010
MEDIANO	30,267	15.6%	12,577
GRANDE	13,357	6.9%	3,628
<b>TOTAL</b>	<b>193,782</b>	<b>100%</b>	
AUTOMOVIL	3,189		2,198
AUTOBUS	61		56
ND	88,185		50,230

(\*) Sin incluir Padrón Federal

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-8. Clasificación por Tamaño de los Vehículos de Carga del Padrón Federal**

TAMAÑO	TOTAL VEHICULOS	%
GRANDE	49,169	60.8%
MEDIANO	31,686	39.2%
<b>TOTAL REGISTROS</b>	<b>80,855</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que los vehículos registrados en el padrón federal tienen libre circulación por los diferentes estados, y su área de operación no corresponde necesariamente con el estado en donde se realizó su registro inicial, y que adicionalmente, éstos no cuentan con información sobre el propietario del vehículo, los registros de estos automotores no se tendrán en cuenta para el cálculo del tamaño de muestra en la zona de estudio pero sí en los posteriores análisis. De acuerdo con la Tabla 3-8, estos vehículos de carga corresponden a vehículos medianos y grandes, tamaños que sí están representados en los registros válidos de los otros padrones.

### 3.2.5 Análisis de los Tamaños de Flota

Con el objeto de incorporar criterios adicionales en la selección de la muestra, se realizó la clasificación de los propietarios de vehículos de acuerdo con el tamaño de flota. En la Tabla 3-9 se puede apreciar que existe una gran concentración de propiedad vehicular en unas pocas empresas: el 1.22% de los propietarios (1,644) poseen el 38.27% de los vehículos, mientras que el 25.3% de los propietarios tiene en promedio 3 vehículos y el 36.5% sólo un vehículo.

**Tabla 3-9. Clasificación por Tamaño de la Flota**

VEHICULOS POR PROPIETARIO	PROPIETARIOS	PROMEDIO VEH/PROP	No. VEH.	%	% ACUMULADO VEHÍCULOS	% ACUMULADO PROPIETARIOS
> 4,000	4	5,210	20,839	7.09	7.09	0.003
1,000-4,000	7	1,750	12,248	4.17	11.25	0.01
300-1,000	58	511	29,622	10.07	21.33	0.05
100-300	102	181	18,463	6.28	27.60	0.13
20-100	493	38	18,697	6.36	33.96	0.49
10 -20	980	13	12,671	4.31	38.27	1.22
<b>Sub-total</b>	<b>1,644</b>		<b>112,540</b>	<b>38.27</b>		
2 - 10	25,630	3	74,166	25.22	63.49	20.26
1	107,351	1	107,351	36.51	100%	
<b>TOTAL</b>	<b>134,625</b>		<b>294,057</b>			

Fuente: Elaboración propia

La concentración de propiedad vehicular en pocas empresas es importante en la selección de la muestra de vehículos, dado que el peso de las grandes empresas en las decisiones sobre cambios operativos de su flota como consecuencia de la aplicación de políticas gubernamentales es muy importante en razón a la cantidad y variedad de vehículos que poseen.

Cabe aclarar que la base de datos original del padrón particular del Estado de México no contiene la información sobre los propietarios cuando éstos corresponden a personas físicas, dado que se

considera como información confidencial; en cuanto al padrón del Distrito Federal, la información sobre estos propietarios u “hombres-camión” es parcial.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se excluyen los registros de propietarios con menos de dos vehículos del cálculo del diseño muestral, más no de los análisis posteriores. Estos vehículos así como los registrados en el padrón Federal se incluirán en los análisis de escenarios y de redes de las etapas posteriores de esta investigación, asumiendo que estos vehículos harán los mismos cambios operativos de las empresas propietarias de tres o más vehículos. Dado que de las entrevistas se obtendrán proporciones de vehículos, para los cálculos finales estas proporciones se aplicarán a la totalidad de camiones en la ZMVM.

### 3.3 DISEÑO DEL MÉTODO DE MUESTREO

A continuación se explica el proceso de la toma de información, el cual parte de la definición de los objetivos y las variables a examinar mediante las entrevistas, y posteriormente se presenta el diseño de la muestra con los criterios de selección de la misma.

#### 3.3.1 Objetivo de las Entrevistas

El objetivo principal de la toma de información es establecer cuáles serían los principales cambios que realizarían las empresas de transporte y distribución en la operación de sus vehículos, discriminados por tamaño, ante la implementación de políticas que afecten el movimiento de carga en las zonas urbanas.

Teniendo en cuenta la oportunidad de establecer contacto directo con los gerentes de vehículos de las empresas, quienes interactúan permanentemente con el sistema de transporte urbano de carga, se incluyen como otros objetivos secundarios de la toma de información los siguientes:

- Conocer el tipo de esquemas de distribución troncal y secundaria que se manejan en las empresas y los tipos de vehículos que intervienen.
- Conocer la percepción que tienen estos actores de los principales problemas relacionados con el transporte de carga en las ZMVM.

#### 3.3.2 Definición de Variables

De acuerdo con las políticas seleccionadas en el capítulo anterior, se toma como variable independiente ( $y_i$ ) el tipo de política a implementar y como variables dependientes ( $x_j$ ), las posibles opciones operativas de los vehículos ante estas restricciones o acciones gubernamentales.

De esta manera, las variables quedan definidas como:

Variable independiente:	$y = \text{políticas, } y_1, y_2, \dots, y_i$
Variables dependientes:	$x = \text{opciones operativas, } x_1, x_2, \dots, x_j$

El listado de las variables a medir se presenta en la Tabla 3-10.

**Tabla 3-10. Definición de Variables**

<b>Política</b>	<b>Variable Independiente</b>	<b>Variable Dependiente (respuesta de los entrevistados)</b>
<i>y<sub>1</sub> = políticas para la reducción del impacto ambiental</i>	<i>y<sub>1,1</sub> = establecimiento de normas de horario (ventanas de tiempo) para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas</i>	<i>x<sub>1,1,1</sub> = cambio de las rutas x<sub>1,1,2</sub> = cambio del tamaño del vehículo x<sub>1,1,3</sub> = centros de consolidación en la zona urbana x<sub>1,1,4</sub> = cambio de horarios de distribución</i>
	<i>y<sub>1,2</sub> = establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas</i>	<i>x<sub>1,2,1</sub> = cambio de las rutas x<sub>1,2,2</sub> = cambio de horarios de distribución x<sub>1,2,3</sub> = centros de consolidación en la zona urbana</i>
	<i>y<sub>1,3</sub> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a las zonas urbanas junto con ventanas de tiempo definidas por los clientes</i>	<i>x<sub>1,3,1</sub> = cambio de itinerarios x<sub>1,3,2</sub> = cambio del tamaño de vehículo x<sub>1,3,3</sub> = centros de consolidación en la zona urbana x<sub>1,3,4</sub> = cambio de horarios de distribución</i>
	<i>y<sub>1,4</sub> = establecimiento de zonas ambientales (restricción de pesos y de tipos de vehículos)</i>	<i>x<sub>1,4,1</sub> = cambio de la flota vehicular x<sub>1,4,2</sub> = centros de consolidación dentro de las zonas ambientales</i>
<i>y<sub>2</sub> = políticas para hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos, menor número de viajes/día)</i>	<i>y<sub>2,1</sub> = establecer corredores de carga sugeridos en zonas urbanas</i>	<i>x<sub>2,1,1</sub> = cambio de tamaño de vehículo (mayor) x<sub>2,1,2</sub> = cambio de rutas de distribución para usar los corredores</i>
	<i>y<sub>2,2</sub> = cobro de cuotas por uso de vías</i>	<i>x<sub>2,2,1</sub> = cambio de rutas para evitar los corredores x<sub>2,2,2</sub> = centros de consolidación dentro de la zona urbana para evitar los corredores x<sub>2,2,3</sub> = pagar y utilizar los corredores</i>
<i>y<sub>3</sub> = políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales</i>	<i>y<sub>3,1</sub> = uso de combustibles alternativos</i>	<i>x<sub>3,1,1</sub> = cambio de flota vehicular con otros combustibles</i>
	<i>y<sub>3,2</sub> = modernización de la flota vehicular</i>	<i>x<sub>3,2,1</sub> = cambio de flota vehicular</i>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3 Fuentes de Información

La fuente de información primaria corresponde al grupo de actores encargados de la toma de decisiones sobre vehículos, transporte y distribución en las empresas de la zona de estudio, los cuales pueden tener diversas denominaciones:

- Gerentes de distribución (o *supply chain management*).
- Gerentes de operaciones.
- Directores o gerentes de vehículos.
- Directores de rutas.
- Gerentes o directores de transporte.
- Propietario de la empresa.

Las entrevistas se realizaron en las sedes de las empresas a cargo de los vehículos que resulten seleccionados en el proceso de muestreo.

### 3.3.4 Método de Recolección de Datos

De acuerdo con los criterios definidos en el numeral 3.1, se realizaron entrevistas utilizando un cuestionario base y con preguntas abiertas, para su posterior tabulación. El diseño del cuestionario se realizó teniendo en cuenta las recomendaciones del Capítulo 9 del libro “Metodología de la Investigación” (Sampieri *et al*, 2006).

En el cuestionario se incluyeron tres partes: la primera de ellas se refiere a la información general de la empresa, los tipos y número de vehículos que opera, y algunas preguntas de control para establecer parámetros estadísticos; un segundo grupo de preguntas es sobre las características de los esquemas de distribución de las empresas, información que se utilizará en la conformación de los escenarios de evaluación de las políticas, pero que no requiere procesamiento estadístico; y una última parte que corresponde a las preguntas centrales sobre el comportamiento operacional de los vehículos ante la implementación de políticas. A partir de este último grupo de respuestas se obtendrán los valores de las variables de investigación definidas en la Tabla 3-10.

### 3.3.5 Diseño de la Muestra

El objetivo de la toma de información es conocer cómo y en qué magnitud se modificaría el comportamiento de los vehículos ante las políticas gubernamentales, y específicamente sus respuestas de acuerdo con el tamaño del vehículo.

De acuerdo con la información primaria con que se cuenta (vehículos clasificados por tamaño y propietario), el parámetro estadístico que se adecúa para la obtención de la información de interés es la proporción de vehículos. La estimación de este parámetro permitirá calcular la participación de cada tipo de vehículo en los cambios que realicen los propietarios para enfrentar las diversas políticas a evaluar.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, la población del estudio se fraccionó en cuatro estratos ( $h_i$ ): vehículos muy chicos, chicos, medianos y grandes de acuerdo con las características de la Tabla 3-1.

Por otra parte, la información disponible para la obtención de la muestra se agrupó por propietarios, lo cual muestra que un alto porcentaje de vehículos pertenece a pocas empresas: 38.3% de los vehículos pertenecen al 1.2% de los propietarios, mientras que el 25.3% de los propietarios tiene en promedio tres vehículos y el 36.5% sólo un vehículo, como se mencionó en la sección 3.2.5. Dado lo anterior, la técnica de muestreo por conglomerados resulta apropiada para este caso por lo cual se utilizó junto con la estratificación, considerando las empresas o propietarios como las unidades primarias en la población ( $i$ ) y los vehículos por tamaño como unidades secundarias en la unidad primaria  $i$ . Adicionalmente, esta técnica es más eficiente en cuanto a costos de recolección de información, dado que en cada conglomerado seleccionado pueden encontrarse unidades de los diferentes estratos y se logra recolectar la información de todos ellos en forma simultánea, aunque implique una menor precisión con respecto a la selección por vehículo para la estimación de las cantidades de la población (Lohr S. L., 1999).

### 3.3.5.1 Definición del tamaño de la muestra ( $n$ )

La unidad de análisis está definida por los vehículos de aquellas empresas que cuenten con tres o más vehículos y que realicen transporte de carga en la ZMVM. Los vehículos de propietarios de dos vehículos o menos, aunque no se involucran en el cálculo del diseño de muestra sí son incluidos en los análisis posteriores de los escenarios de evaluación de políticas y como parte de los flujos de transporte de la zona de estudio.

La estratificación y el número de conglomerados para la zona de estudio se presentan en la Tabla 3-11:

**Tabla 3-11. Estratificación de Vehículos de Carga**

<b>ESTRATO (<math>h</math>)</b>	<b>VEHICULOS POR ESTRATO (<math>N_h</math>)</b>	<b>%</b>	<b>PROPIETARIOS (<math>&gt; 2</math> VEH.) POR ESTRATO (Conglomerados)</b>
Muy chico	44,704	48%	3,503
Chico	21,804	23%	1,730
Mediano	17,298	18%	1,132
Grande	9,749	10%	566
<b>Total Población (<math>N</math>)</b>	<b>93,555</b>		<b>6,931</b>

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del tamaño de muestra ( $n_h$ ) se utilizaron los datos de media ( $\bar{y}$ ), varianza ( $\sigma^2$ ) y desviación estándar ( $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$ ) obtenidos a partir de la toma de información realizada para el “Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México”<sup>10</sup>, utilizando la Ecuación 3-1 (Lohr S. L., 1999).

Dado que para la investigación se requieren los valores estimados de las variables por proporciones, se utiliza el coeficiente de variación ( $CV$ ) para el cálculo del tamaño de la muestra (Ecuación 3-1),

<sup>10</sup> “Tarea 2: Proyecto de realización del estudio matriz origen-destino para el transporte de carga” (Lozano *et al.*, 2006c).

el cual proporciona una medida de la variabilidad relativa de una estimación y tiende a ser más estable en el tiempo en comparación con la varianza (Lohr S. L., 1999). Los resultados del cálculo se presentan en la Tabla 3-12.

$$n_h = \frac{Z_{\alpha/2}^2}{\left[ e^2 + \frac{Z_{\alpha/2}^2}{N_h} CV^2 \right]} CV^2 \quad \text{Ecuación 3-1}$$

donde,

$N_h$  = tamaño de la población del estrato  $h$

$CV^2$  = Coeficiente de Variación =  $\frac{\sigma}{\hat{y}}$

$Z_{\alpha/2} = 1.65$ , para un intervalo de confianza al 90%

$e$  = error estándar, para este caso se tomará 0.01 (10%)

**Tabla 3-12. Cálculo del Tamaño de la Muestra por Estrato ( $n_h$ )**

		MUY CHICO	CHICO	MEDIANO	GRANDE
<i>Población (Vehículos)</i>	$N_h$	44,704	21,804	17,298	9,749
<i>Media*</i>	$Y$	24.8	24.8	24.8	24.8
<i>Varianza*</i>	$\sigma$	51.9	51.9	51.9	51.9
<i>Desviación Estándar*</i>	$\sqrt{\sigma}$	7.2	7.2	7.2	7.2
<i>CV</i>	$\sqrt{\sigma}/Y$	0.290	0.290	0.290	0.290
<i>Z (90%)</i>		1.645	1.645	1.645	1.645
<i>Z<sup>2</sup></i>		2.706	2.706	2.706	2.706
<i>E</i>	10%	0.1	0.1	0.1	0.1
<i>Tamaño muestra (vehículos)</i>	$n_h$	22.74	22.73	22.72	22.70

\* Datos Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México  
Fuente: Elaboración propia

Como se observa de la tabla anterior, para poblaciones grandes el valor del tamaño de la muestra no es proporcional al de la población; el valor  $n$  es el que determina la precisión del estimador y no el porcentaje de la población muestreada (Lohr S. L., 1999).

Debido a la mayor incertidumbre en la información sobre propietarios con que se cuenta para realizar la selección de la muestra de conglomerados, se utiliza un valor de 15% de error esperado. En la Tabla 3-13 se presentan los resultados del cálculo del tamaño de muestra por conglomerados.

**Tabla 3-13. Cálculo del Tamaño de la Muestra de Conglomerados**

<i>Población (Conglomerados)</i>	$N =$	6,931
<i>Media</i>	$Y =$	24.8
<i>Varianza</i>	$\sigma$	51.9
<i>Desviación Estándar</i>	$\sqrt{\sigma}$	7.2
<i>CV</i>	$\sqrt{\sigma}/Y$	0.290
<i>Z (90%)</i>		1.645
<i>Z<sup>2</sup></i>		2.706
<i>E</i>	15%	0.15
<i>Tamaño muestra (propietarios)</i>	$n =$	10

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.2 Selección de la muestra

Los propietarios fueron seleccionados aleatoriamente (ver Tabla 3-14), encontrando que en estas empresas la cuota de vehículos para cada estrato ( $n_h$ ) fue cubierta en el muestreo. Cabe señalar que algunas de las empresas (o propietarios) seleccionadas inicialmente dentro de la muestra debieron ser reemplazadas ante la negativa de algunos propietarios a responder la entrevista, o también debido a que otros solicitaron llenar el cuestionario vía correo electrónico pero finalmente ninguno de ellos hizo llegar el cuestionario diligenciado por este medio.

**Tabla 3-14. Muestra Seleccionada**

<b>EMPRESA</b>	<b>MUY CHICO</b>	<b>CHICO</b>	<b>MEDIANO</b>	<b>GRANDE</b>
1. Barcel S.A. de C.V.	1,076	44	4	65
2. DHL Internacional de México S.A. de C.V.	637	78	8	8
3. El Globo S.A. de C.V.	-	9	2	-
4. Flama Gas S.A. de C.V.	37	148	222	65
5. Ganaderos Productores de Leche Pura S.A. de C.V.	83	259	291	130
6. Ingenieros Civiles Asociados S.A. de C.V.	145	128	123	121
7. Marinela S.A. de C.V.	353	125	6	25
8. Nestlé México S.A. de C.V.	216	359	4	22
9. Panificación Bimbo	1,326	1,717	9	158
10. Sabritas S.A. de C.V.	3,013	1,058	86	189
<b>TOTAL</b>	<b>6,886</b>	<b>3,925</b>	<b>755</b>	<b>783</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.6 Desarrollo de las entrevistas

Las entrevistas se realizaron durante los meses de abril a junio de 2010 a los directivos de las empresas seleccionadas:

- Full/Less truck team leader de DHL Global Forwarding (México) S.A. de C.V.
- Director de Logística y Servicios Agropecuarios de Alpura S.A. de C.V.
- Director de Maquinaria de Ingenieros Civiles Asociados S.A. de C.V.
- Gerente de estudios técnicos de la Dirección de vehículos de Bimbo S.A. de C.V. (Grupo Bimbo: Barcel, Marinela, Panificación Bimbo, El Globo).
- Gerente de Ingeniería y Operación de Flama Gas S.A. de C.V.
- Gerente de Operaciones de Distribución Horizontal en Mixcoac y al Gerente de Distribución (Toluca) de Nestlé México S.A. de C.V.
- Director de Vehículos de Sabritas S.A. de C.V. (Grupo Pepsico).

## 3.4 PROCESAMIENTO Y RESULTADOS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA EN LAS ENTREVISTAS

A partir de las entrevistas se obtuvieron las posibles opciones que tomarían los vehículos ante las políticas propuestas. Estas respuestas se procesaron estadísticamente para obtener las proporciones estimadas ( $\hat{p}_{est\ n}$ ) de las respuestas operacionales para cada uno de los estratos de vehículos con la Ecuación 3-2. Para obtener la proporción con respecto a la totalidad de vehículos, se suman las proporciones obtenidas por respuesta para cada estrato obteniendo  $\hat{p}_{est\ TOTAL}$

$$\hat{p}_{est} = \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{N} \hat{p}_h \quad \text{Ecuación 3-2}$$

(Lohr S. L., 1999)

Donde,

$\hat{p}_{est}$  = proporción estimada para la población total

$N_h$  = tamaño de la población del estrato  $h$

$N$  = tamaño de la población total

$\hat{p}_h$  = proporción de la población del estrato  $h$

El procedimiento estadístico detallado para la obtención de estas proporciones se encuentra en el Anexo 1 y los resultados finales de este cálculo se presentan en la Tabla 3-15.

Los camiones de mayor tamaño son utilizados principalmente en transporte de larga distancia o troncal, para transportar los productos entre grandes centros de distribución, mientras que algunos camiones medianos y los camiones chicos y muy chicos son utilizados para la distribución urbana de mercancías (su tamaño depende del tipo de carga y el tamaño del lote a distribuir); dado lo

anterior se espera que los empresarios tengan respuestas diferentes ante las restricciones a camiones de más de 3,5 toneladas en función del tipo de vehículos, tipo de transporte y tipo de carga.

Cada uno de los resultados de las proporciones obtenidas en la Tabla 3-15 se presenta en forma gráfica junto con su análisis en la sección 3.5. En términos generales, el cambio de tamaño de los vehículos ante las políticas es menos viable en la medida que las empresas cuenten con mayor flota de vehículos pesados, lo cual está relacionado con el tipo de rutas que manejan (troncal o detalle) y con el tipo de producto que distribuyen. En cuanto a los centros de consolidación propuestos en diferentes políticas, los entrevistados manifiestan la dificultad para conseguir los espacios adecuados para estas zonas dentro del área urbana, más aún en las zonas céntricas.

Ante políticas de restricción, para cumplir con las operaciones de entrega, las empresas estarían dispuestas a modificar los horarios de operación de sus vehículos. Para políticas de mejoras en las vialidades para camiones de carga, hay aceptación para modificar las rutas de operación para beneficiarse de las mejores condiciones de estas vías.

**Tabla 3-15 Proporciones Estimadas por Estrato y para el Total de la Población**

Política	Variable Independiente	Variable Dependiente	$\hat{P}_{\text{MCh}}$	$\hat{P}_{\text{Ch}}$	$\hat{P}_{\text{Med}}$	$\hat{P}_{\text{G}}$	$\Sigma \hat{P}_{\text{est}}$	$\hat{P}_{\text{est}} \%$
<i>y<sub>1</sub></i> = políticas para la reducción del impacto ambiental	<i>y<sub>1,1</sub></i> = establecimiento de normas de horario (ventanas de tiempo) para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas	<i>x<sub>1,1,1</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	n.a.	n.a.	2.7%	6.1%	0.088	<b>8.8%</b>
		<i>x<sub>1,1,2</sub></i> = centros de consolidación/ estacionamientos para vehículos de carga	42.1%	21.2%	9.8%	7.8%	0.810	<b>81.0%</b>
		<i>x<sub>1,1,3</sub></i> = cambio de horario de distribución	28.1%	10.5%	10.9%	5.4%	0.549	<b>54.9%</b>
		<i>x<sub>1,1,4</sub></i> = obtención de permisos ante la autoridad	5.4%	1.2%	3.2%	1.7%	0.116	<b>11.6%</b>
	<i>y<sub>1,2</sub></i> = establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas	<i>x<sub>1,2,1</sub></i> = cambio de horarios de distribución	47.2%	21.8%	11.3%	8.7%	0.890	<b>89.0%</b>
		<i>x<sub>1,2,2</sub></i> = centros de consolidación	23.0%	10.0%	9.4%	4.5%	0.469	<b>46.9%</b>
	<i>y<sub>1,3</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas	<i>x<sub>1,3,1</sub></i> = cambio de recorridos	46.8%	22.5%	15.5%	8.8%	0.936	<b>93.6%</b>
		<i>x<sub>1,3,2</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	n.a.	n.a.	7.7%	3.7%	0.113	<b>11.3%</b>
		<i>x<sub>1,3,3</sub></i> = centros de consolidación	2.1%	3.7%	7.2%	2.0%	0.150	<b>15.0%</b>

Política	Variable Independiente	Variable Dependiente	$\hat{P}_{\text{MCh}}$	$\hat{P}_{\text{Ch}}$	$\hat{P}_{\text{Med}}$	$\hat{P}_{\text{G}}$	$\Sigma \hat{P}_{\text{Pest}}$	$\hat{P}_{\text{Pest}} \%$
	junto con ventanas de tiempo definidas por los clientes	$x_{1,3,4}$ = cambio de horario de distribución	47.2%	21.8%	11.3%	8.7%	0.890	<b>89.0%</b>
	$y_{1,4}$ = establecimiento de zonas ambientales (restricción de pesos y de tipos de vehículos)	$x_{1,4,1}$ cambio de tamaño de vehículo	n.a.	n.a.	15.5%	8.8%	0.243	<b>24.36%</b>
		$x_{1,4,2}$ = centros de consolidación	23.0%	10.0%	9.4%	4.5%	0.469	<b>46.9%</b>
		$x_{1,4,3}$ = establecer más rutas/ rutas en diableros o a pié	19.4%	12.1%	5.9%	4.2%	0.416	<b>41.6%</b>
		$x_{1,4,4}$ = búsqueda de mercados alternativos	0.3%	0.9%	5.5%	0.9%	0.075	<b>7.5%</b>
$y_2$ = políticas para hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos, menor número de viajes/día)	$y_{2,1}$ = establecer corredores de carga sugeridos en zonas urbanas	$x_{2,1,1}$ = aumento de tamaño de vehículo	22.4%	8.4%	n.a.	n.a.	0.308	<b>30.8%</b>
		$x_{2,1,2}$ = cambio de rutas de distribución	47.8%	23.3%	18.5%	10.4%	1.000	<b>100.0%</b>
	$y_{2,2}$ = cobro de cuotas por uso de vías	$x_{2,2,1}$ = cambio de rutas de distribución	25.9%	16.2%	13.4%	6.3%	0.618	<b>61.8%</b>
		$x_{2,2,2}$ = establecer centros de consolidación dentro de la zona urbana	23.0%	10.0%	9.4%	4.5%	0.469	<b>46.9%</b>
		$x_{2,2,3}$ = pagar y utilizar los corredores	23.7%	10.1%	10.7%	5.3%	0.497	<b>49.7%</b>
$y_3$ = políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales	$y_{3,1}$ = uso de combustibles alternativos	$x_{3,1,1}$ = cambio de flota vehicular con otros combustibles	26.3%	15.5%	9.2%	6.2%	0.572	<b>57.2%</b>
	$y_{3,2}$ = modernización de la flota vehicular	$x_{3,2,1}$ = modernización de flota vehicular	46.8%	22.5%	15.5%	8.8%	0.936	<b>93.6%</b>

Fuente: Elaboración propia

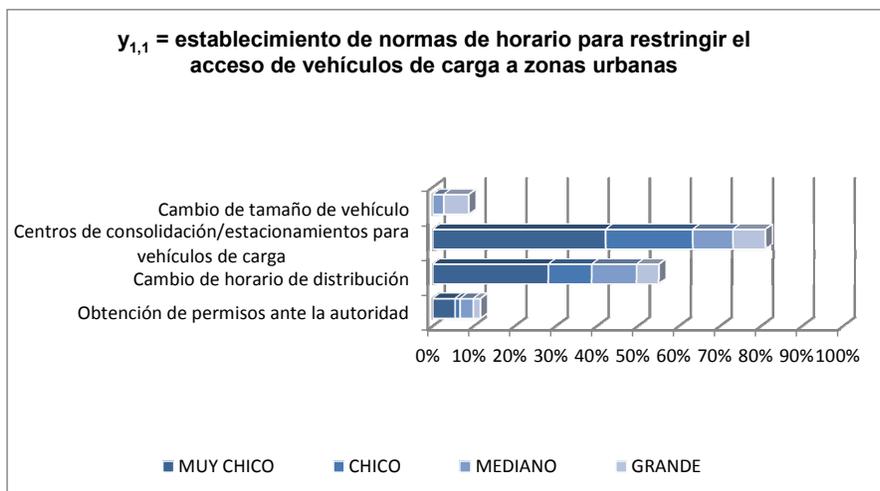
### 3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS ENTREVISTAS

Los resultados anteriores obtenidos mediante las entrevistas fueron analizados para cada política evaluada. Esta información es la base para la definición de los escenarios de evaluación de las políticas públicas para la zona de estudio:

Las acciones ante las políticas para la reducción del impacto ambiental, evaluadas mediante las entrevistas, se presentan a continuación para cada política.

– ***Establecimiento de normas de horario (ventanas de tiempo) para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas***

En la Figura 3-1 se presentan los resultados de las opciones operativas que tomarían los vehículos de carga ante la restricción de acceso durante períodos específicos del día. Este tipo de restricciones aplican generalmente a vehículos de cierto tonelaje (mayor a 3.5 toneladas), por lo cual la primera opción de cambio de tamaño de vehículo solo aplica para vehículos medianos y grandes.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-1. Resultados restricción de horarios de acceso por tamaño del vehículo**

- El 8.8% de los vehículos optarían por cambiar a otros tamaños de vehículos para cumplir con la restricción. En este caso y tal como ha ocurrido con restricciones ya en operación en la zona de estudio, las empresas han cambiado a vehículos más pequeños para poder continuar con la distribución de productos durante todo el día.

Esta alternativa es menos viable en la medida que aumenta el tamaño del vehículo y de acuerdo con las entrevistas está relacionada con el tipo de ruta a cubrir (troncal o detalle) y con el tipo de producto a distribuir: para productos de bajo peso y bajo volumen (botanas, por ejemplo) se facilita más el cambio a vehículos pequeños, pero para productos de mayor peso (líquidos embotellados) o mayor volumen (maquinaria) no es posible cambiar el tamaño del vehículo tan fácilmente.

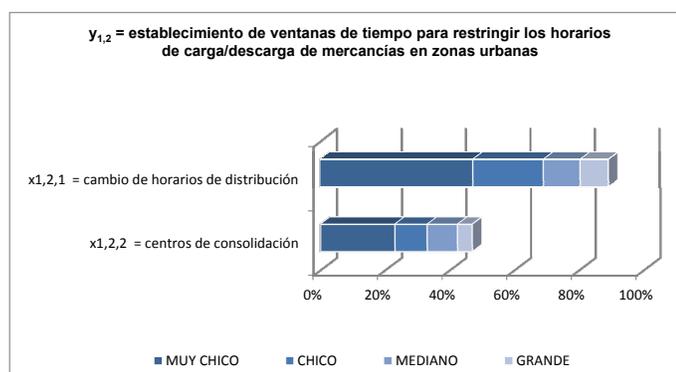
- En cuanto a la utilización de centros de consolidación y/o estacionamientos para vehículos de carga dentro de la zona para minimizar el impacto de las restricciones de horarios de acceso, el 81% de los vehículos sí utilizarían estas instalaciones, pero según manifestaron los entrevistados existe dificultad para conseguir los espacios adecuados para estas zonas dentro del área urbana y más aún en las zonas céntricas.
- En relación con la opción operativa de cambiar los horarios de distribución, el 54.9% de los vehículos modificarían sus horarios para operar fuera de las horas de restricción.

Aunque algunas rutas de distribución operan actualmente en horario nocturno (22:00 a 05:00 horas), especialmente vehículos medianos que van a clientes que abren 24 horas y vehículos grandes de rutas troncales, los entrevistados manifestaron la dificultad de operar en este horario por razones de seguridad y porque la mayoría de clientes finales minoristas (tiendas, mini supermercados, restaurantes, entre otros) no abren en la noche.

- Durante las entrevistas surgió otra alternativa de respuesta por parte de los entrevistados, que es la obtención de permisos ante la autoridad para poder circular en los períodos de restricción (11.6%). Esta respuesta está asociada a movimientos de carga de productos que no es posible fragmentar o que requieren ser entregados al cliente en horarios muy estrictos.
- ***Establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas***

La segunda estrategia evaluada de las políticas para la reducción del impacto ambiental corresponde al establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga y descarga de mercancías en la zona urbana. A diferencia de la anterior, no se limita la circulación del vehículo por las vías urbanas principales, sino que se restringen las operaciones de carga/descarga sobre la vialidad en ciertos horarios. Las respuestas de esta opción se muestran en la Figura 3-2, a partir de las cuales se puede concluir que:

- Ante la restricción por ventanas de tiempo para las operaciones de carga y descarga sobre las vías urbanas, el 89% de los vehículos modificaría los horarios de distribución para cumplir con las entregas. Lo anterior surge de la importancia que tiene para las empresas el cumplir con las entregas oportunas a los clientes, por lo cual reprogramarían sus recorridos para hacer sus operaciones de carga y descarga fuera de la ventana de tiempo y así cumplir con la normatividad y con el cliente.
- En relación con el uso de centros de consolidación, que harían más eficientes los recorridos y por tanto facilitarían la distribución fuera de los horarios de restricción, el 46.9% de los vehículos buscarían esta alternativa. Como se indicó en párrafos anteriores el menor porcentaje de respuesta afirmativa a esta opción obedece a la dificultad que ven las empresas en encontrar espacios para estas facilidades logísticas y a que para cierto tipo de carga no es aplicable el fraccionamiento de la misma (equipos pesados, muebles grandes, etc.).



Fuente: Elaboración propia

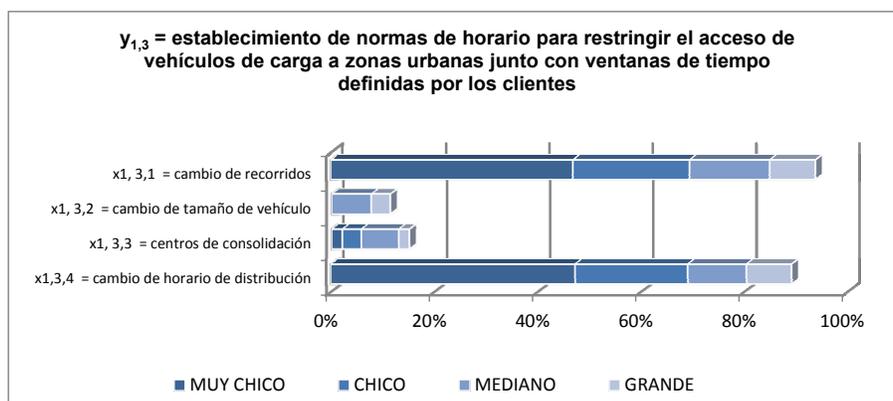
**Figura 3-2. Resultados restricción ventanas de tiempo para carga/descarga por tamaño del vehículo**

– ***Establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas junto con ventanas de tiempo definidas por los clientes***

Esta política es una combinación de restricción por parte del gobierno local junto con exigencias del cliente final y requiere por parte del distribuidor de carga una opción operativa que se ajuste a las dos condiciones.

- En este caso los cambios en los recorridos de las rutas junto con los cambios en los horarios de distribución son las opciones con mayor peso: 93.6% y 89% respectivamente (ver Figura 3-3), ya que los vehículos de carga deben ajustarse a la ventana del tiempo que define el cliente o el dueño de la carga y también a la restricción de circulación de los vehículos. Varios de los entrevistados manifestaron la dificultad de cumplir con todas las entregas bajo estas dos condiciones, sin embargo, las estrategias internas de las empresas en relación con el servicio al cliente hacen que éste sea su prioridad, por lo cual rediseñarían sus esquemas de entrega para poder cumplir a tiempo con los pedidos, inclusive adicionando más rutas y vehículos.

También se identificó durante las entrevistas que la ventana de tiempo que definen los clientes finales suele ser mayor a la que informan inicialmente a los transportistas, debido a la demora en la recepción de la carga a vehículos de las entregas anteriores, por lo que se generan colas y tiempos de espera que dificultan que el camión realice otras entregas durante el mismo recorrido.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-3. Resultados restricción de horario de circulación junto con ventanas de tiempo del cliente**

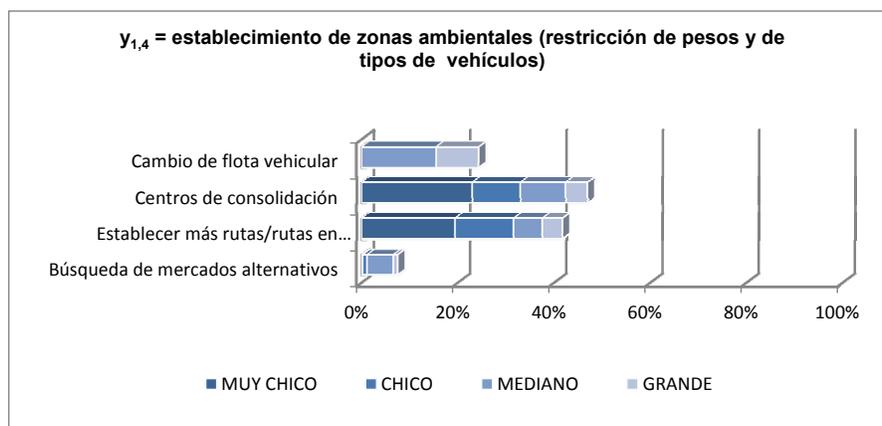
- En cuanto al cambio de tamaño del vehículo para cumplir con estas dos restricciones, lo cual aplica solo para vehículos medianos y grandes, el 11.4% de los vehículos de estos tamaños lo consideraría, ya que se requerirían varios vehículos para cumplir con el mismo pedido, lo cual no es eficiente para algunos propietarios.
- Finalmente, para esta política no consideran tan relevante la alternativa de contar con centros de consolidación en la zona urbana, puesto que solo el 15% de los vehículos respondió afirmativamente a esta opción.

– ***Establecimiento de zonas ambientales (restricción por pesos y tipos de vehículos)***

Para esta pregunta se utilizó como ejemplo, durante las entrevistas, las restricciones actuales en el Centro Histórico de la Ciudad de México<sup>11</sup>, situación que ya han experimentado las empresas, y que podría aplicarse a otras áreas de la zona de estudio.

Ante la restricción total del acceso a algunas zonas para a los vehículos de carga de tamaño superior a 3.5 toneladas, las principales respuestas están relacionados con el cambio de tamaño de los vehículos, ya sea desde el origen o en centros de consolidación, para adecuarse a la normatividad. Los porcentajes de las respuestas son los siguientes (ver Figura 3-4):

- El 24.3% de vehículos medianos y grandes cambiarían la flota vehicular, adecuando los tamaños y características del vehículo a las exigencias de la norma.
- El 46.9% utilizaría centros de consolidación dentro o en la periferia de la zona para reducir el uso de vehículos mayores.
- El 41.6% podría requerir de más rutas para cumplir con los pedidos en razón a la disminución del tamaño (capacidad de carga) de sus vehículos y al mayor tiempo de operación generado por los tramos peatonales que deben cubrir ya sea a pié o utilizando los denominados “diablos” (carretillas).
- Un 7.5% buscaría mercados alternativos ante la imposibilidad de cumplir con las normas exigidas dentro de la zona con restricción.



Fuente: Elaboración propia

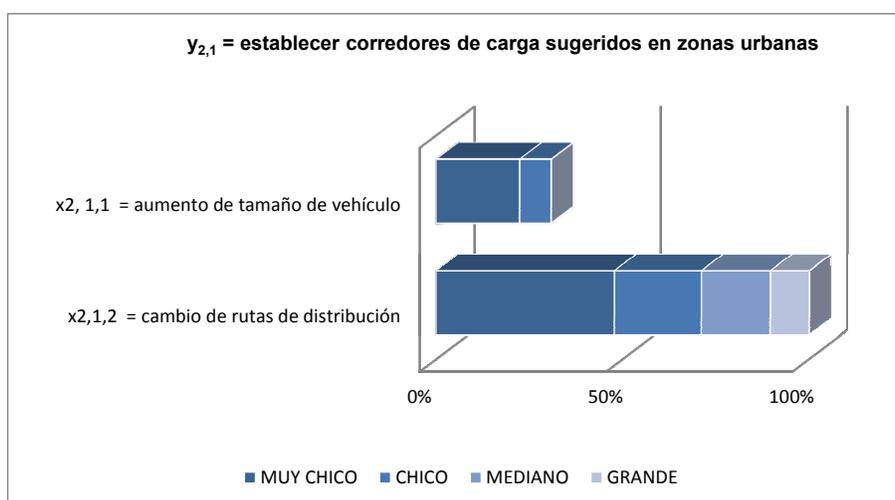
**Figura 3-4. Resultados establecimiento de zonas ambientales por tamaño del vehículo**

<sup>11</sup> Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 359. 19 de junio de 2008. Prohíbe la circulación de los vehículos de carga mayores a 3.5 toneladas, en cualquiera de sus modalidades, en el horario comprendido de las 7:00 a las 22:00 hrs., en el Perímetro “A” del Centro Histórico de la Ciudad de México. Se excluyen vehículos de 3.5 ton, menores de 7.5 m de longitud, vehículos de servicios incluyendo mensajería, construcción y vehículos que transporten mercancías perecederas y refrigerados.

– **Políticas para Hacer más Eficientes los Recorridos del vehículo**

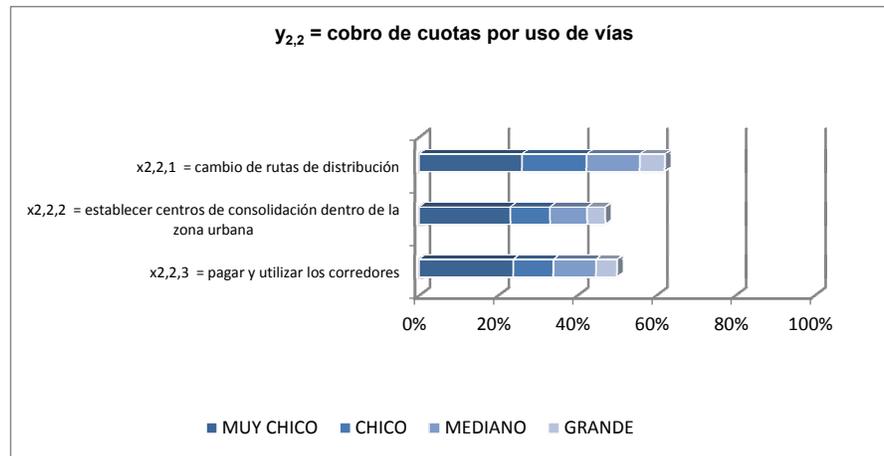
Mediante las entrevistas fueron evaluadas dos estrategias que se enmarcan dentro de las políticas para hacer más eficientes los recorridos de los vehículos de carga (menor número de kilómetros recorridos y menor número de viajes/día), la primera es la definición de corredores de carga sugeridos en las zonas urbanas, es decir, corredores con mejoras operacionales para ser utilizados prioritariamente por vehículos de carga medianos y grandes pero sin obligar a los transportistas a hacer uso de ellos y, la segunda estrategia es cobrar cuotas por usar vías de mejores especificaciones para camiones dentro de la zona urbana.

- Para los corredores de carga sugeridos, 30.8% de los vehículos muy chicos y chicos cambiarían a un mayor tamaño para utilizar en forma más eficiente estos corredores y la totalidad de los vehículos de carga modificarían sus rutas de distribución para beneficiarse de las mejores condiciones de estas vías (ver Figura 3-5).



**Figura 3-5. Resultados corredores de carga sugeridos por tamaño del vehículo**

- En cuanto a las vías de cuota para camiones (ver Figura 3-6), 61.8% de los vehículos modificarían sus rutas para evitar el paso por ellas, mientras que un 49.7% estaría dispuesto a pagar la cuota por razones de eficiencia y seguridad. Aunque las dos opciones anteriores son excluyentes, algunos entrevistados incluyeron las dos opciones como respuesta, manifestando que la decisión final dependería del valor de la cuota, especialmente para camiones grandes.
- También se evaluó la opción de contar con centros de consolidación dentro del área urbana cuya ubicación evite el paso por las vías de cuota, ante lo cual 46.9% respondieron afirmativamente.



Fuente: Elaboración propia

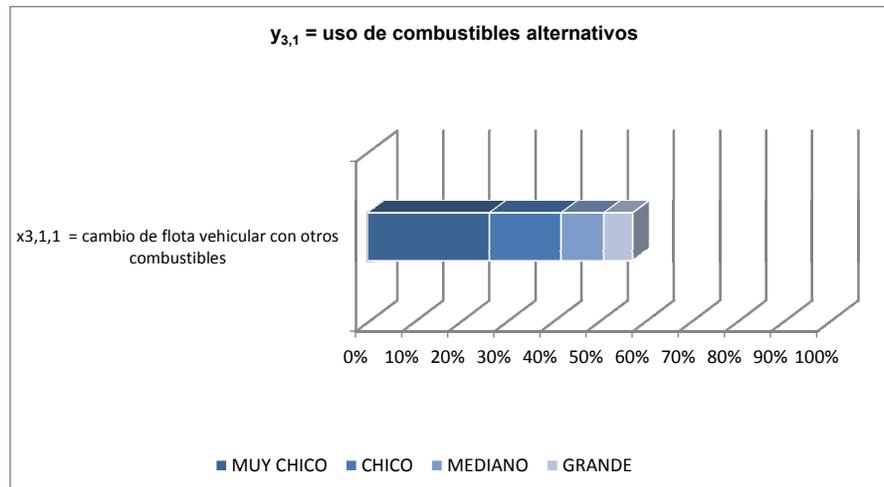
**Figura 3-6. Resultados cobro de cuotas por uso de vías por tamaño del vehículo**

– ***Políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales***

La última política evaluada corresponde a las estrategias para incentivar el uso de tecnologías limpias y de combustibles diferentes a la gasolina o el diesel.

El uso de combustibles alternativos tuvo respuesta afirmativa para el 57.2% de los vehículos (Figura 3-7). Adicionalmente a este valor numérico, durante las entrevistas se obtuvo información importante sobre las experiencias que han tenido las empresas en cuanto al uso de otros combustibles alternativos:

- Los vehículos eléctricos de baja capacidad de carga (menos de 1.5 toneladas) han sido incorporados en las flotas vehiculares de algunas empresas para su uso en zonas que tienen actualmente normas que restringen el acceso de vehículos más grandes, sin embargo, estos vehículos no son considerados como alternativa permanente por dichas empresas, los utilizan principalmente por sus estrategias internas de reducción de emisiones ambientales y como “imagen” de la empresa ante el consumidor. Estos vehículos no tienen alta capacidad de carga y requieren recargar sus sistemas cada cierto número de horas por lo cual no son eficientes para recorridos de distribución extensos.
- En cuanto a los vehículos a gas, el problema planteado por los propietarios se refiere a la poca disponibilidad de estaciones en la zona de estudio, para el llenado con este tipo de combustible.
- Otras alternativas como biocombustibles y vehículos híbridos (electricidad-diesel) están siendo consideradas, al momento en términos experimentales pero no como opción a corto plazo.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-7. Resultados uso de combustibles alternativos por tamaño del vehículo**

Finalmente, para el 93.6% de los vehículos es afirmativa la opción de modernización de la flota. Los vehículos de tamaño muy chico actualmente se rigen por el programa “hoy no circula” del Distrito Federal, por tanto las empresas procuran mantener en circulación toda su flota y la renuevan periódicamente o se lo exigen así a los prestadores de servicios de transporte que trabajan para ellos.

### 3.5.1 Resultados Estandarizados de las Estimaciones

Una vez obtenidas las proporciones para cada variable y tamaño de vehículo, se procedió a estimar el número de vehículos para cada respuesta. Los valores obtenidos corresponden al año 2010 (aplicando una tasa de crecimiento del 3% anual a los datos de los padrones del año 2004). Los porcentajes por tamaño para la totalidad de la flota en la ZMVM son los mostrados en la Tabla 3-16.

**Tabla 3-16 Porcentajes de vehículos por tamaño ZMVM**

Tamaño	%	No. Vehículos 2010
MUY CHICO	45.2	308,200
CHICO	21.3	144,953
MEDIANO	22.0	150,044
GRANDE	11.5	78,139
Totales	100	681,336

Fuente: Elaboración propia

Aplicando los anteriores porcentajes a las proporciones estandarizadas<sup>12</sup> de las respuestas, se obtuvo el número de vehículos que optarían por cada cambio operacional. Los valores de las proporciones para cada política se ponderaron en función del porcentaje total por cada grupo de respuestas.

Los porcentajes de las Tabla 3-17 a la Tabla 3-23 corresponden a la información requerida para la modelación de los escenarios de evaluación que se definen en el Capítulo 5. Son las estimaciones estandarizadas y en términos de número de vehículos de las respuestas de los propietarios de los vehículos de la ZMVM, ante la implementación de políticas, y fueron obtenidas de las proporciones estimadas mediante los resultados de las entrevistas. En la Tabla 3-17, Tabla 3-18, Tabla 3-19 y Tabla 3-20 se presentan los resultados estandarizados para las políticas cuyo objetivo es la reducción del impacto ambiental. Para la política de restricción de acceso por ventanas de tiempo (Tabla 3-17), el menor porcentaje se presenta para el cambio de tamaño del vehículo, dado que éste aplica solo a los camiones de tamaño mediano y grande, y además existe dificultad para este tipo de camiones de cambiar a vehículos más chicos, de acuerdo con las entrevistas realizadas. Para la opción de uso de centros de consolidación se obtiene un porcentaje alto (51.8%), bajo el supuesto de que estas instalaciones son factibles de ubicar en todos los sitios donde sean requeridas.

Para la política de ventanas de tiempo para carga/descarga de los camiones (Tabla 3-18), el mayor porcentaje (65.5%) se obtiene para la opción de cambios de horarios de operación de los camiones, dada la importancia que tiene para las empresas la entrega de las mercancías a los clientes, y la ventana de tiempo limitaría cumplir con todas las entregas.

En cuanto a la política de restricción de acceso y por ventanas de tiempo de los clientes (Tabla 3-19), los mayores porcentajes se obtienen para los cambios de recorridos (44.8%) y cambio de horario de operación de los vehículos (42.6%), respuestas relacionadas también con la importancia que tiene para las empresas el cumplir con las entregas a tiempo, por lo cual optarían por estos cambios ante las restricciones. Para la política de establecimiento de zonas ambientales (Tabla 3-20), la utilización de centros de distribución (39%) y los cambios de rutas asociadas a estos centros e incorporando operaciones inclusive con vehículos en diableros (34.6%), son las opciones de mayor peso, dadas las restricciones tan drásticas que se generarían en este tipo de zonas para los vehículos pesados.

**Tabla 3-17. Proporciones Estandarizadas y Total de Vehículos Afectados por la Política de Restricción de Acceso por Ventanas de Tiempo**

ACCIÓN	% ESTANDARIZADO	MUY CHICO	CHICO	MEDIANO	GRANDE	TOTAL VEHÍCULOS
Cambio de tamaño de vehículo	5.6%	n.a.	n.a.	8,437	4,394	<b>12,831</b>
Incorporar centros de consolidación/estacionamientos para vehículos de carga	51.8%	159,714	75,117	77,755	40,493	<b>353,078</b>
Cambio de horario de operación	35.1%	108,299	50,935	52,724	27,458	<b>239,417</b>
Obtención de permisos ante la autoridad	7.4%	22,856	10,750	11,127	5,795	<b>50,528</b>

Fuente: Elaboración propia

<sup>12</sup> Dado que las respuestas de cada variable no son excluyentes, se obtienen valores superiores al 100% al sumar las proporciones para algunas políticas por lo cual se procedió a ponderar (estandarizar) estos porcentajes.

**Tabla 3-18 Proporciones Estandarizadas y Total de Vehículos Afectados por la Política de Restricción de Carga y descarga por Ventanas de Tiempo**

ACCIÓN	% ESTANDARIZADO	MUY CHICO	CHICO	MEDIANO	GRANDE	TOTAL VEHÍCULOS
Cambio de horarios de operación	65.5%	201,916	94,965	98,301	51,193	<b>446,375</b>
Incorporar centros de consolidación	34.5%	106,284	49,987	51,743	26,947	<b>234,961</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-19 Proporciones Estandarizadas y Total de Vehículos Afectados por la Política de Restricción de Acceso y Ventanas de Tiempo de los Clientes**

ACCIÓN	% ESTANDARIZADO	MUY CHICO	CHICO	MEDIANO	GRANDE	TOTAL VEHÍCULOS
Cambio de recorridos	44.8%	138,054	64,929	67,210	35,001	<b>305,194</b>
Cambio de tamaño de vehículo	5.4%	n.a.	n.a.	8,138	4,238	<b>12,377</b>
Incorporar centros de consolidación	7.2%	22,152	10,419	10,785	5,616	<b>48,972</b>
Cambio de horario de operación	42.6%	131,277	61,742	63,911	33,283	<b>290,214</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-20 Proporciones Estandarizadas y Total de Vehículos Afectados por la Política de Zonas Ambientales**

ACCIÓN	% ESTANDARIZADO	MUY CHICO	CHICO	MEDIANO	GRANDE	TOTAL VEHÍCULOS
Cambio de flota vehicular	20.2%	n.a.	n.a.	30,321	15,791	<b>46,112</b>
Incorporar centros de consolidación	39.0%	120,181	56,524	58,509	30,470	<b>265,684</b>
Establecer más rutas/rutas en diablos o a pié	34.6%	106,617	50,144	51,905	27,031	<b>235,697</b>
Búsqueda de mercados alternativos	6.2%	19,120	8,993	9,308	4,848	<b>42,269</b>

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-21 y Tabla 3-22 se presentan los resultados estandarizados para las políticas cuyo objetivo es hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos o menor número de viajes/día). Para la política de corredores de carga con circulación preferente para camiones pesados (Tabla 3-21), el 76.4% de los camiones cambiarían sus rutas para utilizar estas vialidades y el 23.6% de los vehículos con capacidad menor a 3.5 toneladas consideraría la opción de cambiar a camiones más grandes para beneficiarse de estos corredores. En cuanto a la política de cobro de cuotas por uso de estas vialidades (Tabla 3-22), las opciones se distribuyen casi en igual porcentaje entre las tres alternativas: cambio de recorrido para evitar el pago de cuota

(39%); uso de centros de consolidación en zonas donde su acceso vial no requiera pago de cuotas (30%), y pago de la cuota para utilizar vialidades mejoradas (31%).

Finalmente, en la Tabla 3-23 se presentan los resultados estandarizados para la política para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales, en donde la alternativa de modernización de la flota vehicular es aceptada para un alto porcentaje de los camiones (62.1%). Lo anterior está relacionado (en el caso de los vehículos de menos de 3.5 toneladas) con las políticas vigentes en el Distrito Federal, debido a los controles de emisiones para este tipo de vehículos, que obligan a renovar periódicamente la flota de vehículos para poder circular diariamente. En cuanto al uso de otros combustibles (eléctricos principalmente), como se explicó en la sección anterior, existe mayor dificultad debido a los mayores costos de estos vehículos y a que su capacidad de carga es limitada.

**Tabla 3-21 Proporciones Estandarizadas y Total de Vehículos Afectados por la Política de Corredores de Carga**

ACCIÓN	% ESTANDARIZADO	MUY CHICO	CHICO	MEDIANO	GRANDE	TOTAL VEHÍCULOS
Aumento de tamaño de vehículo	23.6%	72,645	34,167	n.a.	n.a.	<b>106,812</b>
Cambio de rutas de operación	76.4%	235,555	110,786	114,677	59,721	<b>520,739</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-22 Proporciones Estandarizadas y Total de Vehículos Afectados por la Política de Cobro de Cuotas**

ACCIÓN	% ESTANDARIZADO	MUY CHICO	CHICO	MEDIANO	GRANDE	TOTAL VEHÍCULOS
Cambio de rutas de operación	39.0%	120,238	56,550	58,537	30,484	<b>265,810</b>
Establecer centros de consolidación dentro de la zona urbana	29.6%	91,198	42,892	44,399	23,122	<b>201,611</b>
Pagar cuota y utilizar los corredores	31.4%	96,764	45,510	47,109	24,533	<b>213,915</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-23 Proporciones Estandarizadas y Total de Vehículos Afectados por la Política de Uso de Combustibles Alternativos**

ACCIÓN	% ESTANDARIZADO	MUY CHICO	CHICO	MEDIANO	GRANDE	TOTAL VEHÍCULOS
Cambio de flota vehicular con otros combustibles	37.9%	116,871	54,967	56,897	29,631	<b>258,366</b>
Modernización de flota vehicular	62.1%	191,329	89,986	93,146	48,508	<b>422,970</b>

Fuente: Elaboración propia

### **3.6 RESULTADOS DEL SONDEO DE OPINIÓN REALIZADO EN 2012 A LOS GERENTES DE OPERACIONES**

En marzo de 2012 se realizó un sondeo de opinión a algunos gerentes de operaciones de empresas de transporte de carga, el cual contó con el apoyo de la Asociación Nacional de Transporte Privado (ANTP). Durante este sondeo realizado durante la reunión mensual de esta asociación, se realizó una breve presentación a los gerentes, explicando el objetivo de la investigación y el escenario de evaluación de una posible restricción a los camiones pesados (con capacidad mayor a 3.5 toneladas) sobre los principales corredores de acceso a la ZMVM, a horas pico.

En el formato de consulta se amplió información acerca de los siguientes aspectos, que posteriormente sirvieron de apoyo para la definición de los escenarios finales de la evaluación, los cuales se presentan en el Capítulo 5:

- Vialidades alternas (con mejoras para el tráfico de vehículos pesados) que utilizarían los vehículos de carga pesados en el caso de que se aplicara una política de restricción a los camiones de más de 3.5 toneladas sobre los principales accesos a la ZMVM.
- Posible localización de centros de transferencia de carga, en caso de que se restringiera el acceso a los camiones pesados de carga a la ZMVM y no se mejoraran las vías alternas.
- Porcentaje de camiones mayores a 3.5 toneladas que optarían por los siguientes cambios operativos ante la restricción de acceso en los corredores: Av. Constituyentes, Autopista México-Querétaro, Autopista México-Puebla, Autopista México-Pachuca o Autopista México-Cuernavaca
  - a) Utilización de otras vías alternas para los camiones pesados durante el período de restricción asumiendo que serían mejoradas para la circulación de camiones.
  - b) Realización de recorridos con los camiones grandes una vez terminara el período de restricción.
  - c) Reemplazo desde el punto de origen de los camiones grandes por camiones que no estuvieran restringidos (< 3.5 ton).
  - d) Utilización de Centros de Transferencia antes del punto de inicio de la prohibición, en donde cada empresa realizaría el cambio de la carga de los camiones grandes a camiones chicos de la misma empresa, los cuales podrían continuar por los corredores restringidos hasta el destino final, o donde llegarían los camiones chicos para que después la carga pudiera continuar el viaje en camiones más grandes por los corredores no restringidos.

Las respuestas obtenidas en este sondeo se utilizaron como apoyo en la definición de los siguientes elementos para la conformación de los escenarios de evaluación:

- Selección de las vialidades alternas en la ZMVM con opción de mejoramiento para circulación de camiones de carga pesados, las cuales fueron adicionadas a los archivos geográficos de las redes viales para modelación junto con los parámetros de mejora de capacidad en los arcos respectivos. Las vialidades seleccionadas se describen en el Capítulo 6.

- Ubicación factible de Centros de Transferencia antes del inicio de la restricción en corredores de acceso, lo cual se apoyó posteriormente con los resultados de la investigación doctoral “Competitividad Logística Territorial-Caso de Estudio: Sistema Urbano Regional en la Región Centro país”, (Alarcón, 2012).
- Proporciones para el análisis de los escenarios que evalúan varios cambios operativos simultáneos por parte de los transportistas ante las restricciones por ventanas de tiempo en corredores de acceso en la ZMVM.

Los resultados de esta toma de información son la base para la definición de los escenarios que combinan diferentes respuestas operativas por parte de los transportistas, los cuales se encuentran descritos en la sección 5.3.4.

## 4 MARCO TEÓRICO PARA LA MODELACIÓN DE ESCENARIOS

Los modelos de redes de transporte son una herramienta fundamental para representar y analizar los movimientos de los vehículos y determinar los impactos que se generan por la aplicación de políticas o el desarrollo de nuevos proyectos. El análisis del impacto del movimiento de los vehículos de carga, como uno de los componentes del flujo vehicular, se incluye dentro de la aplicación de los modelos de redes de transporte.

El objetivo de esta investigación es proponer un proceso metodológico fundamentado en modelación de redes para evaluar el impacto en el tráfico y en las emisiones de contaminantes de las políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas, con aplicación a un estudio de caso en la ZMVM, para lo cual en este capítulo se presenta la revisión del estado del arte realizada para conformar el marco teórico de los tipos de modelos que finalmente se eligieron para este proceso de evaluación, con aplicabilidad a grandes zonas urbanas con sistemas congestionados de tráfico como la ZMVM.

Los dos tipos de modelaciones incluidas en esta revisión bibliográfica son los siguientes:

- Modelación macroscópica de tráfico multi-vehículo en redes: consiste en el uso y desarrollo de formulaciones matemáticas para representar los patrones de viaje, así como el volumen, las velocidades, y los niveles de congestión en los arcos de una red de transporte compartida por varios tipos de flujos vehiculares.

El enfoque macroscópico corresponde al análisis agregado de estos flujos de tráfico caracterizados por variables macroscópicas: densidad, volumen y velocidad (Barceló J., 2010), aplicable a extensas y complejas redes de tráfico.

- El segundo tipo de modelos son los modelos de factores de emisiones de contaminantes, cuya información base son los inventarios de emisiones de vehículos automotores que recopilan una gran variedad y cantidad de datos para una zona específica, los cuales son administrados por las agencias gubernamentales encargadas del medio ambiente. Para el caso de México la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos (E.P.A.) junto con un grupo consultor (E.R.G., 2000) desarrollaron para México el modelo *Mobile-Mexico*. El marco teórico de la versión *Mobile5.0-MexicoCity*, se presenta en este capítulo, dado que fue la versión seleccionada para ser utilizada en esta investigación, teniendo en cuenta que solo en esta versión se permite al usuario incorporar la información de velocidades (para este caso proveniente de los resultados del modelo de tráfico) para estimar los factores de emisiones.

### 4.1 MODELOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO

La asignación de tráfico es un proceso que permite predecir el flujo modal por las posibles rutas que se dan entre cada par de nodos de origen y destino (O-D) de una red de interés.

Dada una demanda de transporte (matriz O-D) y una red de transporte (arcos  $a$  y nodos  $i$ ), el problema consiste en encontrar los flujos sobre los arcos que satisfagan la demanda de acuerdo con algunos criterios de comportamiento de los usuarios. Con el fin de considerar redes congestionadas,

cada arco tiene asociada una función de congestión, la cual es una función incremental del flujo sobre el arco.

Durante un proceso clásico de asignación de tráfico, se usan un conjunto de reglas o principios para cargar una red con una matriz de viajes establecida (de flujos reales o estimados), a fin de producir un conjunto de flujos en los arcos. Se asume que la selección de la ruta es realizada por un viajero “racional”, es decir, aquel que escoge la ruta con el menor costo percibido entre el par O-D. Algunos de los factores que influyen en su decisión pueden ser: tiempo del viaje, distancia, costo monetario (algunos relacionados con combustibles, cuotas, etc.), congestión, tipo de maniobras que se ejecutan, tipo de vía, el paisaje, la señalización, la seguridad o los hábitos (Ortúzar, 2008).

En la práctica el costo generalizado de viaje no incluye todos estos factores, por tanto en la modelación son inevitables las aproximaciones. Generalmente sólo se consideran dos factores: el tiempo y costo monetario; algunas veces este último es expresado como un valor proporcional a la distancia de viaje (Ortúzar, 2008).

Algunos modelos de asignación de tráfico permiten al usuario ponderar el tiempo y la distancia de viaje, de tal forma que pueda representarse la percepción del viajero en esos dos factores; la suma de estos dos factores corresponde al costo generalizado de viaje que el usuario utiliza para hacer la selección de la ruta.

Ortúzar (1994), clasifica algunos de los modelos de asignación de tráfico de acuerdo con el tipo de restricción y los efectos estocásticos como se muestra en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1 Características de algunos modelos de asignación**

		¿Se incluyen efectos estocásticos?	
		No	Si
¿Se tiene en cuenta la restricción de capacidad?	No	Todo o nada	Estocástico puro de Dial y Burrell
	Sí	Equilibrio del usuario	Equilibrio estocástico del usuario

Fuente: Ortúzar (2008)

A continuación se describen algunos de los modelos de asignación de tráfico más utilizados (Sheffi, 1985):

- Asignación a rutas alternativas mediante curvas de distribución.
- Todo o nada.
- Asignación estocástica.
- Asignación por etapas con restricción de capacidad (funciones intensidad - velocidad).
  - Incremental.
  - Volumen medio.
- Asignación de equilibrio.
- Equilibrio estocástico del usuario.

#### 4.1.1 Asignación Mediante Curvas de Distribución o Reparto

La asignación mediante curvas de distribución o reparto supone que entre cada par de zonas existen al menos dos caminos alternativos, con sus propias características de tiempo, distancia, nivel de servicio (por ejemplo utilizando y sin utilizar la autopista de cuota, o una variante importante del trazo). Los viajes se reparten a uno u otro itinerario en función de las curvas de distribución preestablecidas que definen el porcentaje para cada itinerario en función de variables tales como: tiempo de viaje ahorrado, distancia ahorrada, razón de tiempos de viaje, razón de distancias de viaje, tiempo de viaje y distancia ahorrados, y razón entre distancias y velocidades.

Las curvas pueden ajustarse con base en las observaciones de reparto (o distribución) que se producen en otras áreas o corredores similares.

#### 4.1.2 Asignación para Ruta Mínima, Comúnmente Llamada “Todo o Nada”

Este modelo Todo o Nada es ideal para identificar rutas con tiempo o costo de viaje mínimo, no congestionadas, a las que se les carga todo el flujo entre cada par O-D. Se trata de un proceso simple y poco costoso, que describe las rutas que muchos viajeros deberían seguir, si no existiesen los efectos de capacidad y congestión. En este modelo, el tiempo de viaje es fijo y no depende del nivel de congestión. La desventaja es que en redes que operan con restricciones de capacidad y congestión, sus resultados son poco realistas.

En redes urbanas, en las que entre cada par de zonas existen rutas alternativas similares, en las que en la realidad se reparte el tráfico, el modelo “todo o nada” tiende a sobrecargar ciertos itinerarios y a descargar otros, no ofreciendo buenos resultados.

#### 4.1.3 Asignación Estocástica

Los procesos estocásticos permiten reconocer que varias rutas entre un origen y un destino pueden percibirse con igual tiempo de viaje, o pueden ser igualmente atractivas para un usuario, y por lo tanto, cualquiera puede ser elegida. Es por esto, que estos procesos tratan los costos del arco como variables aleatorias, que varían entre los viajeros de acuerdo con sus preferencias individuales, experiencia y percepción.

Algunas técnicas usadas para la asignación estocástica son:

- Asignación incremental en procesos de simulación estocástica (Burrell, 1968 en Sheffi, 1985): el método Burrell es una asignación todo o nada, en la que se considera que el tiempo de viaje asignado a cada arco es un tiempo medio que los usuarios perciben, con una desviación estándar, de forma que cuando se construye la ruta mínima se establece el tiempo de viaje a través de un proceso aleatorio, donde el valor medio es el establecido en la red y la desviación estándar es la que se defina específicamente. Mediante este proceso es posible que los itinerarios entre dos pares de zonas, que por la ruta mínima tendrían gran parte del itinerario en común, tengan caminos diferentes o con partes comunes menores.
- Modelo logit multinomial para predecir la probabilidad de selección de la ruta: otra mejora del método “Todo o Nada” es la técnica Dial (Dial, 1971 en Sheffi, 1985) o de asignación

estocástica a rutas alternativas. En este método, se definen dos o más rutas alternativas entre cada par de zonas, repartiéndose el flujo existente mediante una relación probabilística (por ejemplo la función de probabilidad exponencial) entre dichos itinerarios, teniendo en cuenta el tiempo mínimo y el tiempo en cada uno de los itinerarios.

- Modelos de selección discreta: en los procesos de asignación estocástica, se distribuyen los viajes entre cada par O-D entre las múltiples rutas alternativas que los conectan. La proporción de viajes que se asigna a una ruta particular es igual a la probabilidad de selección de esa ruta, la cual se calcula por medio de un modelo de selección.

En general, una ruta que ofrezca menor tiempo tendrá más probabilidad de ser elegida. La asignación estocástica no asigna viajes a todas las rutas alternativas, sólo a las rutas que tienen arcos que se consideran “razonables”. Un arco razonable es aquel que toma el viajero, tal que le permita ir desde su origen a su destino en el tiempo mínimo o cerca del mínimo posible. El tiempo de viaje sobre el arco es un dato de entrada fijo y no depende del flujo.

Estos métodos no tienen en cuenta la capacidad de las vías, pudiendo asignar flujos superiores a la capacidad de los arcos.

#### 4.1.4 Asignación con Restricción de Capacidad

La asignación con restricción de capacidad se realiza en varias etapas, cambiando al final de cada etapa las condiciones de funcionamiento del arco (tiempo de viaje), en función de la carga asignada y de la capacidad de la vía que representa el arco. En el proceso de análisis, cada arco se tipifica de acuerdo a sus características: para cada arco se define una curva típica de flujo-velocidad, que en función del flujo asignado permite obtener la velocidad media de circulación. El proceso simplificado es el siguiente:

- 1) Se asigna mediante el modelo “Todo o Nada” o por el método Dial, el total de la matriz de viajes o un porcentaje de ésta.
- 2) Se analiza, arco por arco, la carga asignada y en función de ésta y de la curva flujo-velocidad correspondiente, se asigna una nueva velocidad.
- 3) A la red con las nuevas velocidades se le vuelve a asignar la matriz de viajes, bien en su totalidad o en un porcentaje de ésta.

El método de restricción de capacidad intenta aproximarse a una solución de equilibrio a partir de un proceso iterativo, en el que carga la red mediante el modelo “todo o nada” y recalcula el tiempo de viaje con base en una función de congestión (relación flujo-velocidad), que incorpora la capacidad del arco. Lamentablemente, este método no converge y puede fluctuar entre los arcos a la cuarta iteración.

Este método está incorporado en algunos paquetes de software que intentan disminuir este problema mediante la suavización del tiempo de viaje y promediando los flujos de las últimas iteraciones. Este método no converge a una solución de equilibrio, y los resultados son altamente dependientes del número de iteraciones que se realicen. Usualmente, al hacer una iteración más o una menos, los resultados cambian sensiblemente.

#### 4.1.5 Asignación de Equilibrio

La técnica de asignación de equilibrio asume que el costo o tiempo de viaje en un arco depende del volumen que por él circula. Así, por ejemplo, en un arco congestionado de una arteria vial, el mayor tiempo o costo de viaje, es provocado por el volumen de vehículos que circulan, por lo que los viajeros tenderán a evitar usarlo, mientras existan otras alternativas de ruta (Meyer y Miller, 2001). Asumiendo que los viajeros buscan minimizar su costo de viaje individual, el equilibrio se alcanza cuando ningún viajero tiene algún incentivo para modificar su decisión de ruta (Sheffi, 1985).

En la asignación de equilibrio se dan varios enfoques (Sheffi, 1985):

- Equilibrio del usuario (EU o Equilibrio Determinista del Usuario DUE): en una red en condición de equilibrio del usuario, ningún viajero puede mejorar su tiempo o costo de viaje por un cambio unilateral de su ruta.

Utiliza un proceso iterativo para lograr una solución convergente en la cual ningún usuario puede mejorar su tiempo de viaje. En cada iteración se calculan los flujos en los arcos de la red. Esta técnica incorpora efectos de restricción de capacidad, y el tiempo de viaje depende del flujo.

En caso de aplicar la asignación de equilibrio del usuario a extensas redes que involucran muchos arcos, donde se pueden generar cientos de miles de posibles rutas entre pares O-D, se hace necesaria la aplicación de complejos algoritmos derivados del campo de la investigación de operaciones.

Existen paquetes computacionales comerciales que permiten realizar procesos de modelación de transporte para redes grandes, con rutinas relacionadas con el equilibrio del usuario. En general, las herramientas analíticas computarizadas disponen de procesos que asumen que el principio de selección de la ruta se da bajo una condición de “equilibrio del usuario”. Estos procesos de asignación de viajes asumen que cada persona minimiza u optimiza su costo o tiempo de viaje.

- Equilibrio de Sistema Óptimo (SO): existe otro concepto de equilibrio donde se optimiza el sistema, en el cual los usuarios del sistema “deberían” ser asignados a rutas de tal forma que el tiempo o costo de viaje promedio sea mínimo en todo el sistema.

Bajo este método, ningún usuario podrá cambiar de ruta sin incrementar el tiempo de viaje total del sistema, aunque es posible que el viajero pudiera reducir su propio tiempo de viaje. La asignación SO puede ser pensada como un modelo en el cual la congestión es minimizada cuando los viajeros son informados de la ruta que deben usar. Obviamente, no es un modelo que se comporte en forma realista.

En general, un proceso de asignación con equilibrio del usuario muestra diferentes resultados que uno de sistema óptimo. Esto significa que un sistema en equilibrio del usuario no siempre alcanza el costo mínimo o tiempo mínimo del sistema.

- Equilibrio estocástico del usuario (SUE): el método de asignación de equilibrio antes descrito supone que todos usuarios tienen información perfecta acerca de los tiempos de viaje a través de las distintas alternativas de ruta, y por lo tanto toman la decisión correcta de viaje. Es por esto que se le llama Equilibrio del Usuario Determinista (DUE). En la práctica, los usuarios no disponen de información perfecta acerca del tiempo de viaje en todas las rutas, ni de los eventos

que se producen en la red al momento de decidir la ruta, excepto si se cuenta con dispositivos de ITS (Sistemas Inteligentes de Transporte), (Meyer y Miller, 2001).

El modelo de Equilibrio Estocástico del Usuario (Stochastic User Equilibrium) es una generalización del equilibrio del usuario que asume que el viajero no tiene información perfecta sobre los atributos de la red, y percibe los costos de viaje de diferente manera. Este método produce resultados más realistas que los del modelo determinista, porque permite usar rutas más y menos atractivas. Las rutas de menor atracción tendrán menor utilización pero no tendrán flujo cero, como lo es para el EU.

#### 4.1.5.1 *Formulación del Problema de Equilibrio (Sheffi, 1985)*

Los elementos básicos de un modelo estándar de equilibrio del usuario son:

- Una red de transporte,
- Los requisitos del viaje y
- Las funciones de costo (desutilidad del viaje).

A partir de estos elementos, se deben estimar los volúmenes o flujos de tráfico, expresados como tasas vehiculares.

Cualquier modelo de tráfico debe reconocer el derecho de los usuarios individuales de la red a decidir cuándo, dónde y cómo viajar. Un modelo de equilibrio del usuario, en el cual se busca una descripción o una predicción macroscópica del volumen de tráfico que resulta de la escogencia de rutas en la red, debe también estar basado en un principio sólido que permita prever estos comportamientos de decisión de las rutas de los usuarios.

La condición de equilibrio se refiere al concepto inicialmente introducido por Wardrop (primer principio de Wardrop), en donde el tiempo de viaje en todas las rutas de una red es igual y no mayor al que puede ser percibido por un viajero individual sobre otra ruta. Según el segundo principio de Wardrop los usuarios escogen sus rutas de tal forma que el tiempo promedio (o total) de viaje sea mínimo.

El problema de asignación de equilibrio es encontrar los flujos sobre los arcos que satisfagan el criterio de equilibrio del usuario cuando todos los pares origen-destino han sido asignados apropiadamente. Este patrón de flujos se puede obtener resolviendo la siguiente función:

$$\min z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw$$

**Ecuación 4-1**

Sujeto a:

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \forall r, s$$

**Ecuación 4-2**

y sujeto a:

$$f_k^{rs} \geq 0 \forall k, r, s$$

**Ecuación 4-3**

donde:

- $N$  conjunto de nodos
- $A$  conjunto de arcos
- $R$  conjunto de nodos origen
- $S$  conjunto de nodos destino
- $K_{rs}$  conjunto de rutas que conectan cada par O-D:  $r-s$ ;  $r \in R, s \in S$
- $x_a$  flujo sobre el arco  $a$ ;  $x = (\dots, x_a, \dots)$
- $t_a$  tiempo de viaje en el arco  $a$ ;  $t = (\dots, t_a, \dots)$
- $f_k^{rs}$  flujo en la ruta  $k$  conectando el par O-D:  $r-s$ ;  $f^s = (\dots, f_k^{rs}, \dots)$
- $c_k^{rs}$  tiempo de viaje sobre la ruta  $k$  que conecta el par O-D:  $r-s$ ;  $c^{rs} = (\dots, c_k^{rs}, \dots)$
- $q_{rs}$  tarifa de viaje entre el origen  $r$  y el destino  $s$ ;  $(q)_{rs} = q_{rs}$

$$\delta_{a,k}^{rs} \quad \text{indicador variable: } \delta_{a,k}^{rs} = \begin{cases} 1 & \text{si el arco } a \text{ está en la ruta } k \text{ entre el par O-D: } r-s \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

En esta formulación, la función objetivo es la suma de las integrales de las funciones de desempeño de los arcos. Esta función no tiene una interpretación económica o comportamental. Debe ser tomada estrictamente como una función matemática para resolver los problemas de equilibrio.

La Ecuación 4-2 representa el grupo de restricciones de conservación de flujos. Esta restricción establece que todos los viajes de la matriz O-D deben ser asignados a la red.

Las condiciones de no negatividad en la Ecuación 4-3 se requieren para asegurar que la solución será válida.

La solución óptima del problema anterior se obtiene cuando se llega al equilibrio, es decir cuando (Marcotte y Patriksson, 2007):

Sea  $R_{pq}$  el grupo (finito) de rutas para un par O-D,  $(p, q)$ ;  $h_r$  el volumen de tráfico sobre la ruta  $r \in R_{pq}$  y,  $c_r$  el costo de viaje sobre la ruta percibido por un usuario individual, las condiciones de equilibrio del usuario pueden ser definidas así:

$$h_r > 0 \implies c_r = \pi_{pq}, \quad r \in R_{pq}, \quad p, q \in C$$

**Ecuación 4-4**

$$h_r = 0 \implies c_r \geq \pi_{pq}, \quad r \in R_{pq}, \quad p, q \in C$$

**Ecuación 4-5**

donde,  $\pi_{pq}$  denota el costo mínimo de ruta (esto es, el equilibrio) para cada par O-D,  $(p, q)$ , y el costo de la ruta está dado por  $c_r$ .

Lo que hace más complejo el problema es que las características de oferta y demanda no son fijas, normalmente los costos de la ruta dependen del volumen de tráfico sobre las rutas, y por otra parte el volumen total de tráfico en un par O-D (que es la demanda entre O-D) puede depender del menor costo de viaje o incluso de otros costos entre pares O-D.

**4.1.5.2 Solución al Problema de Equilibrio (Chen et al, 2011)**

El desarrollo de algoritmos para resolver el problema de equilibrio del usuario (EU) es un tema de investigación de gran importancia. De acuerdo con Chen et al (2011), los algoritmos de solución pueden clasificarse en tres categorías (ver Tabla 4-2):

**Tabla 4-2 Algoritmos de Solución para el Problema de Equilibrio del Usuario**

Tipo de Algoritmo	VARIABLES DE DECISIÓN	Tasa de Convergencia	Requisitos de Memoria Computacional
Basado en arcos	Flujo en los arcos	Lenta	Bajo
Basado en origen	Flujos en el arco origen	Rápida	Moderado
Basado en recorrido	Flujos del recorrido	Rápida	Alto

Fuente: adaptado de Chen et al (2011)

El algoritmo de Frank-Wolfe (F-W) (Sheffi, 1985) es el método basado en arcos más utilizado para resolver el problema de equilibrio del usuario dada su facilidad de implementación y los menores requerimientos de memoria computacional.

Los algoritmos más recientes basados en el origen fueron desarrollados por Dial y Bar-Gera (Chen et al, 2011). Estos algoritmos se basan en la propiedad de que las soluciones al problema de EU no contienen rutas cíclicas, por lo cual las asignaciones pueden ser más eficientes en un grupo de sub-redes acíclicas que se inician en cada origen.

Los algoritmos basados en recorridos pueden obtener soluciones muy precisas con tiempos computacionales moderados, sin embargo no están comúnmente incorporados a los paquetes computacionales comerciales debido a sus grandes requerimientos de memoria para resolver problemas de asignación a gran escala.

Estos tres tipos de algoritmos de solución pueden modificarse fácilmente para resolver los problemas de EU con múltiples clases (o vehículos) (Chen et al, 2011), los cuales se describen a continuación.

**4.1.6 Asignación de Equilibrio Multi-Clase (Multi-Vehículo)**

En la literatura el término multi-clase hace referencia a dos tipos de situaciones (Yang y Huang, 2004): la primera, es que los flujos en una red están divididos en diferentes clases de vehículos o modos, cada uno de ellos tiene una función de costo generalizado y al mismo tiempo contribuye a su clase y a las otras funciones de costos de las demás clases en forma individual. Una clasificación de vehículos puede diferenciar los buses y camiones de los automóviles, o los camiones pesados de los livianos, o el transporte privado del transporte público, entre otros. Cada clase de vehículo

puede tener su propia equivalencia en vehículos de pasajeros con efectos diferentes en los tiempos de viaje.

La segunda situación es aquella en la cual se asume que todos los usuarios (o conductores) usan el mismo tipo de vehículo y se comportan igual cuando utilizan una vía, pero se diferencian entre sí en otras maneras no visibles tales como la valoración del tiempo de viaje (por ejemplo, se definen clases de usuarios en función del ingreso de los viajeros).

Para resolver los problemas de equilibrio del usuario multi-clase los flujos generalmente se dividen y equilibran por clase. El problema de equilibrio multi-clase ha sido tratado mediante técnicas de descomposición y hay algunos programas comerciales que estiman los flujos totales utilizando matrices O-D multi-clase, pero muchos de ellos no estiman los flujos separados para cada clase (Lozano *et al*, 2006e). El algoritmo convencional de Frank-Wolfe (Sheffi, 1985) puede aplicarse para resolver el problema de equilibrio multi-clase del usuario (Yang y Huang, 2004).

#### 4.1.6.1 Formulación del problema de equilibrio multi-clase (multi-vehículo)

El problema de equilibrio multi-clase puede ser definido así (Yang y Huang, 2004):

Dada una red de transporte dirigida  $G = (N,A)$ , definida por un grupo de  $N$  nodos y un grupo de arcos dirigidos  $A$ .

Cada arco  $a \in A$  tiene asociado un tiempo de viaje dependiente del flujo  $t_a(v_a)$  que define el tiempo de viaje por unidad de flujo o el tiempo promedio de viaje en cada arco.

La función del tiempo de viaje  $t_a(v_a)$  se asume como diferenciable, convexa y monótonicamente creciente con la cantidad de flujo  $v_a$ .

$\tau_a$  denota la cuota del arco  $a$ ,  $W$  denota el grupo de pares O-D y  $R_w$  el grupo de todas las rutas entre pares O-D.

La demanda de viajes se subdivide en  $M$  clases (vehículos) que corresponden al grupo de usuarios (vehículos) con características diferentes.

$\beta_m$  es el valor promedio del tiempo para los usuarios de clase  $m$  y  $d_w^m$  la demanda de viajes de la clase  $m$  entre los pares O-D  $w$ . Se supone que  $d_w^m$  es fijo y es una entrada del modelo, entonces se hace la distribución de demanda fija del problema de equilibrio multi-clase del usuario.

Cada ruta factible  $r \in R_w$  entre pares O-D tiene asociado un tiempo de viaje  $t_w^r$  y un costo de viaje  $c_w^r$  donde,

$$t_w^r = \sum_{a \in A} t_a(v_a) \delta_{ar}^w \quad y, \quad \text{Ecuación 4-6}$$

$$c_w^r = \sum_{a \in A} \tau_a \delta_{ar}^w \quad \text{Ecuación 4-7}$$

$$\delta_{ar}^w = \begin{cases} 1 & \text{si la ruta } r \text{ entre el par O-D } w \text{ utiliza el arco } A \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Cada usuario de clase  $m$  con valor de tiempo de viaje  $\beta_m$  se asume que escoge una ruta que minimiza la desutilidad del viaje  $g_w^r(\beta_m)$ .

$g_w^r(\beta_m)$  es el tiempo generalizado del viaje (valor monetario convertido a valor equivalente de tiempo) o el costo generalizado del viaje (el tiempo de viaje es convertido en valor monetario):

Min:

$$g_w^r(\beta_m)_{tiempo} = t_w^r + \frac{c_w^r}{\beta_m} = \sum_{a \in A} \left[ t_a(v_a) + \frac{\tau_a}{\beta_m} \right] \times \delta_{ar}^w, r \in R_w, w \in W, m = 1, 2, \dots, M; \text{ Ecuación 4-8}$$

(en términos de tiempo generalizado del viaje)

ó

$$g_w^r(\beta_m)_{costo} = \beta_w t_w^r + c_w^r = \sum_{a \in A} [\beta_a t_a(v_a) + \tau_a] \times \delta_{ar}^w, r \in R_w, w \in W, m = 1, 2, \dots, M \text{ Ecuación 4-9}$$

(en términos de costo generalizado del viaje)

Sujeto a:

$$\sum_{r \in R_w} f_{rw}^m = d_w^m, w \in W, m = 1, 2, \dots, M \text{ Ecuación 4-10}$$

Esta ecuación presenta las condiciones de conservación de demanda para todas las clases que viajan entre todos los pares O-D.

$$f_{rw}^m \geq 0, r \in R_w, w \in W, m = 1, 2, \dots, M \text{ Ecuación 4-11}$$

Donde,

$f_{rw}^m$  es el flujo de un usuario clase  $m$  en la ruta  $r$ . Esta ecuación es la restricción de flujos no negativos en el recorrido.

#### 4.1.6.2 Paquete Computacional para la Solución del Problema de Equilibrio Multi-Vehículo

De acuerdo con el marco teórico de este capítulo, el problema a resolver en esta investigación corresponde al problema de equilibrio del usuario multi-vehículo, dado que se requiere encontrar la asignación de distintos tipos de vehículos sobre la red de la ZMVM, para los diversos escenarios de evaluación.

El paquete computacional *TransCad* (Yang y Huang, 2004, Caliper Corporation, 2008), contiene el módulo de asignación multi-vehículo cuya solución está basada en el algoritmo F-W para resolver el problema de equilibrio del usuario en redes extensas. Este programa ha sido calibrado para las condiciones de tráfico de la ZMVM y ha sido utilizado en varias investigaciones del Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La función de costo generalizado (Ecuación 4-12) que utiliza este programa para la asignación de equilibrio del usuario multi-vehículo es la siguiente (Caliper Corporation, 2008):

$$gC_{OD}^m = \sum_{i \in A_{OD}^m} [VOT^m \cdot VDF(t_a, c_a, x_a, \dots) + FT_a^m] + \sum_{m \in M_{OD}^m} MT_m^i$$

**Ecuación 4-12**

Donde:

- $gC_{OD}^m =$  costo generalizado cada par origen-destino por tipo de vehículo (modo)  $m$
- $A_{OD}^m =$  grupo de arcos de la ruta más corta desde  $O$  hasta  $D$  por vehículo (modo)  $m$
- $VOT^m =$  valor del tiempo de viaje para el vehículo (modo)  $m$
- $VDF =$  función de tiempo de viaje y demoras
- $t_a =$  tiempo de viaje a flujo libre para el arco  $a$
- $c_a =$  capacidad del arco  $a$
- $x_a =$  volumen total sobre el arco  $a = (\sum_m PCE^m x_a^m)$
- $x_m^a =$  flujo de tipo  $m$  sobre el arco  $a$
- $PCE^m =$  factor de vehículo equivalente para el modo (vehículo)  $m$
- $FT_a^m =$  costo fijo por cuota (en caso de contar con este tipo de arcos) sobre el arco  $a$  para el modo (vehículo)  $m$
- $M_{OD}^m =$  grupo de nodos con arcos de cuota entre  $O$ - $D$  por modo (vehículo)  $m$
- $MT_m^i =$  valor de cuota para el tramo  $i$  por modo (vehículo)  $m$

#### 4.1.6.3 Aplicación del Problema de Asignación Multi-Vehículo en la ZMVM

Para resolver el problema de asignación multi-vehículo para el estudio de caso en la ZMVM se utilizarán los archivos de los aforos vehiculares y las matrices origen-destino (O-D), para cada tipo de vehículo (al año 2010), y de la red vial de la ZMVM, del Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, los cuales se describen en la sección 5.2.

Los principales resultados obtenidos con la asignación multi-vehículo y que serán requeridos para el análisis de escenarios son los siguientes:

- Flujos vehiculares por tipo de vehículo, por sentido y totales en cada arco de la red.

- Velocidad estimada en cada arco de la red.
- Kilómetros recorridos en cada arco de la red.
- Relación volumen vehicular/capacidad para cada arco de la red, en cada sentido.

La obtención de los indicadores de evaluación a partir de estos resultados se describe más adelante en la sección 5.4.

## 4.2 MODELOS PARA ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EMISIONES

Los modelos de factores de emisiones de vehículos dependen de múltiples parámetros que son propios de cada zona tales como: tipo y antigüedad de los vehículos, condiciones de temperatura y humedad del ambiente, tipo y calidad de los combustibles, entre otros. Para comprender cómo se formulan los modelos para la estimación de los factores de emisión y su aplicación en una red de transporte se presenta a continuación el resumen sobre los conceptos teóricos y principales salidas del modelo *Mobile*, cuya versión 5.0 es utilizada en esta investigación, teniendo en cuenta que esta versión permite al usuario incorporar información de velocidades proveniente de los modelos de tráfico para estimar los factores de emisiones.

Los principales impactos generados por el transporte de carga y sus consecuencias sobre la salud humana y sobre el ambiente en general se describen en el Anexo 2.

Las emisiones de vehículos automotores se calculan combinando los factores de emisión con los Kilómetros Recorridos por Vehículo (*KRV*). Los factores de emisión de los vehículos automotores se derivan a partir de modelos; en Estados Unidos estos factores son calculados con dos modelos: la serie *MOBILE* desarrollada por la “*Environmental Protection Agency*” – E.P.A. – y la serie del “*Motor Vehicle Emission Inventory Model*” desarrollado para California por “*California Air Resources Board*” – CARB –. En Europa, el modelo COPERT se utiliza frecuentemente para el cálculo de inventarios de emisiones de fuente móviles. (Holmen B. *et al*, 2003). El modelo *MOBILE-Mexico* se utiliza para estimar las emisiones de vehículos automotores en México.

Para la estimación de contaminantes de vehículos automotores existen metodologías basadas en los inventarios de emisiones, las cuales son aplicables a cualquier vehículo automotor, sea éste de carga o de pasajeros. Para obtener los factores, se aplican los modelos de factores de emisión, como el modelo *Mobile* que incluye dentro de sus parámetros diferentes tipos de vehículos y diversas tipologías de camiones.

Las emisiones de los vehículos automotores son más complejas y dinámicas que las de la mayoría de los otros tipos de fuentes. Por ejemplo, los cambios en las características del combustible, las velocidades de operación del vehículo, la tecnología para el control de emisiones, la temperatura ambiente y la altitud pueden afectar los factores de emisión. Con el objeto de incorporar éstos y otros factores, la serie *Mobile* incluye los efectos de varios de estos parámetros.

A continuación se resumen los aspectos básicos de la modelación de factores de emisión, tomados de los “Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen VI. Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Vehículos Automotores” (*Radian International*, 1997).

#### 4.2.1 Modelo MOBILE5-México (Radian International, 1997; E.R.G., 2000)

El modelo *MOBILE5-Mexico*, basado en el *MOBILE5a* de la E.P.A., estima factores de emisión de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) para vehículos a gasolina y diesel.

Calcula emisiones para ocho tipos de vehículos, determinados con base en el inventario de vehículos automotores, que distribuye los vehículos en categorías con características de emisión similares. Las variables clave que se utilizan en esta clasificación inicial de los vehículos son el tipo de vehículo (automóvil, camión, autobús, etc.), el tipo de combustible (gasolina, diesel, combustibles licuados, etc.), el peso bruto vehicular (PBV), y el nivel de la tecnología de control de emisiones del vehículo. El PBV es el peso del vehículo cuando transporta la carga máxima permitida por el fabricante con el tanque de combustible lleno.

Las emisiones de los diferentes vehículos automotores pueden variar en múltiples órdenes de magnitud, dependiendo de numerosos factores. En particular, el nivel de la tecnología de control de emisiones en un vehículo ejerce una influencia significativa sobre la magnitud de las emisiones, y es determinado por las normas de emisión aplicables al vehículo. Cuando se estiman los factores de emisión de los vehículos, éstos son agrupados con base en los estándares de emisión que aplican a los vehículos cuando fueron fabricados.

Con el objeto de tomar en cuenta las diferencias tanto en el parque vehicular como en los hábitos para conducir entre México y Estados Unidos, el modelo *MOBILE5* fue modificado para estimar factores en las áreas metropolitanas de las ciudades de México, Monterrey y Ciudad Juárez. Los modelos modificados para la Ciudad de México (*MOBILE-MCMA*) y Monterrey (*MOBILE-MMAp*) utilizan una matriz de equivalencias para la tecnología de control que identifica los factores de emisión básicos de *MOBILE* para los vehículos del parque vehicular mexicano, con base en la edad del vehículo y sus controles de emisión. Por ejemplo, un vehículo mexicano ligero a gasolina (*LDGV-Light Duty Gasoline Vehicle*) de 1994, es equivalente de acuerdo con estos factores a un *LDGV* estadounidense de 1988. El modelo incluye estas matrices internamente, por tanto el usuario final no entra a modificar esta información.

El modelo ha sido calibrado para cinco regiones en México:

- Ciudad de México y las áreas colindantes que tienen regulaciones similares sobre contaminación del aire y programas de inspección y mantenimiento regulares (I/M). Las emisiones de Ciudad de México son particulares también por la altura (2,250 m.s.n.m.).
- Urbano interior: todas las áreas metropolitanas del interior de México, Guadalajara, Monterrey, Aguascalientes, excepto Ciudad de México. Estas áreas tienen regulaciones similares sobre contaminación del aire y no son tan exigentes como el Distrito Federal. Algunas de estas áreas tienen programa I/M.
- Rural interior: todas las áreas no urbanas del interior excluyendo el Distrito Federal. Los vehículos no tienen regulación en estas áreas excepto las normas federales. No hay programa I/M.
- Frontera urbana: todas las áreas metropolitanas sobre la frontera con Estados Unidos (Ciudad Juárez, Mexicali, Tijuana, etc.). Por la proximidad con EE.UU., hay regulaciones específicas sobre contaminación del aire. Algunas de estas áreas tienen programas I/M. Las flotas de

vehículos están muy afectadas por la presencia de vehículos registrados en EE.UU. y por vehículos importados por México desde EE.UU.

- Frontera rural: todas las áreas no urbanas sobre la frontera con Estados Unidos. Existen algunas regulaciones específicas para el área de frontera que se pueden aplicar, los programas I/M no son relevantes, hay vehículos de origen de EE.UU., pero no tan común como en zonas urbanas

#### 4.3 Metodología Básica para la Estimación de Emisiones del Modelo *MOBILE*

El modelo *MOBILE* está formado por un conjunto de rutinas codificadas en lenguaje *FORTRAN* que generan factores de emisión de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), para vehículos automotores alimentados con gasolina y diesel. Los factores de emisión para hidrocarburos pueden ser expresados como hidrocarburos totales (HCT), hidrocarburos no metánicos (HCNM), compuestos orgánicos volátiles<sup>13</sup> (COV), gases orgánicos totales (GOT), o gases orgánicos no metánicos (GONM). Estas categorías se definen en la Tabla 4-3. El manual consultado (Radian International, 1997) incluye el cálculo de factores para GOT que de acuerdo con la tabla mencionada incluyen: hidrocarburos, metano, etano y aldehídos.

**Tabla 4-3 Definición de Hidrocarburos**

	Compuestos Incluidos en los Factores de Emisión de Hidrocarburos			
	Hidrocarburos DIF <sup>a</sup>	Metano	Etano	Aldehídos
Hidrocarburos Totales (HTC)	✓	✓	✓	
Hidrocarburos No Metánicos (HCNM)	✓		✓	
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	✓			✓
Gases Orgánicos Totales (GOT)	✓	✓	✓	✓
Gases Orgánicos No Metánicos (GONM)	✓		✓	✓

<sup>a</sup> Los Hidrocarburos DIF se refieren a las emisiones de hidrocarburos como son medidas en el detector de ionización de flama (DIF) utilizado en las pruebas de vehículos automotores.

Fuente: “Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen VI. Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Vehículos Automotores”. *Radian International*, 1997

En el modelo *MOBILE*, la meta final consiste en calcular un factor de emisión promedio para cada tipo de vehículo. A continuación se describen algunas de las ecuaciones teóricas básicas utilizadas por el modelo, las cuales no son visibles para el usuario de éste; sin embargo, tanto éstas como los factores de emisión resultantes están influenciados por diversos parámetros de entrada del modelo.

<sup>13</sup> Compuestos Orgánicos Volátiles (COV): son hidrocarburos (HC) emitidos a la atmósfera generalmente por fuentes de combustión o de evaporación. Los COV son importantes precursores de la formación de ozono, así como precursores de partículas secundarias. Las especies de COV forman un subconjunto dentro de un grupo más amplio de hidrocarburos denominados gases orgánicos totales (GOT), que incluyen a todos los compuestos carbonados, excepto carbonatos, carburos metálicos, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y ácido carbónico. La característica que diferencia a los GOT de los COV es que estos últimos no incluyen los compuestos GOT con reactividad fotoquímica limitada o ausente. (Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999)

La ecuación básica utilizada para la estimación de las emisiones de los vehículos automotores requiere la multiplicación de los datos de actividad vehicular por un factor de emisión, como se muestra en la Ecuación 4-13 (Radian International, 1997):

$$E_p = KRV \times FE_p$$

#### Ecuación 4-13

donde:

$E_p$  = emisiones totales del contaminante  $p$

$KRV$  = kilómetros recorridos por vehículo

$FE_p$  = factor de emisión del contaminante  $p$

Para los vehículos automotores, los datos de actividad se refieren a los kilómetros recorridos por vehículo ( $KRV$ ) y los factores de emisión se expresan en unidades de gramo de contaminante por  $KRV$ . Los  $KRV$  representan la distancia total recorrida por una población de vehículos en un periodo de tiempo determinado.

La ecuación básica de estimación anterior es aplicable para la mayoría de los contaminantes gaseosos y partículas. Para otros contaminantes tales como  $SO_x$  y el plomo, las emisiones se calculan utilizando un balance de combustible, suponiendo que se emite la totalidad del azufre o plomo contenido en el combustible.

La Ecuación 4-14 describe el balance de combustible para  $SO_x$  es (Radian International, 1997):

$$E_{SO_x, f} = Comb_f \times \rho_f \times S_f \times 2$$

#### Ecuación 4-14

donde:

$E_{SO_x, f}$  = emisiones de  $SO_x$  del combustible  $f$  (gasolina o diesel)

$Comb_f$  = consumo total del combustible  $f$

$\rho_f$  = densidad del combustible  $f$

$S_f$  = contenido de azufre (fracción de masa) del combustible  $f$

$2$  = factor de conversión de masa de azufre a masa de  $SO_x$  (como  $SO_2$ ).

Una ecuación similar Ecuación 4-15 describe el balance de combustible para el plomo:

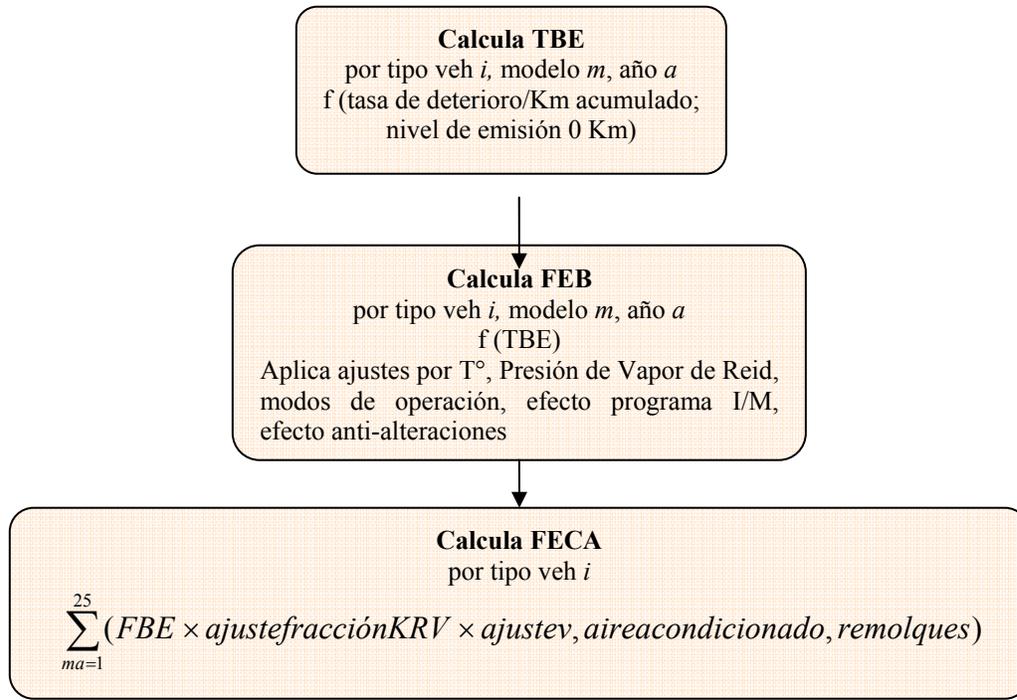
$$E_{Pb, f} = Comb_f \times \rho_f \times Pb_f$$

#### Ecuación 4-15

donde:

$Pb_f$  = contenido de plomo (fracción de masa) del combustible  $f$

En la Figura 4-1 se presenta el diagrama de flujo del modelo *MOBILE* para el cálculo de los factores de emisiones, la descripción detallada de los factores que se involucran en el cálculo así como las ecuaciones se encuentran en el Anexo 2.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-1 Diagrama de Flujo de Cálculo de Factores de Emisión**

Donde:

**TBE:** Tasas Básicas de Emisión Promedio. El fundamento de las TBE son los datos sobre las emisiones de vehículos obtenidos en condiciones de prueba normalizadas tales como: temperatura, características del combustible y ciclos de manejo normalizados. Las emisiones varían con la edad del vehículo (emisiones de un vehículo nuevo y emisiones que se incrementan con el kilometraje del vehículo).

**FEB** Las TBE no corresponden exactamente con las emisiones reales de un vehículo automotor, éstas representan las emisiones medidas en condiciones de prueba controladas. Para reconciliar las diferencias que existen entre las emisiones de prueba y las reales, se deben aplicar los factores FEB de ajuste a las emisiones reales.

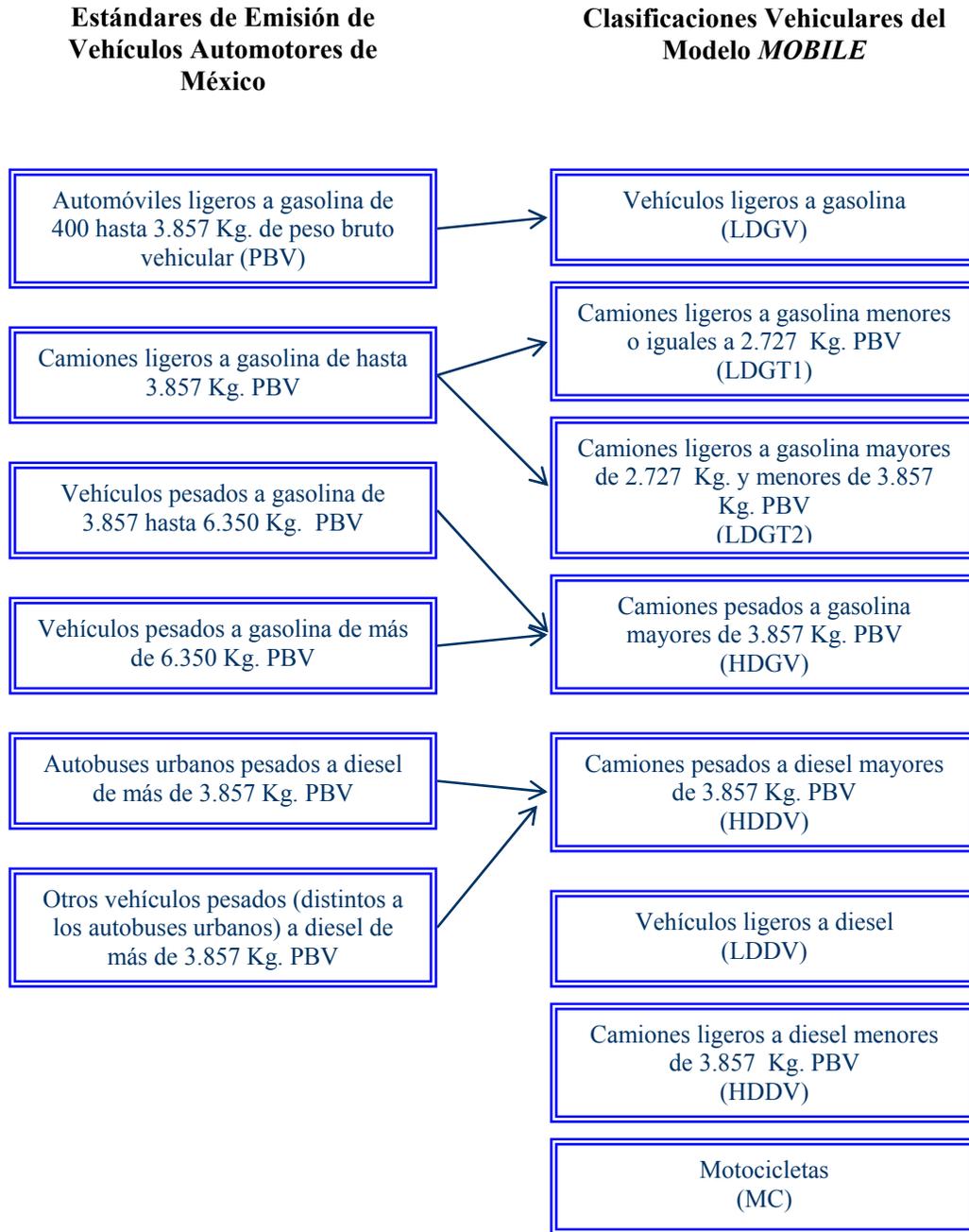
**FECA:** después de calcular los FEB para cada modelo y año con los ajustes pertinentes, se calcula el factor de emisión compuesto – FECA - para el parque vehicular para cada tipo de vehículo.

Como se indicó antes, los factores de ajuste son utilizados en los modelos de factores de emisión para corregir las condiciones de operación particulares, que son el resultado de diversas características específicas de la región o del parque vehicular. Algunas de las características regionales que pueden afectar las emisiones de los vehículos automotores son las siguientes:

- Características físicas: temperatura y altitud.
- Características del combustible.
- Programas de verificación: programas I/M (de inspección y mantenimiento) y programas anti-alteración.
- Características del parque vehicular: dentro de las características del parque, se encuentra la velocidad promedio del vehículo, la cual debe ser obtenida por tipo de vehículo (y de preferencia por tipo de vía), debido a que este parámetro afecta los factores de emisión.
- Distribución de *KRV* por clase vehicular.
- Tasas de acumulación de kilometraje y distribución del registro (fracción del total de vehículos registrados para cada modelo y año) en una clase vehicular.

#### **4.4 Tipos de Vehículos del Modelo *MOBILE***

Los tipos de vehículos del modelo *MOBILE* coinciden con las clasificaciones de los estándares de emisión vehicular estadounidenses. Los estándares de emisiones vehiculares en México también están definidos a partir de una clasificación similar a la estadounidense, lo que simplifica el uso de las clases vehiculares del *MOBILE-Mexico*. La Figura 4-2 presenta una comparación de las clasificaciones de los estándares de emisiones vehiculares de México y las clases vehiculares del modelo *MOBILE*. México ha establecido estándares de emisión para seis clases de vehículos, que cubren autos de pasajeros, camiones ligeros, camiones pesados y autobuses. Estas clases se relacionan con cinco clases vehiculares del *MOBILE*. En el parque vehicular mexicano también existen otros vehículos para los que no se han definido nuevos estándares de emisión, entre los que se incluyen autos y camiones ligeros a diesel, y motocicletas a gasolina.



Fuente: “Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen VI. Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Vehículos Automotores”. *Radian International*, 1997

**Figura 4-2 Correspondencia de los Estándares de Emisión de México con las Clases Vehiculares del Modelo *MOBILE***

#### 4.5 Cálculo de los *KRV* a partir de Modelos de Tráfico

Los resultados de los modelos de tráfico, hacen una estimación del tiempo de recorrido y de los flujos de tráfico en los arcos individuales. Los resultados de los modelos son la fuente de información de recorridos vehiculares detallados y estimaciones de la velocidad que pueden ser utilizados en los inventarios de emisiones.

A partir de las estimaciones de la distancia y el volumen de los arcos, los *KRV* en un arco individual pueden ser estimados a partir de la Ecuación 4-16:

$$KRV = \frac{Volumen}{Distancia}$$

**Ecuación 4-16**

donde:

*KRV* =            Kilómetros recorridos por tipo de vehículo en un periodo de tiempo dado  
*Volumen* =        Número de vehículos por tipo en un enlace para un periodo de tiempo dado  
*Distancia* =        Distancia del enlace, en kilómetros

#### 4.6 Factores de Emisión para la ZMVM

Los factores de emisiones de NO<sub>x</sub> y CO para los tipos de vehículos definidos en esta investigación (homologados a los vehículos *Mobile* a partir de las clases de la Figura 4-2) se obtuvieron para velocidades entre 2.5 y 105 Km/hora con el modelo *Mobile5-Mexico City*, obteniendo los factores mostrados en las Figura 4-3 y Figura 4-4 para NO<sub>x</sub> y en la Figura 4-5 para CO.

Los parámetros de temperatura, altitud, modo de operación, programa de inspección y mantenimiento, entre otros, vienen definidos internamente en el modelo para la Ciudad de México, por tanto los factores obtenidos son de aplicación exclusiva para esta zona.

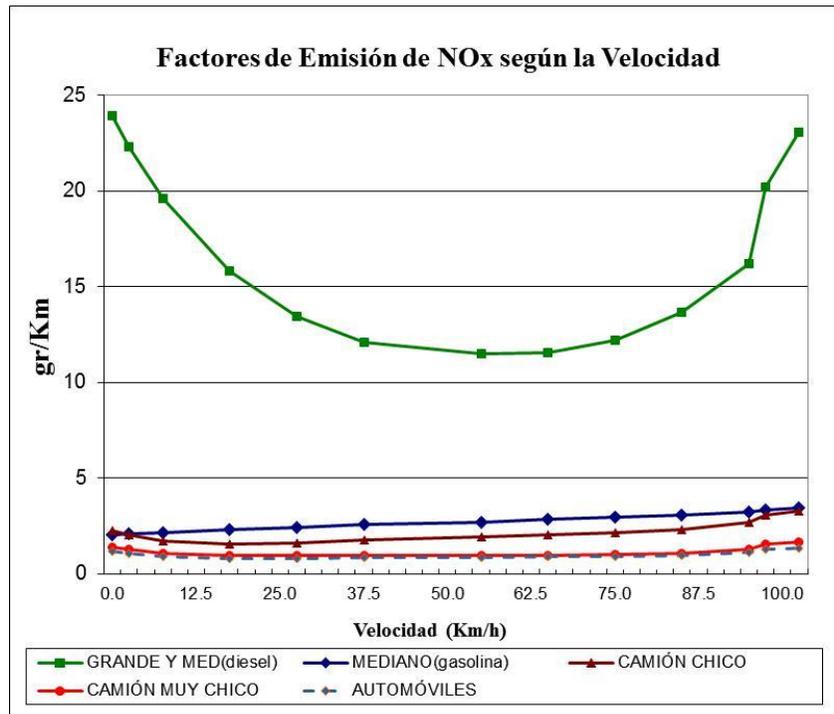
En la Figura 4-4 se aprecia la variación de las emisiones de NO<sub>x</sub> en gr/Km para los vehículos a gasolina. Estas emisiones para los automóviles y camiones de menos de 3.5 toneladas de capacidad tienen valores superiores para velocidades muy bajas (2.5 Km/hr), el cual disminuye hasta velocidades de cerca de 20 Km/hr. A partir de esta velocidad las emisiones continúan con aumento moderado a medida que el vehículo incrementa su velocidad, pero a velocidades superiores a 75 Km/hr se incrementa rápidamente la pendiente de la curva, alcanzando los máximos niveles de emisiones. Para los camiones medianos a gasolina se observa una tendencia lineal e incremental en la curva de emisiones de NO<sub>x</sub> con pendiente alta desde las velocidades más bajas y con valores de emisión superiores a los vehículos más chicos.

En la Figura 4-3 se incluye adicionalmente en la gráfica, la curva de emisiones de NO<sub>x</sub> para vehículos medianos y grandes con combustible diesel, la cual tiene un comportamiento completamente diferente comparada con la curva de los vehículos a gasolina, ya que para

velocidades bajas (con emisiones de 24 gr/Km) hasta una velocidad cercana a los 50 Km/hr hay tendencia a la disminución de las emisiones de NO<sub>x</sub> en función de la velocidad, para comenzar a incrementarse nuevamente con una pendiente fuerte, alcanzando nuevamente valores de emisiones altas para velocidades altas, muy similares a las emisiones generadas a baja velocidad.

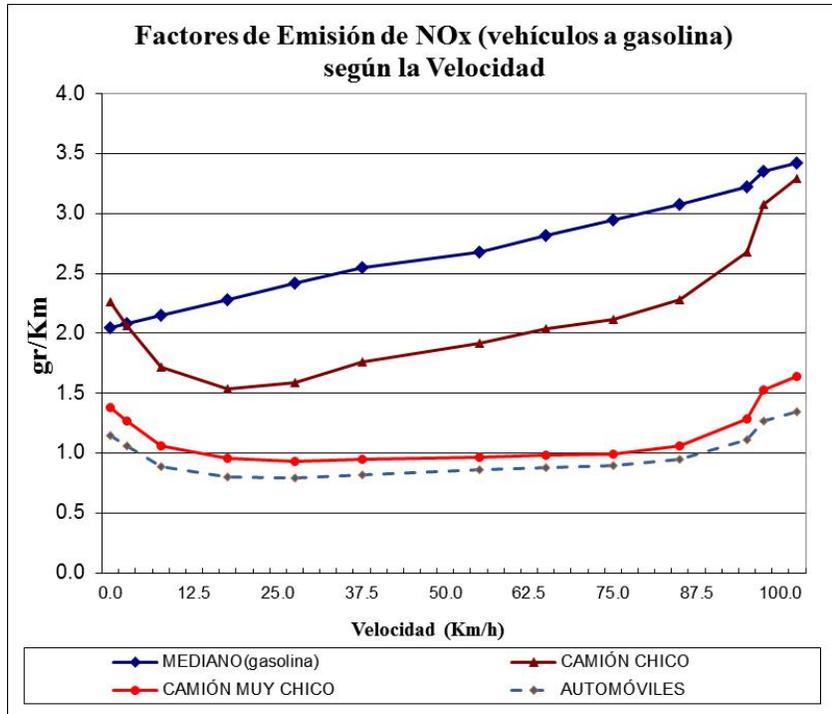
Para el CO (ver Figura 4-5), las curvas de emisiones en función de la velocidad tiene una forma similar para todos los tipos de vehículos (incluyendo los de combustible diesel), con valores muy altos de emisiones de CO a velocidades muy bajas (menores a 10 Km/hr), disminuyendo estas emisiones a medida que se incrementa la velocidad, hasta alcanzar los 70 Km/hr, velocidad a partir de la cual nuevamente se incrementan las emisiones con una pendiente muy alta. Para los vehículos a gasolina de mayor capacidad (camiones medianos y chicos) los valores de emisiones de CO a velocidades muy bajas o muy altas son muy superiores a los de los automóviles y camiones más chicos.

En la sección 5.4 se describe la forma como se involucran los factores de emisión en los cálculos de los indicadores de evaluación de los escenarios.



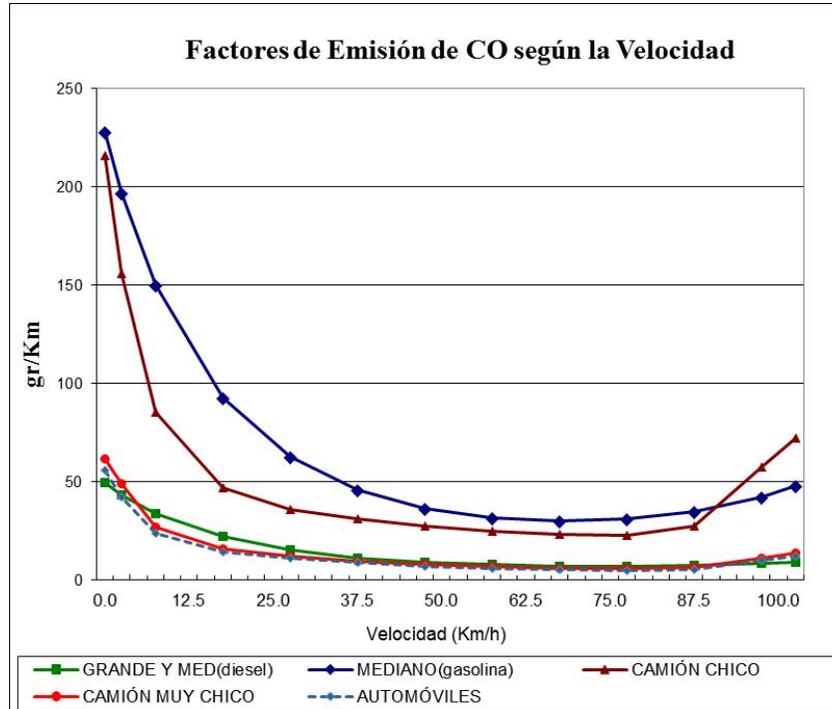
Fuente: elaboración propia con base en resultados del modelo *Mobile5-MexicoCity*

**Figura 4-3. Factores de Emisión de NO<sub>x</sub> en función de la Velocidad**



Fuente: elaboración propia con base en resultados del modelo *Mobile5-MexicoCity*

**Figura 4-4. Factores de Emisión de NO<sub>x</sub> (vehículos a gasolina)**



Fuente: elaboración propia con base en resultados del modelo *Mobile5-MexicoCity*

**Figura 4-5. Factores de Emisión de CO en función de la Velocidad**

## **5 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS PARA EVALUACIÓN DE POLÍTICAS EN LA ZMVM**

Una vez definida en el Capítulo 2 la política de restricción por ventanas de tiempo como la política a evaluar para la ZMVM, y teniendo en cuenta los resultados de las entrevistas realizadas para obtener las proporciones de los cambios de los vehículos de carga ante las restricciones, se presenta en este capítulo el procedimiento desarrollado para la selección y definición de los quince escenarios de evaluación.

Inicialmente se hace un resumen de los antecedentes de las acciones que se han llevado a cabo recientemente en la ZMVM relacionadas con el transporte de carga, para entender el contexto de la política seleccionada para ser evaluada mediante la metodología propuesta en esta investigación, para posteriormente entrar en el detalle de la información y selección de los escenarios de evaluación.

### **5.1 ANTECEDENTES DE LAS ACCIONES APLICADAS AL TRANSPORTE DE CARGA EN LA ZMVM**

De acuerdo con la revisión documental que se presenta en el Capítulo 2, para la Zona Metropolitana del Valle de México no existe en el momento una política integral para la mitigación de impactos del transporte de carga en el área urbana. Lo que existe, por una parte, es el programa ambiental para el Distrito Federal (G.D.F., 2008a), denominado “Agenda Ambiental para la Ciudad de México 2007-2012” que incluye dos acciones dirigidas al transporte de carga: el programa de autorregulación de emisiones para vehículos diesel y una propuesta para estructurar a futuro un programa integral para el control ambiental del transporte de carga, que son acciones puntuales y a largo plazo.

Por otra parte, el “Programa de Transporte y Vialidad 2007-2012” (G.D.F., 2010), incluye dos subprogramas globales para la regulación del transporte de carga denominados: vialidades principales libres de circulación de transporte de carga y, restricción de circulación del transporte de carga a determinados horarios, cuyo objetivo de acuerdo con este documento es:

“...reducir el congestionamiento en vías primarias así como la reducción de emisiones contaminantes; agilizar y mejorar la circulación del transporte de personas, productos y mercancías en las vialidades principales de la ciudad”. (G.D.F., 2010)

Sin embargo, no especifica sobre cuáles vialidades se aplicará el programa ni los indicadores que permitirán medir el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Al igual que en otros países en desarrollo (G.I.Z., 2011), algunas de las medidas impuestas a los vehículos de carga en la ZMVM (tal como se presenta en el Programa de Transporte y Vialidad antes mencionado), se ponen en marcha ante la necesidad de resolver problemas urgentes y evidentes como la congestión o la contaminación local, optando por prohibir la circulación de camiones pesados durante los períodos de mayor flujo de tráfico sobre algunos corredores, que para el caso de la ZMVM son parte fundamental de la red primaria de carga, sin evaluar ex ante los posibles impactos sobre las vialidades que utilizarán los camiones como alternativa, sobre los

cambios que realizarían los transportistas ante la restricción o sobre los efectos sobre el sistema urbano de transporte en general.

Así mismo, se encuentra para la zona de estudio que algunas de las medidas restrictivas impuestas a los vehículos de carga son consecuencia de diferentes acciones dentro de programas que conforman otras políticas con objetivos enfocados al transporte de pasajeros pero que al ser puestas en operación, afectan la circulación de los vehículos de carga y muchas veces restringen su paso por corredores que tradicionalmente han sido utilizados en forma intensiva por este tipo de vehículos, como es el caso de los corredores Metrobus y “Cero Emisiones”. En 2011, como parte del desarrollo de la metodología propuesta para esta investigación, se analizó el impacto en el tráfico y en las emisiones de contaminantes locales ( $\text{NO}_x$  y CO) como consecuencia de las restricciones a los camiones pesados en los corredores antes mencionados, encontrando que no hay impactos significativos sobre las emisiones y la contaminación en la parte central de la ZMVM, pero sí en los tiempos totales de viajes de los camiones (Lyons *et al*, 2011).

Se destaca como política pública para el transporte de carga en la ZMVM, el programa para la zona central del Distrito Federal denominado “Regulación del Transporte de Carga en el Centro Histórico de la Ciudad de México” (G.D.F., 2008b), que comprende el denominado perímetro “A” de esta zona (aproximadamente 1,5 kilómetros alrededor de la Plaza Central o Zócalo) y que prohíbe la circulación de los vehículos de carga mayores a 3.5 toneladas, en cualquiera de sus modalidades, en el horario comprendido de las 7:00 a las 22:00 horas. Este programa fue precedido por un convenio entre los representantes del gobierno del Distrito Federal con diferentes agremiaciones de comerciantes, transportistas de pasajeros y de carga, que facilitó su puesta en marcha y su operación en esta zona tan sensible de la ciudad, sin embargo, no se conocen los indicadores de su efectividad en términos de mitigación de impactos.

Por otra parte, de acuerdo con entrevistas con las autoridades de tránsito<sup>14</sup>, se está considerando en el mediano plazo la posibilidad de restringir los vehículos de carga sobre algunos accesos a la ZMVM en las horas pico, por lo cual la política seleccionada para evaluar con la metodología propuesta, las denominadas ventanas de tiempo o restricciones de acceso de vehículos de carga de gran tamaño en horarios específicos, podrá aportar herramientas para el proceso de toma de decisiones. Los corredores sobre los cuales se restringiría la circulación de los vehículos de carga corresponden a las principales vialidades de entrada/salida de la ZMVM durante el período pico de la mañana.

Además de esta restricción por ventanas de tiempo y como una política complementaria, existen diferentes proyectos de infraestructura a corto y mediano plazo en la ZMVM para mejorar en términos de capacidad otros accesos al Distrito Federal y para continuar con la construcción de segundos pisos en algunas vialidades internas (anillo Periférico en los tramos norte y oriente). Estas mejoras pueden tener impactos sobre las rutas de los camiones pesados y sobre la congestión en general para la ZMVM. Por esta razón, el mejoramiento de la red vial se consideró en algunos escenarios junto con la restricción por ventanas de tiempo.

---

<sup>14</sup> De acuerdo con reuniones realizadas con las autoridades de tránsito y con las asociaciones de transportistas de carga en agosto de 2011, en el mediano plazo algunas medidas restrictivas para los camiones pesados estaban siendo consideradas para algunos de los principales corredores de acceso a la ZMVM.

## 5.2 INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS ESCENARIOS

En el Capítulo 4 se presentó el marco teórico sobre el modelo de asignación de tráfico multi-vehículo que será utilizado para la estimación de los flujos en la red en cada escenario. Como se mencionó en ese capítulo, la información inicial con que se cuenta para esta etapa de la investigación son los archivos de los aforos vehiculares y las matrices origen-destino (O-D), para cada tipo de vehículo (al año 2010), y de la red vial de la ZMVM, del Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales del Instituto de Ingeniería de la UNAM; no obstante, se requirió la actualización y complementación de esta información para adecuarla a los objetivos de esta investigación y para cada uno de los escenarios a evaluar. A continuación se describe la información general requerida para la evaluación de la política de restricciones por ventanas de tiempo en la ZMVM y más adelante se describe la información específica para cada uno de los quince escenarios de evaluación.

### 5.2.1 Demanda de Viajes

La representación de los deseos de viaje entre las diferentes zonas de atracción de tráfico (ZAT) de la ZMVM está dada por la matriz origen-destino (O-D) de viajes, en donde cada celda  $a$  de la matriz ( $a_{i,j}$ ) indica el número de viajes que se generan en una zona  $i$  y tienen como destino la zona  $j$ . Las matrices base utilizadas en esta investigación se obtuvieron del estudio de demanda de viajes para el transporte de carga en la ZMVM (Lozano *et al*, 2006c), con proyección al 2010, para el cual se definieron 1,924 ZAT con sus respectivos centriodes.

Para cada uno de los cinco tipos de vehículos definidos para la evaluación de la política de restricción por ventanas de tiempo se requirieron inicialmente dos matrices O-D base, una para representar los viajes en el período pico de la mañana y otra para los viajes del período valle, para un total de diez matrices iniciales: vehículos de pasajeros y camiones muy chicos, chicos, medianos y grandes, para la hora pico (8:00-9:00 a.m.) y para la hora valle (9:00-10:00 a.m.).

Adicionalmente, para cada uno de los quince escenarios definidos para la evaluación se obtuvieron diferentes matrices que representan los cambios en la demanda de viajes por tipo de vehículo, de acuerdo con las proporciones de los cambios operativos obtenidos con las entrevistas (Capítulo 3), tanto para el período pico como para el valle, los cuales se explican para cada escenario en la sección 5.3.

En la Figura 5-1 se muestra el esquema de las líneas de deseo de viaje obtenidas de la matriz O-D para los camiones de tamaño mediano en la parte central de la ZMVM.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-1. Líneas de deseo de viaje. Parte central ZMVM**

De acuerdo con la información de las matrices base para la ZMVM, durante el período pico de la mañana se generan cerca de 1.6 millones de viajes de vehículos, 21% de éstos corresponden a vehículos de carga, de los cuales 9% son de camiones muy chicos, 4% de camiones chicos, 6% de medianos y 2% de camiones pesados (ver Tabla 5-1).

**Tabla 5-1 Distribución de viajes de vehículos en la ZMVM-Período pico de la mañana**

Tipo de Vehículo	No. Viajes	%
Vehículos de pasajeros	1,334,700	79%
Camiones muy chicos	155,009	9%
Camiones chicos	63,734	4%
Camiones medianos	99,880	6%
Camiones grandes	32,140	2%
<i>Total Viajes de vehículos</i>	<i>1,685,463</i>	<i>100%</i>

Fuente: Elaboración propia

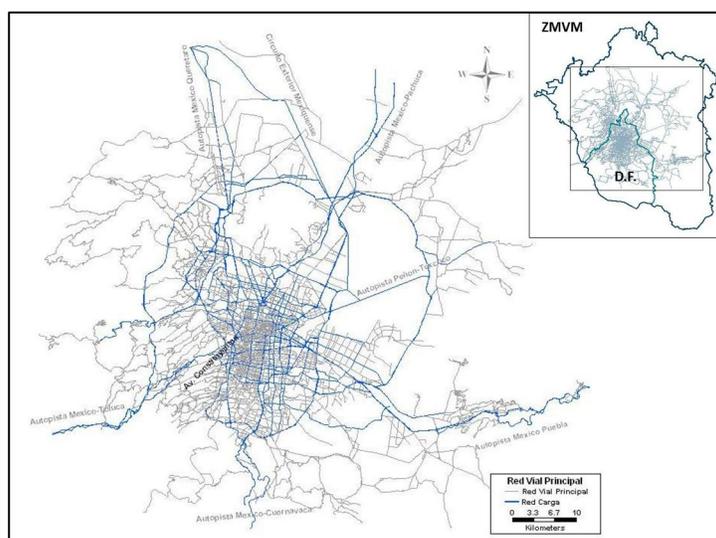
Durante este período los vehículos grandes y medianos viajan principalmente en las vías periféricas, dentro de las zonas industriales y dentro de las grandes zonas de comercio y servicios (como la Central de Abastos) (Lozano *et al*, 2006d).

## 5.2.2 Redes de Transporte

Para el proceso de asignación de tráfico, adicionalmente a las matrices O-D, se requieren los archivos geográficos que representan las redes viales (nodos y arcos) que utilizan los vehículos de pasajeros y los camiones de carga, con los atributos de cada arco, tales como: longitud, capacidad, parámetros de calibración, velocidad máxima y tiempo de recorrido a flujo libre, entre otros.

Para esta evaluación se utilizaron las siguientes redes de la ZMVM:

- Red vial principal (ver Figura 5-2): esta red está conformada por cerca de 15,200 arcos y cubre más de 8,500 kilómetros de vías principales (no se incluyen vías locales). Por esta red pueden circular todos los vehículos no restringidos, incluyendo los vehículos de carga de tamaño muy chico y chico.
- Sub-red de carga: la sub-red de carga consta de cerca de 5,800 arcos y 3,800 kilómetros de vías principales (ver Figura 5-2)). Por esta red pueden circular los camiones pesados, además de los vehículos de pasajeros y los camiones no restringidos.



Fuente: elaboración propia

Figura 5-2. Red Vial Principal y Red de Carga - ZMVM

- Sub-red complemento: la sub-red complemento es una red requerida para el proceso de asignación multi-vehículo, y equivale al sub-conjunto de arcos de la red principal por donde no pueden circular los vehículos de carga pesados. En la Figura 5-2, son aquellas vialidades que no están superpuestas por la red de carga (en color más claro).
- Adicional a las redes básicas antes descritas se requirieron otras redes para representar los escenarios con restricciones y con mejoramiento de vialidades, las cuales se describirán junto con los escenarios definidos en el numeral 5.3.

### 5.2.3 Factores de emisiones de contaminantes locales

Los factores de emisiones para  $\text{NO}_x$  y CO se obtuvieron para diferentes velocidades con el modelo *Mobile5-Mexico City*, cuyos fundamentos teóricos fueron descritos en el Capítulo 4. Los resultados gráficos junto con la explicación del comportamiento de estos factores en función de la velocidad para los automóviles, camiones grandes, medianos, chicos y muy chicos en la ZMVM se presentan en las Figura 4-3 a Figura 4-5, donde se aprecia la relación estrecha de los factores de emisiones con respecto a la velocidad del vehículo. Estos factores fueron usados para obtener las emisiones de contaminantes locales según se explica en la sección 5.4.

### 5.3 DEFINICIÓN DE LOS GRUPOS DE ESCENARIOS

Como se explicó al inicio de este capítulo, las autoridades de tránsito del Distrito Federal ante los problemas de congestión durante los períodos pico de algunas vías de entrada/salida de la ZMVM, decidieron implementar un programa piloto de restricción a la circulación de camiones con capacidad de carga superior a 3.5 toneladas sobre estas vías. Con el fin de estimar cuáles serían sus posibles impactos desde el punto de vista de tráfico y de emisiones locales de contaminantes sobre el sistema de transporte urbano de la ZMVM se decidió evaluar esta política con la metodología propuesta en esta investigación, definiendo quince escenarios que analizan el impacto de diferentes modificaciones operativas de los vehículos de carga ante las restricciones, tanto para la hora pico como para la hora valle.

Para evaluar la política de restricción por ventanas de tiempo en los principales accesos a la ZMVM durante el período pico, se parte de los resultados de las entrevistas realizadas a los empresarios del sector los cuales fueron la base para definir los escenarios de análisis.

Mediante las entrevistas se identificaron cuáles serían las principales reacciones de los operadores de vehículos de carga ante las restricciones por ventanas de tiempo a los camiones pesados en la ZMVM y con sus resultados numéricos se cuantificaron, en términos de proporciones, los cambios operativos en la flota de camiones, discriminado por tamaño del vehículo.

Para la evaluación se conformaron los siguientes cuatro grupos de escenarios en función del tipo de opción operativa a evaluar. Cada uno de ellos se describe con más detalle en las siguientes secciones:

- Grupo 1: integrado por los escenarios base, tanto para el período pico como para el período valle.
- Grupo 2: este grupo está conformado por siete escenarios que evalúan en forma independiente cada opción operativa.
- Grupo 3: incluye dos escenarios que evalúan el impacto del mejoramiento de la red vial para los períodos pico y valle de la mañana.
- Grupo 4: en este grupo los seis escenarios planteados evalúan el impacto de varias opciones operativas (de los vehículos pesados de carga) aplicadas simultáneamente en la ZMVM.

Para conformar los escenarios se tuvieron en cuenta las siguientes opciones de cambio de los vehículos de carga ante las restricciones de ventanas de tiempo impuestas a los camiones de más de 3.5 toneladas en los corredores de acceso a la ZMVM:

- Cambio de recorrido de los camiones de más de 3.5 toneladas para evitar las vialidades restringidas.
- Cambio de tamaño de los camiones medianos y grandes a camiones chicos sin restricción (<3.5 toneladas de capacidad).

- Modificación en los horarios de operación de los vehículos pesados (medianos y grandes) restringidos, los cuales pasan de la hora pico a la hora valle.
- Uso de centros de consolidación durante el período de restricción para los camiones medianos y grandes, en donde la carga se sube a camiones chicos para que ésta siga hacia su destino final (o donde llegan los camiones chicos para que la carga continúe en camiones pasados en vías no restringidas hacia afuera de la ZMVM).

Los valores de las proporciones de los anteriores cambios utilizadas en cada escenario, se describen para cada grupo a continuación.

### **5.3.1 Grupo 1: Escenarios Base**

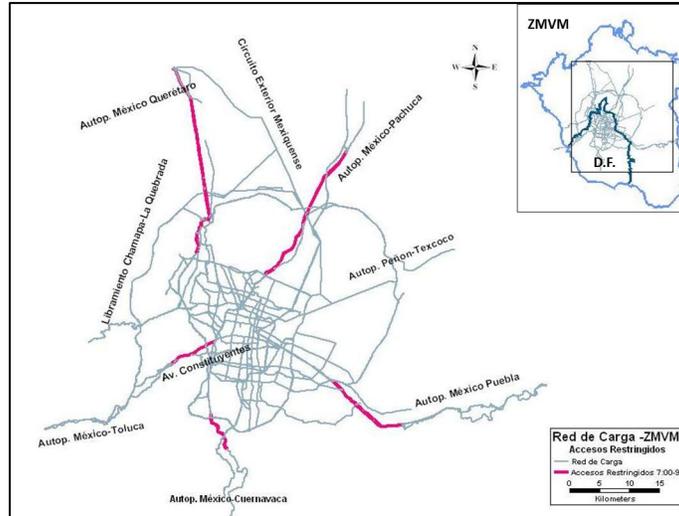
Para este grupo se definieron los escenarios 1.1A y 1.1B que representan las condiciones actuales de los flujos de tráfico en la ZMVM para la hora pico de la mañana (8:00 a 9:00) y para la hora valle (9:00 -10:00) sin ningún tipo de restricciones para los camiones pesados.

En estos escenarios la asignación de viajes multi-vehículo se realiza sobre la red vial principal para los vehículos de pasajeros, los camiones de tamaño muy chico y chico, y sobre la sub-red de carga (sin restricciones) para todos los vehículos incluyendo los camiones medianos y grandes. Las matrices por cada tipo de vehículo corresponden a las matrices de viajes O-D base para el período pico de la mañana.

### **5.3.2 Grupo 2: Escenarios que Evalúan una Sola Opción Operativa ante la Restricción por Ventanas de Tiempo**

Este grupo de siete escenarios evalúa en cada uno de ellos una opción operativa diferente ante la restricción a los camiones de carga medianos y grandes durante la hora pico de la mañana (8:00-9:00) sobre los cinco principales corredores de entrada/salida de la ZMVM, cuya restricción cubre un total de 100.5 km (ver Figura 5-3):

- Autopista México-Querétaro, desde su entronque con el Anillo Periférico hasta la intersección con el Circuito Exterior Mexiquense (43.9 Km).
- Autopista México-Pachuca, desde la Av. Insurgentes Norte hasta la caseta de cobro en el punto denominado "Ojo de Agua", en dirección a Pachuca (Hidalgo), 14.0 Km.
- Autopista México-Puebla, desde su intersección con la Av. Ignacio Zaragoza hasta la caseta de cobro de "Chalco" en dirección a Puebla (Puebla), 16 Km.
- Autopista México-Cuernavaca (incluye un tramo de la Av. Insurgentes Sur), desde la intersección de la Av. Insurgentes con el Eje 10 Sur en el Distrito Federal hasta el entronque con la Carretera Federal a Cuernavaca (Morelos), 12.8 Km.
- Avenida Constituyentes desde su intersección con la Autopista México-Toluca hasta la Av. Chapultepec en el Distrito Federal, 13.8 Km.



Fuente: elaboración propia

**Figura 5-3 Accesos restringidos en la ZMVM**

Las proporciones de cambios operativos ante la restricción por ventanas de tiempo para este grupo de escenarios son las siguientes:

- 5.6% de los vehículos medianos y grandes cambian a vehículos de tamaño no restringido (menor a 3.5 ton.).
- 35.1% de los vehículos pesados restringidos cambian de horario de operación, con inicio de circulación en el período valle inmediatamente siguiente a la hora pico de la mañana.
- 51.8% de los vehículos medianos y grandes utilizan centros de consolidación/estacionamientos ubicados antes de las zonas de prohibición para cambiar sus vehículos a tamaños no restringidos.

Las entrevistas identificaron como otra opción, el obtener permisos ante la autoridad para no cumplir con la restricción dada la imposibilidad de modificar su tamaño (por no poder fragmentar su carga y por razones de cumplimiento de horario con los clientes). Esta alternativa no se incluye en la evaluación por ser considerada como una excepción.

La comparación de escenarios se realiza entre la situación antes de la implementación de la política (escenarios base) con las situaciones estimadas con el modelo después de aplicar las medidas de restricción a los camiones de carga en la ZMVM.

La asignación de viajes multi-vehículo para este grupo de escenarios se realiza sobre la red vial principal para los vehículos de pasajeros, los camiones de tamaño muy chico y chico, y sobre la sub-red de carga con algunos arcos restringidos para los camiones medianos y grandes.

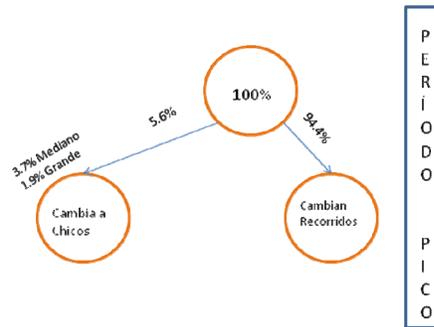
Los escenarios definidos para este segundo grupo se presentan a continuación.

5.3.2.1 Escenario 2.0

En este escenario se analiza la opción de que todos los camiones medianos y grandes que circulan por los corredores con prohibición cambian sus recorridos para evitar los tramos restringidos y así poder llegar a sus destinos. El número de viajes asignados es el mismo de la situación base, dado que sólo se modifican las rutas.

5.3.2.2 Escenario 2.1

En este escenario, 5.6% de los camiones pesados (3.7% medianos y 1.9% grandes) cambian a camiones chicos con capacidad de carga de 3.5 ton, los cuales pueden circular por toda la red (ver Figura 5-4). Los vehículos medianos y grandes que no cambian de tamaño (94.4%), continúan restringidos durante el período pico en los corredores de acceso/salida de la ZMVM y deben modificar sus recorridos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-4. Proporciones de Vehículos -Escenario 2.1

Para este escenario, cada celda de la matriz base de vehículos chicos es adicionada con dos factores (ver Ecuación 5-1): un factor por la proporción de vehículos medianos que cambia a tamaño chico (cinco vehículos chicos por uno mediano) y otro por los vehículos grandes que de igual forma cambian de tamaño (once vehículos chicos por cada camión grande). Para obtener estos factores de multiplicación también se tuvo en cuenta que la flota de camiones clasificados como medianos y grandes incluye varios tamaños dentro de la misma categoría (por ejemplo, dentro de los camiones medianos se encuentran camiones desde 3.6 hasta 8.5 toneladas), por tanto, cada factor se ponderó de acuerdo con el número de vehículos de diferente tamaño en cada categoría obtenidos de las bases de datos de vehículos generadas para la evaluación.

Asimismo, de la matriz base O-D de camiones medianos se sustraen los vehículos que se cambiaron por camiones chicos y de igual forma de la matriz base de camiones grandes también se restan aquellos vehículos que cambiaron a chicos. Las matrices de los viajes de vehículos de pasajeros y camiones muy chicos no tienen cambios dado que estos vehículos no están afectados por las restricciones. Los anteriores cálculos se detallan a continuación en la Ecuación 5.1, con la siguiente notación:

Sea,

$MP_{b,HP}$  = matriz de viajes base para vehículos de pasajeros en la hora pico

$M1_{b,HP}$  = matriz de viajes base para vehículos muy chicos en la hora pico

$M2_{b,HP}$  = matriz de viajes base para vehículos chicos en la hora pico

$M3_{b,HP}$  = matriz de viajes base para vehículos medianos en la hora pico

$M4_{b,HP}$  = matriz de viajes base para vehículos grandes en la hora pico

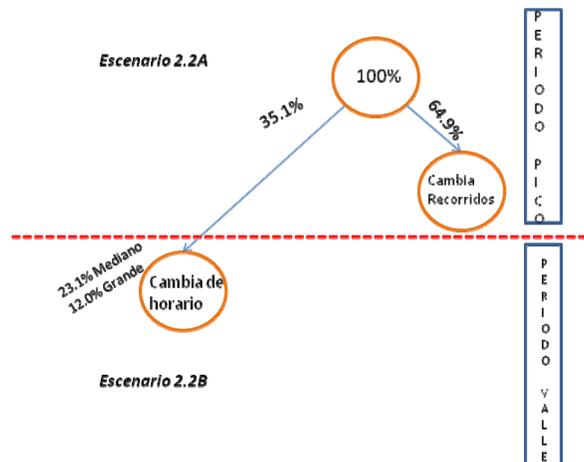
Las matrices para el escenario 2.1 se calculan a partir de las matrices del escenario base con los siguientes factores:

$$\begin{aligned}
 MP_{2.1} &= MP_{b,HP} \\
 MI_{2.1} &= MI_{b,HP} \\
 M2_{2.1} &= M2_{b,HP} + 0,237 \times M3_{b,HP} + 0,276 \times M4_{b,HP} \\
 M3_{2.1} &= M3_{b,HP} - 0,037 \times M3_{b,HP} = 0,963 M3_{b,HP} \\
 M4_{2.1} &= M4_{b,HP} - 0,019 \times M4_{b,HP} = 0,981 M4_{b,HP}
 \end{aligned}$$

**Ecuación 5-1**

**5.3.2.3 Escenarios 2.2A y 2.2B**

El grupo de escenarios 2.2 incluye dos escenarios que surgen a partir de la opción de cambio de los horarios de operación de los vehículos de carga de la hora pico a la hora valle, de acuerdo con las proporciones que se presentan en la Figura 5-5, en donde 35.1% de los camiones medianos y grandes cambian su horario de circulación a la hora valle y el restante 64.4% continúa en la hora pico modificando sus recorridos para evitar los tramos restringidos.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-5. Proporciones de Vehículos -Escenarios 2.2A y 2.2B**

En el escenario 2.2A, las matrices de viaje se afectan en las proporciones antes mencionadas de acuerdo con la Ecuación 5-2, donde los vehículos de pasajeros, camiones muy chicos y chicos no tienen cambios en sus matrices base. El cálculo de las matrices para el escenario 2.2A es el siguiente, de acuerdo con la notación descrita para el escenario 2.1:

$$\begin{aligned}
 MP_{2.2A} &= MP_{b,HP} \\
 MI_{2.2A} &= MI_{b,HP} \\
 M2_{2.2A} &= M2_{b,HP} \\
 M3_{2.2A} &= M3_{b,HP} - 0,23 \times M3_{b,HP} = 0,77 M3_{b,HP} \\
 M4_{2.2A} &= M4_{b,HP} - 0,12 \times M4_{b,HP} = 0,88 M4_{b,HP}
 \end{aligned}$$

**Ecuación 5-2**

Para el escenario 2.2B el porcentaje de vehículos grandes (12.0%) y medianos (23.1%) que modifica su horario de operación pasa a la hora valle, incrementando los volúmenes de carga de este período. Para este escenario se utilizan las matrices O-D de la hora valle para todos los tipos de vehículos, afectando las matrices de camiones medianos y grandes de acuerdo con la Ecuación 5-3, donde el subíndice *HV* denota las matrices de la hora valle:

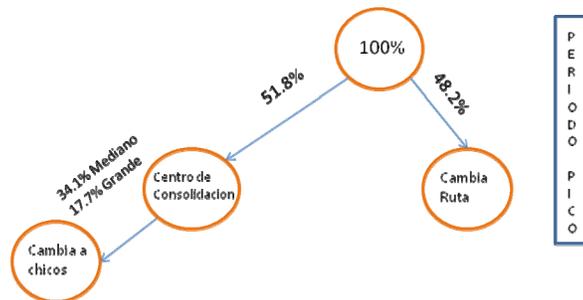
$$\begin{aligned}
 MP_{2.2B} &= MP_{b,HV} \\
 MI_{2.2B} &= MI_{b,HV} \\
 M2_{2.2B} &= M2_{b,HV} \\
 M3_{2.2B} &= M3_{b,HV} + 0.231 \times M3_{b,HP} \\
 M4_{2.2B} &= M4_{b,HV} + 0.120 \times M4_{b,HP}
 \end{aligned}$$

**Ecuación 5-3**

**5.3.2.4 Escenario 2.3**

Este escenario incluye la modelación de la disminución de vehículos de carga que circulan durante la hora pico dado que 51.8% de éstos utilizaría centros de consolidación (o de espera) antes de iniciar los recorridos en la hora pico (ver el esquema de la Figura 5-6). Se asume que múltiples centros de consolidación estarían localizados antes del inicio de la restricción en los cinco corredores, lo cual es una situación ideal, dado que realmente no existen estos espacios disponibles en todos los accesos a la ZMVM, por lo cual se generaron otros escenarios que sí toman en cuenta este factor (ver sección 5.3.4.)

En los centros de consolidación, 34.1% de los camiones medianos y 17.7% de los camiones grandes son reemplazados por vehículos de menor tamaño que circulan por toda la red. El reemplazo se hace en proporción de 5 camiones con capacidad de carga de 3.5 toneladas por cada camión mediano y de 11 camiones de 3.5 toneladas por cada camión grande, de acuerdo con la Ecuación 5-4.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-6. Proporciones de Vehículos -Escenario 2.3**

$$\begin{aligned}
 MP_{2.3} &= MP_{b,HP} \\
 MI_{2.3} &= MI_{b,HP} \\
 M2_{2.3} &= M2_{b,HP} + 1.704 M3_{b,HP} + 1.952 M4_{b,HP} \\
 M3_{2.3} &= M3_{b,HP} - 0.341 M3_{b,HP} = 0.659 M3_{b,HP} \\
 M4_{2.3} &= M4_{b,HP} - 0.177 M4_{b,HP} = 0.823 M4_{b,HP}
 \end{aligned}$$

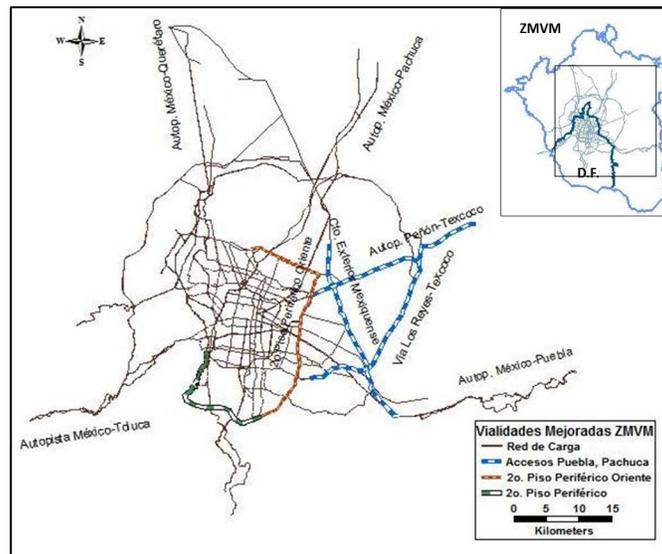
**Ecuación 5-4**

### 5.3.3 Grupo 3: Escenarios que Evalúan Restricciones por Ventanas de Tiempo y el Mejoramiento de la Red

Este grupo incluye el análisis sobre el impacto que tendría la restricción por ventanas de tiempo a camiones de carga medianos y grandes durante el período pico de la mañana en los corredores de acceso a la ZMVM, junto con el impacto de políticas complementarias como el mejoramiento de algunas vías internas y de acceso que podrían ayudar a mitigar los problemas derivados. Existen en el momento diferentes proyectos de infraestructura a corto y mediano plazo en la ZMVM para mejorar en términos de capacidad otros accesos al Distrito Federal y para continuar con la construcción de segundos pisos en algunas vialidades internas, lo cual puede tener impactos sobre las rutas de los camiones pesados y sobre la congestión en general para la ZMVM.

Las vialidades que se incluyen para este grupo de escenarios son las siguientes (ver Figura 5-7):

- Circuito Exterior Mexiquense Sur (incorporando la tercera etapa): desde el entronque con la Autopista Peñón-Texcoco hasta el entronque con la Autopista México-Puebla.
- Mejoras en la carretera Los Reyes-Texcoco.
- Segundo piso del Periférico Poniente (actualmente en construcción).
- Segundo piso del Periférico Oriente (proyecto).



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-7. Vialidades Mejoradas ZMVM**

#### 5.3.3.1 Escenario 3.1A

El escenario 3.1A toma en cuenta el mejoramiento en las vialidades de la red vial principal y de carga, antes mencionadas, junto con el cambio de horario de 35.1% de los camiones medianos y grandes, los cuales dejan de circular en la hora pico y pasan a la hora valle. El restante 64.9% de los

camiones restringidos cambian sus recorridos en la hora pico para evitar las restricciones en los accesos a la ZMVM.

Las matrices de este escenario cambian en las mismas proporciones del escenario 2.2A (ver Ecuación 5-2) y las redes utilizadas corresponden a la red vial principal mejorada y la sub-red de carga mejorada, con algunos arcos restringidos.

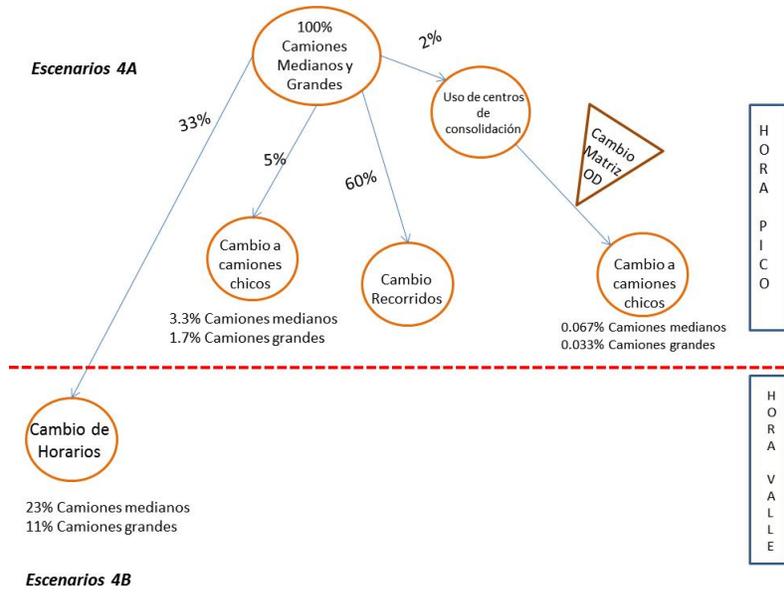
#### **5.3.3.2 Escenario 3.1B**

Este escenario evalúa el impacto en la hora valle generado por el cambio de horario de 35.1% de los camiones medianos y grandes sobre la red vial mejorada. Los cambios en las matrices corresponden a los del escenario 2.2B (Ecuación 5-3) y las redes para este escenario son la red vial principal mejorada y la sub-red de carga mejorada y sin restricciones.

#### **5.3.4 Grupo 4: Escenarios que Evalúan Simultáneamente Varias Opciones Operativas ante la Restricción por Ventanas de Tiempo**

El grupo 4 de escenarios incluye seis escenarios que evalúan la situación en que los cambios operativos identificados en las entrevistas sean realizados simultáneamente, es decir, que una proporción de camiones restringidos opta por cambiar de recorridos para evitar los tramos con prohibición, mientras que otro porcentaje cambia de horario de operación a la hora valle, otro grupo cambia a camiones de tamaño no restringido y un último porcentaje hace uso de centros de consolidación ubicados antes de iniciar el tramo con prohibición, donde cambian a vehículos de tamaño no restringido. Las anteriores opciones son evaluadas también con y sin mejoramiento en la infraestructura vial de la ZMVM.

Para la obtención de estas proporciones combinadas se realizaron entrevistas adicionales a un grupo de empresas que operan en la ZMVM, obteniendo las proporciones que se presentan en el esquema de la Figura 5-8: 33% de los camiones pesados cambia de horario de operación, 5% cambia a tamaño de vehículos no restringidos, 60% cambia sus recorridos y 2% utiliza centros de consolidación.

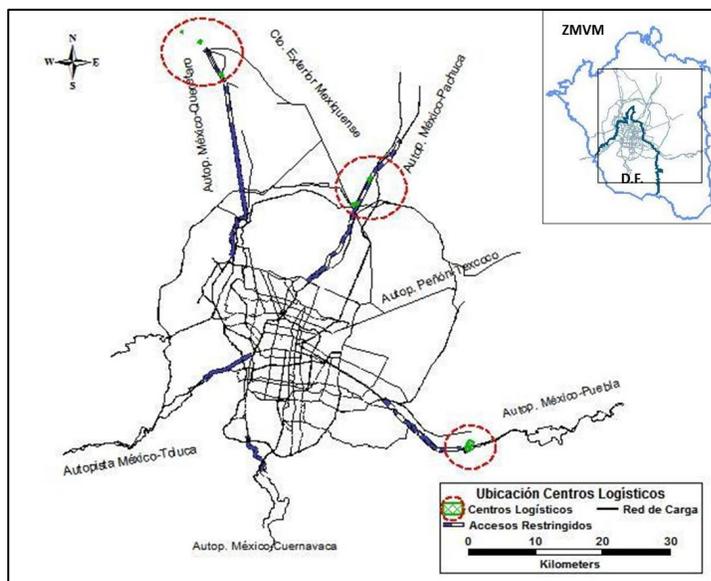


Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-8. Grupo 4 de escenarios: combinación de opciones operacionales**

Con el fin de analizar el impacto real de los centros de consolidación sobre el tráfico y las emisiones del área de estudio, se realizó una revisión sobre la posible ubicación de estas facilidades basada en los resultados del trabajo de investigación “Competitividad Logística Territorial-Caso de Estudio: Sistema Urbano Regional en la Región Centro país”, (Alarcón, 2012). Se encontró que no existen para todos los accesos, espacios suficientes disponibles para estas instalaciones a una distancia no mayor a 30 kilómetros antes del inicio de la restricción. Las áreas disponibles se encuentran localizadas en los accesos nororientales de la ZMVM: sobre las autopistas México-Querétaro, México-Pachuca y México-Puebla. Sobre los accesos de las autopistas México-Toluca y México-Cuernavaca no hay espacios disponibles a una distancia razonable de la ZMVM.

Las áreas definidas para la posible ubicación de la Centros de Consolidación son las que se encuentran en la Figura 5-9).



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-9. Grupo 4 de Escenarios-Ubicación Centros Logísticos**

#### 5.3.4.1 Escenario 4.1A

El escenario 4.1A evalúa la combinación de las siguientes opciones de cambio de los camiones de carga grandes y medianos ante la restricción por ventanas de tiempo, aplicándolas a la ZMVM en forma simultánea:

- Cambio en los horarios de operación.
- Cambio a vehículos de tamaño no restringido (<3.5 toneladas).
- Cambio de recorridos para evitar los corredores restringidos y llegar al destino final.
- Uso de centros de consolidación, donde los camiones pesados son reemplazados por vehículos de tamaño no restringido.

Para este escenario, se requirió adicionalmente una redistribución de viajes en la matriz origen-destino base, generada por la incorporación de los centros logísticos que son utilizados por un 2% de los camiones medianos y grandes, lo cual modifica los viajes de la siguiente forma:

- El 2% de los viajes en camiones grandes y medianos que entraría a la ZMVM por los corredores restringidos o cuyo origen (conector de centroide de zona a la vía restringida) se encuentre antes de iniciar la restricción, llegarían a utilizar los centros logísticos ubicados antes de iniciar la restricción en las zonas definidas en la Figura 5-9, convirtiendo los centros logísticos en zona destino para estos viajes. En términos de la matriz O-D, los viajes de las zonas destino originales de este 2% de viajes de camiones medianos y grandes se reducen en tal proporción, mientras que los viajes de las zonas donde están los centros logísticos se incrementan en igual proporción.
- El 2% de los camiones medianos y pesados cambia en el centro logístico a camiones chicos, en razón de 5 vehículos chicos por cada mediano, y 11 vehículos chicos por cada camión grande, los cuales se distribuyen a los destinos originales de los camiones pesados. Es decir, las zonas

de la matriz donde se encuentran los centros logísticos se convierten ahora en el origen de estos nuevos viajes adicionales en camiones chicos, incrementando el número de viajes, los cuales se distribuyen hacia los destinos originales de los camiones pesados.

- De igual forma en sentido inverso, el 2% de los camiones pesados que saldrían de la ZMVM por los corredores restringidos, entran al centro logístico donde cambian a vehículos chicos para continuar hacia el destino final, aumentando los viajes de la matriz de camiones chicos y disminuyendo los viajes en ciertos destinos finales.

Los anteriores cambios se ven reflejados en la Tabla 5-2 donde se comparan los totales de viajes de la matriz base original con la nueva matriz denominada de centros logísticos. Como consecuencia de esta redistribución de viajes también se ve afectada (reducida) la longitud de los viajes debido a que unos vehículos llegan a los centros de distribución y de ahí salen otros vehículos que llevan la carga a su destino final.

**Tabla 5-2 Nueva matriz O-D -Período pico de la mañana para los Escenarios del Grupo 4**

Tipo de Vehículo	Matriz O-D original	Matriz O-D Centros Logísticos	% Cambio
Vehículos de pasajeros	1,334,700	1,334,700	0%
Camiones muy chicos	155,009	155,009	0%
Camiones chicos	63,734	102,869	+61%
Camiones medianos	99,880	77,166	-23%
Camiones grandes	32,140	29,838	-7%

Fuente: Elaboración propia

Una vez incorporados los anteriores cambios en la nueva matriz de centros logísticos, se generaron las matrices para el escenario 4.1A con las siguientes proporciones obtenidas del sondeo de opinión descrito en la sección 3.6. (ver esquema de la Figura 5-8):

- 33% de los camiones grandes y medianos cambia su horario de operación a la hora valle.
- 5% de los camiones pesados cambia a vehículos de tamaño no restringido (<3.5 toneladas).
- 60% de los camiones restringidos cambia sus recorridos para poder llegar al destino final.

En cuanto a las redes para este escenario, se utiliza la red vial principal y la sub-red de carga con los accesos restringidos.

#### **5.3.4.2 Escenario 4.1B**

El escenario 4.1B considera la combinación de los cambios operacionales antes descritos, para el período valle. La matriz para este escenario fue adicionada con el 33% de los camiones pesados que cambiaron de la hora pico a la hora valle y se conservaron los vehículos que cambiaron de tamaño en el Escenario 4.1A, pero ya sin la restricción de ventanas de tiempo.

### 5.3.4.3 Escenario 4.2A

Este escenario considera todos los cambios operaciones descritos para el escenario 4.1A junto con el mejoramiento de la red vial descrito en el escenario 3.1A (ver Figura 5-7). Al igual que en los anteriores escenarios, se incorporó la nueva matriz de centros logísticos para evaluar el impacto de estas facilidades sobre el tráfico y las emisiones, pero para este escenario, con mejoramiento en la capacidad de algunas vías y la incorporación de otras nuevas en la ZMVM.

Las redes utilizadas corresponden a la red vial principal mejorada y la sub-red de carga mejorada con restricciones en los principales accesos a la ZMVM.

### 5.3.4.4 Escenario 4.2B

El escenario 4.2B considera todos los cambios operacionales simultáneamente, junto con el mejoramiento de la red vial para el período valle. La matriz O-D para este escenario es la nueva matriz de centros logísticos para el periodo valle adicionada con 33% de camiones grandes y medianos.

La red vial para este escenario es la red vial principal mejorada y la sub-red de carga mejorada y sin ningún tramo restringido.

### 5.3.4.5 Escenarios 4.3A y 4.3B

Con el fin de analizar el impacto de los centros logísticos, los escenarios 4.3A y 4.3B analizan la combinación de cambios operacionales y mejoramiento de vialidades con excepción del uso de centros logísticos, tanto para el período pico como para el período valle. De esta forma, la comparación de los escenarios 4.2A y 4.2B con los escenarios 4.3A y 4.3B permitirá comparar la situación con y sin centros logísticos.

Las matrices para estos dos escenarios se obtuvieron de las matrices base originales sin la afectación por redistribución de viajes generada por los centros logísticos. Las ecuaciones para la obtención de estas matrices son las siguientes, de acuerdo con la notación utilizada en este capítulo y las proporciones de la Figura 5-10.

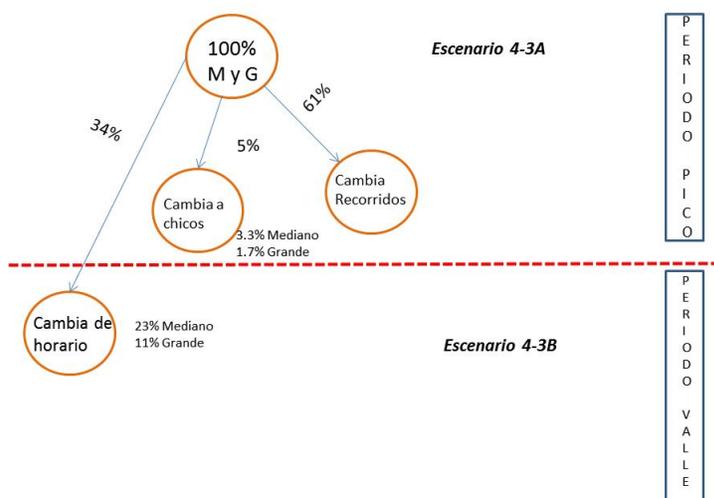
Las redes viales para este escenario son la red vial principal mejorada, la sub-red de carga mejorada y la sub-red con restricciones (período pico).

$$\begin{aligned}
 MP_{4.3A} &= MP_{b,HP} \\
 MI_{4.3A} &= MI_{b,HP} \\
 M2_{4.3A} &= M2_{b,HP} + 0.2112 \times M3_{b,HP} + 0.24905 \times M4_{b,HP} \\
 M3_{4.3A} &= M3_{b,HP} - 0.23 \times M3_{b,HP} - 0.033 \times M3_{b,HP} = 0.7373 M3_{b,HP} \\
 M4_{4.3a} &= M4_{b,HP} - 0.11 \times M4_{b,HP} - 0.017 M4_{b,HP} = 0.863 M4_{b,HP}
 \end{aligned}$$

**Ecuación 5-5**

$$\begin{aligned}
 MP_{4.3B} &= MP_{b,HV} \\
 MI_{4.3B} &= MI_{b,HV} \\
 M2_{4.3B} &= M2_{b,HV} \\
 M3_{4.3B} &= M3_{b,HV} + 0.23 \times M3_{b,HP} \\
 M4_{4.3B} &= M4_{b,HV} + 0.11 \times M4_{b,HP}
 \end{aligned}$$

**Ecuación 5-6**



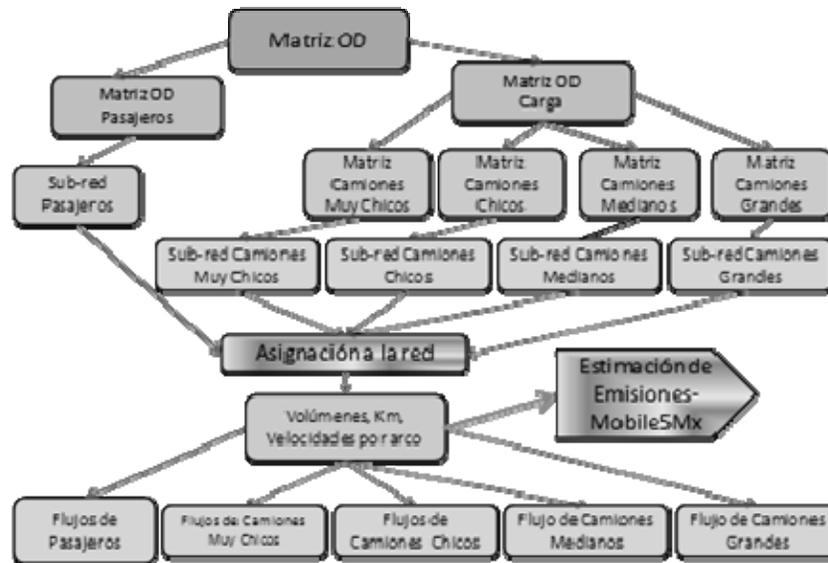
Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-10. Escenarios 4.3A y 4.3B: Combinación de Opciones Operacionales sin Centros de Consolidación**

#### 5.4 PROCESO DE ASIGNACIÓN MULTI-VEHÍCULO Y DE OBTENCIÓN DE LOS INDICADORES DE EVALUACIÓN

Una vez definidos los quince escenarios de evaluación, descritos en el numeral anterior, junto con la información de entrada de las matrices O-D y de las redes para cada uno de ellos, se procedió a realizar el proceso de asignación multi-vehículo utilizando el módulo de asignación “*Multi Modal Assignment*” del programa *TransCad Ver. 5.0*, el cual fue calibrado y validado en el Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales del Instituto de Ingeniería-LTST de la UNAM para las condiciones de tráfico de la ZMVM.

El proceso de asignación multi-vehículo se realiza para cada uno de los escenarios utilizando las matrices O-D y las redes definidas para cada tipo de vehículo, de acuerdo con la Figura 5-11.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-11. Proceso de Asignación Multi-Vehículo para cada Escenario**

Los principales resultados obtenidos con la asignación multi-vehículo de cada uno de los escenarios son los siguientes:

- Flujos vehiculares por tipo de vehículo, por sentido y totales en cada arco de la red.
- Velocidad estimada en cada arco de la red.
- Kilómetros recorridos en cada arco de la red.
- Relación volumen vehicular/capacidad para cada arco de la red, en cada sentido.

Con los resultados de la asignación multi-vehículo antes definidos, se procede a calcular los siguientes indicadores, que serán utilizados para la evaluación y comparación de escenarios:

- Total de kilómetros recorridos (TK) por todos los vehículos en toda la red: corresponde a la suma de los kilómetros recorridos por todos los tipos de vehículos ( $m$ ) en cada arco ( $i$ ) de la red, de acuerdo con la velocidad estimada ( $v$ ) en cada arco.
- Total de kilómetros recorridos por los camiones medianos y grandes en la sub-red de carga: se calcula en forma similar al anterior indicador, pero solo para los vehículos pesados.
- Tiempo de viaje (TV) en horas de todos los vehículos en la red: calculado en función de la velocidad estimada ( $v$  en km/hora) en cada arco ( $i$ ), para el flujo de todos los tipos de vehículos ( $m$ ) a partir de la longitud de cada arco ( $i$ ).
- Tiempo de viaje en horas de los camiones medianos y grandes: se calcula de igual forma para los tipos de vehículo mediano y grande.
- Factor de congestión  $\phi$  (Lozano et al, 2007): es la relación entre los kilómetros con mejor flujo y los kilómetros con mayores demoras y congestión, calculado con la Ecuación 5-7, donde  $\rho_i$

es la relación entre el flujo total (suma de todos los flujos por tipo de vehículo en ambos sentidos del arco  $i$ ) estimado por el modelo y la capacidad del arco  $i$  (relación volumen/capacidad) y,  $\kappa_i$  es el número de kilómetros con esta tasa.

En la Ecuación 5-7, el numerador considera aquellos arcos en los cuales el flujo es menor que su capacidad, y da un valor mayor para los arcos cercanos a flujo libre, mientras que el denominador considera los arcos muy congestionados y da un mayor valor para los arcos en los cuales se tiene peor congestión y demoras. De acuerdo con lo anterior,  $\varphi$  es la relación entre los kilómetros con mejor flujo y los kilómetros con mayores demoras y congestión. Por tanto, si  $\varphi_A > \varphi_B$ , el escenario A es mejor que el escenario B en términos de congestión.

$$\varphi = \left( \frac{\sum_{\forall \rho_i < 1} (1 - \rho_i) \kappa_i^2}{-\sum_{\forall \rho_i > 1} (1 - \rho_i) \kappa_i^2} \right)$$

**Ecuación 5-7**

- Con la información resultante de flujos vehiculares por tipo de vehículo y con las velocidades en cada arco de la red, se procede a realizar el cálculo de emisiones de contaminantes locales NO<sub>x</sub> y CO utilizando los factores de emisión del modelo *Mobile5-MéxicoCity* (ver Ecuación 5-8), que estima un factor de emisión ( $FE_{p,v,c}$  en gr/km) para cada tipo de vehículo ( $c$ ) en función de la velocidad del arco ( $v$ ) dada en kilómetros/hora. Las emisiones de contaminantes totales se calculan con la Ecuación 5-8 para cada contaminante.

$$E_p^c = \sum_i^n \sum_c^m KRV_{i,c} \times FE_{i,p,v,c}$$

**Ecuación 5-8**

donde,

$E_p^c =$	emisiones totales en gramos del contaminante $p$ para la clase de vehículo tipo $c$
$KRV_{i,c} =$	kilómetros recorridos por el vehículo tipo $c$ en el arco $i$
$FE_{i,p,v,c} =$	factor de emisión (gr/km) del contaminante $p$ , para la velocidad (km/hr) $v$ , del vehículo tipo $c$
$n =$	número de arcos de la red
$m =$	tipos de vehículos

La obtención final de los indicadores se realiza en un proceso computacional adicional en SQL<sup>15</sup>, el cual mediante una secuencia de programación calcula a partir de las salidas del modelo de asignación multi-vehículo los valores de cada indicador para cada escenario. Los indicadores de kilómetros y tiempos de recorrido se obtienen a partir de la información de volúmenes, tiempos, longitud, número de carriles y sentido de circulación de cada uno de los 15,200 arcos de la red

<sup>15</sup> SQL es el acrónimo de Lenguaje de Consultas Estructurado (*Structured Query Language*)

principal, para cada tipo de vehículo. El proceso diseñado permite obtener estos valores para cada tipo de vehículo en cada escenario.

El índice de congestión se obtiene con la información de *VOC* (relación volumen/capacidad) y los kilómetros recorridos (para cada valor de *VOC*) en cada uno de los 15,200 arcos de la red. Los valores de emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$  se calculan para cada uno de los 15,200 arcos en función de la velocidad del arco y los kilómetros recorridos por cada uno de los tipos de vehículos.

Los resultados de este proceso de cálculo para cada uno de los quince escenarios evaluados se presentan en el siguiente capítulo, junto con el análisis correspondiente.

## 6 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Se presenta en este capítulo el análisis de los resultados de la evaluación de los escenarios propuestos en esta investigación y que sirvieron de base para formular la metodología de evaluación de políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas.

En el capítulo anterior se describieron los quince escenarios evaluados, los cuales conforman cuatro grupos: el grupo 1 que incluye los escenarios base tanto para el período pico como para el valle; el grupo 2 que evalúa en forma independiente cada opción operativa ante la restricción por ventanas de tiempo; el grupo 3 que analiza adicionalmente a la restricción por ventanas de tiempo, el impacto del mejoramiento en algunas vialidades y, el grupo 4 que evalúa el impacto de la aplicación de todas las opciones operativas de los transportistas ante las restricciones, en forma simultánea.

Una vez realizado el proceso de asignación multi-vehículo para cada uno de los escenarios, se obtuvieron los siguientes indicadores, cuya metodología de obtención se describió al final del capítulo anterior:

- Total de kilómetros recorridos (TK) por todos los vehículos en la red.
- Total de kilómetros recorridos por los camiones medianos y grandes en la sub-red de carga.
- Tiempo de viaje (TV) en horas de todos los vehículos en la red.
- Tiempo de viaje en horas de los camiones medianos y grandes.
- Factor de congestión  $\phi$ .
- Estimación de emisiones totales de  $\text{NO}_x$  y CO para todos los vehículos en la red.
- Estimación de emisiones de  $\text{NO}_x$  y CO para los camiones medianos y grandes.

### 6.1 RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE CADA ESCENARIO

Los resultados generales de las evaluaciones se presentan en la Tabla 6-1 con los valores de los indicadores obtenidos para cada escenario en el período pico (escenarios A), el período valle (escenarios B) y para el período total de la mañana (A+B), estos últimos obtenidos a partir de la suma algebraica de los indicadores del período pico (A) más los del período valle (B) en cada grupo de escenarios, con excepción del índice de congestión que se obtiene directamente de los datos de salida del modelo para los dos períodos utilizando la Ecuación 5-7. El análisis de estos resultados se realiza para los escenarios más relevantes y se presenta en el numeral 6.3.

Los escenarios suma (A+B) de la Tabla 6-1, indican la suma de dos periodos de análisis continuos en el tiempo. Para obtener el período total de la mañana, se toman los indicadores de emisiones y kilómetros y tiempos recorridos de la hora pico y se adicionan a los de la hora inmediatamente siguiente (hora valle), conservando en ambos periodos las mismas unidades de medición.

**Tabla 6-1 Indicadores Obtenidos a Partir del Proceso de Asignación Multi-Vehículo**

Escenarios	Emisiones Locales Totales (tons)		Emisiones Locales de Camiones Pesados (tons)		1/Índice de Congestión	Total Kilómetros Recorridos-TK		Total Tiempos de Viaje-TV (horas)	
	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	CO		Total	Camiones	Total	Camiones
Escenario 1.1A	39.80	752.69	29.17	185.59	3.81	19,963,326	3,979,936	22,248,634	5,756,533
Escenario 2.0	32.13	623.05	22.37	154.19	2.80	19,150,218	2,880,891	17,750,989	3,882,502
Escenario 2.1	31.90	620.86	22.15	152.37	2.79	19,120,818	2,850,322	17,639,202	3,819,265
Escenario 2.2A	28.27	566.79	18.75	120.99	2.45	18,423,865	2,349,592	15,276,224	2,796,775
Escenario 2.3	27.32	558.14	17.83	115.04	2.37	18,285,146	2,231,711	14,798,185	2,579,827
Escenario 3.1A	28.91	562.49	19.45	125.12	2.49	18,572,014	2,360,679	14,778,966	2,719,614
Escenario 4.1A	29.30	747.66	17.96	116.25	3.52	19,825,366	2,217,257	20,111,898	2,866,468
Escenario 4.2A	29.74	741.53	18.44	119.23	3.52	19,939,503	2,227,836	19,388,789	2,815,997
Escenario 4.3A	29.30	610.20	19.34	125.99	2.78	18,982,143	2,347,410	16,113,424	2,796,837
Escenario 1.1B	38.70	785.84	28.37	180.70	2.26	18,015,230	3,938,180	18,168,144	5,452,182
Escenario 2.2 B	42.74	850.51	32.05	210.93	2.36	18,734,366	4,469,814	20,516,531	6,707,031
Escenario 3.1B	36.87	741.77	26.96	182.48	2.27	17,878,341	3,889,351	16,923,003	5,282,139
Escenario 4.1B	43.53	1,008.19	31.25	202.84	2.83	19,803,375	4,241,074	23,335,359	6,446,942
Escenario 4.2B	37.93	919.03	26.29	176.28	2.71	19,004,517	3,699,057	19,803,117	5,161,320
Escenario 4.3B	35.74	651.31	26.42	174.16	2.30	17,642,419	3,895,516	12,344,159	4,050,691
1.1A+1.1B	78.50	1,538.53	57.53	366.29	3.01	37,978,556	7,918,117	40,416,778	11,208,715
2.2A+2.2B	71.00	1,417.30	50.80	331.92	2.41	37,158,231	6,819,407	35,792,755	9,503,807
3.1A+3.1B	65.78	1,304.26	46.42	307.61	2.38	36,450,355	6,250,030	31,701,970	8,001,753
4.1A+4.1B	72.83	1,755.85	49.20	319.09	3.18	39,628,741	6,458,330	43,447,258	9,313,410
4.2A+4.2B	67.67	1,660.56	44.73	295.51	3.11	38,944,020	5,926,894	39,191,906	7,977,317
4.3A+4.3B	65.03	1,261.51	45.76	300.16	2.52	36,624,562	6,242,926	28,457,582	6,847,528

Fuente: Elaboración propia

## 6.2 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

Para comparar los resultados de evaluación de los escenarios, se calculó la relación ( $i_e / i_b$ ) entre cada indicador de los diferentes escenarios ( $i_e$ ) con respecto a los indicadores del escenario base ( $i_b$ ), tanto para el período pico como para el valle, obteniendo los valores que se presentan en la Tabla 6-2. Así mismo, se estableció una escala de color para la comparación entre escenarios de acuerdo con los siguientes criterios:

- Mucho mejor: valores de  $i_e/i_b$  entre 0.45 y 0.7
- Mejor: valores de  $i_e/i_b$  superiores a 0.7 y menores que 0.9
- Igual: relación  $i_e/i_b$  superior a 0.9 y menor que 1.1
- Peor: valor de  $i_e/i_b$  mayor a 1.1 y menor que 1.3

- Mucho peor: relación  $i_e/i_b$  superior a 1.3 y menor que 1.5

El análisis de estos resultados se presenta a continuación para los escenarios más relevantes.

**Tabla 6-2 Resultados para Comparación de Escenarios**

Escenarios	Emisiones Locales Totales (tons)		Emisiones Locales de Camiones Pesados (tons)		1/Índice de Congestión	Total Kilómetros Recorridos-TK		Total Tiempos de Viaje-TV (horas)	
	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	CO		Total	Camiones	Total	Camiones
Escenario 1.1A	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Escenario 2.0	0.81	0.83	0.77	0.83	0.73	0.96	0.72	0.80	0.67
Escenario 2.1	0.80	0.82	0.76	0.82	0.73	0.96	0.72	0.79	0.66
Escenario 2.2A	0.71	0.75	0.64	0.65	0.64	0.92	0.59	0.69	0.49
Escenario 2.3	0.69	0.74	0.61	0.62	0.62	0.92	0.56	0.67	0.45
Escenario 3.1A	0.73	0.75	0.67	0.67	0.65	0.93	0.59	0.66	0.47
Escenario 4.1A	0.74	0.99	0.62	0.63	0.92	0.99	0.56	0.90	0.50
Escenario 4.2A	0.75	0.99	0.63	0.64	0.92	1.00	0.56	0.87	0.49
Escenario 4.3A	0.74	0.81	0.66	0.68	0.73	0.95	0.59	0.72	0.49
Escenario 1.1B	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Escenario 2.2 B	1.10	1.08	1.13	1.17	1.04	1.04	1.13	1.13	1.23
Escenario 3.1B	0.95	0.94	0.95	1.01	1.00	0.99	0.99	0.93	0.97
Escenario 4.1B	1.12	1.28	1.10	1.12	1.25	1.10	1.08	1.28	1.18
Escenario 4.2B	0.98	1.17	0.93	0.98	1.20	1.05	0.94	1.09	0.95
Escenario 4.3B	0.92	0.83	0.93	0.96	1.02	0.98	0.99	0.68	0.74
1.1A+1.1B	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.2A+2.2B	0.90	0.92	0.88	0.91	0.80	0.98	0.86	0.89	0.85
3.1A+3.1B	0.84	0.85	0.81	0.84	0.79	0.96	0.79	0.78	0.71
4.1A+4.1B	0.93	1.14	0.86	0.87	1.06	1.04	0.82	1.07	0.83
4.2A+4.2B	0.86	1.08	0.78	0.81	1.03	1.03	0.75	0.97	0.71
4.3A+4.3B	0.83	0.82	0.80	0.82	0.84	0.96	0.79	0.70	0.61

Fuente: Elaboración propia

MUCHO MEJOR	MEJOR	IGUAL	PEOR	MUCHO PEOR
-------------	-------	-------	------	------------

### 6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Se presenta a continuación el análisis de los resultados de la evaluación de los escenarios propuestos en esta investigación para evaluar la política de ventanas de tiempo aplicada a los vehículos de carga de más de 3.5 toneladas sobre los principales corredores de acceso a la ZMVM.

Se analizan en primera instancia aquellos escenarios que evalúan una sola opción operativa de los transportistas ante la restricción, luego aquellos escenarios que miden el impacto de las mejoras en

vialidades y por último la combinación simultánea de opciones operativas, la cual se considera como la opción más cercana a la realidad.

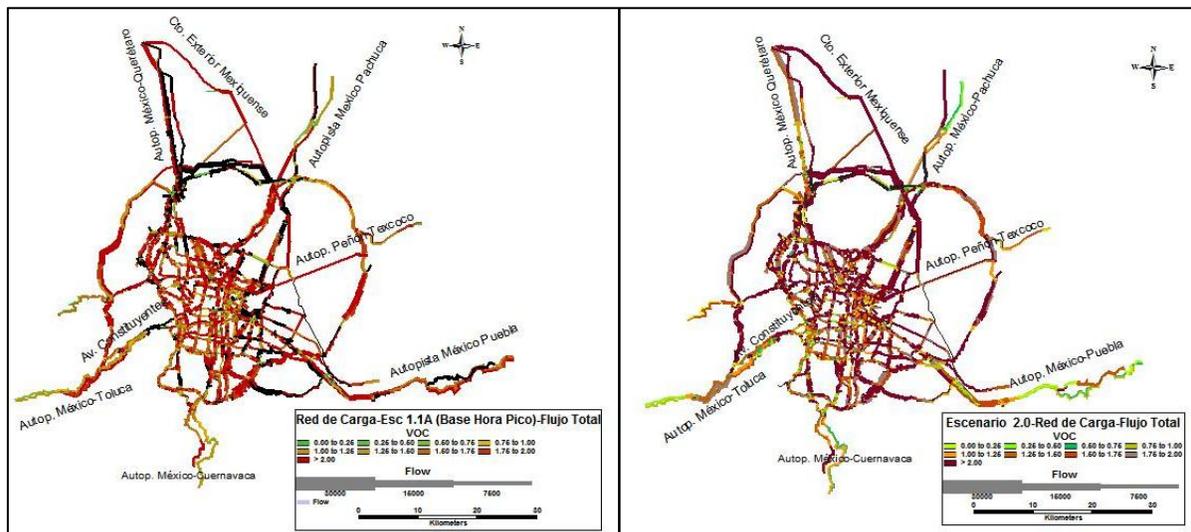
El análisis se centra en los resultados de asignación para los camiones de carga medianos y grandes, dado que son los que están sujetos a la política de restricción.

### 6.3.1 Escenario 2.0 - Cambio de Recorridos

El Escenario 2.0 evalúa la opción de que todos los camiones medianos y grandes que circulan por los corredores con prohibición cambian sus recorridos para evitar los tramos restringidos y así poder llegar a sus destinos.

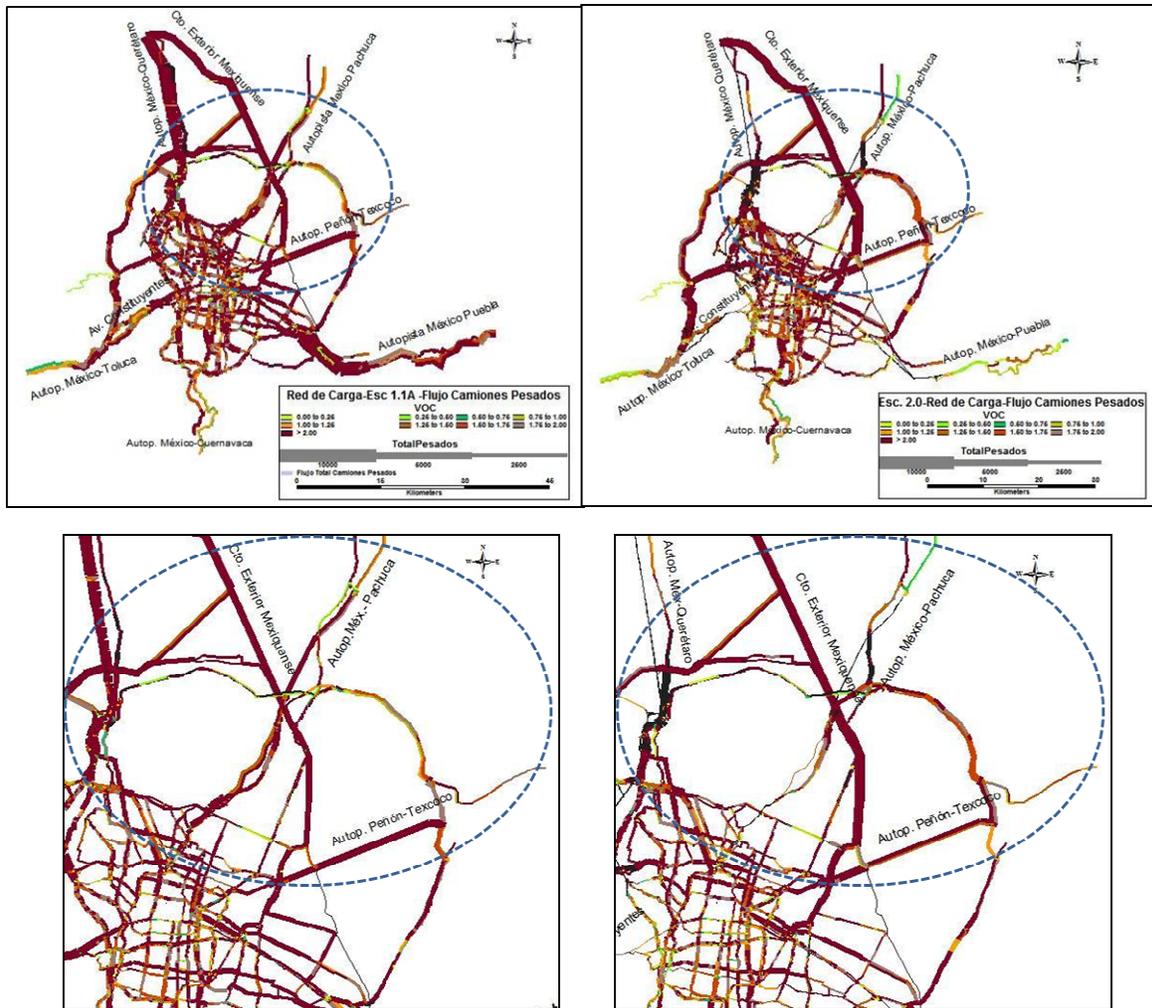
En la parte izquierda de la Figura 6-1 se presenta la asignación de flujos totales de vehículos para el período pico base de la mañana en la sub-red de carga y en la derecha se presenta la asignación del escenario 2.0 sobre la misma sub-red para el mismo período, figuras que representan el volumen del flujo vehicular (por ancho de líneas) junto con el impacto sobre la congestión (en rangos de valores de la relación volumen/capacidad del arco-VOC, en gama de colores donde verde es flujo libre y rojo y negro, congestión con colas).

Aunque ambos escenarios presentan muchos arcos congestionados (color negro y rojo oscuro), los cambios más visibles en flujos y congestión (relación Volumen/Capacidad-VOC) se presentan sobre los corredores de acceso restringidos, en donde para el escenario 2.0, dejan de circular los camiones medianos y grandes. En la Figura 6-2, donde sólo se presentan los flujos de vehículos pesados (camiones medianos + camiones grandes) para estos dos escenarios, se aprecia más fácilmente esta reasignación de flujos sobre la red de carga, cuando es aplicada la restricción por ventanas de tiempo sobre los corredores de acceso.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-1 Comparación Escenarios 1.1A y 2.0 - Red de Carga: Flujos Totales**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-2 Comparación Escenarios 1.1A y 2.0 - Red de Carga: Camiones Pesados**

En la Figura 6-2 se amplía la zona nororiental del área de estudio, en donde se pueden apreciar los cambios de flujo de los camiones pesados sobre los corredores restringidos México-Pachuca y México-Querétaro que se trasladan principalmente hacia la Autopista Peñón-Tezcoco, la carretera Texcoco-Tepexpan y el Circuito Exterior Mexiquense.

En cuanto a los resultados de los indicadores, de acuerdo con la Tabla 6-3, el escenario 2.0 genera una mejora en todos los indicadores de evaluación, especialmente para los tiempos de recorrido de los camiones, que se reducen en 33% (1,874,031 horas), sin embargo, los tiempos totales de viajes para todos los vehículos en la red no tienen un cambio significativo como consecuencia de la restricción por ventanas de tiempo para los camiones pesados. Las emisiones locales de NO<sub>x</sub> y CO para los camiones pesados se reducen en 23% y 17% respectivamente.

En el escenario 2.0, los camiones cambian sus recorridos hacia vialidades alternativas, algunas de las cuales podrían tener cobro de cuota por su uso; aquí se asume que este costo es absorbido por los transportistas.

**Tabla 6-3 Comparación de Escenarios 1.1A y 2.0**

Escenarios	Emisiones Totales(tons)		Emisiones Cam. Pesados (tons)		1/Índice de Congestión	Total Kilómetros Recorridos-TK		Total Tiempos de Viaje-TV(horas)	
	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	CO		Total	Camiones	Total	Camiones
Escenario 1.1A	39.80	752.69	29.17	185.59	3.81	19,963,326	3,979,936	22,248,634	5,756,533
Escenario 2.0	32.13	623.05	22.37	154.19	2.80	19,150,218	2,880,891	17,750,989	3,882,502
Escenario 2.0	0.81	0.83	0.77	0.83	0.73	0.96	0.72	0.80	0.67

Fuente: Elaboración propia

### 6.3.2 Escenario 2.1 - Cambio de Tamaño de Vehículos

En el escenario 2.1, 5.6% de los camiones pesados cambian a camiones chicos con capacidad de carga de 3.5 ton, los cuales pueden circular por toda la red. Los vehículos medianos y grandes que no cambian de tamaño (94.4%), continúan restringidos durante el período pico en los corredores de acceso/salida de la ZMVM y deben modificar sus recorridos.

La proporción de cambio de tamaño de vehículos para este escenario es muy baja, ya que refleja según los resultados de las entrevistas, la dificultad que tendrían los transportistas para cambiar el tamaño de los vehículos. Sin embargo, se realiza la evaluación para medir el impacto de esta opción operativa, obteniendo que hay cambios mínimos positivos en la mayoría de indicadores con respecto al escenario 2.0 donde sólo se evalúan los cambios de recorridos. En cuanto a la congestión de la red total y los recorridos de todos los vehículos, no hay cambios con respecto a la situación base, el cambio de tamaño de 5.6% de los camiones pesados no cambia significativamente el desempeño de la red total (ver Tabla 6-4).

**Tabla 6-4 Comparación de Escenarios 2.0 y 2.1**

Escenarios	Emisiones Totales(tons)		Emisiones Cam. Pesados (tons)		1/Índice de Congestión	Total Kilómetros Recorridos-TK		Total Tiempos de Viaje-TV(horas)	
	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	CO		Total	Camiones	Total	Camiones
Escenario 2.0	32.13	623.05	22.37	154.19	2.80	19,150,218	2,880,891	17,750,989	3,882,502
Escenario 2.1	31.90	620.86	22.15	152.37	2.79	19,120,818	2,850,322	17,639,202	3,819,265
Escenario 2.0	0.81	0.83	0.77	0.83	0.73	0.96	0.72	0.80	0.67
Escenario 2.1	0.80	0.82	0.76	0.82	0.73	0.96	0.72	0.79	0.66

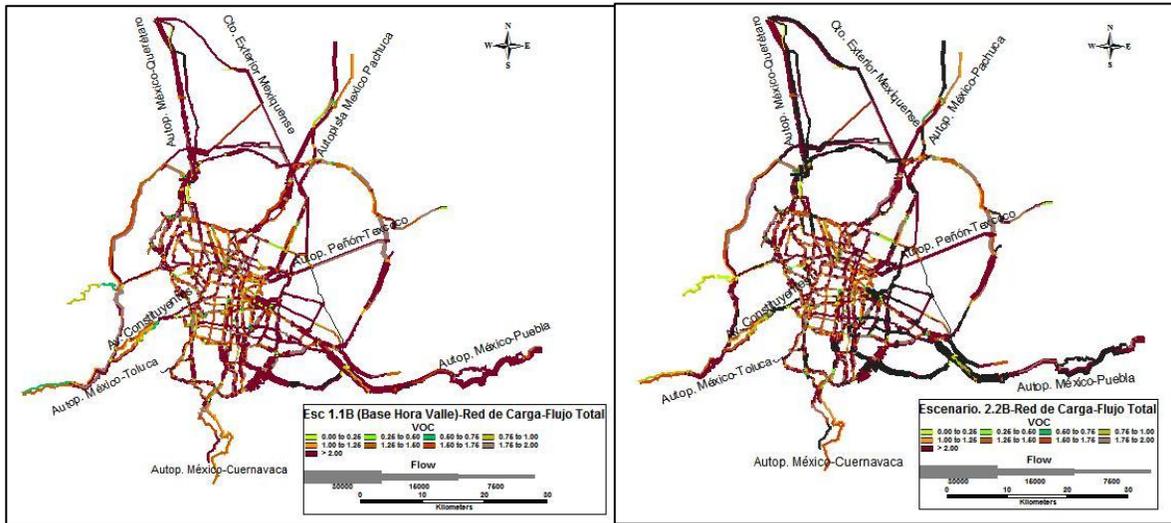
Fuente: Elaboración propia

### 6.3.3 Escenarios 2.2A - Cambio de Horario de Operación

En relación con el cambio de horario de operación de 35% de los camiones pesados (escenario 2.2A), los resultados de la evaluación reflejan, como era de esperar, que se generan mejoras para el período pico. Sin embargo, el período valle (escenario 2.2B), el cual recibe 35% más de camiones pesados, se ve afectado negativamente para la mayor parte de los indicadores. En la Figura 6-3 se

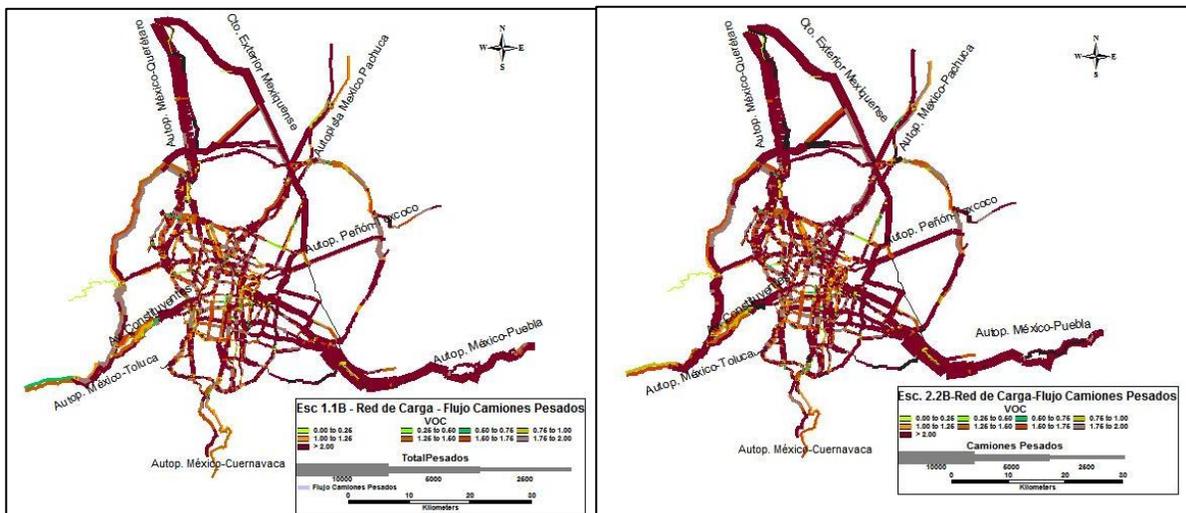
muestra el flujo de vehículos totales para el período base valle (escenario 1.1B) y para el escenario 2.2B, notando en la gráfica de VOC un aumento importante en los niveles de congestión en la red para el escenario 2.2B (cambio de VOC a valores mayores, de color rojo a negro).

En la Figura 6-4 se aprecia más claramente el incremento (líneas más anchas y color más oscuro) en los flujos de camiones pesados en la sub-red de carga, como consecuencia de la aplicación de la ventana de tiempo para el período pico, lo cual incrementa los flujos de vehículos pesados en el período valle.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-3 Comparación Escenarios 1.1B y 2.2B - Red de Carga: Flujos Totales



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-4 Comparación Escenarios 1.1B y 2.2B - Red de Carga: Flujos de Camiones Pesados

En cuanto a los indicadores de evaluación, en la Tabla 6-5 se presenta la comparación de éstos, en donde se encuentra que para el período valle (2.2B), hay un incremento de 13% en las emisiones de NO<sub>x</sub> y de 17% en las de CO para los camiones pesados, mientras que los kilómetros recorridos aumentan en 13% y los tiempos de viaje en 23% para estos vehículos pesados.

En cuanto al período total de la mañana, este cambio de 35% de camiones pesados hacia el período valle genera mejoras en los tiempos (15%) y recorridos (14%) para camiones, y una disminución general de la congestión del 20%. Sin embargo, las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO no cambian respecto al período total de la mañana para todos los vehículos.

**Tabla 6-5 Comparación de Escenarios 2.2A y 2.2B**

Escenarios	Emisiones Totales(tons)		Emisiones Cam. Pesados (tons)		1/Índice de Congestión	Total Kilómetros Recorridos-TK		Total Tiempos de Viaje-TV(horas)	
	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	CO		Total	Camiones	Total	Camiones
Escenario 2.2 A	0.71	0.75	0.64	0.65	0.64	0.92	0.59	0.69	0.49
Escenario 2.2 B	1.10	1.08	1.13	1.17	1.04	1.04	1.13	1.13	1.23
2.2A+2.2B	0.90	0.92	0.88	0.91	0.80	0.98	0.86	0.89	0.85

Fuente: Elaboración propia

#### 6.3.4 Escenarios 2.3 - Uso de Centros de Consolidación

Este escenario considera que 51.8% de los camiones medianos y grandes utilizaría centros de consolidación (o de espera) antes de iniciar los recorridos en la hora pico. Sin embargo, al realizar la revisión de la posible ubicación de estos centros de consolidación se encontró que no hay espacios disponibles antes de todos los accesos restringidos para implementar estas instalaciones, por tanto, la situación modelada en el escenario 2.3 se consideró finalmente como no real y su aporte a esta investigación se toma solo como parte del desarrollo y prueba de la metodología propuesta.

La situación real de los centros de consolidación se evalúa en el grupo de escenarios 4, donde se considera la posible ubicación geográfica de estos centros y su impacto en la distribución de viajes (cambios en la matriz O-D) en la zona de estudio. Lo anterior fue explicado ampliamente en la definición de los escenarios del grupo 4, en el capítulo precedente.

#### 6.3.5 Escenarios 3.1A y 3.1B - Cambio de Horario de Operación junto con Mejoramiento de Vialidades

Los escenarios 3.1A y 3.1B evalúan el impacto que tendría el cambio de horario de 35% de los camiones medianos y grandes, generado por la restricción de ventanas de tiempo a los camiones pesados, junto con el impacto de la política complementaria de mejoramiento de algunas vías internas y de acceso a la ZMVM.

Este grupo de escenarios 3.1 se compara con los escenarios 2.2, los cuales evalúan la misma situación sin la mejora en vialidades. Como se aprecia en la Tabla 6-6, el mejoramiento de vialidades genera impactos levemente más positivos (entre 1% y 3%) para el período pico (3.1A) y entre el 1% y 14% para el período total de la mañana (3.1A+3.1B), siendo el impacto más positivo la disminución de 14% en los tiempo de viaje de los camiones cuando se consideran las vialidades mejoradas.

En cuanto al período valle (3.1B), en ambos casos se estiman indicadores desfavorables por el incremento del 35% de camiones en este período, aun cuando el mejoramiento de vialidades disminuye este impacto negativo para todos los indicadores evaluados.

En estos escenarios, los recorridos en las nuevas vías se vuelven más cortos, pero mayor cantidad de vehículos llega más rápido a los cuellos de botella (en las entradas y salidas de la nueva vialidad). Los vehículos que usan las vías mejoradas, al salir de éstas hacia sus destinos finales se encuentran con puntos que tienen mayores niveles de congestión.

**Tabla 6-6 Comparación de Escenarios 2.2 y 3.1**

Escenarios	Emisiones Totales(tons)		Emisiones Cam. Pesados (tons)		1/Índice de Congestión	Total Kilómetros Recorridos-TK		Total Tiempos de Viaje-TV(horas)	
	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	CO		Total	Camiones	Total	Camiones
Escenario 2.2 A	0.71	0.75	0.64	0.65	0.64	0.92	0.59	0.69	0.49
Escenario 3.1A	0.73	0.75	0.67	0.67	0.65	0.93	0.59	0.66	0.47
Escenario 2.2 B	1.10	1.08	1.13	1.17	1.04	1.04	1.13	1.13	1.23
Escenario 3.1B	0.95	0.94	0.95	1.01	1.00	0.99	0.99	0.93	0.97
2.2A+2.2B	0.90	0.92	0.88	0.91	0.80	0.98	0.86	0.89	0.85
3.1A+3.1B	0.84	0.85	0.81	0.84	0.79	0.96	0.79	0.78	0.71

Fuente: Elaboración propia

### 6.3.6 Escenarios 4.A y 4.B: Evaluación Simultánea de Varias Opciones Operativas ante la Restricción por Ventanas de Tiempo

Los escenarios del grupo cuatro evalúan la combinación de opciones de cambio de los camiones de carga grandes y medianos ante la restricción por ventanas de tiempo, aplicándolas a la ZMVM en forma simultánea. Estos escenarios con varias respuestas operativas combinadas representan de manera realista lo que pasaría ante la política implementada, como es descrito en el capítulo 5. El análisis de la comparación de cada uno de estos escenarios con la situación base y con los otros escenarios del grupo 4 se presenta a continuación.

#### 6.3.6.1 Resultados Escenarios 4.1A y 4.1B

Los escenarios 4.1A y 4.1B estiman el impacto de la combinación de las siguientes proporciones de cambios operativos: 33% de los camiones pesados cambia de horario de operación, 5% cambia a tamaño de vehículos no restringidos, 60% cambia sus recorridos y 2% utiliza centros de consolidación.

Como se explicó en el capítulo anterior, este grupo de escenarios considera adicionalmente la redistribución de viajes en la matriz O-D de carga teniendo en cuenta el impacto de los centros de consolidación, los cuales son analizados como zonas origen y/o destino de los viajes de los camiones grandes, medianos y chicos que son cambiados por vehículos de otro tamaño en estas instalaciones. Además, la ubicación de estos centros está acorde con la disponibilidad de espacios en las zonas norte y nororiente de la ZMVM (antes del inicio de la restricción en los corredores Autopista México-Querétaro, México-Pachuca y México-Puebla), considerando así una modelación

más cercana a la realidad, que permitirá un mejor análisis de los resultados de la evaluación de los centros de consolidación. Para los demás accesos, no existe opción de espacios para centros logísticos inmediatamente antes de la zona de inicio de la restricción.

Los resultados del escenario 4.1A (ver Tabla 6-7) muestran mejoramiento en todos los indicadores para camiones pesados: disminución de 38% en las emisiones de NO<sub>x</sub>, de 37% en emisiones de CO, 44% en kilómetros recorridos y 50% en los tiempos de viaje. En relación con los indicadores para todos los vehículos, éstos no tienen cambios significativos con respecto a la situación base, con excepción de las emisiones de NO<sub>x</sub> que disminuyen 26%, en el periodo pico.

**Tabla 6-7 Comparación de los Escenarios del Grupo 4**

Escenarios	Emisiones Totales(tons)		Emisiones Cam. Pesados (tons)		1/Índice de Congestión	Total Kilómetros Recorridos-TK		Total Tiempos de Viaje-TV(horas)	
	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	CO		Total	Camiones	Total	Camiones
Escenario 4.1A	0.74	0.99	0.62	0.63	0.92	0.99	0.56	0.90	0.50
Escenario 4.2A	0.75	0.99	0.63	0.64	0.92	1.00	0.56	0.87	0.49
Escenario 4.3A	0.74	0.81	0.66	0.68	0.73	0.95	0.59	0.72	0.49
Escenario 4.1B	1.12	1.28	1.10	1.12	1.25	1.10	1.08	1.28	1.18
Escenario 4.2B	0.98	1.17	0.93	0.98	1.20	1.05	0.94	1.09	0.95
Escenario 4.3B	0.92	0.83	0.93	0.96	1.02	0.98	0.99	0.68	0.74
4.1A+4.1B	0.93	1.14	0.86	0.87	1.06	1.04	0.82	1.07	0.83
4.2A+4.2B	0.86	1.08	0.78	0.81	1.03	1.03	0.75	0.97	0.71
4.3A+4.3B	0.83	0.82	0.80	0.82	0.84	0.96	0.79	0.70	0.61

Fuente: Elaboración propia

Para el período valle (escenario 4.1B), se estima un empeoramiento en la mayor parte de los indicadores, con incrementos de 10% y 12% para las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO de los camiones, y de 8% y 18% para recorridos y tiempos de viaje respectivamente en camiones, lo cual es de esperarse debido al incremento del número de camiones en circulación

Para el período total de la mañana, el escenario 4.1A+4.1B, presenta una disminución de 14% y 13% en las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO respectivamente para los camiones pesados, así como también en los recorridos (18%) y tiempos de viaje (17%) para estos vehículos. Los demás indicadores son similares a la situación base.

Aunque se presentan mejoras en algunos de los indicadores, el desempeño de este escenario que incluye varias opciones operativas de los camiones como respuesta a las políticas de restricción no es mejor que los resultados estimados para los escenarios 4.2 y 4.3, por tanto el análisis se centrará en estos últimos.

#### 6.3.6.2 Resultados Escenarios 4.2A y 4.2B

Los escenarios 4.2A y 4.2B evalúan adicionalmente a las opciones consideradas en los escenarios 4.1A y 4.1B, el mejoramiento de algunas vialidades para el período pico y el período valle. Sus resultados (ver Tabla 6-7) muestran un leve incremento positivo con respecto a los escenarios 4.1A (entre 1% y 3%) en todos los indicadores para el período pico, y un mejoramiento (entre 5% y 23%) en los indicadores para el período valle (4.1B), mostrando que la construcción y el mejoramiento de

la capacidad de algunas vialidades puede ser positiva ante la restricción por ventanas de tiempo para los camiones.

Para el período total de la mañana, el escenario 4.2A+4.2B presenta indicadores mejores (entre 1% y 12%) en relación con los del escenario 4.1A+4.1B que no incluye el mejoramiento de vialidades.

Con respecto al escenario base 1.1A+1.1B, las emisiones de camiones en el período de la mañana (4.2A+4.2B) se mejoran en 22% para NO<sub>x</sub> y en 19% para CO, mientras los recorridos se mejoran en 25% y los tiempos de viaje en 29% para estos vehículos. Los indicadores para la totalidad de los vehículos en el período de la mañana se mantienen similares a los del escenario base, con excepción de las emisiones totales de NO<sub>x</sub> que disminuyen en 14%.

Lo anterior implica que la implementación simultánea de todas las opciones operativas de los camiones junto con el mejoramiento de algunas vialidades tiene un efecto positivo mayor en el período total de la mañana para los camiones pesados, pero considerando todos los vehículos en la red este efecto es muy leve. Lo anterior se explica en parte porque los recorridos en las nuevas vías se vuelven más cortos para los camiones, pero una mayor cantidad de vehículos llega más rápido a los entronques (en las entradas y salidas de la nueva vialidad), generando cuellos de botella y puntos con mayores niveles de congestión, afectando negativamente el desempeño de toda la red.

#### **6.3.6.3 Resultados Escenarios 4.3A y 4.3B**

Del grupo 4 de escenarios, como se aprecia en la Tabla 6-7, el mejor desempeño corresponde a los escenarios 4.3A y 4.3B en los cuales se consideran simultáneamente todas las opciones de cambios de los transportistas ante la restricción por ventanas de tiempo (incluyendo mejoras en las vialidades), con excepción de los centros de consolidación.

Para el escenario 4.3A, del período pico, las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO para camiones se disminuyen en 34% y 32% respectivamente, mientras que los recorridos decrecen en 41% y los tiempos de viaje en 51%, con respecto al escenario base. Los indicadores para todos los vehículos en la red también mejoran: 26% y 19% en emisiones de NO<sub>x</sub> y CO respectivamente, 27% en congestión y 28% en tiempos de viaje, pero los kilómetros recorridos permanecen casi igual que en la situación base.

El escenario para el período valle (4.3B), a diferencia de los otros escenarios para el período valle de este grupo 4, presenta casi todos los indicadores similares a la situación base (escenario 1.1B), y con mejoras en los indicadores para los tiempos de viaje de camiones y de todos los vehículos en la red. Este último resultado puede estar relacionado con el mejoramiento de las vialidades en la ZMVM.

Considerando el período total de la mañana (escenario 4.3A más escenario 4.3B), todos los indicadores son positivos con respecto al escenario base (1.1A + 1.1B), con disminución de emisiones del 20% de NO<sub>x</sub> y 18% de CO para los camiones pesados, y de 21% y 39% para recorridos y tiempos de viaje de estos vehículos. La congestión para este escenario también disminuye en 16%, mientras que las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO decrecen en 17% y 18% respectivamente para todos los vehículos. Los recorridos y tiempos de viaje para todos los vehículos en la red disminuyen en 4% y 30% respectivamente.

Comparando el período total de la mañana del escenario 4.2A+4.2B con el escenario 4.3A+4.3B, los cuales se diferencian únicamente porque este último no considera los centros de consolidación, se observa que el escenario total de la mañana 4.3 presenta mejores indicadores: 2% y 1% menos emisiones de NO<sub>x</sub> y CO para camiones, respectivamente; 4% y 10% menos kilómetros recorridos y

tiempos de viaje de camiones, respectivamente, y 19% menos en congestión de todos los vehículos. Al considerar este escenario 4.3 sin los centros logísticos también se mejoran los tiempos y recorridos de todos los vehículos en la red en 7% y 27% respectivamente, así como las emisiones de NO<sub>x</sub> en 3% y las de CO en 26%.

Los resultados anteriores se deben básicamente a que la operación de los centros de consolidación generaría una mayor concentración de flujo de camiones pesados (que entran al centro logístico), así como de camiones chicos (salen una vez se hace el cambio de tamaño de vehículo) en las vías de acceso a los centros de consolidación y en sus inmediaciones, incrementando la congestión en vías aledañas, y afectando negativamente el desempeño en toda la red.

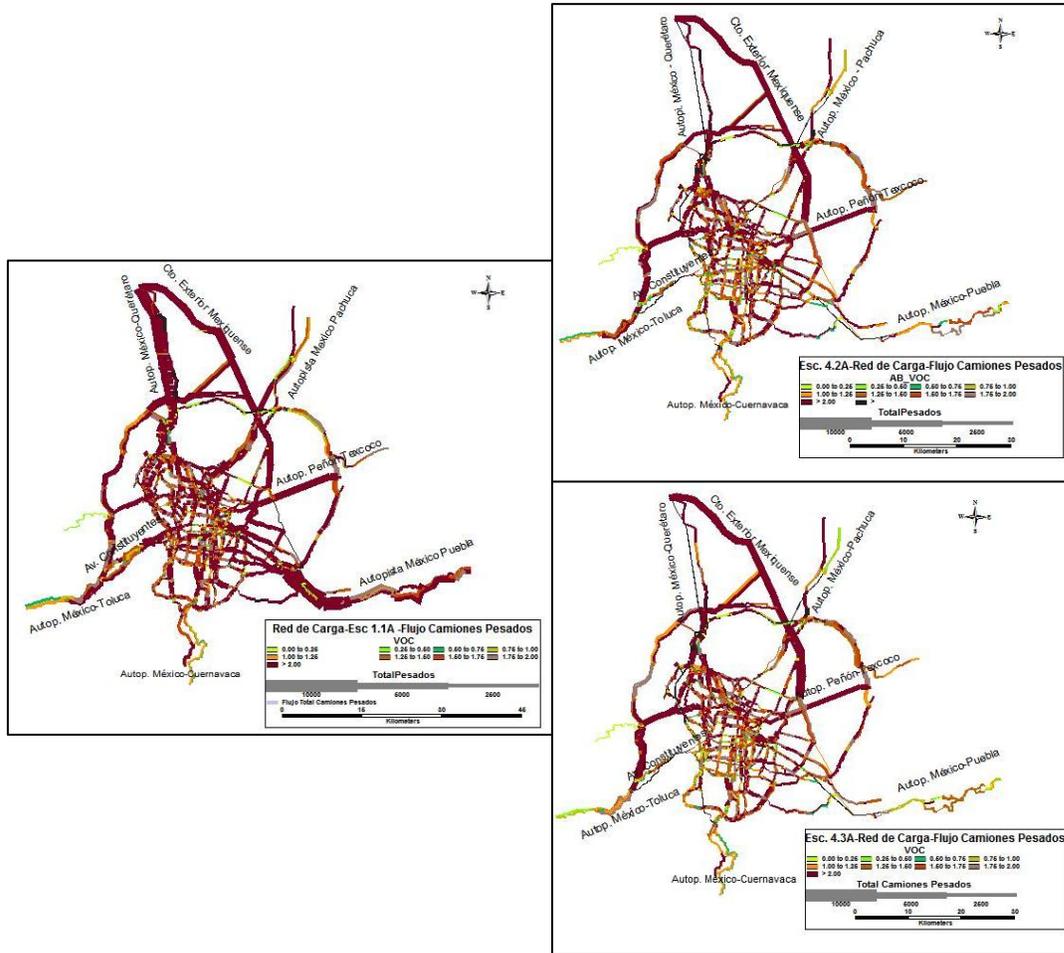
Los indicadores también muestran que hay una mejora en el desempeño de los camiones pesados sin considerar los centros logísticos, dado que estos centros generan un incremento en los flujos de camiones chicos (ver Figura 6-6 y Figura 6-7) y además congestión en las vías que conectan los centros logísticos con la red principal, lo cual afecta negativamente los indicadores para toda la red.

#### **6.3.6.4 Mapas de Comparación de Resultados del Escenario Base con los Escenarios 4.2 y 4.3**

Con el fin de ampliar la comparación de los escenario base (escenarios 1.1A y 1.1B) con los resultados de los escenarios 4.2A, 4.2B, 4.3A y 4.3B, para los cuales se estiman los indicadores más favorables de la evaluación, se analizan más detalladamente y en mapas los resultados de la asignación de flujos vehiculares en la red de carga para los camiones pesados y chicos, ampliando aquellas zonas en donde se ubican los centros de consolidación, lo cual permite apreciar mejor el impacto de estas instalaciones en los flujos locales sobre las vías aledañas.

En la Figura 6-5 a la Figura 6-9 se presentan los mapas de la red con la cantidad de flujo vehicular (según el ancho de la línea) junto con el impacto sobre la congestión por rango de valores de la relación VOC, en gama de colores, de verde (flujo libre), hasta rojo oscuro y negro (congestión con colas).

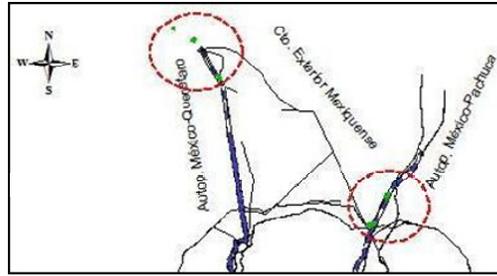
En la Figura 6-5 se presentan los flujos de camiones pesados sobre la red de carga, en donde se aprecia la redistribución de éstos para los escenarios 1.1A, 4.2A y 4.3B, generados por la restricción por ventanas de tiempo sobre los corredores de acceso. En la Figura 6-6 se amplía la zona de los accesos de la Autopista México-Querétaro y México-Pachuca, en donde estarían ubicados los centros de consolidación, observando cambios importantes en los flujos de camiones pesados y camiones chicos.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-5 Comparación Escenarios 1.1A, 4.2A y 4.3A- Red de Carga: Flujos de Camiones Pesados**

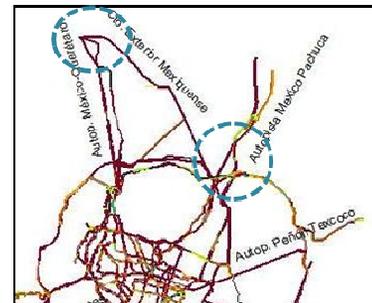
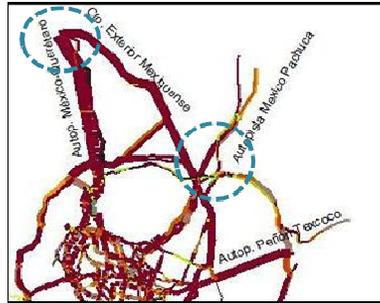
**Ubicación Centros Logísticos**



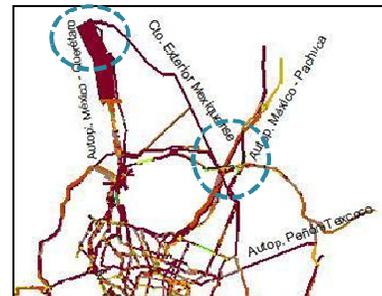
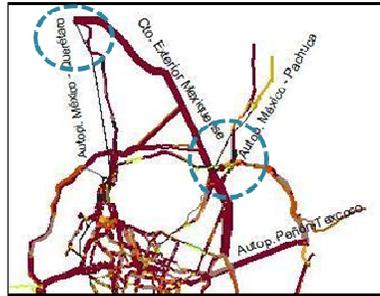
**Camiones Pesados**

**Camiones Chicos**

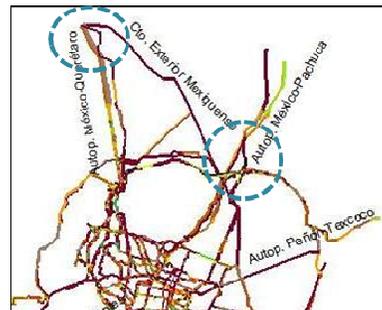
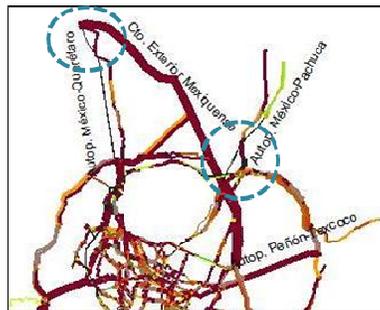
**Escenario 1.1A**



**Escenario 4.2A**



**Escenario 4.3A**



Fuente: Elaboración propia

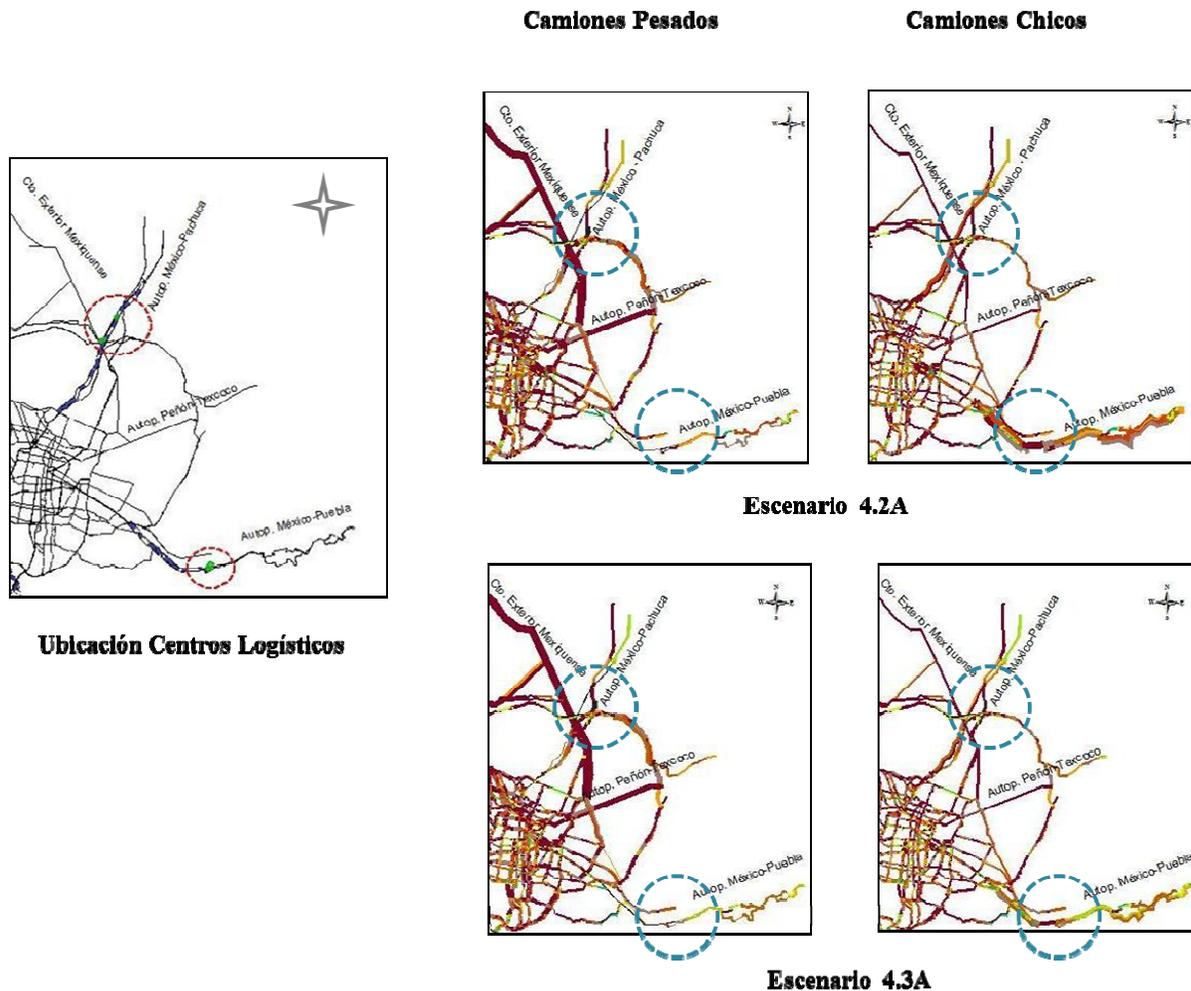
**Figura 6-6 Detalle Comparación de los Escenarios 1.1A, 4.2A y 4.3A-para Flujos de Camiones Pesados y Chicos**

El escenario 4.2A evalúa la aplicación de todas las opciones operacionales simultáneamente, incluyendo el uso de los centros de distribución antes del inicio de la restricción, en donde un porcentaje de camiones pesados cambia a camiones chicos para seguir hasta el destino final, y donde los camiones chicos llegan para cambiar a camiones pesados. En la Figura 6-6 se observa claramente el impacto de este cambio a camiones chicos sobre la Autopista México-Querétaro, los cuales al no estar restringidos, congestionan este corredor y las calles locales que conectan el centro de consolidación con la autopista.

En la Figura 6-7, se amplía la zona de los accesos restringidos en la Autopista México-Puebla y México-Pachuca, observando el aumento del flujo de camiones chicos sobre la Autopista México-Puebla y en las vías locales de conexión con el centro de consolidación, como consecuencia del uso de los centros de consolidación y la no existencia de otras vías alternas en la zona para redistribuir estos flujos.

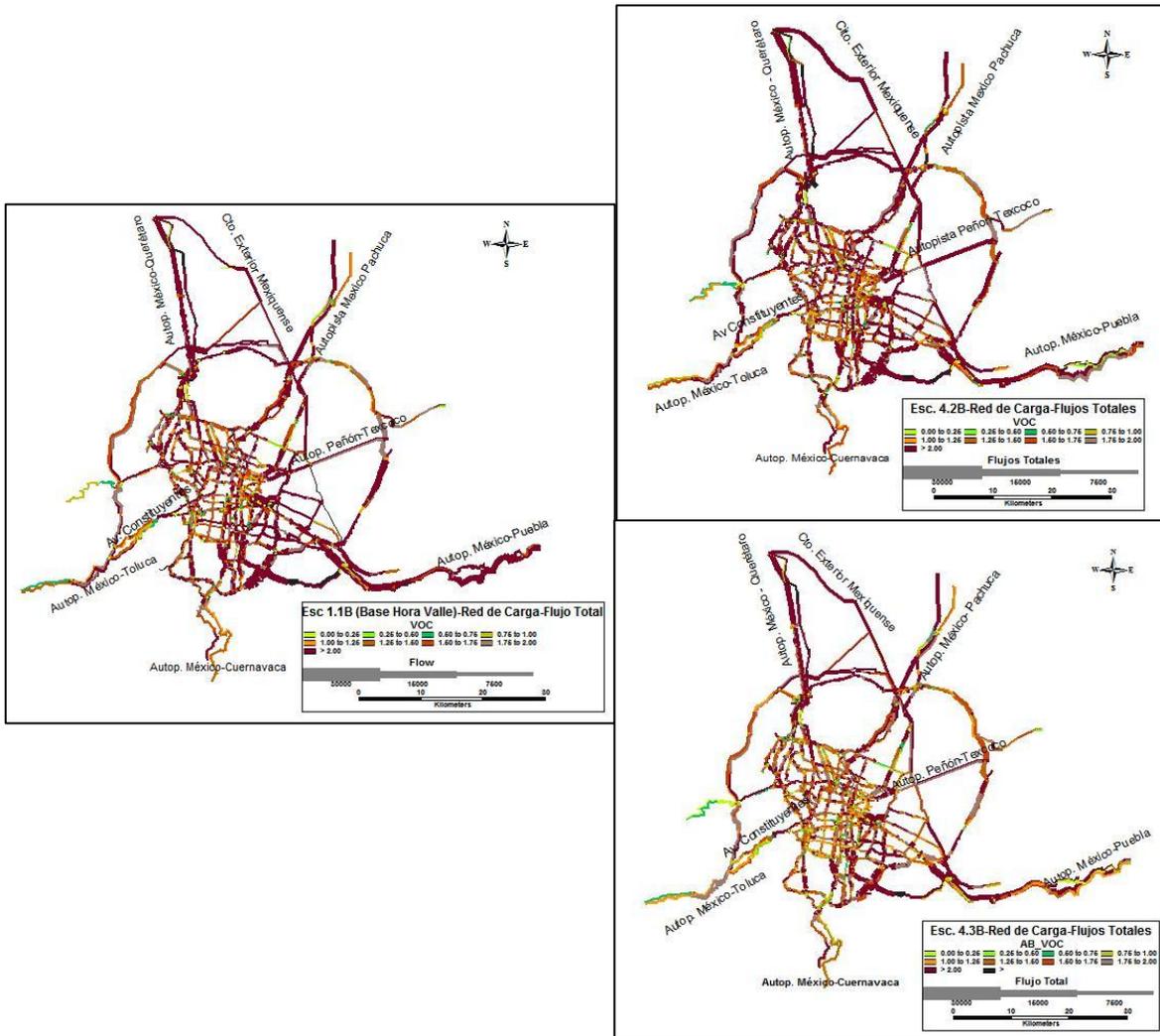
En cuanto al período valle, el mejor desempeño se estima para el escenario 4.3B. En la Figura 6-8 se muestran los flujos totales sobre la red de carga para el periodo valle. De acuerdo con los resultados de la Tabla 6-7, la congestión total para el escenario 4.2A se incrementa en 20% mientras que para el escenario 4.3B se incrementa en 2% con respecto al escenario base 1.1B, lo cual se ve reflejado claramente en los mapas temáticos de las Figura 6-8 y Figura 6-9.

Considerando el período total de la mañana (escenario 4.3A + escenario 4.3B), la congestión para este escenario se disminuye en 16%.



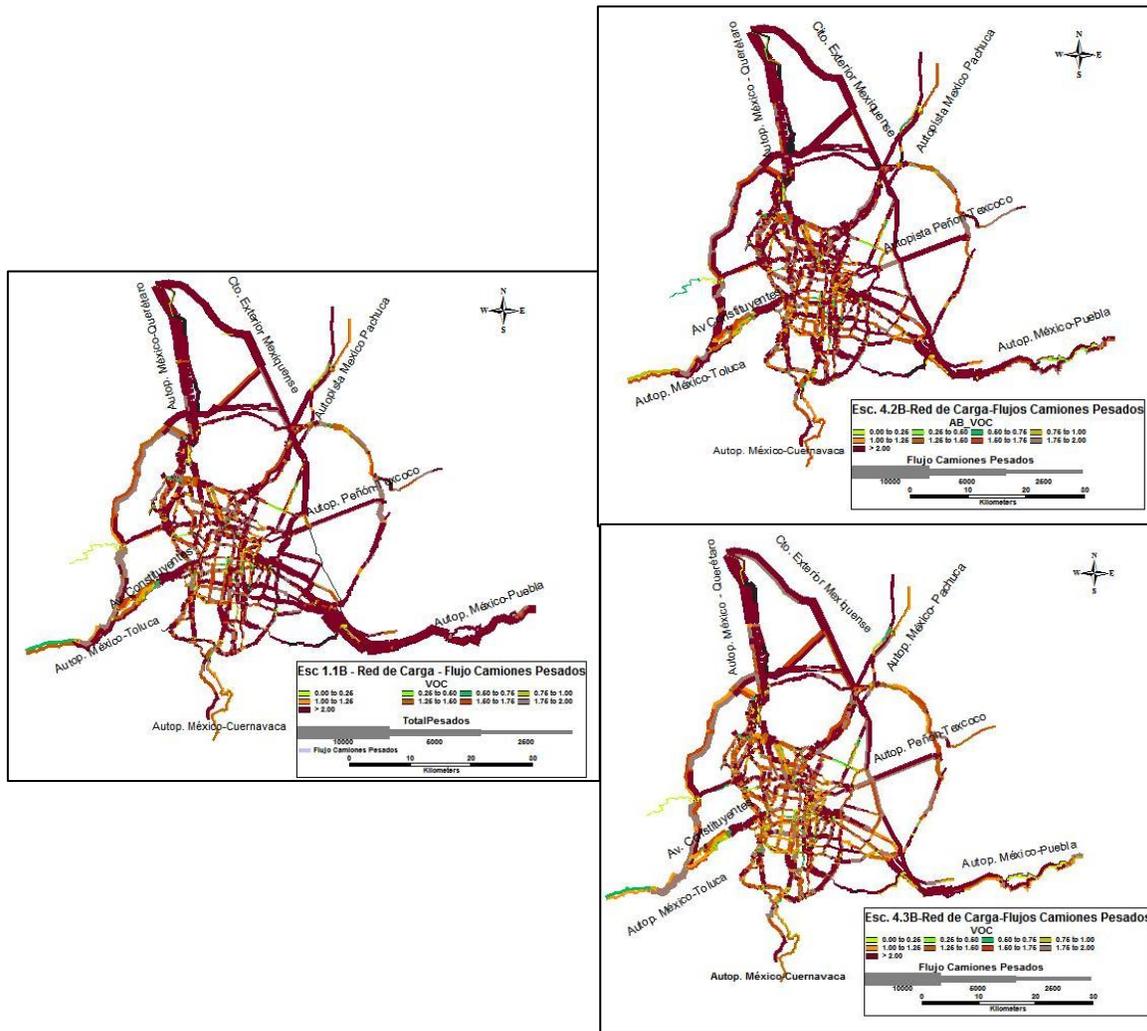
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-7 Detalle Comparación Escenarios 4.2A y 4.3A para Flujos de Camiones Pesados y Chicos



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-8 Comparación de los Escenarios 1.1B, 4.2B y 4.3B- Red de Carga: Flujos Totales



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-9 Comparación de los Escenarios 1.1B, 4.2B y 4.3B- Red de Carga: Flujos de Camiones Pesados

#### 6.4 CONCLUSIONES ADICIONALES DE LA EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Adicionalmente a los análisis anteriores, la evaluación de los escenarios de la política de restricción por ventanas de tiempo a los camiones pesados en los corredores de acceso en la ZMVM permite concluir que:

- La restricción por ventanas de tiempo a los camiones de carga sobre los principales corredores de acceso a la ZMVM genera impactos más favorables sobre la congestión y las emisiones de contaminantes locales, si los transportistas reaccionan con la aplicación de diferentes opciones operacionales simultáneamente.

- La puesta en operación de centros de consolidación en los corredores restringidos en donde existen espacios disponibles para estas facilidades pero no infraestructura vial adecuada en sus alrededores, genera un efecto negativo en los indicadores de evaluación de la congestión y en las emisiones de contaminantes considerando la totalidad de la red.
- El mejoramiento en la capacidad de algunas vialidades alternas de acceso a la ZMVM, así como la construcción de nuevas autopistas en la ZMVM puede ser una alternativa para un mejor desempeño del tráfico y de las emisiones locales ante las políticas de restricción por ventanas de tiempo.
- Los indicadores muestran que para el período total de la mañana hay una mejora en el escenario combinado que no considera los centros de consolidación, lo anterior puede deberse a que estos centros generarían un incremento en los flujos de camiones chicos e incremento de la congestión en las vías que conectan el centro de consolidación con la vialidad principal, lo cual afecta negativamente los indicadores para toda la red.

## **7 METODOLOGÍA PARA EVALUAR POLÍTICAS PÚBLICAS APLICADAS AL TRANSPORTE DE CARGA EN ZONAS URBANAS**

Con base en el procedimiento realizado para el análisis de los impactos de las políticas públicas aplicadas al transporte de carga urbano en la ZMVM, se propone una metodología de evaluación para este tipo de análisis fundamentada en modelación de redes de tráfico y en modelos de emisiones de contaminantes.

La metodología propuesta debe ser aplicada a zonas urbanas que cumplan con los siguientes supuestos:

- Grandes ciudades con sistemas complejos de tráfico cuyas vialidades sean compartidas por todo tipo de vehículos.
- Zonas urbanas donde no esté claramente definido el uso del suelo para las actividades relacionadas con el transporte de carga y por tanto se presente mezcla de usos en el territorio urbano.
- Zonas urbanas donde la infraestructura pública para actividades logísticas sea incipiente o inexistente.

### **7.1 INFORMACIÓN BÁSICA PARA APLICAR LA METODOLOGÍA**

Para la aplicación de la metodología propuesta se requiere contar con información detallada sobre el sistema de transporte urbano en el área de estudio, y en particular sobre la oferta y demanda del transporte de carga, siendo la más importante la siguiente:

- Oferta de transporte de carga:

Dentro de la oferta de transporte se incluye la información sobre el parque automotor de vehículos de carga en la zona de estudio para el año base, cuya fuente principal son los datos del registro vehicular oficial, la cual debe contar como mínimo con los siguientes datos:

- Propiedad del vehículo: esta información es fundamental para la toma de información que se debe realizar a los propietarios de camiones que se vean afectados por la política bajo evaluación.
- Identificación de los tipos de vehículos de carga que operan en el área de estudio, clasificándolos por su capacidad de carga de acuerdo con el objetivo de la evaluación y el número de vehículos por cada categoría definida. Esta información puede obtenerse indirectamente con la información sobre la marca y línea del vehículo.
- Identificación del tipo de combustible de los vehículos, la cual se utilizará para la clasificación vehicular de los modelos de emisiones de contaminantes.

- Redes de transporte:

Para la aplicación de los modelos de asignación se requiere contar con los diferentes tipos de redes de transporte para la zona de estudio, que se definen teniendo en cuenta las características físicas y las clasificaciones de uso de cada vialidad, determinadas generalmente por las reglamentaciones de cada zona urbana en particular. De acuerdo con esta clasificación, podrán circular cierto tipo de vehículos en cada vialidad, por lo cual para la modelación se requerirán diferentes redes para asignar los flujos vehiculares, siendo las principales las siguientes:

- Red vial principal: representa las vías principales de la zona urbana donde de acuerdo con sus características físicas y de usos pueden circular todos los vehículos, con excepción de los vehículos de carga pesados. Debido a la complejidad de las redes urbanas, generalmente no se incluyen todas las calles del tejido urbano, sino solamente aquellas en donde existen flujos vehiculares importantes.
- Sub-red de transporte de carga: incluye aquellas vialidades que de acuerdo con su capacidad y diseño geométrico pueden circular los vehículos de carga pesados. En los arcos que conforman esta sub-red también pueden circular otros tipos de vehículos, de acuerdo con la normatividad de cada zona urbana.
- Sub-red complemento: para el proceso de asignación multi-vehículo se requiere definir un subconjunto de arcos de la red principal, sobre los cuales no pueden circular los vehículos de carga pesados, el cual se obtiene como la substracción del conjunto de arcos de la sub-red de carga de los que conforman la red principal.

Para cada uno de los arcos de todas las redes que sean definidas para el estudio, se requerirán como mínimo los siguientes atributos para realizar la asignación:

- Longitud del arco.
- Capacidad (vehículos/carril/hora).
- Función de costo.
- Velocidad a flujo libre en el arco.
- Tiempo de recorrido a flujo libre
- Parámetros calibrados.

- Demanda de transporte:

De acuerdo con los tipos de vehículos que se definan para el análisis del impacto de las políticas, se requerirá para cada uno de ellos la matriz origen-destino de viajes que represente la demanda de transporte para un período horario específico entre las ZAT (Zonas de Atracción del Tráfico) del área de estudio para el año base. Se requerirán tantas matrices como tipos de vehículos y períodos de análisis sean definidos para el estudio.

- Aforos por tipo de vehículo:

Para el proceso de asignación se requieren aforos por tipo de vehículo en ambas direcciones de flujo para el mayor número posible de arcos. Estos aforos deben ser realizados durante el mismo período de análisis del estudio (hora pico, hora valle, etc.). Los aforos vehiculares son requeridos para el proceso de validación del modelo de asignación.

- Factores de emisiones:

Para la obtención de las emisiones de contaminantes locales  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ , se requiere contar con los factores de emisiones específicos para cada zona urbana en estudio, y para cada tipo de vehículo. Los modelos mediante los cuales se obtienen los factores de emisiones dependen de datos que son particulares para cada zona urbana tales como: temperatura ambiente, características de los combustibles, velocidades de operación del vehículo, tecnología para el control de emisiones, altitud, entre otros, por tanto no es viable utilizar factores de emisión de otras áreas urbanas.

- Otro tipo de información:

Adicionalmente a la información técnica antes mencionada, es importante contar con información sobre las agremiaciones de transportistas de carga, la reglamentación y normatividad vigente para el transporte de carga en el área de estudio y, sobre los planes y políticas previstos que pueden afectar el transporte urbano de carga a corto y mediano plazo.

## **7.2 ETAPAS DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA**

Una vez seleccionado el grupo de políticas públicas o la política pública a analizar, y a partir de la información básica antes detallada, se proponen las siguientes etapas para la evaluación de las políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas.

### **7.2.1 Paso 1: Preparación de la Información Básica**

La información de oferta y demanda debe ser preparada y organizada para los procesos de modelación subsiguientes. Dado el volumen de información que se requiere, es de gran utilidad contar con paquetes computacionales para el manejo de bases de datos.

#### **7.2.1.1 Clasificación Vehicular**

Se requiere definir muy claramente la clasificación vehicular a utilizar en desarrollo del ejercicio de evaluación, dado que de este parámetro depende la información principal de entrada a los procesos de asignación de flujos vehiculares y de estimación de emisiones de contaminantes.

Para el estudio de caso de esta investigación, la clasificación vehicular se realizó en función de la capacidad de carga de los camiones en el área de estudio, tomando en cuenta las clasificaciones previas de los estudios de demanda y de las matrices origen-destino (O-D) existentes para la zona de estudio. Se deberá contar desde el inicio con tantas matrices O-D como categorías vehiculares sean definidas para la evaluación de las políticas.

Las matrices O-D para automóviles serán incluidas en todo el proceso, dado que para el tipo de zonas urbanas donde se aplica esta metodología, estos vehículos comparten la misma infraestructura vial con los vehículos de carga.

Si no se cuenta con una matriz O-D para los vehículos de transporte público de pasajeros, y dado que éstos tienen rutas fijas, para el proceso de asignación éstos pueden ser restados de la capacidad en los arcos por donde circulan.

### **7.2.1.2 Bases de Datos por Categoría y Propietario**

Una vez definidas las categorías vehiculares, se procede a clasificar la información de oferta de transporte de carga en tales categorías, obteniendo el total de unidades para cada clase.

Simultáneamente se generan las bases de datos para cada tipo de vehículo con la información sobre propietarios, agrupándolos por empresa o por propietario individual. Dado que el número de propietarios unitarios para el tipo de zonas de estudio donde se aplica esta metodología puede ser muy grande (representan los denominados hombres-camión), éstos pueden ser agrupados en un solo campo, siempre y cuando el número total sea incluido para el diseño del tamaño de la muestra para la recolección de información.

## **7.2.2 Paso 2: Definición de los Escenarios para Representar las Políticas a Evaluar**

La metodología propuesta requiere de toma de información para conocer las reacciones de los propietarios de vehículos de carga ante las políticas a evaluar. De estas reacciones dependerá la formulación de los escenarios de evaluación, por lo cual este segundo paso incluye varias etapas intermedias antes de precisar cada escenario. Una vez definidos los escenarios se deberán establecer los requerimientos de información de redes y matrices para cada uno de ellos para continuar hacia el siguiente paso de la modelación.

### **7.2.2.1 Realización de entrevistas a los propietarios de vehículos de carga**

Una de las actividades más relevantes dentro de esta propuesta metodológica es el conocimiento de las reacciones de los propietarios de vehículos de carga ante las políticas, pues son finalmente estos actores quienes decidirán qué hacer con sus vehículos ante las restricciones.

En el desarrollo de esta investigación, el contacto con los empresarios fue una de las etapas que más aportó información sobre la visión de éstos ante la problemática del transporte de carga, no obstante, se resalta la dificultad para obtener las entrevistas con los gerentes de las empresas seleccionadas en el muestreo. Se recomienda involucrar previamente a las agremiaciones de transportistas y de empresas del sector transporte de carga en el proceso de evaluación, ya que dentro de las funciones de estas agremiaciones está el conocer las decisiones y políticas públicas que afecten a sus agremiados, y este tipo de estudios técnicos les genera interés, lo cual facilita el contacto inicial con el sector, para posteriormente buscar involucrar a los gerentes de operaciones o de logística de las empresas de interés para la toma de información.

El procedimiento de las entrevistas se encuentra explicado ampliamente en el Capítulo 3, siendo las etapas principales las siguientes:

### **7.2.2.2 *Diseño del método de recolección de información***

De acuerdo con la revisión del estado del arte realizada para conocer cuáles métodos de recolección de información se están utilizando en investigaciones similares sobre impactos de políticas para el transporte de carga, la entrevista resulta ser la herramienta más aconsejable, existiendo variaciones sobre el método para realizarla: directa, telefónica o vía correo electrónico. Para el caso de la ZMVM, el método que mejor respuesta obtuvo fue la entrevista directa a los gerentes. Las entrevistas por correo electrónico (envío de los formularios) o vía telefónica no tuvieron aceptación por parte de las empresas.

El diseño del método de muestreo y de la recolección de la información se basa en las técnicas y etapas tradicionales para estos estudios, siendo las más importantes las siguientes:

### **7.2.2.3 *Definición de las variables de investigación***

Las variables de investigación están dadas por las políticas (variable dependiente) sobre las cuales se quiere conocer la respuesta operativa (variables independientes) de los transportistas. El éxito de las entrevistas y su posterior procesamiento radica en obtener los valores estimados de las variables independientes, que para este estudio en particular fueron definidas como proporciones de vehículos para cada respuesta operativa de los transportistas ante las restricciones.

### **7.2.2.4 *Diseño del formato de preguntas***

Una vez definidas las variables, se diseña un formulario básico con preguntas que involucren las variables directa o indirectamente en cada una de ellas. Durante la entrevista se pueden identificar otras variables o respuestas operativas ante las políticas no consideradas previamente así como información relevante para el estudio, lo cual depende de la habilidad del entrevistador, quien debe conocer ampliamente el tema, y no limitarse al cuestionario. Sin embargo, se debe tener cuidado en obtener respuestas claras y concisas en aquellas preguntas que fueron diseñadas para medir las variables de investigación, como por ejemplo, el porcentaje de la flota de vehículos pesados de la empresa entrevistada que cambiaría de ruta para evitar las restricciones o cuáles vialidades consideraría como alternas para sus rutas.

### **7.2.2.5 *Determinación del método de muestreo***

El método de muestreo depende de la información de la población de estudio, es decir, de las bases de datos de propietarios y tipos de vehículos creadas según se explicó en el numeral 7.2.1.2, así como de los recursos humanos y financieros con que se cuente para esta etapa del estudio. Para el caso particular de esta investigación, el método seleccionado fue la técnica de muestreo por conglomerados, junto con la estratificación, considerando las empresas o propietarios como las unidades primarias en la población ( $i$ ) y los vehículos por tamaño como unidades secundarias en la unidad primaria  $i$ . Para otras poblaciones de estudio diferentes a la ZMVM, se recomienda consultar previamente bibliografía sobre técnicas de muestreo a fin de seleccionar la técnica que más se adecue a la información disponible.

#### **7.2.2.6 *Procesamiento y obtención de resultados de la información de las entrevistas***

Una vez finalizada la etapa de entrevistas, se realiza su procesamiento estadístico para obtener los valores de las variables estimadas para la población de estudio. Este procesamiento depende de la técnica de muestreo seleccionada; que para esta investigación se encuentra detallado en el Anexo 1.

A partir de estas estimaciones, se obtienen los valores que serán la base para los escenarios de análisis. Como ejemplo, para la política de restricción a los vehículos de carga por ventanas de tiempo en los corredores de acceso a la ZMVM, los cambios operativos identificados para la flota de vehículos medianos y grandes y sus proporciones fueron los siguientes:

- 5.6% de los vehículos medianos y grandes cambiarían a vehículos de tamaño no restringido (menor a 3.5 ton.).
- 35.1% de los vehículos pesados restringidos cambiarían de horario de operación, con inicio de circulación en el período valle inmediatamente siguiente a la hora pico de la mañana.
- 51.8% de los vehículos medianos y grandes utilizarían centros de consolidación ubicados fuera de las zonas de prohibición, para cambiar sus vehículos a tamaños no restringidos.

Las entrevistas identificaron como otra opción, el obtener permisos ante la autoridad para no cumplir con la restricción dada la imposibilidad de modificar su tamaño (por no poder fragmentar su carga y por razones de cumplimiento de horario con los clientes). Esta alternativa no se incluyó en la modelación por ser considerada como una excepción.

#### **7.2.3 Paso 3: Definición de las Matrices para la Modelación Multi-Vehículo**

Una vez determinadas las proporciones de vehículos para cada opción operativa, se procede a obtener las matrices de viajes que se modificarán según la definición de cada escenario.

Para el análisis de esta investigación, los escenarios se agruparon de tal forma que el primer grupo representa las condiciones actuales tanto para el período pico como para el valle; el segundo grupo evalúa una respuesta operativa diferente en cada escenario; el tercer grupo evalúa el mejoramiento en la red vial y el cuarto grupo de escenarios combina todas las anteriores opciones en cada escenario.

El manejo dado a las matrices O-D que se explica a continuación, se aplica a los grupos de escenarios 2 y 3. El cuarto grupo requirió además una redistribución de viajes en la matriz de vehículos de carga, cuya metodología se describirá en el apartado 7.2.3.2.

##### **7.2.3.1 *Obtención de Matrices para Evaluar una Opción Operativa en Cada Escenario***

Para cada escenario se cuenta con las matrices base, una por cada tipo de vehículo. Para obtener la matriz de cada escenario que refleje la proporción del cambio analizado por tipo de vehículo, cada celda de la matriz base se afecta con un factor según la proporción de cada cambio operacional.

En la sección 5.3, se encuentra el procedimiento realizado para obtener las matrices del estudio de caso, apoyado en los esquemas de la Figura 5-4 a la Figura 5-6 en las cuales se representan los cambios y proporciones usados en cada escenario. Con la Ecuación 5-1 a la Ecuación 5-4 se obtienen las matrices por tipo de vehículo para cada escenario, cada ecuación contiene los factores que afectan cada matriz por tipo de vehículo de acuerdo con las proporciones obtenidas en el paso anterior.

En el estudio de caso, las matrices de automóviles y camiones de tamaño muy chico no tuvieron cambios en ningún escenario dado que estos vehículos no fueron afectados por las políticas y pueden circular por toda la red sin restricciones. Estas matrices junto con las obtenidas para los camiones chicos, medianos y grandes en cada escenario son entradas para el modelo de asignación multi-vehículo, como se explica en el esquema de la Figura 5-11.

### **7.2.3.2 Obtención de Matrices para los Escenarios que Combinan Diferentes Opciones Incluyendo Centro de Consolidación**

Para este grupo de escenarios en particular se utiliza una metodología diferente para la obtención de las matrices afectadas por los cambios operativos. Dado que se evalúan simultáneamente cambios de tamaño de vehículos, cambio de horarios de operación y cambio de recorridos, junto con uso de centros de consolidación, se considera que estos últimos generan una redistribución de viajes en el área de estudio, dado que los camiones pesados y chicos llegan de diferentes orígenes al centro de consolidación ubicado fuera de las zonas de restricción, convirtiendo este centro en un nuevo origen y destino para estos viajes de camiones, lo cual debe ser reflejado en la matriz de viajes.

Los anteriores cambios se realizan para un porcentaje de camiones pesados (de acuerdo con las proporciones obtenidas en las entrevistas realizadas, ver Figura 5-8 y Figura 5-10), y se incorporan a la matriz O-D base original, obteniendo una nueva matriz base (Tabla 5-2) para este grupo de escenarios. Para el estudio de caso, la explicación detallada de la obtención de esta matriz se encuentra en la sección 5.3.4.

### **7.2.4 Paso 4: Definición de las Redes para la Modelación Multi-Vehículo de cada Escenario**

Cada uno de los escenarios también requiere de la definición de varias redes de transporte para la modelación multi-vehículo. Como se explicó en el numeral 7.1, se requieren varios tipos de redes y sub-redes de acuerdo con el escenario analizado:

- Red vial principal: esta red representa las vialidades principales del área de estudio donde pueden circular libremente los automóviles y los vehículos de carga no restringidos.
- Sub-red de carga: dado que los camiones de carga pesados no pueden circular por todas las vías de la red principal, se debe crear un sub-grupo de arcos (incluyendo los conectores a centroides de carga) que contenga solamente las vialidades donde circulan los camiones pesados. Sobre esta sub-red también circulan los demás tipos de vehículos.
- Sub-red de carga con arcos restringidos: ésta sub-red excluye de la red anterior aquellos arcos que debido a la aplicación de la política de restricción ya no pueden ser utilizados por los camiones pesados.

- Red vial principal mejorada: algunos de los escenarios a analizar pueden incluir el mejoramiento en términos de capacidad de algunas vías o la inclusión de vialidades nuevas. Para representar estos cambios, se debe generar una nueva red vial principal y las sub-redes que sean necesarias, modificando la capacidad y los parámetros del modelo en aquellos arcos de los tramos mejorados. Para las nuevas vialidades, se crean los nuevos arcos con todos sus atributos y se conectan a la red original.

Es importante aclarar que las asignaciones se deben realizar sobre las mismas redes durante el proceso de evaluación de los grupos de escenarios, dado que la modificación de los arcos o de sus parámetros puede alterar los resultados de la evaluación y el proceso de análisis posterior, con excepción de aquellos escenarios que evalúen políticas de mejoramiento de vialidades o cambios en la infraestructura vial.

### 7.2.5 Paso 5: Estimación de los Factores de Emisiones

Los factores de emisión de los vehículos automotores se derivan a partir de modelos. En México el modelo *MOBILE-Mexico* se utiliza para estimar las emisiones de vehículos automotores, y en particular el Modelo *MOBILE-Mexico City* se utiliza para el área urbana de la ZMVM. La información base para los modelos de factores de emisión son los inventarios de emisiones de vehículos automotores que recopilan una gran variedad de datos que incluyen: kilómetros recorridos por el vehículo, estadísticas de consumo de combustible, velocidades de manejo, datos del registro vehicular y clases de vehículos, así como las características del combustible, por lo cual los factores de emisión que se estiman con estos modelos son para uso exclusivo en el área urbana de estudio.

El modelo *Mobile5.0-Mexico City*, permite estimar los factores de emisión de  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ , para diferentes tipos de vehículos en función de la velocidad, razón por la cual se eligió para esta investigación, ya que a partir de las velocidades estimadas por el modelo de asignación multi-vehículo en cada arco de la red para los diferentes tipos de vehículos fue posible estimar el factor de emisión  $FE_{p,v,c}$  (en gramos/kilómetro), del contaminante  $p$ , para cada tipo de vehículo  $c$  en función de la velocidad del arco  $v$ . (ver Ecuación 5-8).

En la Figura 4-3 a la Figura 4-5 se presentan las curvas de emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$  en función de la velocidad para los cinco tipos de vehículos definidos para esta investigación, obtenidas con base en los factores estimados para la ZMVM con el modelo *Mobile5.0-Mexico City*, los cuales se utilizan en el Paso 8 para las estimaciones de emisiones totales en los escenarios analizados.

### 7.2.6 Paso 6: Estimación de los flujos por tipo de vehículo

Una vez se ha definido la información de matrices, redes y sub-redes para los diferentes escenarios, se procede a realizar la modelación para estimar los volúmenes de tráfico en cada arco de la red. Dado que se requiere estimar los flujos por tipo de vehículo, de acuerdo con el marco teórico presentado en el Capítulo 4, se utiliza un modelo de asignación multi-vehículo, recordando que se requieren tantas matrices como tipo de vehículos se hayan definido, así como las diferentes sub-redes para representar las políticas a evaluar, y los aforos en los diferentes arcos para cada tipo de vehículo. En la Figura 5-11 se presenta el esquema del proceso de asignación utilizado para la modelación de los escenarios.

Los principales resultados que se obtienen con la modelación de cada escenario son los siguientes:

- Flujos vehiculares por tipo de vehículo y por sentido, en cada arco de la red.
- Kilómetros recorridos en cada arco de la red, por tipo de vehículo.
- Velocidad estimada en cada arco de la red.
- Relación volumen vehicular/capacidad para cada arco de la red, en cada sentido.

El volumen de información generado en cada proceso de asignación es muy grande debido a que los resultados se obtienen para cada arco de la red, y las redes analizadas con esta propuesta metodológica son muy extensas. Dado lo anterior se recomienda contar con paquete computacional para manejo de bases de datos, el cual permitirá obtener en forma más expedita y eficiente los indicadores de la evaluación que se explican a continuación.

### 7.2.7 Paso 7: Obtención de los Indicadores de Evaluación de Tráfico para cada Escenario

Con los resultados de la asignación multi-vehículo antes definidos, se procede a calcular los siguientes indicadores, que serán utilizados para la evaluación y comparación de escenarios:

- Total de kilómetros recorridos (TK) por todos los vehículos en toda la red: corresponde a la suma de los kilómetros recorridos por todos los tipos de vehículos ( $m$ ) en cada arco ( $i$ ) de la red, de acuerdo con la velocidad estimada ( $v$ ) en cada arco.
- Total de kilómetros recorridos por los camiones medianos y grandes en la sub-red de carga: se calcula en forma similar al anterior indicador, pero solo para los vehículos pesados.
- Tiempo de viaje (TV) en horas de todos los vehículos en la red: calculado en función de la velocidad estimada ( $v$  en km/hora) en cada arco ( $i$ ), para el flujo de todos los tipos de vehículos ( $m$ ) a partir de la longitud de cada arco ( $i$ ).
- Tiempo de viaje en horas, de los camiones medianos y grandes: se calcula de igual forma que el anterior indicador TV pero sólo para los tipos de vehículo mediano y grande.
- Factor de congestión  $\phi$ : es la relación entre los kilómetros con mejor flujo y los kilómetros con mayores demoras y congestión, calculado con la Ecuación 5-7.

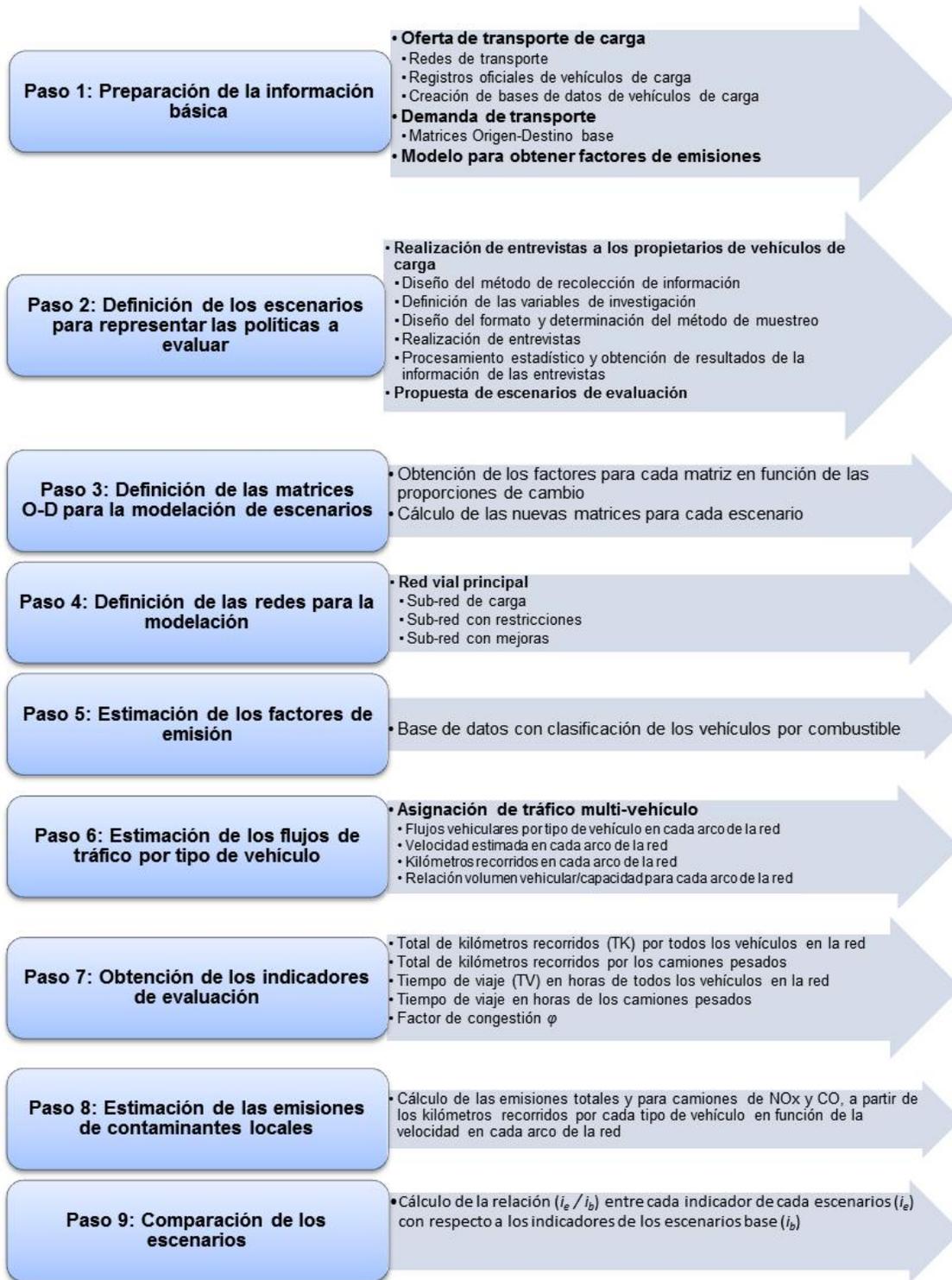
### 7.2.8 Paso 8: Estimación de los Indicadores de Emisiones de Contaminantes Locales NO<sub>x</sub> y CO

A partir de los resultados de la modelación multi-vehículo del paso anterior junto con los factores de emisión obtenidos con el modelo de emisiones en el Paso 5, se procede a calcular las emisiones de todos los vehículos en cada uno de los arcos de la red y también las emisiones para camiones pesados utilizando la Ecuación 5-8. Posteriormente se suman las emisiones de todos los arcos, obteniendo la estimación de NO<sub>x</sub> y CO para cada escenario, para todos los vehículos y para camiones pesados.

### **7.2.9 Paso 9: Comparación de Escenarios**

Para comparar los resultados de evaluación de los escenarios, se calcula la relación ( $i_e / i_b$ ) entre cada indicador de los diferentes escenarios ( $i_e$ ) con respecto a los indicadores de los escenarios base ( $i_b$ ). Se propone establecer una escala numérica y de colores de acuerdo con los valores obtenidos con las relaciones antes calculadas para facilitar la comparación entre escenarios.

En la Figura 7-1 se presenta el resumen de las etapas de la metodología antes descrita.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-1. Metodología para la Evaluación de Políticas Públicas Aplicadas a Vehículos de Carga en Zonas Urbanas**

## 8 CONCLUSIONES

En este documento de tesis se presenta el desarrollo de la propuesta metodológica, a partir de su aplicación a un estudio de caso en la Zona Metropolitana del Valle de México-ZMVM-, para la evaluación de políticas públicas aplicadas al transporte de carga en áreas urbanas con características similares a ésta.

Las conclusiones han sido divididas en tres partes, la primera, incluye aquéllas sobre los resultados de la evaluación de la política de restricción por ventanas de tiempo en la ZMVM, la segunda incluye las recomendaciones sobre la aplicación metodológica al estudio de caso en la ZMVM y la tercera, las conclusiones y recomendaciones sobre la metodología desarrollada.

### 8.1 CONCLUSIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA POLÍTICA DE VENTANAS DE TIEMPO A VEHÍCULOS DE CARGA EN LA ZMVM

La selección de la política a evaluar en la ZMVM se basó en la revisión del estado del arte sobre políticas aplicadas en otras áreas urbanas y que tuviesen aplicabilidad en la zona de estudio así como también que fueran susceptibles de evaluación mediante modelos de redes de asignación de tráfico. Adicionalmente de las reuniones con autoridades del sector, se identifica que dada la problemática de congestión sobre algunos corredores de acceso a la ZMVM en las horas pico, la política de restricción a los vehículos de carga por ventanas de tiempo en estos corredores tiene una alta probabilidad de ser puesta en marcha en el corto plazo.

Para la evaluación de la política antes mencionada se definieron cuatro grupos de escenarios, con un total de quince escenarios de evaluación basados en las respuestas dadas por los transportistas, las cuales permitieron definir los cambios operativos de los camiones pesados ante las eventuales prohibiciones y las proporciones de estos cambios. Las principales conclusiones de este proceso de evaluación son las siguientes:

Ante la prohibición a la circulación de los camiones de carga sobre los principales accesos a la ZMVM se obtienen impactos más favorables tanto en congestión como en emisiones de contaminantes en la red, si los transportistas ponen en marcha simultáneamente diferentes cambios operativos para los camiones pesados, lo cual además representa la realidad de mejor manera, es decir, la combinación de cambios en los recorridos de rutas y en los tamaños de vehículos, así como los cambios de horario de operación hacia la hora valle, generan mejores indicadores en cuanto a kilómetros recorridos y tiempos de viaje para camiones y en las emisiones de contaminantes (disminución de 38% en las emisiones de NO<sub>x</sub>, de 37% en emisiones de CO, 44% en kilómetros recorridos y 50% en los tiempos de viaje). Sin embargo, si se incorpora dentro de las opciones de cambios operativos la utilización de centros de consolidación en los accesos en donde sería factible su localización dada la existencia de espacios disponibles, se estiman indicadores menos favorables para los camiones pesados (emisiones de NO<sub>x</sub> y CO disminuyen en 34% y 32% respectivamente y los recorridos decrecen en 41%, respecto al escenario base).

Lo anterior se debe básicamente a que la operación de estos centros generaría una mayor concentración de flujo de camiones pesados (que entran al centro logístico), así como de camiones chicos (salen una vez se hace el cambio de tamaño de vehículo) en las vías de acceso a los centros y

en sus inmediaciones, incrementando la congestión en vías aledañas, y afectando negativamente el desempeño en toda la red, de acuerdo con los resultados mencionados.

En la mayor parte de los escenarios que evalúan el cambio de horario de un porcentaje de camiones pesados de la hora pico hacia la hora valle, se genera un empeoramiento de las condiciones de tráfico y ambientales en la red para el período valle. Se exceptúan los escenarios en donde además de este cambio de horario se incluye la política complementaria de mejoramiento de vialidades o la combinación de cambios operacionales (sin incluir centros de consolidación).

Dado lo anterior, se recomienda realizar la evaluación de las políticas no solamente para el período pico, en donde se presentan los flujos más altos de tráfico en las zonas urbanas, sino también en los períodos valle, dado que la afectación de los cambios operativos de los camiones de carga pueden afectar negativamente los flujos de tráfico y de emisiones de contaminantes para estos períodos de menor demanda de tráfico.

Al incluir adicionalmente en la evaluación de la política de restricción por ventanas de tiempo una política complementaria de mejoramiento de algunas vialidades dentro de la ZMVM, se obtienen mejoras en los indicadores (por ejemplo, para el escenario 4.2A que incluye el mejoramiento de vialidades, se presenta un incremento positivo entre 1% y 3% en todos los indicadores con respecto al escenario 4.1A que no tiene mejoras en la red). Así mismo, los resultados de la asignación multi-vehículo muestran que ante las mejoras en capacidad, se produce una redistribución de flujos de los camiones pesados (y otros vehículos) hacia estos nuevos corredores, pero también se observa que hay congestión en los puntos de incorporación y en las salidas de los corredores a la nueva red.

Lo anterior puede significar que la construcción de nuevas vialidades y el mejoramiento de la capacidad de algunas de las ya existentes puede ser una alternativa adecuada para los camiones pesados, ante la restricción por ventanas de tiempo en los accesos a la ZMVM, sin embargo, se recomienda complementar este análisis en futuras investigaciones con los posibles impactos en la distribución de flujos si se establece una cuota de cobro por uso de estas nuevas vialidades, dado que esto podría afectar la decisión de los transportistas sobre su utilización como vía alterna en sus recorridos dentro de la ZMVM. Lo anterior implicaría además, la realización de encuestas adicionales con técnicas de preferencias declaradas para poder identificar las tendencias de decisión de los transportistas ante esta política de cobro de cuotas.

El indicador de kilómetros recorridos por los camiones pesados en los escenarios evaluados, disminuye con respecto a los escenarios base, sin embargo, al considerar este indicador para todos los vehículos que circulan en la red, éste permanece sin cambios en todos los escenarios. Es decir, no hay un impacto significativo de las restricciones en los corredores de acceso a la ZMVM, para los vehículos pesados en la zona de estudio en cuanto a kilómetros recorridos por todos los vehículos en la red, aun cuando sí existe un impacto positivo para los camiones pesados.

Así como en evaluaciones similares para otros contextos (Nakamura *et al*, 2008), este resultado muestra la importancia de evaluar integralmente el impacto de las medidas de prohibición a los vehículos pesados en toda la red, ya que el considerar sólo una parte de los flujos o solo una parte de la red puede llevar a conclusiones o interpretaciones sesgadas con respecto al impacto real de las políticas.

En relación con los indicadores de tiempos y recorridos de viaje para los vehículos de carga, sería importante en futuras investigaciones analizar desde el punto de vista económico el impacto de las restricciones sobre los costos de operación en las flotas de vehículos de carga.

## **8.2 CONCLUSIONES SOBRE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS EN LA ZMVM**

Por las razones descritas al inicio de estas conclusiones, se seleccionó la política de restricción por ventanas de tiempo en la ZMVM para aplicar la metodología de evaluación desarrollada en esta investigación, sin embargo, la metodología propuesta así como la información recolectada para la ZMVM, puede ser aplicada para evaluar otras políticas tales como la definición de corredores de carga en zonas urbanas, análisis de zonas ambientales, análisis de cambio de tecnología de combustibles de vehículos, entre otras, todas ellas susceptibles de evaluación con modelos de redes y de factores de emisiones de contaminantes. Es claro que la información existente deberá adaptarse a los objetivos de la nueva evaluación, así como puede ser necesario realizar toma de información complementaria para la modelación de los escenarios que sean definidos.

Los escenarios planteados para la evaluación de la política de restricción por ventanas de tiempo en la ZMVM se basaron en las entrevistas realizadas a los empresarios del transporte de carga en la ZMVM. Sus respuestas fueron procesadas estadísticamente, obteniendo estimaciones realistas de los posibles cambios operativos. Lo anterior junto con la selección de las herramientas de modelación específicas para este tipo de análisis y calibradas para la zona de estudio, permitieron realizar estimaciones objetivas de los impactos en los flujos de tráfico y en las emisiones de contaminantes para esta zona en particular. Sin embargo, como en todo proceso de planeación integral, las estimaciones de la modelación son un soporte para la toma de decisiones y deben analizarse como tales.

La revisión del estado del arte en materia de políticas públicas aplicadas al transporte de carga en zonas urbanas permitió identificar múltiples medidas que se están utilizando en diferentes países para la mitigación de los impactos de los camiones de carga, sin embargo, su aplicabilidad en zonas con diferentes niveles de avance en planeación urbana y organización territorial, debe ser analizada previamente. Una medida exitosa en una zona urbana europea puede no ser aplicable a una ciudad de un país en desarrollo.

Para lo anterior se recomienda un proceso escalonado y con visión a largo plazo de planeación de las políticas y medidas para la mitigación de impactos del transporte urbano de carga en áreas urbanas como la ZMVM, involucrando a los transportistas como parte decisiva del proceso.

Las entrevistas realizadas a los transportistas de carga además de permitir identificar sus reacciones operativas ante las posibles políticas de restricción a los vehículos de carga, fue un instrumento muy importante para el conocimiento de la operación del transporte urbano de carga en la ZMVM y sobre las expectativas de este importante grupo de actores en la toma de decisiones.

Sería deseable en este tipo de procesos de evaluación contar con participación de todos los actores involucrados en la toma de decisiones sobre el tema de políticas de carga en las zonas urbanas, tanto autoridades como transportistas y los otros usuarios del sistema pueden hacer aportes para la solución de la problemática, lo cual retroalimenta el proceso de análisis, específicamente en la formulación de los escenarios de evaluación.

### **8.3 CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS APLICADAS AL TRANSPORTE DE CARGA EN ZONAS URBANAS**

Adicionalmente a la discusión realizada en el Capítulo 7 sobre cada etapa del proceso metodológico desarrollado en esta investigación, se incluyen las siguientes conclusiones y recomendaciones sobre la metodología de evaluación:

La metodología propuesta en esta investigación puede ser aplicada a zonas urbanas que cumplan con los siguientes supuestos:

- Grandes ciudades con sistemas complejos de tráfico cuyas vialidades sean compartidas por todo tipo de vehículos.
- Zonas urbanas donde no esté claramente definido el uso del suelo para las actividades relacionadas con el transporte de carga y por tanto se presente mezcla de usos en el territorio urbano.
- Zonas urbanas donde la infraestructura pública para actividades logísticas sea incipiente o inexistente.

La metodología propuesta se basa en la información de oferta y demanda del sistema de transporte de carga para la zona urbana de estudio, así como en información adicional recolectada de acuerdo con la política a evaluar y con los objetivos de la evaluación. Así mismo, los modelos para el análisis de redes y de emisiones de contaminantes requieren de su calibración y validación previas para ser utilizados en los análisis de cada zona de estudio. Dado lo anterior, la calidad y consistencia de la información de entrada y su correcto procesamiento para la evaluación de las políticas con la metodología propuesta es un factor fundamental para el éxito de su aplicación y la obtención de resultados confiables.

En la metodología desarrollada fueron definidos indicadores claros y comparables para analizar el impacto de las políticas bajo estudio y las reacciones a éstas, sobre el tráfico y las emisiones locales de contaminantes; la comparación de estos indicadores para diferentes políticas y escenarios de éstas permite apoyar el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, esta última etapa de la evaluación puede complementarse involucrando otros indicadores en función de las políticas que se requiera evaluar, así como técnicas de evaluación multicriterio.

## REFERENCIAS

Alarcón R., (2012), “Competitividad Logística Territorial. Caso de Estudio. Sistema Urbano-Regional en la Región Centro País”. Tesis de Doctorado en Urbanismo. Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 280-290.

Barceló J., (2010), “Fundamentals of Traffic Simulation”. N.Y. Ed. Springer. p.p. 17-22.

Best Urban Freight Solutions-BESTUFS.net, (2008), “Environmental Zones in European Cities: Accommodating the needs of passenger and freight transport in cities”, 32 pp., en <http://www.bestufs.net>. Fecha de consulta: 11-02-09.

Best Urban Freight Solutions-BESTUFS.net, (2007), “Guía de Buenas Prácticas sobre el Transporte Urbano de Mercancías”, 84 pp., en <http://www.bestufs.net>. Fecha de consulta: 11-02-09.

Best Urban Freight Solutions-BESTUFS.net, (2006), “Best Urban Solutions II. D5.2. Quantification of Urban Freight Transports Effects II”, pp. 1-10, en <http://www.bestufs.net>. Fecha de consulta: 11-02-09.

Best Urban Freight Solutions-BESTUFS.net, (2005), “Policy and Research Recommendations I. Urban Consolidation Centres, Last Mile Solutions”, 22 pp., en <http://www.bestufs.net>. Fecha de consulta: 11-02-09.

Buliung R., Kanaroglou P. (2008), “Estimating the contribution of commercial vehicle movement to mobile emissions in urban areas”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, volumen 44, número 2, marzo 2008, pp. 260-276.

Caliper Corporation (2010), “User’s Guide. TransCad, Transportation Planning Software Ver. 5.0R4”. 20 pp.

Comi A., Russo F. (2005), “Demand models for city logistics: a state of the art and a proposed integrated system”, *Memorias de la 4th. International Conference on City Logistics*, Malasia, pp. 91- 106.

Cooperación Ambiental de América del Norte-CCA-, (2011), “Un solo destino: la sustentabilidad, Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el transporte de carga en América del Norte”. CCA. Montreal, Canadá. 76 pp.

Cordeau J. F. et al, (2007), *Vehicle Routing*; en “Handbooks in Operations Research and Management Science”, Barnhart C., Laporte G., (editores), Elsevier Ltd, U.K., pp. 367-398.

Chen B.Y. , Lam W.H.K, Sumalee A., Shaob H. (2011), “An efficient solution algorithm for solving multi-class reliability-based traffic assignment problem”, *Mathematical and Computer Modeling* 54, 2011, pp. 1428-1439.

Eastern Research Group Inc. -E.R.G.-, (2003), “Mexico National Fuel Balance”, Apéndice A, 53 pp.

\_\_\_\_\_, (2003), “MOBILE6-Mexico documentation and user’s guide”, Sacramento. EE.UU. 26 pp.

Eastern Research Group Inc., Radian International, (2000), “MOBILE5-Mexico documentation and user’s guide”, Sacramento. EE.UU. 30 pp.

European Commission, (2008), “Internalization measures and policies for the external cost of transport” en “Internalization Measures and Policies for all external cost of Transport (IMPACT) – Deliverable 3”, pp. 12-21. en <http://ec.europa.eu/transport/strategies/consultations>. Fecha de consulta: 21-09-09.

Filippi F., Nuzzolo A., Comi A., Delle Site P., (2010), “Ex-ante assessment of urban freight transport policies”. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volumen 2, número 3, 2010, pp. 6332-6342.

Gobierno del Distrito Federal – GDF - (2010), “Programa Integral de Transporte y Vialidad 2007-2012”. *Gaceta Oficial No. 803Bis*. Marzo 22, 2010. Secretaría de Transportes y Vialidad, Gobierno del Distrito Federal.

\_\_\_\_\_, (2008a), “Agenda Ambiental del Distrito Federal. Programa Ambiental 2007-2012”. *Gaceta Oficial No. 273*. Febrero 13, 2008. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal.

\_\_\_\_\_, (2008b), “Aviso sobre la regulación del transporte de carga en el perímetro A del centro histórico de la Ciudad de México”. *Gaceta Oficial No. 359*. Junio 19, 2008. Secretaría de Vías y Transporte. Gobierno del Distrito Federal.

\_\_\_\_\_, (2009), “Aviso sobre el establecimiento del corredor de pasajeros Cero Emisiones -Eje central Lázaro Cárdenas”. *Gaceta Oficial Julio 20, 2009*. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, GDF.

GIZ -Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional- (2011), “Transporte Urbano de Carga para Ciudades en Desarrollo-Módulo 1g”. Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo, 57 pp. en <http://www.cleanairinstitute.org>. Fecha de consulta 05-05-11.

Granados F., (2003), “Identificación de los principales corredores de transporte de carga en la Zona Metropolitana del Valle de México”, tesis de maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 150 pp.

Guillen D., (2003), *The Economic of Noise*; en “Handbook of Transport and the Environment”, Hensher D., Button K., (editores), Elsevier Ltd, U.K., pp. 81-87.

Hensher D., Button K., (2003), Introduction; en “Handbook of Transport and the Environment”, Hensher D., Button K., (editores), Elsevier Ltd., U.K., pp. 1-6.

Hensher D.A., Golob T.F., (1999), “Searching for policy priorities in the formulation of a freight transport strategy: a canonical correlation analysis of freight industry attitudes”. *Transportation Research Part E*. pp. 241-267.

HolguínVeras J., Torres C.A., Xuegang B., (2011), “On the comparative performance of urban delivery vehicle classes”. *Transportmetrica*. pp. 1–24.

Holmen B., Niemeier D., (2003), Air Quality; en “Handbook of Transport and the Environment”, Hensher D., Button K., (editores), Elsevier Ltd, U.K., pp. 61-68.

Hunt J.D., Stefan K.J., (2007), “Tour-based microsimulation of urban commercial movements”. Transportation Research. Part B. Vol. 41. pp. 981–1013.

Janic M., (2007), “Modeling the full costs of an intermodal and road freight transport network”, Transportation Research Part D: Transport and Environment, volumen 12, número 1, enero 2007, pp. 33-44.

Khare M., Sharma P., (2002), “Modelling Urban Vehicle Emissions”, Wit Press, U.K., pp. 1-33.

Lenzen M., Dey C., Hamilton C., (2003), Climate Change; en “Handbook of Transport and the Environment”, Hensher D., Button K., (editores), Elsevier Ltd, U.K., pp. 37-60.

Lohr S. L., (1999), “Muestreo: diseño y análisis”. Thomson International Editores, México, pp. 1-50.

Londoño G., (2005), “Métodos de Asignación Dinámica de Tráfico”, Tesis Posgrado en Ingeniería. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 60-66.

Lozano A., Antún J., Granados F., Guzmán A., Hernández R., Alarcón R., Reyes E., Vargas F., Argumedo M., Romero E., Magallanes R., Álvarez L., Torres V., (2006a), “Proyecto de identificación de la oferta y demanda del transporte de carga en la ZMVM y análisis del marco legal en la materia”. En: Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México, Vol. I, Tomo 1, 231 pp., Tomo 2, 191 pp., Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Ambiental Metropolitana del Valle de México, México.

Lozano A., J. Antún, F. Granados, A. Guzmán, R. Hernández, R. Alarcón, E. Reyes, F. Vargas, M. Argumedo, E. Romero, et al., (2006b) “Oferta y demanda del transporte de carga en la Zona Metropolitana del Valle de México”. En: Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México, Vol. I, pp.1-232, Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Ambiental Metropolitana del Valle de México, México.

Lozano A., R. Magallanes, J.P. Antún, Y. Angulo, F. Granados, A. Zamarripa, E. Romero, A. Guzmán, G. Luyando (2006c) Proyecto de realización del estudio matriz origen-destino para el transporte de carga. In: Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México, Vol III, pp.1-161, Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Ambiental Metropolitana del Valle de México, México.

Lozano A., Granados F., Antún J., Magallanes R., Torres V., Romero E., Londoño G., Guzmán A., Vargas F., Luyando G., (2006d), “Proyecto de Corredores Metropolitanos de Transporte de Carga en la Zona Metropolitana del Valle de México”. En: Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México, Vol. IV, pp.1-348, Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Ambiental Metropolitana del Valle de México, México.

Lozano A., J. Antún, F. Granados, V. Torres, G. Londoño, A. Zamarripa. (2006e), “Multiple vehicle flow estimation, for determining freight corridors in Mexico City”. Proceedings of the Third International Workshop on Freight Transportation and Logistics (Odysseus 2006). Althea (España).

- Lozano A; Antún JP; Granados F; Torres V (2007) “Assessments of traffic and emissions impacts, for determining future infrastructure in a metropolitan street network: a real application in Mexico City”. Proceeding of the Sixth Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN IV), Phuket, Tailandia, Junio de 2007.
- Lyons L., Lozano A., Granados F., Guzmán A., Antún J.P. (2012), “Impact of the Recent Environmental Policies on the Freight Transportation in Mexico City”, *Procedia - Social and Behavioural Sciences* No. 39. Pp 437-449.
- Lyons L., (2007), “Planeamiento de Soportes Logísticos de Plataforma”, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Pp. 52.
- Marcotte P., Patriksson M., (2007) Traffic Equilibrium ; en “Handbooks in Operations Research and Management Science”, Lenstra J. K., Nemhauser G. L. (editores), Elsevier Ltd., U.K., pp. 623-647.
- Meyer, M.D., Miller, E.J., (2001), “Urban Transportation Planning”. 2a. Edición. McGraw-Hill Higher Education, pp 89-168.
- Nakamura Y., Taniguchi, E., Yamada T., Ando, N. A., (2008), “Macroscopic Traffic Simulator for evaluating Urban Transport Measures for Heavy Vehicles. En: Innovations in City Logistics. Taniguchi E., Thompson R., editors. Nova Science Publishers, Inc. New York. pp.185-196.
- Ogden K. W., (1992), “Urban Goods Movement. A guide to policy and planning”, Ashgate Publishing Company, Vermont. USA., 397 pp.
- Organization for Economic Co-operation and Development-OECD (2003), “Delivering the Goods. 21<sup>st</sup> Century Challenges to Urban Goods Transport”, OECD, Paris, 153 pp.
- Ortúzar, J. de D., Willumsen, L.G., (2008), “Modelos de Transporte”. PubliCan. España. pp. 333-545.
- Puckett S.M., Hensher D.A., (2008), “The role of attribute processing strategies in estimating the preferences of road freight stakeholders”, *Transportation Research, Part E*, vol 44, pp. 379–395.
- Quak H. Koster R., (2009). “Delivering Goods in Urban Areas: How to Deal with Urban Policy Restrictions and the Environment”. *Transportation Science* 43. Pp. 211 - 227.
- Quak H., De Koster M., (2007), “Exploring retailers’ sensitivity to local sustainability policies”, *Journal of Operations Management*, volumen 25, número 6, pp. 1103-1122.
- Quak H. and Koster R. (2006), “Relailer’s distribution and local time windows policies”. En: *Recent Advances in City Logistics*. Taniguchi E., Thompson R., editores. Elsevier. Amsterdam. Pp. 463-478.
- Quak H., (2006), “Distribution strategies under urban freight policy pressure”. En : *Memorias de Odysseus 2006*. 3rd. International Workshop on Freight Transportation and Logistics. Pp. 279-281.
- Radian International, (1997), “Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Vehículos Automotores. Volumen VI, Final” en: “Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México”, en: [http://www.epa.gov/ttn/catc/cica/abstr\\_e.html](http://www.epa.gov/ttn/catc/cica/abstr_e.html), 126 pp. Fecha de consulta: 02-06-09

Rothengatter W., (2003), Environmental Concepts-Physical and Economic; en “Handbook of Transport and the Environment”, Hensher D., Button K., (editores), Elsevier Ltd, U.K., pp. 9-30.

Sampieri et al. (2007), “Metodología de la Investigación. 4ª. Ed. Mc Graw-Hill Interamericana. México, pp 235-329.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2010), “Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio en la ZMVM-2008” en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones>. Fecha de consulta: 02-06-10.

\_\_\_\_\_, (2008), “Inventarios de Emisiones en México”, <http://www.semarnat.gob.mx/gestionambiental/calidaddelaire/Pages/InventarioNacionaldeEmisiones.aspx>. Fecha de consulta: 11-04-09.

\_\_\_\_\_, (2006), “Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999” en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones>. Fecha de consulta: 02-06-09.

Secretaría de Transporte y Comunicaciones, (2008), “NOM-012-SCT-2-2008”. Pp. 12-15.

Sheffi, Y., (1985), “Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods”. Capítulos 1, 3, 4 y 5. Massachusetts Institute of Technology. Prentice-Hall.

Taniguchi E., Noritake M., Yamada T., T. Izumitani, (1999), “Optimal size and location planning of public logistics terminals”, Transportation Research. Part E, Volumen 35, Pp. 207-222.

Taniguchi E., Thompson R.G., (2002), “Innovations in freight transport”, Wit Press, Southampton, 205 pp.

Transport for London, (2007), “London Freight Plan 2007. Sustainable Freight Distribution: a plan for London”, 108 pp., en <http://www.tfl.gov.uk>. Fecha de consulta: 27-01-09.

U.S. Environmental Protection Agency (2008), “MOBILE model, ver. 6.2”, en <http://www.epa.gov/OMS/mobile.htm>, E.P.A. home-transportation and air quality-modeling, testing and research-modeling and inventories-MOBILE model.

Yang H., Huang J.,(2004), “The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium problem”. Transportation Research, Parte B.15 pp.

#### **Referencias de Páginas en Internet:**

<http://www.epa.gov>

<http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/liquididos>.

[http://www.shell.com.mx/home/content/mex/innovation/alternative\\_energy/biofuels](http://www.shell.com.mx/home/content/mex/innovation/alternative_energy/biofuels).

## ANEXO 1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS ENTREVISTAS

Los resultados de las entrevistas se analizaron en términos de proporciones para luego hacer inferencias sobre la población total. Para ello, la variable dependiente  $y_i$  definida previamente a la toma de información tomará valores lógicos 0, para respuestas negativas y valor 1, para respuestas positivas de acuerdo con las entrevistas realizadas. Dado el compromiso de confidencialidad con las empresas y personas propietarias de los vehículos que colaboraron con las entrevistas, las fuentes de información aparecerán en el documento como  $E_n$ .

El muestreo se realizó en conglomerados como unidad primaria y los vehículos estratificados se consideran como unidad secundaria. Las fórmulas utilizadas en los cálculos presentados a continuación corresponden a las de muestreo estratificado, teniendo en cuenta que es considerado como un caso particular de conglomerado en una etapa (Lohr S. L., 1999).

Se presenta en este anexo en forma detallada el ejemplo de cálculo de la proporción estimada de las respuestas de los vehículos de estrato muy chico ( $h = 1$ ) para la primera política sobre reducción del impacto ambiental:  $y_{1,1}$ , establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a las zonas urbanas. El procedimiento descrito se aplicó en forma similar a las demás políticas.

Una vez explicado paso a paso el procedimiento de cálculo para este estrato, los resultados de su aplicación para los otros tres estratos y las demás políticas evaluadas se presentan al final de este anexo (Tabla 10).

### 1. EJEMPLO DE CÁLCULO PARA EL ESTRATO 1

En este ejemplo se explica la metodología de cálculo para inferir las proporciones totales de las respuestas de los vehículos del estrato “Muy chico”. Se analiza la primera variable de las políticas para la reducción del impacto ambiental que corresponde a la pregunta: *Qué harían los vehículos de su empresa ante el establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a las zonas urbanas?* De acuerdo con los entrevistados surgen 4 respuestas diferentes:

- $x_{1,1,1}$  = cambio de tamaño de vehículo
- $x_{1,1,2}$  = uso de centros de consolidación/estacionamientos para vehículos de carga
- $x_{1,1,3}$  = cambio de horario de distribución
- $x_{1,1,4}$  = obtención de permisos ante la autoridad

- **Paso 1: Tabulación de las respuestas.**

Las respuestas de los entrevistados se tabularon según se muestra en la Tabla 1. Las respuestas no son excluyentes, un vehículo puede optar por una o más de las alternativas. Si los vehículos optan por el cambio de tamaño de vehículo o por el cambio de horarios de distribución, por ejemplo, aparecerá 1 en las filas correspondientes, y en caso negativo aparecerá 0.

**Tabla 1 Tabulación de las respuestas. Vehículos Estrato 1, Muy Chico**

Variable Dependiente	Respuestas						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
$x_{1,1,1}$ = cambio de tamaño de vehículo	0	0	1	1	1	0	0
$x_{1,1,2}$ = centros de consolidación/estacionamientos para vehículos de carga	0	0	1	1	1	1	0
$x_{1,1,3}$ = cambio de horario de distribución	1	1	1	0	1	0	1
$x_{1,1,4}$ = obtención de permisos ante la autoridad	1	1	0	0	0	0	0

$y_1$  = políticas para la reducción del impacto ambiental

$y_{1,1}$  = Establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a las zonas urbanas

Fuente: Elaboración propia

- **Paso 2: Cálculo de la proporción para el estrato 1.**

Los valores 0 y 1 de las respuestas anteriores se multiplicaron por el número de vehículos de tamaño muy chico de cada una de las empresas o personas entrevistadas (conglomerados), obteniendo el número de unidades de la muestra del estrato 1 ( $n_1$ ). Con este valor se calculan las proporciones de respuestas de los vehículos del estrato “muy chico” con respecto al total de vehículos de la muestra. Para la primera opción de cambio de vehículo, por ser vehículos muy chicos, no existe la opción de cambio, por tanto aparece la fila en ceros:

**Tabla 2 Proporción de vehículos de la muestra del estrato 1 con respuesta afirmativa**

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	$\Sigma$	% respecto a $n_1$
<b>Total vehículos en la muestra tamaño muy chico</b>	<b>145</b>	<b>637</b>	<b>3,013</b>	<b>2,755</b>	<b>216</b>	<b>83</b>	<b>37</b>	<b><math>n_1 = 6,886</math></b>	<b>100.0%</b>
$x_{1,1,1}$ = cambio de tamaño de vehículo	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
$x_{1,1,2}$ = uso de centros de consolidación	0	0	3,013	2,755	216	83	0	6,067	88.1%
$x_{1,1,3}$ = cambio de horario de distribución	145	637	3,013	0	216	0	37	4,048	58.8%
$x_{1,1,4}$ = obtención de permisos ante la autoridad	145	637	0	0	0	0	0	782	11.4%

Fuente: Elaboración propia

- **Paso 3: Cálculo del error estándar (EE)**

Con la Ecuación 1 se calculó el valor del error estándar de la proporción estimada para los resultados del estrato 1, es decir, el primer valor de la sumatoria de la Ecuación 1. Los otros sumandos ( $n = 2, 3, 4$ ) se calculan de igual forma para cada estrato y al final de este anexo se presenta el resultado de aplicar la raíz cuadrada a la sumatoria total:

$$EE(\hat{p}_{est}) = \sqrt{\sum_{h=1}^n \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) \times \left(\frac{N_h}{N}\right)^2 \times \left(\frac{\hat{p}_h(1-\hat{p}_h)}{n_h-1}\right)}$$

### Ecuación 1

(Lohr S. L., 1999)

donde,

$EE(\hat{p})$  = error estándar de la proporción estimada

$N_h$  = tamaño de la población del estrato  $h$  (para este ejemplo  $h=1$ )

$n_h$  = tamaño de la muestra del estrato  $h$

$N$  = tamaño de la población total

$p_{h,j}$  = proporción de la población del estrato  $h$  con respuesta afirmativa a la pregunta  $j$

$(1 - p_{h,j})$  = proporción de la población del estrato  $h$  con respuesta negativa a la pregunta  $j$

Los valores de  $N$ ,  $n_h$  y  $N_h$  para el estrato 1 son:

$n_h$  = tamaño de la muestra del estrato 1 = 6,886 vehículos

$N_h$  = tamaño de la población del estrato 1 = 44,704 vehículos

$N$  = tamaño de la población total = 93,555 vehículos

Obteniendo:

**Tabla 3 Cálculo del error estándar para la proporción estimada del estrato 1**

Variable	Proporción Estimada Estrato 1 ( $\hat{p}_1$ )	( $1 - \hat{p}_1$ )	Error Estándar $EE_1$
$x_{1,1,1}$ = cambio de tamaño de vehículo	0.000	1.000	n.a.
$x_{1,1,2}$ = centros de consolidación/estacionamientos	0.881	0.119	2.940E-06
$x_{1,1,3}$ = cambio de horario de distribución	0.588	0.412	6.80E-06
$x_{1,1,4}$ = obtención de permisos ante la autoridad	0.114	0.886	2.82E-06

Fuente: Elaboración propia

- **Paso 4: Cálculo de la proporción estimada para el total de la población  $N$ :**

Con los valores de la proporción estimada en el paso 2 para cada respuesta en cada estrato, se procede a calcular la proporción estimada para la población total utilizando la Ecuación 2. En este ejemplo se presentan solo los resultados de las variables  $x_{1,1,j}$  para el estrato 1, los cuales se sumarán posteriormente a los resultados de los estratos 2, 3 y 4 para obtener finalmente con la sumatoria planteada en la Ecuación 2, la proporción estimada para la población total:

$$\hat{p}_{est} = \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{N} \hat{p}_h$$

### Ecuación 2

(Lohr S. L., 1999)

Donde,

$\hat{p}_{est}$  = proporción estimada para la población total (para este ejemplo, solo se estima la población del estrato  $h=1$ )

$N_h$  = tamaño de la población del estrato  $h$

$N$  = tamaño de la población total

$\hat{p}_h$  = proporción de la población del estrato  $h$

Los valores de  $N_h$  para el estrato 1 y  $N$  para la población total son:

$N_h$  = tamaño de la población del estrato 1 = 44,704 vehículos

$N$  = tamaño de la población total = 93,555 vehículos

Obteniendo,

**Tabla 4 Proporción estimada del total de vehículos del estrato 1**

Variables	$\hat{p}_{est}$	%
$x_{1,1,1}$ = cambio de tamaño de vehículo	n.a.	
$x_{1,1,2}$ = centros de consolidación/estacionamientos	0.421	42.1
$x_{1,1,3}$ = cambio de horario de distribución	0.281	28.1
$x_{1,1,4}$ = obtención de permisos ante la autoridad	0.054	5.4

Fuente: Elaboración propia

- **Paso 5: Interpretación de resultados:**

Los resultados obtenidos hasta este punto corresponden a las proporciones (con respecto a la muestra de vehículos del estrato 1) de vehículos de tamaño muy chico que respondieron afirmativamente a la opción operativa. Para obtener la proporción con respecto a la totalidad de

vehículos, se suman las proporciones obtenidas por respuesta para cada estrato, lo cual se presenta en la Tabla 10.

Para esta primera política sobre la reducción del impacto ambiental, la lectura de estos resultados parciales es la siguiente:

- El 42.1% de los vehículos de tamaño muy chico en la muestra seleccionada utilizarían centros de consolidación de carga o estacionamientos para vehículos de carga en la zona urbana ante el establecimiento de normas de horario que restringieran el acceso de vehículos de carga a las zonas urbanas.
- El 28.1% de los vehículos muy chicos en la muestra seleccionada cambiarían los horarios de distribución debido a la restricción de acceso.
- 5.4% de los vehículos muy chicos en la muestra seleccionada optarían por solicitar permisos ante la autoridad para circular durante el horario de restricción.

## **2. RESULTADOS PARA LOS ESTRATOS DE VEHICULOS MUY CHICO, CHICO, MEDIANO Y GRANDE**

De acuerdo con la metodología explicada, se realizaron los cálculos para todas las variables definidas para el estudio, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5 Resultados para el estrato MUY CHICO

Variable Dependiente	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Σ	%	Proporción Estimada Estrato I (p <sup>^</sup> )	(1-p <sup>^</sup> )	Error Estándar EE	EE%	$\hat{p}_{est} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i p_i}{N}$	$\hat{p}_{est} \%$
<b>Total vehículos muestra tamaño muy chico</b>								145	637	3,013	2,755	216	83	37	6,886	100						
<i>n<sub>h</sub></i> = tamaño de la muestra del estrato muy chico = 6,886 vehículos <i>N<sub>h</sub></i> = tamaño de la población del estrato muy chico = 44,704 vehículos <i>N</i> = tamaño de la población total = 93,555 vehículos																						
<i>Y<sub>1</sub></i> = políticas para la reducción del impacto ambiental																						
<i>y<sub>1,1</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas																						
<i>x<sub>1,1,1</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a									
<i>x<sub>1,1,2</sub></i> = centros de consolidación/ estacionamientos para vehículos de carga	0	0	1	1	1	1	0	0	0	3,013	2,755	216	83	0	6,067	88.1%	0.881	0.119	2.940E-06	0.0003%	0.421	<b>42.1</b>
<i>x<sub>1,1,3</sub></i> = cambio de horario de distribución	1	1	1	0	1	0	1	145	637	3,013	0	216	0	37	4,048	58.8	0.588	0.412	6.797E-06	0.0007%	0.281	<b>28.1</b>
<i>x<sub>1,1,4</sub></i> = obtención de permisos ante la autoridad	1	1	0	0	0	0	0	145	637	0	0	0	0	0	782	11.4	0.114	0.886	2.824E-06	0.0003%	0.054	<b>5.4</b>
<i>y<sub>1,2</sub></i> = establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas																						
<i>x<sub>1,2,1</sub></i> = cambio de horarios de distribución	1	1	1	1	1	0	1	145	637	3,013	2,755	216	0	37	6,803	98.8	0.988	0.012	3.341E-07	0.0000%	0.472	<b>47.2</b>
<i>x<sub>1,2,2</sub></i> = centros de consolidación	0	0	1	0	1	1	0	0	0	3,013	0	216	83	0	3,312	48.1	0.481	0.519	7.004E-06	0.0007%	0.230	<b>23.0</b>
<i>y<sub>1,3</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas junto con ventanas de tiempo definidas por los clientes																						
<i>x<sub>1,3,1</sub></i> = cambio de recorridos	0	1	1	1	1	1	1	0	637	3013	2,755	216	83	37	6,741	97.9	0.979	0.021	5.783E-07	0.0001%	0.468	<b>46.8</b>
<i>x<sub>1,3,2</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a									
<i>x<sub>1,3,3</sub></i> = centros de consolidación	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	216	83	0	299	4.3	0.043	0.957	1.165E-06	0.0001%	0.021	<b>2.1</b>
<i>x<sub>1,3,4</sub></i> = cambio de horario de distribución	1	1	1	1	1	0	1	145	637	3013	2,755	216	0	37	6,803	98.8	0.988	0.012	3.341E-07	0.0000%	0.472	<b>47.2</b>
<i>y<sub>1,4</sub></i> = establecimiento de zonas ambientales (restricción de pesos y de tipos de vehículos)																						
<i>x<sub>1,4,1</sub></i> = cambio de flota vehicular	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a									
<i>x<sub>1,4,2</sub></i> = centros de consolidación	0	0	1	0	1	1	0	0	0	3,013	0	216	83	0	3,312	48.1	0.481	0.519	7.004E-06	0.0007%	0.230	<b>23.0</b>
<i>x<sub>1,4,3</sub></i> = establecer más rutas/ rutas en diableros o a pié	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2,755	0	0	37	2,792	40.5	0.405	0.595	6.763E-06	0.0007%	0.194	<b>19.4</b>
<i>x<sub>1,4,4</sub></i> = búsqueda de mercados alternativos	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	37	37	0.5	0.005	0.995	1.499E-07	0.0000%	0.003	<b>0.3</b>

Variable Dependiente	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	$\Sigma$	%	Proporción Estimada Estrato 1 ( $\hat{p}$ )	(1-p $\hat{}$ )	Error Estándar EE	EE%	$\hat{p}_{est}$ $\hat{p} = \frac{\sum N_i \hat{p}_i}{N}$	$\hat{p}_{est}$ %
<b><i>y<sub>2</sub> = políticas para hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos, menor número de viajes/día)</i></b>																						
<b><i>y<sub>2,1</sub> = establecer corredores de carga sugeridos en zonas urbanas</i></b>																						
<i>x<sub>2,1,1</sub></i> = aumento de tamaño de vehículo	0	0	1		1	0	0	0	0	3,013	0	216	0	0	3,229	46.9	0.469	0.531	6.987E-06	0.0007%	0.224	<b>22.4</b>
<i>x<sub>2,1,2</sub></i> = cambio de rutas de distribución	1	1	1	1	1	1	1	145	637	3,013	2,755	216	83	37	6,886	100	1.000	0	0.000E+00	0.0000%	0.478	<b>47.8</b>
<b><i>y<sub>2,2</sub> = cobro de cuotas por uso de vías</i></b>																						
<i>x<sub>2,2,1</sub></i> = cambio de rutas de distribución	0	1	0	1	1	1	1	0	637	0	2,755	216	83	37	3,728	54.1	0.541	0.459	6.966E-06	0.0007%	0.259	<b>25.9</b>
<i>x<sub>2,2,2</sub></i> = establecer centros de consolidación dentro de la zona urbana	0	0	1	0	1	1	0	0	0	3,013	0	216	83	0	3,312	48.1	0.481	0.519	7.004E-06	0.0007%	0.230	<b>23.0</b>
<i>x<sub>2,2,3</sub></i> = pagar y utilizar los corredores	1	0	1	0	1	0	1	145	0	3,013	0	216	0	37	3,411	49.5	0.495	0.505	7.013E-06	0.0007%	0.237	<b>23.7</b>
<b><i>y<sub>3</sub> = políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales</i></b>																						
<b><i>y<sub>3,1</sub> = uso de combustibles alternativos</i></b>																						
<i>x<sub>3,1,1</sub></i> = cambio de flota vehicular con otros combustibles	1	1	0	1	1	0	1	145	637	0	2,755	216	0	37	3,790	55.0	0.550	0.450	6.942E-06	0.0007%	0.263	<b>26.3</b>
<b><i>y<sub>3,2</sub> = modernización de la flota vehicular</i></b>																						
<i>x<sub>3,2,1</sub></i> = modernización de flota vehicular	0	1	1	1	1	1	1	0	637	3,013	2,755	216	83	37	6,741	97.9	0.979	0.021	5.783E-07	0.0001%	0.468	<b>46.8</b>

n.a. No Aplica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Resultados para el estrato CHICO

Variable Dependiente	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Σ	%	Proporción Estimada Estrato 1 ( $\hat{p}$ )	(1- $\hat{p}$ )	Error Estándar EE	EE%	$\hat{p}_{est}$	$\hat{p}_{est}$ %
<b>Total vehículos muestra tamaño muy chico</b>								128	78	1,058	1,886	359	259	148	3,916	100						
<i>n<sub>h</sub></i> = tamaño de la muestra del estrato chico = 3,916 vehículos																						
<i>N<sub>h</sub></i> = tamaño de la población del estrato chico = 21,804 vehículos																						
<i>N</i> = tamaño de la población total = 93,555 vehículos																						
<i>y<sub>1</sub></i> = políticas para la reducción del impacto ambiental																						
<i>y<sub>1,1</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas																						
<i>x<sub>1,1,1</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a									
<i>x<sub>1,1,2</sub></i> = centros de consolidación/ estacionamientos para vehículos de carga	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1,058	1,886	359	259	0	3,562	91.0%	0.910	0.090	9.359E-07	0.0001%	0.212	<b>21.2</b>
<i>x<sub>1,1,3</sub></i> = cambio de horario de distribución	1	1	1	0	1	0	1	128	78	1,058	0	359	0	148	1,771	45.2	0.452	0.548	2.820E-06	0.0003%	0.105	<b>10.5</b>
<i>x<sub>1,1,4</sub></i> = obtención de permisos ante la autoridad	1	1	0	0	0	0	0	128	78	0	0	0	0	0	206	5.3	0.053	0.947	5.673E-07	0.0001%	0.012	<b>1.2</b>
<i>y<sub>1,2</sub></i> = establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas																						
<i>x<sub>1,2,1</sub></i> = cambio de horarios de distribución	1	1	1	1	1	0	1	128	78	1,058	1,886	359	0	148	3,657	93.4	0.934	0.066	7.030E-07	0.0001%	0.218	<b>21.8</b>
<i>x<sub>1,2,2</sub></i> = centros de consolidación	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1,058	0	359	259	0	1,676	42.8	0.428	0.572	2.787E-06	0.0003%	0.100	<b>10.0</b>
<i>y<sub>1,3</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas junto con ventanas de tiempo definidas por los clientes																						
<i>x<sub>1,3,1</sub></i> = cambio de recorridos	0	1	1	1	1	1	1	0	78	1,058	1,886	359	259	148	3,788	96.7	0.967	0.033	3.599E-07	0.0000%	0.225	<b>22.5</b>
<i>x<sub>1,3,2</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a									
<i>x<sub>1,3,3</sub></i> = centros de consolidación	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	359	259	0	618	15.8	0.158	0.842	1.513E-06	0.0002%	0.037	<b>3.7</b>
<i>x<sub>1,3,4</sub></i> = cambio de horario de distribución	1	1	1	1	1	0	1	128	78	1,058	1,886	359	0	148	3,657	93.4	0.934	0.066	7.030E-07	0.0001%	0.218	<b>21.8</b>
<i>y<sub>1,4</sub></i> = establecimiento de zonas ambientales (restricción de pesos y de tipos de vehículos)																						
<i>x<sub>1,4,1</sub></i> = cambio de flota vehicular	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a									
<i>x<sub>1,4,2</sub></i> = centros de consolidación	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1,058	0	359	259	0	1,676	42.8	0.428	0.572	2.787E-06	0.0003%	0.100	<b>10.0</b>
<i>x<sub>1,4,3</sub></i> = establecer más rutas/ rutas en diableros o a pié	0			1		0	1	0	0	0	1,886	0	0	148	2,034	51.9	0.519	0.481	2.841E-06	0.0003%	0.121	<b>12.1</b>

Variable Dependiente	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Σ	%	Proporción Estimada Estrato 1 ( $\hat{p}$ )	(1- $\hat{p}$ )	Error Estándar EE	EE%	$\hat{p} \pm \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{N} \hat{p}_h$	$\hat{p}_{est}$ %
$x_{1,4,4}$ = búsqueda de mercados alternativos	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	148	148	3.8	0.038	0.962	4.139E-07	0.0000%	0.009	<b>0.9</b>
<i>y<sub>2</sub> = políticas para hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos, menor número de viajes/día)</i>																						
<i>y<sub>2,1</sub> = establecer corredores de carga sugeridos en zonas urbanas</i>																						
$x_{2,1,1}$ = aumento del tamaño de vehículo	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1,058	0	359	0	0	1,417	36.2	0.362	0.638	2.628E-06	0.0003%	0.084	<b>8.4</b>
$x_{2,1,2}$ = cambio de rutas de distribución	1	1	1	1	1	1	1	128	78	1,058	1,886	359	259	148	3,916	100	1.000	0	0.000E+00	0.0000%	0.233	<b>23.3</b>
<i>y<sub>2,2</sub> = cobro de cuotas por uso de vías</i>																						
$x_{2,2,1}$ = cambio de rutas de distribución	0	1	0	1	1	1	1	0	78	0	1,886	359	259	148	2,730	69.7	0.697	0.303	2.403E-06	0.0002%	0.162	<b>16.2</b>
$x_{2,2,2}$ = establecer centros de consolidación dentro de la zona urbana	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1,058	0	359	259	0	1,676	42.8	0.428	0.572	2.787E-06	0.0003%	0.100	<b>10.0</b>
$x_{2,2,3}$ = pagar y utilizar los corredores	1	0	1	0	1	0	1	128	0	1,058	0	359	0	148	1,693	43.2	0.432	0.568	2.793E-06	0.0003%	0.101	<b>10.1</b>
<i>y<sub>3</sub> = políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales</i>																						
<i>y<sub>3,1</sub> = uso de combustibles alternativos</i>																						
$x_{3,1,1}$ = cambio de flota vehicular con otros combustibles	1	1	0	1	1	0	1	128	78	0	1,886	359	0	148	2,599	66.4	0.664	0.336	2.541E-06	0.0003%	0.155	<b>15.5</b>
<i>y<sub>3,2</sub> = modernización de la flota vehicular</i>																						
$x_{3,2,1}$ = modernización de flota vehicular	0	1	1	1	1	1	1	0	78	1,058	1,886	359	259	148	3,788	96.7	0.967	0.033	3.599E-07	0.00004%	0.225	<b>22.5</b>

n.a. No Aplica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7 Resultados para el estrato MEDIANO

Variable Dependiente	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Σ	%	Proporción Estimada Estrato 1 (p̂)	(1-p̂)	Error Estándar EE	EE%	p̂ <sub>est</sub>	p̂ <sub>est</sub> %
<b>Total vehículos muestra tamaño muy chico</b>								123	8	86	19	4	291	222	753	100						$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i p_i}{N}$
<i>n<sub>h</sub></i> = tamaño de la muestra del estrato mediano = 753 vehículos <i>N<sub>h</sub></i> = tamaño de la población del estrato mediano = 17,298 vehículos <i>N</i> = tamaño de la población total = 93,555 vehículos																						
<i>y<sub>1</sub></i> = políticas para la reducción del impacto ambiental																						
<i>y<sub>1,1</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas																						
<i>x<sub>1,1,1</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	0	0	1	1	1	0	0	0	0	86	19	4	0	0	109	14.5	0.145	0.855	5.383E-06	0.0005%	0.027	<b>2.7</b>
<i>x<sub>1,1,2</sub></i> = centros de consolidación/estacionamientos para vehículos de carga	0	0	1	1	1	1	0	0	0	86	19	4	291	0	400	53.1	0.531	0.469	1.083E-05	0.0011%	0.098	<b>9.8</b>
<i>x<sub>1,1,3</sub></i> = cambio de horario de distribución	1	1	1	0	1	0	1	123	8	86	0	4	0	222	443	58.8	0.588	0.412	1.053E-05	0.0011%	0.109	<b>10.9</b>
<i>x<sub>1,1,4</sub></i> = obtención de permisos ante la autoridad	1	1	0	0	0	0	0	123	8	0	0	0	0	0	131	17.4	0.174	0.826	6.249E-06	0.0006%	0.032	<b>3.2</b>
<i>y<sub>1,2</sub></i> = establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas																						
<i>x<sub>1,2,1</sub></i> = cambio de horarios de distribución	1	1	1	1	1	0	1	123	8	86	19	4	0	222	462	61.4	0.614	0.386	1.031E-05	0.0010%	0.113	<b>11.3</b>
<i>x<sub>1,2,2</sub></i> = centros de consolidación	0	0	1	0	1	1	0	0	0	86	0	4	291	0	381	50.6	0.506	0.494	1.087E-05	0.0011%	0.094	<b>9.4</b>
<i>y<sub>1,3</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas junto con ventanas de tiempo definidas por los clientes																						
<i>x<sub>1,3,1</sub></i> = cambio de recorridos	0	1	1	1	1	1	1	0	8	86	19	4	291	222	630	83.7	0.837	0.163	5.942E-06	0.0006%	0.155	<b>15.5</b>
<i>x<sub>1,3,2</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	0	0	1	0	1	0	1	0	0	86	0	4	0	222	312	41.4	0.414	0.586	1.055E-05	0.0011%	0.077	<b>7.7</b>
<i>x<sub>1,3,3</sub></i> = centros de consolidación	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	4	291	0	295	39.2	0.392	0.608	1.036E-05	0.0010%	0.072	<b>7.2</b>
<i>x<sub>1,3,4</sub></i> = cambio de horario de distribución	1	1	1	1	1	0	1	123	8	86	19	4	0	222	462	61.4	0.614	0.386	1.031E-05	0.0010%	0.113	<b>11.3</b>
<i>y<sub>1,4</sub></i> = establecimiento de zonas ambientales (restricción de pesos y de tipos de vehículos)																						
<i>x<sub>1,4,1</sub></i> = cambio de flota vehicular	0	1	1	1	1	1	1	0	8	86	19	4	291	222	630	83.7	0.837	0.163	5.942E-06	0.0006%	0.155	<b>15.5</b>
<i>x<sub>1,4,2</sub></i> = centros de consolidación	0	0	1	0	1	1	0	0	0	86	0	4	291	0	381	50.6	0.506	0.494	1.087E-05	0.0011%	0.094	<b>9.4</b>
<i>x<sub>1,4,3</sub></i> = establecer más rutas/ rutas en diábolos o a pié	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	19	0	0	222	241	32.0	0.320	0.680	9.463E-06	0.0009%	0.059	<b>5.9</b>
<i>x<sub>1,4,4</sub></i> = búsqueda de mercados alternativos	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	222	222	29.5	0.295	0.705	9.040E-06	0.0009%	0.055	<b>5.5</b>

Variable Dependiente	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Σ	%	Proporción Estimada Estrato 1 (p <sup>^</sup> )	(1- p <sup>^</sup> )	Error Estándar EE	EE%	p <sup>^</sup> <sub>est</sub>	p <sup>^</sup> <sub>est</sub> %
<b><i>y<sub>2</sub> = políticas para hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos, menor número de viajes/día)</i></b>																						
<b><i>y<sub>2,1</sub> = establecer corredores de carga sugeridos en zonas urbanas</i></b>																						
<i>x<sub>2,1,1</sub></i> = aumento de tamaño del vehículo	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a															
<i>x<sub>2,1,2</sub></i> = cambio de rutas de distribución	1	1	1	1	1	1	1	123	8	86	19	4	291	222	753	100	1.000	0.000	0.000E+00	0.0000%	0.185	<b>18.5</b>
<b><i>y<sub>2,2</sub> = cobro de cuotas por uso de vías</i></b>																						
<i>x<sub>2,2,1</sub></i> = cambio de rutas de distribución	0	1	0	1	1	1	1	0	8	0	19	4	291	222	544	72.2	0.722	0.278	8.719E-06	0.0009%	0.134	<b>13.4</b>
<i>x<sub>2,2,2</sub></i> = establecer centros de consolidación dentro de la zona urbana	0	0	1	0	1	1	0	0	0	86	0	4	291	0	381	50.6	0.506	0.494	1.087E-05	0.0011%	0.094	<b>9.4</b>
<i>x<sub>2,2,3</sub></i> = pagar y utilizar los corredores	1	0	1	0	1	0	1	123	0	86	0	4	0	222	435	57.8	0.578	0.422	1.061E-05	0.0011%	0.107	<b>10.7</b>
<b><i>y<sub>3</sub> = políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales</i></b>																						
<b><i>y<sub>3,1</sub> = uso de combustibles alternativos</i></b>																						
<i>x<sub>3,1,1</sub></i> = cambio de flota vehicular con otros combustibles	1	1	0	1	1	0	1	123	8	0	19	4	0	222	376	49.9	0.499	0.501	1.087E-05	0.0011%	0.092	<b>9.2</b>
<b><i>y<sub>3,2</sub> = modernización de la flota vehicular</i></b>																						
<i>x<sub>3,2,1</sub></i> = modernización de flota vehicular	0	1	1	1	1	1	1	0	8	86	19	4	291	222	630	83.7	0.837	0.163	5.942E-06	0.0006%	0.155	<b>15.5</b>

n.a. No Aplica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Resultados para el estrato GRANDE

Variable Dependiente	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Σ	%	Proporción Estimada Estrato 1 (p <sup>^</sup> )	(1- p <sup>^</sup> )	Error Estándar EE	EE%	p <sup>^</sup> <sub>Est</sub>	p <sup>^</sup> <sub>Est</sub> %
<b>Total vehículos muestra tamaño muy chico</b>								121	8	189	248	22	130	65	783	100						$\hat{p} = \frac{\sum_{m=1}^k N_m p_m}{N}$
<i>n<sub>h</sub></i> = tamaño de la muestra del estrato mediano = 783 vehículos																						
<i>N<sub>h</sub></i> = tamaño de la población del estrato mediano = 9,749 vehículos																						
<i>N</i> = tamaño de la población total = 93,555 vehículos																						
<i>y<sub>1</sub></i> = políticas para la reducción del impacto ambiental																						
<i>y<sub>1,1</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas																						
<i>x<sub>1,1,1</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	0	0	1	1	1	0	0	0	0	189	248	22	0	0	459	58.6	0.586	0.414	3.098E-06	0.0003%	0.061	<b>6.1</b>
<i>x<sub>1,1,2</sub></i> = centros de consolidación/ estacionamientos para vehículos de carga	0	0	1	1	1	1	0	0	0	189	248	22	130	0	589	75.2	0.752	0.248	2.380E-06	0.0002%	0.078	<b>7.8</b>
<i>x<sub>1,1,3</sub></i> = cambio de horario de distribución	1	1	1	0	1	0	1	121	8	189	0	22	0	65	405	51.7	0.517	0.483	3.189E-06	0.0003%	0.054	<b>5.4</b>
<i>x<sub>1,1,4</sub></i> = obtención de permisos ante la autoridad	1	1	0	0	0	0	0	121	8	0	0	0	0	0	129	16.5	0.165	0.835	1.757E-06	0.0002%	0.017	<b>1.7</b>
<i>y<sub>1,2</sub></i> = establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas																						
<i>x<sub>1,2,1</sub></i> = cambio de horarios de distribución	1	1	1	1	1	0	1	121	8	189	248	22	0	65	653	83.4	0.834	0.166	1.768E-06	0.0002%	0.087	<b>8.7</b>
<i>x<sub>1,2,2</sub></i> = centros de consolidación	0	0	1	0	1	1	0	0	0	189	0	22	130	0	341	43.6	0.436	0.564	3.140E-06	0.0003%	0.045	<b>4.5</b>
<i>y<sub>1,3</sub></i> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas junto con ventanas de tiempo definidas por los clientes																						
<i>x<sub>1,3,1</sub></i> = cambio de recorridos	0	1	1	1	1	1	1	0	8	189	248	22	130	65	662	84.5	0.845	0.155	1.669E-06	0.0002%	0.088	<b>8.8</b>
<i>x<sub>1,3,2</sub></i> = cambio de tamaño de vehículo	0	0	1	0	1	0	1	0	0	189	0	22	0	65	276	35.2	0.352	0.648	2.915E-06	0.0003%	0.037	<b>3.7</b>
<i>x<sub>1,3,3</sub></i> = centros de consolidación	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	22	130	0	152	19.4	0.194	0.806	1.998E-06	0.0002%	0.020	<b>2.0</b>
<i>x<sub>1,3,4</sub></i> = cambio de horario de distribución	1	1	1	1	1	0	1	121	8	189	248	22	0	65	653	83.4	0.834	0.166	1.768E-06	0.0002%	0.087	<b>8.7</b>
<i>y<sub>1,4</sub></i> = establecimiento de zonas ambientales (restricción de pesos y de tipos de vehículos)																						
<i>x<sub>1,4,1</sub></i> = cambio de flota vehicular	0	1	1	1	1	1	1	0	8	189	248	22	130	65	662	84.5	0.845	0.155	1.669E-06	0.0002%	0.088	<b>8.8</b>
<i>x<sub>1,4,2</sub></i> = centros de consolidación	0	0	1	0	1	1	0	0	0	189	0	22	130	0	341	43.6	0.436	0.564	3.140E-06	0.0003%	0.045	<b>4.5</b>
<i>x<sub>1,4,3</sub></i> = establecer más rutas/ rutas en diableros o a pié	0			1		0	1	0	0	0	248	0	0	65	313	40.0	0.400	0.600	3.064E-06	0.0003%	0.042	<b>4.2</b>
<i>x<sub>1,4,4</sub></i> = búsqueda de mercados alternativos							1	0	0	0	0	0	0	65	65	8.3	0.083	0.917	9.721E-07	0.0001%	0.009	<b>0.9</b>

Variable Dependiente	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Σ	%	Proporción Estimada Estrato 1 (p <sup>^</sup> )	(1- p <sup>^</sup> )	Error Estándar EE	EE%	p <sup>^</sup> est	p <sup>^</sup> est %
<i>y<sub>2</sub> = políticas para hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos, menor número de viajes/día)</i>																						
<i>y<sub>2.1</sub> = establecer corredores de carga sugeridos en zonas urbanas</i>																						
<i>x<sub>2.1.1</sub></i> = aumento de tamaño del vehículo	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a															
<i>x<sub>2.1.2</sub></i> = cambio de rutas de distribución	1	1	1	1	1	1	1	121	8	189	248	22	130	65	783	100	1.000	0	0.000E+00	0.0000%	0.104	<b>10.4</b>
<i>y<sub>2.2</sub> = cobro de cuotas por uso de vías</i>																						
<i>x<sub>2.2.1</sub></i> = cambio de rutas de distribución	0	1	0	1	1	1	1	0	8	0	248	22	130	65	473	60.4	0.604	0.396	3.054E-06	0.0003%	0.063	<b>6.3</b>
<i>x<sub>2.2.2</sub></i> = establecer centros de consolidación dentro de la zona urbana	0	0	1	0	1	1	0	0	0	189	0	22	130	0	341	43.6	0.436	0.564	3.140E-06	0.0003%	0.045	<b>4.5</b>
<i>x<sub>2.2.3</sub></i> = pagar y utilizar los corredores	1	0	1	0	1	0	1	121	0	189	0	22	0	65	397	50.7	0.507	0.493	3.192E-06	0.0003%	0.053	<b>5.3</b>
<i>y<sub>3</sub> = políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales</i>																						
<i>y<sub>3.1</sub> = uso de combustibles alternativos</i>																						
<i>x<sub>3.1.1</sub></i> = cambio de flota vehicular con otros combustibles	1	1	0	1	1	0	1	121	8	0	248	22	0	65	464	59.3	0.593	0.407	3.083E-06	0.0003%	0.062	<b>6.2</b>
<i>y<sub>3.2</sub> = modernización de la flota vehicular</i>																						
<i>x<sub>3.2.1</sub></i> = modernización de flota vehicular	0	1	1	1	1	1	1	0	8	189	248	22	130	65	662	84.5	0.845	0.155	1.669E-06	0.0002%	0.088	<b>8.8</b>

n.a. No Aplica

Fuente: Elaboración propia

### 3. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DEL ERROR ESTÁNDAR DE LAS PROPORCIONES ESTIMADAS

Con los resultados del error estándar para las proporciones estimadas en cada estrato (columna Error Estándar (*EE*) de las Tabla 5 a Tabla 8) se obtiene el error estándar de las proporciones estimadas para la población utilizando la Ecuación 1:

$$EE\left(\hat{p}_{est}\right) = \sqrt{\sum_{h=1}^n \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) \times \left(\frac{N_h}{N}\right)^2 \times \left(\frac{\hat{p}_h(1-\hat{p}_h)}{n_h-1}\right)}$$

En el siguiente cuadro se presentan los resultados de ésta sumatoria, donde se observa que los errores estimados están por debajo del error asumido del 10%.

**Tabla 9 Estimación del error estándar de las proporciones estimadas**

Política	Variable Independiente	Variable Dependiente	EE $\hat{p}_{est}$ MCh	EE $\hat{p}_{est}$ Ch	EE $\hat{p}_{est}$ Med	EE $\hat{p}_{est}$ Gr	EE $\hat{p}_{est}$	EE $\hat{p}_{est}$ %
<i>y</i> <sub>1</sub> = políticas para la reducción del impacto ambiental	<i>y</i> <sub>1,1</sub> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas	<i>x</i> <sub>1,1,1</sub> = cambio de tamaño de vehículo	n.a	n.a	5.38E-06	3.10E-06	0.0029	0.29%
		<i>x</i> <sub>1,1,2</sub> = centros de consolidación/ estacionamientos para vehículos de carga	2.94E-06	9.36E-07	1.08E-05	2.38E-06	0.0041	0.41%
		<i>x</i> <sub>1,1,3</sub> = cambio de horario de distribución	6.80E-06	2.82E-06	1.05E-05	3.19E-06	0.0048	0.48%
		<i>x</i> <sub>1,1,4</sub> = obtención de permisos ante la autoridad	2.82E-06	5.67E-07	6.25E-06	1.76E-06	0.0034	0.34%
	<i>y</i> <sub>1,2</sub> = establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas	<i>x</i> <sub>1,2,1</sub> = cambio de horarios de distribución	3.34E-07	7.03E-07	1.03E-05	1.77E-06	0.0036	0.36%
		<i>x</i> <sub>1,2,2</sub> = centros de consolidación	7.00E-06	2.79E-06	1.09E-05	3.14E-06	0.0049	0.49%
	<i>y</i> <sub>1,3</sub> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas junto con	<i>x</i> <sub>1,3,1</sub> = cambio de recorridos	5.78E-07	3.60E-07	5.94E-06	1.67E-06	0.0029	0.29%
		<i>x</i> <sub>1,3,2</sub> = cambio de tamaño de vehículo	n.a	n.a	1.06E-05	2.91E-06	0.0037	0.37%
		<i>x</i> <sub>1,3,3</sub> = centros de consolidación	1.17E-06	1.51E-06	1.04E-05	2.00E-06	0.0039	0.39%

Política	Variable Independiente	Variable Dependiente	EE $\hat{p}_{est}$ MCh	EE $\hat{p}_{est}$ Ch	EE $\hat{p}_{est}$ Med	EE $\hat{p}_{est}$ Gr	EE $\hat{p}_{est}$	EE $\hat{p}_{est}$ %
	ventanas de tiempo definidas por los clientes	$x_{1,3,4}$ = cambio de horario de distribución	3.34E-07	7.03E-07	1.03E-05	1.77E-06	0.0036	0.36%
	$y_{1,4}$ = establecimiento de zonas ambientales (restricción de pesos y de tipos de vehículos)	$x_{1,4,1}$ = cambio de flota vehicular	n.a.	n.a.	5.94E-06	1.67E-06	0.0028	0.28%
		$x_{1,4,2}$ = centros de consolidación	7.00E-06	2.79E-06	1.09E-05	3.14E-06	0.0049	0.49%
		$x_{1,4,3}$ = establecer más rutas/ rutas en diablos o a pié	6.76E-06	2.84E-06	9.46E-06	3.06E-06	0.0047	0.47%
		$x_{1,4,4}$ = búsqueda de mercados alternativos	1.50E-07	4.14E-07	9.04E-06	9.72E-07	0.0033	0.33%
$y_2$ = políticas para hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos, menor número de viajes/día)	$y_{2,1}$ = establecer corredores de carga sugeridos en zonas urbanas	$x_{2,1,1}$ = aumento de tamaño de vehículo	6.99E-06	2.63E-06	n.a.	n.a.	0.0041	0.31%
		$x_{2,1,2}$ = cambio de rutas de distribución	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00%
	$y_{2,2}$ = cobro de cuotas por uso de vías	$x_{2,2,1}$ = cambio de rutas de distribución	6.97E-06	2.40E-06	8.72E-06	3.05E-06	0.0046	0.46%
		$x_{2,2,2}$ = establecer centros de consolidación dentro de la zona urbana	7.00E-06	2.79E-06	1.09E-05	3.14E-06	0.0049	0.49%
	$x_{2,2,3}$ = pagar y utilizar los corredores	7.01E-06	2.79E-06	1.06E-05	3.19E-06	0.0049	0.49%	
$y_3$ = políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales	$y_{3,1}$ = uso de combustibles alternativos	$x_{3,1,1}$ = cambio de flota vehicular con otros combustibles	6.94E-06	2.54E-06	1.09E-05	3.08E-06	0.0048	0.48%
	$y_{3,2}$ = modernización de la flota vehicular	$x_{3,2,1}$ = modernización de flota vehicular	5.78E-07	3.60E-07	5.94E-06	1.67E-06	0.0029	0.29%

n.a.: No aplica

Fuente: Elaboración propia

#### 4. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE PROPORCIONES PARA EL TOTAL DE LA POBLACIÓN

Con los resultados de las proporciones estimadas para cada estrato (columna  $\hat{p}_{est}$  de la *Tabla 5 a Tabla 8*) se obtiene la estimación de las proporciones para la población utilizando la Ecuación 2:

$$\hat{p}_{est} = \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{N} \hat{p}_h$$

En el siguiente cuadro se presentan los resultados de ésta sumatoria, que corresponden al valor final de este proceso estadístico:

**Tabla 10 Estimación de las proporciones para el total de la población**

Política	Variable Independiente	Variable Dependiente	$\hat{P}_{est}$ MCh	$\hat{P}_{est}$ Ch	$\hat{P}_{est}$ Med	$\hat{P}_{est}$ G	$\Sigma =$ $\hat{P}_{est}$	$\hat{P}_{est}$ %	
<i>y<sub>1</sub> = políticas para la reducción del impacto ambiental</i>	<i>y<sub>1,1</sub> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas</i>	<i>x<sub>1,1,1</sub> = cambio de tamaño de vehículo</i>	n.a.	n.a.	2.7%	6.1%	0.088	<b>8.8%</b>	
		<i>x<sub>1,1,2</sub> = centros de consolidación/ estacionamientos para vehículos de carga</i>	42.1%	21.2%	9.8%	7.8%	0.810	<b>81.0%</b>	
		<i>x<sub>1,1,3</sub> = cambio de horario de distribución</i>	28.1%	10.5%	10.9%	5.4%	0.549	<b>54.9%</b>	
		<i>x<sub>1,1,4</sub> = obtención de permisos ante la autoridad</i>	5.4%	1.2%	3.2%	1.7%	0.116	<b>11.6%</b>	
	<i>y<sub>1,2</sub> = establecimiento de ventanas de tiempo para restringir los horarios de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas</i>	<i>x<sub>1,2,1</sub> = cambio de horarios de distribución</i>	47.2%	21.8%	11.3%	8.7%	0.890	<b>89.0%</b>	
		<i>x<sub>1,2,2</sub> = centros de consolidación</i>	23.0%	10.0%	9.4%	4.5%	0.469	<b>46.9%</b>	
	<i>y<sub>1,3</sub> = establecimiento de normas de horario para restringir el acceso de vehículos de carga a zonas urbanas junto con ventanas de tiempo definidas por los clientes</i>	<i>x<sub>1,3,1</sub> = cambio de recorridos</i>	46.8%	22.5%	15.5%	8.8%	0.936	<b>93.6%</b>	
		<i>x<sub>1,3,2</sub> = cambio de tamaño de vehículo</i>	n.a.	n.a.	7.7%	3.7%	0.113	<b>11.3%</b>	
		<i>x<sub>1,3,3</sub> = centros de consolidación</i>	2.1%	3.7%	7.2%	2.0%	0.150	<b>15.0%</b>	
		<i>x<sub>1,3,4</sub> = cambio de horario de distribución</i>	47.2%	21.8%	11.3%	8.7%	0.890	<b>89.0%</b>	
	<i>y<sub>1,4</sub> = establecimiento de zonas ambientales (restricción de pesos y de tipos de vehículos)</i>	<i>x<sub>1,4,1</sub> cambio de tamaño de vehículo</i>	n.a.	n.a.	15.5%	8.8%	0.243	<b>24.36%</b>	
		<i>x<sub>1,4,2</sub> = centros de consolidación</i>	23.0%	10.0%	9.4%	4.5%	0.469	<b>46.9%</b>	
		<i>x<sub>1,4,3</sub> = establecer más rutas/ rutas en diableros o a pié</i>	19.4%	12.1%	5.9%	4.2%	0.416	<b>41.6%</b>	
		<i>x<sub>1,4,4</sub> = búsqueda de mercados alternativos</i>	0.3%	0.9%	5.5%	0.9%	0.075	<b>7.5%</b>	
	<i>y<sub>2</sub> = políticas para hacer más eficientes los recorridos del vehículo (menor número de kilómetros recorridos, menor número de viajes/día)</i>	<i>y<sub>2,1</sub> = establecer corredores de carga sugeridos en zonas urbanas</i>	<i>x<sub>2,1,1</sub> = aumento de tamaño de vehículo</i>	22.4%	8.4%	n.a.	n.a.	0.308	<b>30.8%</b>
			<i>x<sub>2,1,2</sub> = cambio de rutas de distribución</i>	47.8%	23.3%	18.5%	10.4%	1.000	<b>100.0%</b>
<i>y<sub>2,2</sub> = cobro de cuotas por uso de vías</i>		<i>x<sub>2,2,1</sub> = cambio de rutas de distribución</i>	25.9%	16.2%	13.4%	6.3%	0.618	<b>61.8%</b>	
		<i>x<sub>2,2,2</sub> = establecer centros de consolidación dentro de la zona urbana</i>	23.0%	10.0%	9.4%	4.5%	0.469	<b>46.9%</b>	
	<i>x<sub>2,2,3</sub> = pagar y utilizar los corredores</i>	23.7%	10.1%	10.7%	5.3%	0.497	<b>49.7%</b>		
<i>y<sub>3</sub> = políticas para incentivar la eficiencia de los transportistas en cuanto a emisiones ambientales</i>	<i>y<sub>3,1</sub> = uso de combustibles alternativos</i>	<i>x<sub>3,1,1</sub> = cambio de flota vehicular con otros combustibles</i>	26.3%	15.5%	9.2%	6.2%	0.572	<b>57.2%</b>	
	<i>y<sub>3,2</sub> = modernización de la flota vehicular</i>	<i>x<sub>3,2,1</sub> = modernización de flota vehicular</i>	46.8%	22.5%	15.5%	8.8%	0.936	<b>93.6%</b>	

n.a.: No aplica

Fuente:

Elaboración

propia

## ANEXO 2. MODELOS PARA ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EMISIONES

Para comprender cómo se formulan los modelos para la estimación de los factores de emisión y su aplicación en una red de transporte se presenta a continuación el resumen sobre los tipos de emisiones de los vehículos automotores de carga y los conceptos teóricos y principales salidas del modelo *Mobile5-MexicoCity*.

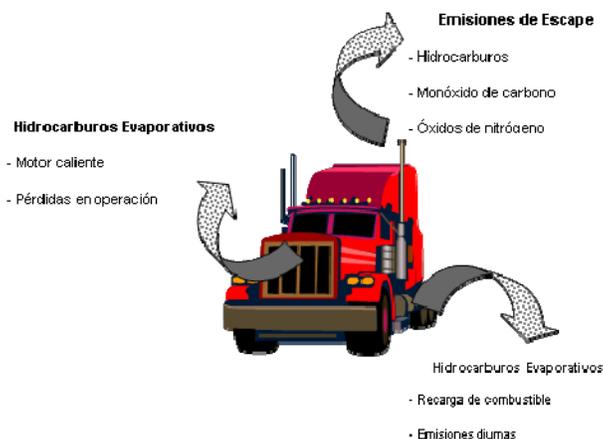
### 1. IMPACTOS GENERADOS POR LOS VEHÍCULOS DE CARGA

El transporte urbano de carga afecta el medio ambiente físico y social en diversas formas, algunas de ellas no cuantificables. Las afectaciones cuantificables incluyen el ruido, las emisiones de contaminantes y la vibración. Los impactos no medibles pueden describirse como la invasión de vehículos en espacios públicos y zonas residenciales, y la incomodidad psico-social que éstos producen en la comunidad.

La contaminación del aire es un problema en crecimiento debido al incremento de la población urbana que ocasiona alta densidad de tráfico de vehículos automotores, mayor necesidad de generación de energía eléctrica y la expansión de las actividades comerciales e industriales.

El mayor problema asociado con la contaminación urbana del aire es el sistema de transporte y su interacción con la ciudad. Los vehículos producen diferentes tipos de emisiones bajo diferentes condiciones de velocidad, de aceleración y en detención (Radian International, 1997). Además de las emisiones del escape, los vehículos automotores registran una gran variedad de procesos de emisión evaporativa que incluyen (ver . Figura 1)

- Emisiones evaporativas del motor caliente: son aquellas que se presentan debido a la volatilización del combustible en el sistema de alimentación después de que el motor se ha apagado. El calor residual del motor volatiliza el combustible.
- Emisiones evaporativas de operación: son las emisiones ocasionadas por las fugas de combustible, ya sea como líquido o vapor, que se presentan mientras el motor está en funcionamiento.
- Emisiones evaporativas durante la recarga de combustible: son las emisiones evaporativas desplazadas del tanque de combustible del vehículo durante la recarga. Estas pueden ocurrir mientras el vehículo está en reposo y en puntos conocidos, como las gasolineras.
- Emisiones diurnas: son las emisiones del tanque de combustible del vehículo debidas a una mayor temperatura del combustible y a la presión de vapor del mismo. Estas emisiones se deben al incremento de la temperatura ambiente ocasionado por el sistema de escape del vehículo o por el calor reflejado en la superficie del camino.
- Emisiones evaporativas en reposo: son emisiones evaporativas diferentes a las anteriores, que se presentan cuando el motor no está en funcionamiento. Las pérdidas en reposo se deben principalmente a fugas de combustible y al traspaso del vapor a través de las líneas de alimentación del combustible.



Fuente: Elaboración propia adaptado de “Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen VI. Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Vehículos Automotores”. *Radian International*, 1997

**. Figura 1. Procesos de emisión de contaminantes en vehículos automotores**

Los escapes de los vehículos emiten un amplio rango de componentes cuyos efectos al medio ambiente son variados. Los principales efectos y compuestos emitidos son:

- a) Monóxido de carbono (CO): es un gas que no se puede ver ni oler, pero que puede causar la muerte cuando se inhala en niveles elevados. El monóxido de carbono es un producto de la combustión incompleta de los combustibles a base de hidrocarburos como gas, gasolina, querosén, carbón, petróleo o madera. Los vehículos emiten monóxido de carbono directamente por los tubos de escape durante el arranque, cuando el suministro de aire está restringido ("ahogado") o cuando no están afinados apropiadamente.

El CO generalmente se considera como guía de los niveles de otros contaminantes gaseosos o de partículas suficientemente pequeñas para mantenerse suspendidas en el aire a largo plazo. El CO tiene muchas ventajas como material de referencia para la estimación de contaminantes producidos por el tráfico ya que es químicamente inerte en la atmósfera y tiene una concentración natural baja. Es producido por vehículos de motor a gasolina o diesel y lo más importante es que es posible medir la concentración de CO en la atmósfera continuamente, lo que permite tener datos para evaluar los modelos en períodos cortos en donde hay fluctuaciones importantes de los flujos de tráfico y en las condiciones meteorológicas (Khare y Sharma, 2002).

Si los contaminantes proceden de una fuente común (para este caso los escapes vehiculares), cuando se dispersan en el aire sus concentraciones deben tener la misma proporción que sus tasas de emisión (en la práctica, algunos factores afectan esta situación química ideal). Algunos contaminantes sufren reacciones químicas en la atmósfera y esto influye en sus concentraciones, sin embargo, es posible hacer estimaciones del nivel probable de material contaminante conociendo la concentración de otro, el cual se usa como material de referencia. Por las anteriores ventajas, el CO se considera como un índice sustituto que puede usarse como indicador de otros contaminantes generados por el tráfico (Khare y Sharma, 2002).

- b) Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): es formado por el uso de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), combustión de residuos sólidos, árboles y productos de madera, y también como resultado de otras reacciones químicas (por ejemplo, manufactura de cemento). (E.P.A., 2008).

Contribuye con cerca del 50% del total de gases de efecto invernadero, los cuales tienen efecto sobre el cambio climático global.

- c) Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ): el dióxido de nitrógeno y el óxido nítrico se forman como resultado de la combustión a alta temperatura y presión.  $\text{NO}_x$  es el nombre genérico de un grupo de gases altamente reactivos que contienen nitrógeno y oxígeno en diversas cantidades. Muchos de los óxidos de nitrógeno son incoloros e inodoros. Contribuyen con otros problemas de contaminación del aire que incluyen (E.P.A., 2008):

- Formación de ozono ( $\text{O}_3$ ) a nivel de la tierra (*smog*): se forma cuando el  $\text{NO}_x$  y las partículas orgánicas volátiles reaccionan en presencia de la luz solar. Los niños, las personas con deficiencias pulmonares y los individuos que trabajan o se ejercitan al aire libre son susceptibles de efectos adversos como daño al tejido pulmonar y la reducción de la función pulmonar. El ozono puede ser transportado por el viento y causa daños lejos de las fuentes de emisión.

- Lluvia ácida: el  $\text{NO}_x$  y el dióxido de azufre reaccionan con otras sustancias en el aire para formar ácidos los cuales caen a la tierra en forma de lluvia, niebla, nieve o partículas secas. La lluvia ácida causa deterioro a vehículos, edificaciones y monumentos históricos y hace que las corrientes y lagos se acidifiquen y afecten la fauna acuática.

- Las partículas suspendidas y el  $\text{NO}_x$  reaccionan con el amoníaco, la humedad, y otros compuestos como el ácido nítrico. La salud humana se ve afectada al respirar estos compuestos, ya que las pequeñas partículas penetran profundamente en partes sensibles del pulmón y pueden causar o empeorar enfermedades respiratorias como el enfisema y la bronquitis, y agravar problemas pre-existentes del corazón.

- Cambio climático: el óxido nítrico ( $\text{NO}_2$ ), es un gas de efecto invernadero. Se acumula en la atmósfera junto con otros gases causando incremento gradual de la temperatura terrestre.

- Visibilidad: las partículas de nitratos y el dióxido de nitrógeno pueden bloquear el paso de la luz, reduciendo la visibilidad en áreas urbanas y aún en zonas más alejadas.

- d) Partículas suspendidas (PM): es una compleja mezcla de pequeñas partículas y gotitas de líquido. La contaminación por partículas proviene de varios componentes que incluyen ácidos (nitratos y sulfatos), químicos orgánicos, metales y partículas de polvo. Las condiciones meteorológicas, la época del año y los tipos de fuentes afectan las propiedades químicas de estas partículas.

El tamaño de la partícula está relacionado con su potencial para causar daño a la salud humana. Las partículas de 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ) de diámetro o menos generalmente pasan a través de la nariz y garganta y entran al pulmón. Una vez inhaladas, estas partículas pueden afectar el corazón y los pulmones. Las partículas gruesas ( $\text{PM}_{10}$ ) se encuentran cerca de las autopistas e industrias, pueden formarse por la abrasión de llantas y frenos, erosión del suelo o como resultado de reacciones químicas en la atmósfera.

Las partículas finas  $\text{PM}_{2.5}$  (de 2.5 micrómetros de diámetro o menos) se encuentran en el humo y la bruma; pueden ser emitidas directamente por fuentes como incendios forestales, o formarse cuando los gases emitidos por industrias, plantas de energía o automóviles reaccionan en el aire (E.P.A., 2008).

Existen fuentes adicionales de emisiones de partículas (PM) de los vehículos automotores, entre éstas la de mayor magnitud es el levantamiento de polvo del camino, polvo recogido por las llantas del vehículo y suspendido en el aire por la turbulencia ocasionada por el movimiento, estas emisiones de polvo son manejadas como fuente de área y no se incluyen en el cálculo de emisiones de vehículos. Otras fuentes de PM no originadas en el escape incluyen el desgaste de las llantas y frenos, en general estas fuentes son insignificantes cuando se comparan con las del escape y el polvo levantado y, por lo tanto, en algunas ocasiones son omitidas de los inventarios de emisiones. Los factores de emisiones para llantas y frenos, sin embargo, pueden ser estimados utilizando modelos (*Radian International*, 1997).

- e) Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>): pertenece a la familia de los gases de óxido de azufre (SO<sub>x</sub>). Estos gases se disuelven fácilmente en agua. El azufre es común en las materias primas como petróleo crudo, carbón y otros minerales que contienen aluminio, cobre, cinc, plomo o hierro. Los gases SO<sub>x</sub> se forman cuando se quema combustible que contenga azufre como el petróleo o el carbón, y cuando se extrae la gasolina del petróleo o los metales de minerales. El SO<sub>2</sub> se disuelve en vapor de agua y forma ácido, interactúa con otros gases y partículas del aire para formar sulfatos y otros productos peligrosos para la salud humana (E.P.A., 2008).
- f) Plomo (Pb): es un metal que se encuentra en forma natural en el ambiente así como en productos manufacturados. Las mayores fuentes de emisión de plomo han sido históricamente los vehículos motorizados y las industrias. Como resultado de las regulaciones de la E.P.A. para remover el plomo de la gasolina, las emisiones de plomo han disminuido desde 1980 así como los niveles de plomo en el aire (E.P.A., 2008).

## 2. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES DE LOS VEHÍCULOS DE CARGA

Para la estimación de contaminantes de vehículos automotores existen metodologías basadas en los inventarios de emisiones, las cuales son aplicables a cualquier vehículo automotor, sea este de carga o de pasajeros. Para obtener los factores, se aplican los modelos de factores de emisión para vehículos automotores que incluyen dentro de sus parámetros diferentes tipos de vehículos y diversas tipologías de camiones.

A continuación se resumen los aspectos básicos de la modelación de factores de emisión, tomados de los “Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen VI. Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Vehículos Automotores” (*Radian International*, 1997).

### a) Modelos de factores de emisión de contaminantes para vehículos automotores

La información base para los modelos de factores de emisión son los inventarios de emisiones de vehículos automotores que recopilan una gran variedad de datos que incluyen los KRV, estadísticas de consumo de combustible, velocidades de manejo, datos del registro vehicular y clases de vehículos, así como las características del combustible. En algunos casos, estos datos son absolutamente indispensables para el proceso del inventario y deben obtenerse para generar incluso las estimaciones más preliminares del modelo.

Los datos primarios son los mínimos requeridos para generar un inventario básico; los datos secundarios reemplazan a los parámetros clave por omisión con datos locales; los datos terciarios se incluyen en la medida en que estén disponibles para refinar el inventario con respecto a las

condiciones locales. Un inventario inicial puede generarse sólo con datos primarios; sin embargo, la adición de datos secundarios y terciarios mejora sustancialmente el nivel de confianza de las estimaciones realizadas.

Los datos primarios para un inventario incluyen:

- Datos de actividad vehicular que cubran la región del inventario en su totalidad (generalmente KRV o consumo de combustible), agrupados para coincidir con los datos del factor de emisión disponibles.
- Estándares de emisión vehicular por año y modelo.
- Velocidades vehiculares promedio.
- Factores de emisión por tipo de vehículo, tipo de combustible, año, modelo y velocidad de manejo.
- Datos de la composición del combustible para la región del inventario, por estación, incluyendo contenido de azufre, oxígeno y plomo, y presión de vapor Reid (PVR).
- Distribución del parque vehicular por año y modelo, incluyendo la fracción de vehículos no registrados y extranjeros.
- Condiciones locales de altitud y temperatura ambiente.
- Tasas de acumulación anual de kilómetros por vehículo, por clase vehicular, modelo y año.

Los datos secundarios necesarios incluyen:

- Información sobre el programa local de inspección y mantenimiento de vehículos (I/M), y del programa anti-alteraciones (PAA).
- Datos de las encuestas locales de alteración de vehículos y tasas de uso del combustible no adecuado.

Los datos terciarios incluyen:

- Datos de las encuestas locales de hábitos de manejo para identificar las longitudes de recorrido promedio y el tiempo transcurrido entre los arranques de motor.
- Datos de la encuesta del patrón de manejo para identificar los patrones locales de velocidades vehiculares, peso transportado y tasas de aceleración.

Los inventarios de emisiones de fuentes móviles se estiman generalmente multiplicando un factor de emisión obtenido por mediciones con un dinamómetro sobre el tubo de escape de un vehículo por la estimación de la actividad de viaje de cada tipo de vehículo.

En la mayoría de cálculos de emisiones se toman tres tipos de emisiones: emisiones del tubo de escape en movimiento, emisiones de encendido y emisiones por evaporación. Los inventarios de emisiones representan la suma de emisiones del tubo de escape, del encendido y de las evaporaciones para hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas.

Los factores de emisión se combinan con varios tipos de actividad durante el viaje para obtener las emisiones totales. Los valores de kilómetros de viaje y la velocidad de viaje estimados por modelos de tráfico se utilizan para calcular el total de emisiones en movimiento. La información de final del viaje tomada de los modelos de demanda y de las encuestas se utiliza para estimar el número de encendidas del vehículo y los tiempos de reposo.

## b) Metodología básica para la estimación de emisiones de vehículos automotores

La ecuación básica utilizada para la estimación de las emisiones de los vehículos automotores requiere la multiplicación de los datos de actividad vehicular por un factor de emisión, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E_p = KRV \times FE_p$$

### Ecuación 3

donde:

$E_p$  = emisiones totales del contaminante  $p$   
 $KRV$  = kilómetros recorridos por vehículo  
 $FE_p$  = factor de emisión del contaminante  $p$

Para los vehículos automotores, los datos de actividad se refieren a los kilómetros recorridos por vehículo (KRV), mientras que los factores de emisión se expresan en unidades de gramo de contaminante por KRV. Los KRV representan la distancia total recorrida por una población de vehículos en un periodo de tiempo determinado. Es preferible que los KRV sean estimados a partir de modelos de transporte o de conteos de vehículos en circulación aunque en algunos casos los KRV pueden ser obtenidos a partir de las estadísticas de consumo de combustible.

## 3. EL MODELO *MOBILE*

En el modelo *MOBILE*, la meta final consiste en calcular un factor de emisión promedio para cada tipo de vehículo. A continuación se describen algunas de las ecuaciones teóricas básicas utilizadas por el modelo, las cuales no son visibles para el usuario del modelo; sin embargo, tanto éstas como los factores de emisión resultantes están influenciados por diversos parámetros de entrada del modelo que se describen más adelante.

### a) Cálculo de las tasas básicas de emisión promedio (TBE)

El cálculo de las tasas básicas de emisión promedio (TBE) para cada tipo de vehículo, modelo y año es el primer paso para estimar los factores de emisión de vehículos automotores. El fundamento de las TBE son los datos sobre las emisiones de vehículos en uso obtenidos en condiciones de prueba normalizadas tales como, temperatura, características del combustible y ciclos de manejo normalizados. Las emisiones varían con la edad del vehículo, de manera que es posible aplicar regresiones lineales que relacionan los datos de las emisiones con las lecturas del odómetro. Estas regresiones dan como resultado ecuaciones TBE que incorporan una tasa de emisión de cero millas (la intersección “y” de la regresión) y una tasa de deterioro (pendiente). La primera representa las emisiones de un vehículo nuevo, mientras que la segunda describe la manera en que las emisiones se incrementan con el kilometraje (millaje) del vehículo.

El modelo *MOBILE* utiliza dos ecuaciones TBE para describir las diferentes tasas de deterioro en diferentes regímenes de kilometraje (millaje) para los LDGV (vehículos ligeros a gasolina) y los

camiones ligeros a gasolina nuevos. A continuación se presentan las dos ecuaciones TBE hipotéticas:

$$\text{Para } MILAC \leq 50.000 \text{ millas, } TBE = ECM + \left( DET1 \times \frac{MILAC}{10.000} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

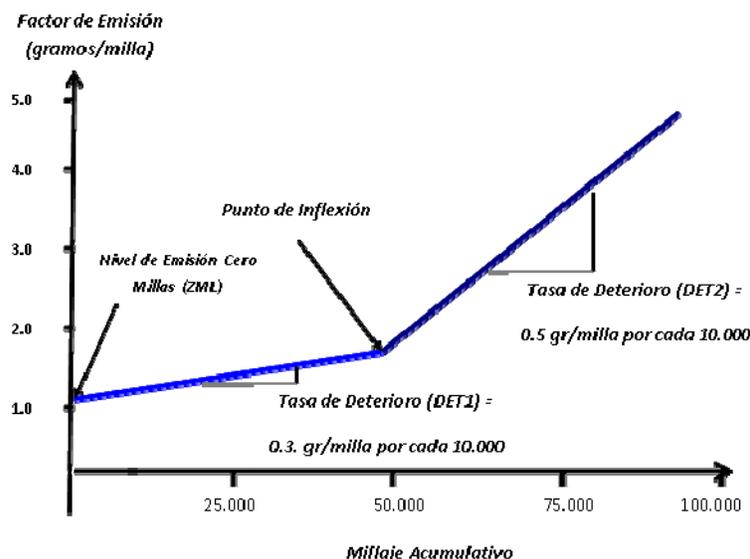
Para  $MILAC > 50.000$  millas,

$$TBE = ECM + (DET1 \times 5) + \left( DET2 \times \frac{[MILAC - 50.000]}{10.000} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:

$TBE =$	tasa básica de emisión
$ECM =$	nivel de emisión cero millas (intersección)
$DET1 =$	tasa de deterioro por cada 10.000 millas (pendiente) para el millaje acumulado hasta 50.000 millas
$DET2 =$	tasa de deterioro por cada 10.000 millas (pendiente) para el millaje acumulado por más de 50.000 millas
$MILAC =$	millaje acumulado en el odómetro

El punto de inflexión de 50,000 millas en el modelo *MOBILE* ha sido adoptado por convención para los vehículos y camiones ligeros a gasolina. A cada tipo de vehículo se le ha asignado una TBE por cada 25 años de antigüedad, con base en la acumulación de kilometraje (millaje) para cada modelo y año vehicular (



Fuente: Adaptado de "Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen VI. Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Vehículos Automotores". *Radian International*, 1997

**Figura 2. Tasas de Emisión Básicas Hipotéticas**

Las tasas básicas de emisión no corresponden exactamente con las emisiones reales de un vehículo automotor, éstas representan las emisiones medidas en condiciones de prueba controladas. Para reconciliar las diferencias que existen entre las emisiones de prueba y las reales, se deben aplicar factores de ajuste a las emisiones reales. De esta manera, a partir de la TBE es posible calcular un factor de emisión básico (FEB) para cada tipo de vehículo, modelo y año:

$$FEB = (TBE \times FA \times FAim) + FAaa \quad \text{Ecuación 6}$$

donde:

$FEB =$	factor de emisión básico, por modelo y año
$TBE =$	tasa básica de emisión, por modelo y año
$FA =$	factor de ajuste para los efectos de diferentes temperaturas, presiones de vapor de Reid y modos de operación
$FAim =$	factor de ajuste para el efecto del programa de I/M
$FAaa =$	factor de ajuste para los efectos de la alteración de los controles de emisión y los programas anti-alteración

La ecuación anterior sólo muestra los principales factores de ajuste que son aplicables para todos los tipos de contaminantes en las situaciones típicas. En el modelo MOBILE existen factores de ajuste adicionales que son aplicables sólo en circunstancias especializadas o para un contaminante (por ejemplo, corrección para CO a baja temperatura).

Después de calcular los FEB para cada modelo y año con los ajustes pertinentes, se calcula un factor de emisión promedio o compuesto para el parque vehicular para cada tipo de vehículo con un factor de ajuste adicional. El factor de emisión compuesto para el parque vehicular (FECA) está dado por la siguiente ecuación:

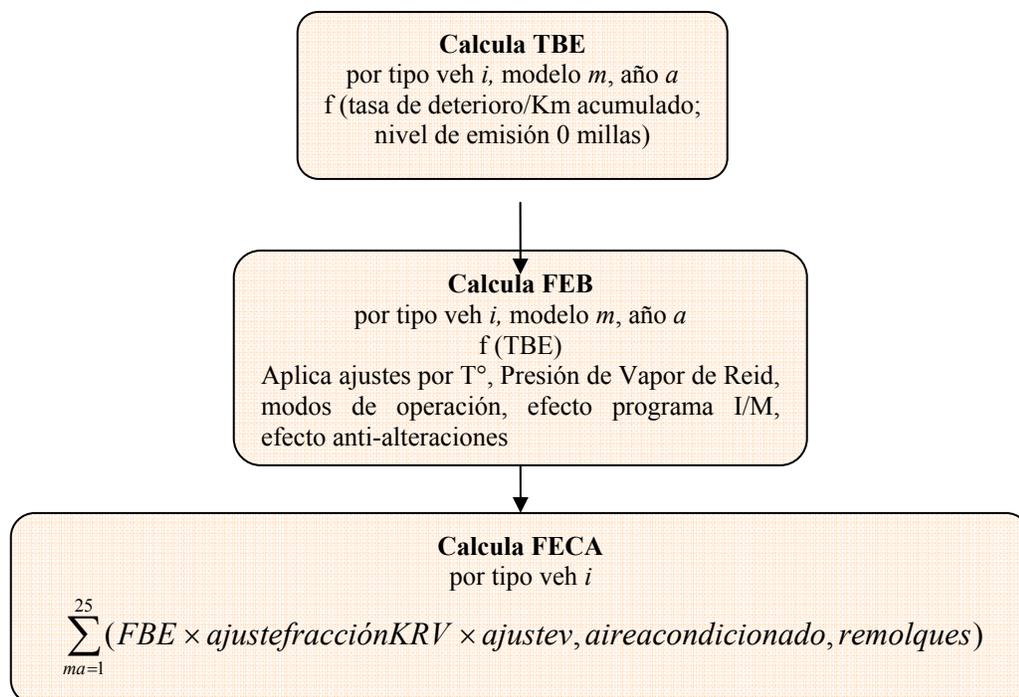
$$FECA = \sum_{ma=1}^{25} (FR \times Fa \times TBE) \quad \text{Ecuación 7}$$

donde:

$FECA =$	factor de emisión compuesto del parque vehicular
$ma =$	modelo y año
$FR =$	fracción del recorrido (fracción de los KRV totales con los que contribuye cada modelo y año)
$Fa =$	factor de ajuste para los efectos de la velocidad, uso del aire acondicionado, carga extra y remolque de trailers
$TBE =$	factor de emisión básico por modelo y año

El factor de ajuste adicional ( $Fa$ ) toma en cuenta los efectos de las características específicas del área de estudio con respecto a velocidad del tráfico, uso del aire acondicionado, carga extra y remolque de trailers. Después de este ajuste, cada factor de emisión ajustado es ponderado por la fracción del recorrido (en KRV) para ese modelo y año. Finalmente, los factores de emisión ponderados para cada uno de los 25 años de antigüedad se suman para generar un factor de emisión

compuesto, que es el factor de emisión promedio para un tipo de vehículo específico. El proceso de cálculo se ilustra en la Figura 3



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3 Diagrama de Flujo de Cálculo de Factores de Emisión**

### b) Características regionales que afectan los factores de emisión

Como se indicó antes, los factores de ajuste son utilizados en los modelos de factores de emisión para corregir las condiciones de operación particulares, que son el resultado de diversas características específicas de la región o del parque vehicular. Algunas de las características regionales que pueden afectar las emisiones de los vehículos automotores son:

- Características físicas: temperatura o altitud.
- Características del combustible.
- Programas de verificación: programas I/M y anti-alteración PAA.
- Temperatura: las emisiones de vehículos automotores (GOT, CO y NO<sub>x</sub>) tienen una gran dependencia de la temperatura del aire circundante. La temperatura de operación estándar utilizada en la determinación de las tasas básicas de emisión del *MOBILE* es de 24°C (75°F). En los datos de entrada del modelo *MOBILE*, estos factores de ajuste están determinados por la bandera de temperatura (TEMFLG) en la sección de control, por el registro de la temperatura diaria mínima y máxima en el parámetro de área local (PAL), y por la temperatura ambiente en el registro descriptivo del escenario.

Dependiendo del valor elegido para TEMFLG, los factores de ajuste para las emisiones de escape, emisiones evaporativas del motor recién apagado y las emisiones en reposo y en operación serán calculadas utilizando la temperatura mínima y máxima diaria, o la temperatura ambiente.

- **Altitud:** es otra característica física que tiene un efecto significativo sobre las emisiones de los vehículos automotores de la región. A medida en que la altitud se incrementa, la densidad del aire ambiente disminuye. El resultado de esta disminución en la densidad del aire es que los vehículos afinados para funcionar en una relación aire-combustible estequiométrica, tienden a funcionar en una relación más rica en combustible. Esta desviación de la estequiometría resultará en mayores emisiones de contaminantes. Por otro lado, la altitud también puede afectar la eficiencia mecánica de los vehículos que, a su vez, pueden modificar la cantidad de las emisiones.

En lugar de usar un factor de ajuste para tomar en cuenta las diferencias de altitud, el modelo *MOBILE* utiliza un conjunto de TBE para áreas de baja altitud (representando las condiciones aproximadamente a 150 metros sobre el nivel medio del mar), y otro conjunto de TBE para áreas de altitud elevada (representando las condiciones aproximadamente a 1,700 metros sobre el nivel medio del mar). Los factores de emisión promedio del parque vehicular para GOT y CO en altitudes elevadas son entre 15 y 20% mayores que en altitudes bajas, mientras que los de NO<sub>x</sub> disminuyen ligeramente.

- **Características del Combustible (PVR):** dado que las emisiones de los vehículos automotores son el resultado final de la combustión de la gasolina y el diesel, las características del combustible pueden afectar de manera significativa la cantidad de contaminantes emitidos. La volatilidad del combustible, en particular, afecta directamente la cantidad de las emisiones de un vehículo automotor. Para el modelo *MOBILE*, la volatilidad del combustible se expresa como presión de vapor de Reid<sup>16</sup> (ó PVR). La PVR estándar para gasolina utilizada en la determinación de las tasas básicas de emisión para el modelo *MOBILE* es 9.0 libras por pulgada cuadrada (psi); el uso de cualquier otra PVR para gasolina requiere la aplicación de factores de ajuste. Las especificaciones del combustible actual requieren una PVR de combustible de 6.5 a 8.5 en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, y de 6.5 a 9.5 en el resto del país.

Debido a que el diesel tiene una volatilidad muy baja que resulta en emisiones evaporativas despreciables, el *MOBILE* no utiliza un valor PVR para este combustible.

- **Características del Combustible – Combustibles Oxigenados:** otra característica del combustible que puede afectar la cantidad de contaminantes emitidos por los vehículos automotores, es la introducción de combustibles oxigenados (ya sea mezclas de gasolina y alcohol, o de gasolina y éter), dentro de la mezcla general de combustibles. Los combustibles oxigenados son introducidos para reducir las emisiones de CO. El mayor contenido de oxígeno en los combustibles oxigenados mejora la eficiencia de la combustión, reduciendo así las emisiones de CO. El ajuste para los combustibles oxigenados es controlado en el registro PAL por la bandera de combustible oxigenado (OXYFLG), y por un registro descriptivo de los combustibles oxigenados que sigue inmediatamente al registro PAL. Este registro incluye la participación de mercado y el contenido de oxígeno en las mezclas de combustible con alcohol y éter.

---

<sup>16</sup> Presión de vapor de Reid: Aunque esta no sea una medida exacta de la volatilidad, mide la tendencia que presenta el combustible a pasar a fase vapor. Para determinarla se mide la presión de vapor formado en el calentamiento de una muestra de un combustible líquido a 37.8°C. Fuente: <http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/liquidos>

- Programas de Inspección y Mantenimiento (I/M): con el objetivo de reducir las emisiones de los vehículos automotores, con frecuencia se instrumentan programas de verificación regionales, de los cuales el más común es el programa de inspección y mantenimiento (I/M). A medida en que el kilometraje (millaje) de un vehículo aumenta, las emisiones evaporativas y del escape también aumentan, debido a la degradación continua del sistema de control de emisiones del vehículo. El propósito de los programas I/M es minimizar este exceso de emisiones aplicando pruebas en intervalos de tiempo regulares.

Los datos TBE no incluyen los efectos de los programas I/M, por lo tanto, los factores de ajuste, basados en los parámetros de entrada relacionados con los I/M, se usan para ajustar los datos TBE.

Debido a que los requerimientos específicos de los programas I/M pueden ser distintos de una región a otra, existen muchas variaciones posibles. La bandera I/M (IMFLAG), ubicada en la sección de control, permite la modelación de los efectos de cero, uno o dos programas I/M.

- a) Programas Anti-Alteraciones: otro tipo de estrategia regulatoria que puede ser instrumentada es el programa antialteraciones (PAA). La alteración se refiere a la alimentación del vehículo con el combustible inapropiado, la eliminación o desconexión de los convertidores catalíticos, o la reducción, por algún otro medio, de la eficiencia del sistema de control de emisiones del vehículo. Las razones para la alteración son diversas, pero su efecto general es la anulación de algunas de las reducciones en las emisiones logradas a través de los programas I/M u otros avances tecnológicos. La alteración puede ser intencional o no. Como su nombre lo sugiere, los PAA son instrumentados para compensar los efectos de la alteración, y consisten en inspecciones a los diversos componentes del vehículo que son utilizados para el control de emisiones, entre los que se incluyen: los convertidores catalíticos, el limitador de entrada de combustible, y el tapón de gasolina, entre otros. Para facilitar su administración, las inspecciones PAA normalmente se realizan de manera simultánea con las pruebas I/M periódicas.

Actualmente, el modelo MOBILE incorpora los niveles de alteración generales por omisión para los vehículos estadounidenses.

- b) Características del parque vehicular: para utilizar un modelo de factor de emisión, es necesario estimar las características del recorrido de cada tipo de vehículo, entre las que destacan:
  - Velocidad del vehículo: debe determinarse la velocidad promedio del vehículo por clase vehicular (y de preferencia por tipo de vía), debido a que este parámetro afecta los factores de emisión.
  - Distribuciones KRV por clase vehicular (o combinaciones): los datos KRV generales deben ser segregados por clase vehicular para asignar los factores de emisión adecuados.
  - Tasas de acumulación de kilometraje (millaje) y distribución del registro (fracción del total de vehículos registrados para cada modelo y año) en una clase vehicular: Estas tasas se utilizan para determinar la fracción del recorrido de cada modelo y año dentro de una clase vehicular.

- Velocidad del vehículo:

La estimación de la velocidad promedio del vehículo es un elemento importante para determinar los factores de emisión apropiados para los inventarios de emisiones de vehículos

automotores que circulan por carreteras. En el modelo *MOBILE*, los factores de emisión representan el recorrido a una velocidad promedio. Los factores de emisión son desarrollados a partir de ciclos de prueba en los que la velocidad del vehículo no es constante, sino que varía alrededor de un promedio. En consecuencia, la meta al desarrollar estimaciones de la velocidad consiste en determinar velocidades promedio del vehículo, en lugar de velocidades instantáneas.

– Combinaciones de KRV

La combinación de KRV describe la distribución de los KRV del parque vehicular total para cada clase vehicular. Cuando se estiman las emisiones de los vehículos automotores, primero deben determinarse los KRV totales en una región o en una vía individual. Posteriormente, la combinación es utilizada para disgregar los KRV totales en diferentes clases vehiculares para ayudar en el cálculo de las emisiones. La combinación KRV puede ser estimada si se conocen las poblaciones vehiculares y las tasas de acumulación de kilometraje (millaje) para cada clase vehicular. Ambos parámetros son necesarios debido a que las diferentes clases vehiculares tienden a ser manejadas a diferentes tasas. Por ejemplo, los camiones comerciales pesados generalmente tienen tasas de acumulación de kilometraje (millaje) superiores a los vehículos de pasajeros.

– Distribuciones del registro

Las distribuciones del registro permiten conocer la fracción de vehículos de un modelo y año particular con relación a la población general de clases vehiculares. Existe cierto grado de incertidumbre debido a que la población vehicular está compuesta tanto por vehículos registrados como por no registrados, mientras que cualquier distribución del registro, por definición, sólo incluirá a los vehículos registrados. La distribución del registro y las tasas de acumulación de kilometraje (millaje) son utilizadas en conjunto para calcular la fracción del recorrido en el modelo *MOBILE*. Esta fracción del recorrido es la porción de KRV acumulados por un modelo y año de vehículos en una clase vehicular, con respecto a los KRV totales para la clase vehicular completa. Este cálculo se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$FR_i = \frac{Frt_i \times TAM_i}{\sum_{i=1}^{25} (Frt_i \times TAM_i)} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde:

$FR_i$  = Fracción recorrida para el modelo y año  $i$ , dentro de una clase vehicular  
 $Frt_i$  = Fracción de los registros totales de la clase vehicular para el modelo y año,  $i$   
 $TAM_i$  = Tasa de acumulación de kilometraje (millaje) para los vehículos en el modelo y año,  $i$

– Tasas de acumulación de kilometraje (millaje)

La tasa de acumulación de kilometraje (millaje) es la cantidad anual de KRV acumulados por los vehículos de un modelo, año y una clase vehicular. Este parámetro es uno de los más difíciles de determinar, dado que no puede ser estimado a partir de las observaciones del tráfico.